



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

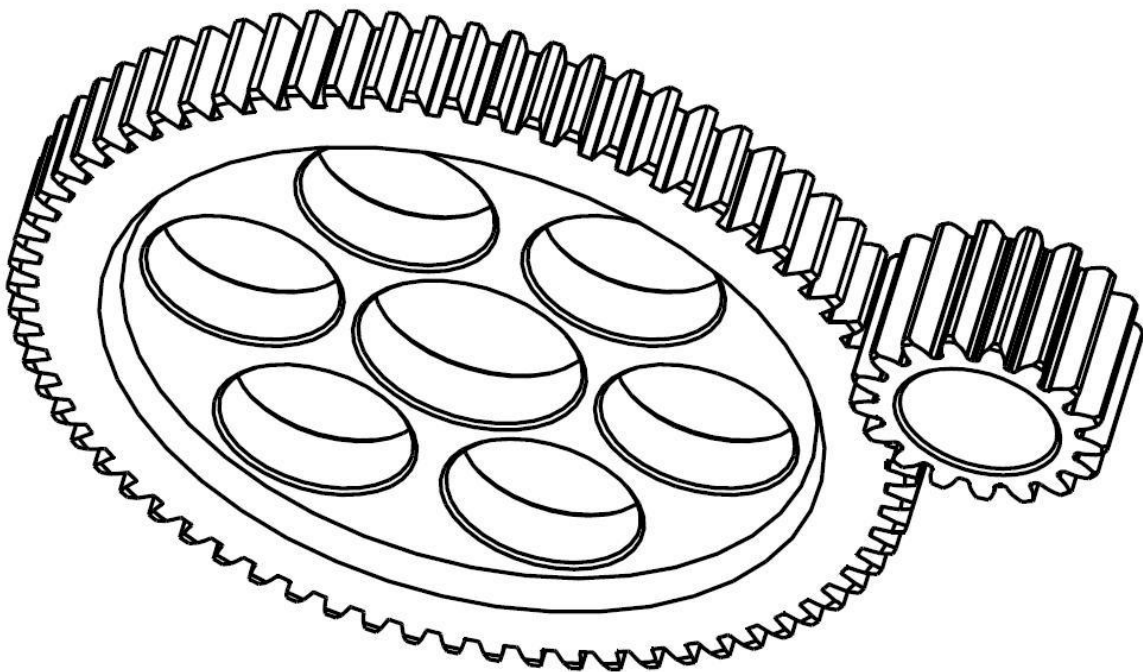
Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

**Μελέτη, σχεδιασμός και ανάπτυξη
προϊόντος με έμφαση στην επιλογή υλικού
και στις τεχνολογίες παραγωγής,
περίπτωση οδοντωτού τροχού**

Καρκάνης Μανούσος

Αρ. Μητρώου 707



Ξάνθη, Νοέμβριος 2012



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

**Μελέτη, σχεδιασμός και ανάπτυξη
προϊόντος με έμφαση στην επιλογή υλικού
και στις τεχνολογίες παραγωγής,
περίπτωση οδοντωτού τροχού**

Καρκάνης Μανούσος

Αρ. Μητρώου 707

Copyright © Μανούσος Καρκάνης, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Πρόλογος

Η διαδικασία επιλογής υλικών είναι ίσως το κρισιμότερο βήμα που πρέπει να κάνει ο μηχανικός πριν προχωρήσει στην υλοποίηση μίας κατασκευής, η οποία πρέπει να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες με ένα συγκεκριμένο τρόπο και να επιδεικνύει την κατάλληλη αντοχή. Για κάθε κατασκευή, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη πρέπει να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες, προκειμένου να είναι αξιόπιστη και λειτουργική. Η λανθασμένη επιλογή υλικού μπορεί να αποβεί μοιραία και να οδηγήσει ακόμη και στην απώλεια ανθρωπίνων ζωών. Π.χ. η εξέλιξη των υλικών που χρησιμοποιεί η αυτοκινητοβιομηχανία και αεροναυπηγική είναι ραγδαία, προκειμένου να αποφευχθούν πρόωρες αστοχίες και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους (σύνθετα υλικά στο αμάξωμα, αντιδιαβρωτικές επικαλύψεις, επιφανειακή σκλήρυνση μετάλλων που καταπονούνται επιφανειακά, βελτίωση ελαστικών).

Κατά την διαδικασία κατασκευής ενός προϊόντος, εφόσον βρεθεί το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί, πρέπει να βρεθεί και η κατάλληλη μέθοδος με την οποία θα κατεργαστεί το υλικό για να πάρει την τελική του μορφή. Η μέθοδος κατασκευής, ή αλλιώς κατεργασίας, που θα επιλεγεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες τεχνικούς αλλά και οικονομικούς. Όσο αναφορά τους τεχνικούς παράγοντες, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι κατάλληλη για την σωστή επεξεργασία του συγκεκριμένου υλικού και την κατασκευή του τελικού προϊόντος ή προϊόντων σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί για την ποιότητα. Πολύ σημαντικός παράγοντας στην επιλογή της κατάλληλης κατεργασίας αποτελεί και η όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής του προϊόντος, το οποίο αποτελείται από το κόστος του υλικού αλλά και το κόστος της κατεργασίας του.

Η έρευνα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών και του κόστους κατεργασίας τους είναι συνεχής, προκειμένου να κατασκευαστούν εξαρτήματα και στοιχεία μηχανών με μεγαλύτερη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής, αλλά και όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος παραγωγής. Λόγω του ευρέως φάσματος υλικών και αντιστοίχων παραμέτρων υλικών και δευτερογενών κατεργασιών, είναι διαδεδομένη

πλέον η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στη διαδικασία σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων γύρω από την επιλογή υλικών και κατάλληλων κατεργασιών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης της Πολυτεχνικής Σχολής Ξάνθης, έχει σαν αντικείμενο την μελέτη, τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντος, με έμφαση στην επιλογή υλικού και στις τεχνολογίες παραγωγής. Το προϊόν που μελετάται είναι ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών από μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Η εργασία μπορεί να λειτουργήσει σαν ένα ολοκληρωμένο οδηγό ανάπτυξης ενός μηχανολογικού εξαρτήματος, με στόχο την βελτίωση ενός ήδη υπάρχοντος από τεχνική αλλά και οικονομική σκοπιά, προσπαθώντας να δώσει λύσεις σε πιθανούς προβληματισμούς που θα συναντήσει ένας μηχανικός κατά την διαδικασία αυτή.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στους οδοντωτούς τροχούς με μια περιγραφή των διαφόρων τύπων τους και μια ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου που απαιτείται για την μετέπειτα κατανόηση της εργασίας. Τέλος, αναλύεται η συγκεκριμένη εφαρμογή του ζεύγους οδοντωτών τροχών που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αρχικά περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και διαστάσεων των δύο οδοντωτών τροχών, ώστε να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον σχεδιασμό τους μέσω H/Y. Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία τρισδιάστατης απεικόνισης των τροχών μέσω του σχεδιαστικού λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Κατόπιν, γίνεται μια γενική περιγραφή των ανοχών διαστάσεων και της εύρεσης των ανοχών για τις διαστάσεις των οδοντωτών τροχών, που στην συνέχεια θα εισαχθούν στα μηχανολογικά σχέδια. Επίσης, γίνεται αναφορά στην τραχύτητα επιφάνειας και στην διαδικασία μέτρησης της τραχύτητας των επιφανειών των οδόντων των τροχών, που επίσης απαιτείται στα σχέδια τους. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας των τελικών μηχανολογικών σχεδίων των τροχών από τις τρισδιάστατες απεικονίσεις τους, με την χρήση του ίδιου λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται διερεύνηση των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι οδοντωτοί τροχοί και κατόπιν επιλογή νέων υλικών από τα οποία θα κατασκευαστούν εκ νέου. Η διερεύνηση και η επιλογή νέων υλικών γίνεται μέσω του λογισμικού *CES Edupack 2008*, αφού αρχικά όμως αναλυθούν κάποια δεδομένα, συνθήκες και περιορισμοί που θα εισαχθούν στο λογισμικό. Κατόπιν βρίσκονται τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι τροχοί και επαληθεύεται η αντοχή τους μέσω ελέγχου αντοχής των οδόντων τους σε επιφανειακή πίεση με τα συγκεκριμένα υλικά. Στην συνέχεια, επιλέγονται νέα υλικά για τους οδοντωτούς τροχούς και γίνεται εκ νέου έλεγχος αντοχής των οδόντων σε επιφανειακή πίεση με

τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν. Τέλος, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των αρχικών και των νέων υλικών των οδοντωτών τροχών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται οι συνήθεις μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών και κατόπιν περιγράφεται η κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών. Στην συνέχεια, αναλύεται το κόστος κατασκευής τους με τα αρχικά και τα νέα υλικά, με δύο διαφορετικές μεθόδους κατασκευής, καθώς και για δύο διαφορετικές ετήσιες παραγόμενες ποσότητες, με ένα συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης του κόστους κατασκευής ενός εξαρτήματος. Τέλος, υπολογίζεται το πραγματικό κόστος κατασκευής των νέων τροχών και γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των κοστών που προκύπτουν με το μοντέλο, ώστε να προσδιοριστεί η πιο συμφέρουσα κατασκευή, καθώς και μεταξύ του πραγματικού κόστους και του εκτιμώμενου, για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με παράθεση των γενικών συμπερασμάτων που προκύπτουν, καθώς και με προτάσεις για περεταίρω έρευνα και εξέλιξη της εργασίας.

Μανούσος Καρκάνης

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφεραν στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής:

Τον κύριο Παντελή Ν. Μπότσαρη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ, στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την άψογη συνεργασία μας, το αμείωτο ενδιαφέρον και τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε.

Τον κύριο Γεώργιο Γαλερίδη, Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την καταλυτική βοήθεια που μου προσέφερε και για την αμέριστη συμπαράσταση του καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου, οι οποίοι, έμμεσα ή άμεσα, συνέβαλαν ώστε να πραγματοποιηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Ευχαριστίες.....	iv
Πίνακας περιεχομένων.....	v
Πίνακας σχημάτων.....	xi
Κατάλογος πινάκων.....	xviii
Περίληψη.....	xix
Abstract.....	xx

Κεφάλαιο 1

<i>Οδοντωτοί τροχοί, μελέτη περίπτωσης.....</i>	<i>1</i>
Περιεχόμενα.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Οδοντωτοί τροχοί.....	2
1.2.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί.....	3
1.2.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί.....	3
1.2.3 Οδοντωτός κανόνας.....	4
1.2.4 Σύστημα ατέρμονα – κορώνας.....	5
1.2.5 Επικυκλική οδόντωση.....	5
1.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη και διαστάσεις οδοντωτών τροχών.....	6
1.4 Οδοντώσεις εξειλιγμένης.....	15
1.4.1 Είδη οδοντώσεων.....	15
1.4.2 Οδοντώσεις εξειλιγμένης.....	15
1.5 Κατασκευή της μορφής του οδόντα – συνθήκες κύλισης.....	16
1.6 Υποκοπές οδοντωτών τροχών.....	18

1.6.1 Οριακός αριθμός οδόντων.....	18
1.6.2 Μετατόπιση.....	20
1.6.3 Διαστάσεις τροχών και με μετατόπιση.....	23
1.7 Μελέτη περίπτωσης.....	24
1.8 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	27
1.9 Βιβλιογραφία.....	28

Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός οδοντωτών τροχών..... 29

Περιεχόμενα.....	29
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Μετρήσεις και υπολογισμοί γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οδοντωτών τροχών.....	31
2.2.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν).....	31
2.2.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	36
2.2.3 Απόσταση αξόνων.....	43
2.3 Σχεδιασμός των οδοντωτών τροχών μέσω του λογισμικού <i>Pro/ENGINEER Wildfire 4</i>	44
2.3.1 Εισαγωγή.....	44
2.3.1.1 Η οδόντωση εξειλιγμένης καμπύλης.....	45
2.3.1.2 Σχεδιασμός καμπύλης από εξίσωση.....	46
2.3.1.3 Σχεδίαση του οδοντωτού τροχού.....	47
2.3.2 Κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν).....	48
2.3.2.1 Δημιουργία της εξειλιγμένης καμπύλης μέσω εξισώσεων.....	48
2.3.2.2 Δημιουργία του κυλίνδρου.....	50
2.3.2.3 Σχεδιασμός των τριών κύριων κύκλων (αρχικός, βασικός, πόδα).....	52
2.3.2.4 Δημιουργία σημείου αναφοράς.....	53
2.3.2.5 Δημιουργία ενός νέου σημείου αναφοράς και μίας καμπύλης.....	54
2.3.2.6 Δημιουργία χαρακτηριστικού αποτίμησης (evaluate).....	55
2.3.2.7 Αντιγραφή της εξειλιγμένης καμπύλης.....	56
2.3.2.8 Προσθήκη μιας σχέσης και ανανέωση (regenerate) του αντικειμένου..	57
2.3.2.9 Ανάποδη αντιγραφή (mirror) του αντιγράφου της εξειλιγμένης καμπύλης.....	58
2.3.2.10 Δημιουργία κι άλλου αντιγράφου της εξειλιγμένης καμπύλης.....	59
2.3.2.11 Δημιουργία του διάκενου ανάμεσα στους οδόντες.....	60

2.3.2.12 Δημιουργία των οδόντων με αντιγραφή του διάκενου περιμετρικά (Pattern).....	64
2.3.2.13 Δημιουργία του fillet των οδόντων.....	65
2.3.2.14 Δημιουργία της οπής.....	67
2.3.2.15 Δημιουργία των Chamfer του οδόντα και της οπής.....	69
2.3.3 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	72
2.3.3.1 Δημιουργία των περιμετρικών οπών.....	73
2.3.3.2 Δημιουργία εσοχών και Chamfer του οδόντα.....	75
2.3.3.3 Δημιουργία των Chamfer στις οπές.....	77
2.3.4 Ζεύγος οδοντωτών τροχών σε συνεργασία.....	78
2.3.4.1 Εισαγωγή του κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	78
2.3.4.2 Εισαγωγή και τοποθέτηση του κινούμενου οδοντωτού τροχού.....	79
2.3.5 Ανοχές.....	81
2.3.5.1 Παραδοχές.....	82
2.3.5.2 Σύστημα ανοχών ISO.....	82
2.3.6 Τραχύτητα επιφάνειας.....	83
2.3.6.1 Τοπογραφία επιφανειών.....	84
2.3.6.2 Αποκλίσεις μηχανολογικών επιφανειών από την επιπεδότητα.....	85
2.3.6.3 Τραχύτητα επιφανειών.....	86
2.3.6.4 Μέτρηση γεωμετρικών αποκλίσεων επιφανειών σε δυο διαστάσεις... ..	87
2.3.6.4.1 Ηλεκτρομηχανικά Τραχύμετρα.....	88
2.3.6.5 Μέτρα τραχύτητας.....	89
2.3.6.5.1 Μέση γραμμή.....	89
2.3.6.5.2 Μέση αριθμητική τραχύτητα Ra.....	90
2.3.6.5.3 Μέγιστο βάθος ή μέγιστη τραχύτητα Rt.....	90
2.3.6.5.4 Καμπύλη Φέρουσας Επιφάνειας.....	91
2.3.6.6 Μέτρηση της μέσης τραχύτητας (Ra) των οδόντων των τροχών.....	91
2.3.7 Τελικά μηχανολογικά σχέδια.....	93
2.3.7.1 Μηχανολογικό σχέδιο κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	93
2.3.7.2 Εκτυπωμένα τελικά μηχανολογικά σχέδια.....	96
2.4 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	97
2.5 Βιβλιογραφία.....	98

Κεφάλαιο 3

Εύρεση των υλικών των οδοντωτών τροχών και επιλογή νέων.....	99
---	-----------

Περιεχόμενα.....	99
3.1 Εισαγωγή.....	101
3.2 Ανάλυση των δεδομένων, των συνθηκών και των περιορισμών για την εύρεση των υλικών και την επιλογή νέων.....	102
3.2.1 Αντοχή σε κάμψη (<i>Yield strength</i>).....	102
3.2.1.1 Τάσεις στους οδόντες.....	103
3.2.1.2 Υπολογισμός καμπτικής τάσης στους οδόντες.....	105
3.2.1.3 Αντοχή υλικών οδοντωτών τροχών σε κάμψη (<i>Yield strength</i>).....	110
3.2.2 Πυκνότητα (<i>Density</i>).....	111
3.2.3 Σκληρότητα (<i>Hardness</i>).....	112
3.2.3.1 Μέθοδοι σκληρομέτρησης.....	112
3.2.3.2 Στατικές μέθοδοι.....	113
3.2.3.3 Δυναμικές μέθοδοι ή μέθοδος EQUOTIP.....	113
3.2.3.4 Μέτρηση σκληρότητας των οδοντωτών τροχών.....	115
3.2.4 Συντελεστής ελαστικότητας – αντοχή σε κάμψη (<i>Young 's modulus – Yield strength</i>).....	118
3.2.5 Αντοχή κόπωσης στους 10^7 κύκλους (<i>Fatigue strength at 10^7 cycles</i>).....	119
3.2.6 Συντελεστής θερμικής διαστολής (<i>Thermal expansion coefficient</i>).....	120
3.2.7 Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (<i>Maximum service temperature</i>).....	121
3.2.8 Θερμικός αγωγός ή μονωτής (<i>Thermal conductor or insulator</i>).....	122
3.2.9 Τιμή (<i>Price</i>).....	123
3.3 Εφαρμογή του λογισμικού <i>CES Edupack 2008</i> για την εύρεση των υλικών των οδοντωτών τροχών.....	123
3.3.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός.....	124
3.3.1.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών....	124
3.3.1.2 Τελική επιλογή του υλικού.....	128
3.3.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	129
3.3.2.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών....	129
3.3.2.2 Τελική επιλογή του υλικού.....	130
3.4 Έλεγχος αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση.....	130
3.5 Εφαρμογή του λογισμικού <i>CES Edupack 2008</i> για την επιλογή νέων υλικών των οδοντωτών τροχών.....	136
3.5.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών.....	136
3.5.2 Εισαγωγή κριτηρίων και τελική επιλογή των υλικών.....	137
3.5.3 Επιλογή συγκεκριμένων χαλύβων για τους οδοντωτούς τροχούς.....	145
3.6 Έλεγχος αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση με τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν.....	146
3.7 Σύγκριση μεταξύ αρχικών και νέων υλικών των οδοντωτών τροχών.....	147

3.7.1 Χυτοσίδηροι.....	147
3.7.1.1 Φαιός ή γκρίζος χυτοσίδηρος.....	148
3.7.1.2 Όλκιμος χυτοσίδηρος ή χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη.....	149
3.7.2 Χάλυβες.....	150
3.7.2.1 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες.....	151
3.8 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	152
3.9 Βιβλιογραφία.....	154

Κεφάλαιο 4

Κατασκευή οδοντωτών τροχών και ανάλυση κόστους..... 155

Περιεχόμενα.....	155
4.1 Εισαγωγή.....	157
4.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών.....	157
4.2.1 Μέθοδοι κοπής οδοντωτών τροχών.....	158
4.2.1.1 Κοπή σε φρέζα με χρήση εργαλείου μορφής (Gear milling).....	158
4.2.1.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (Rack generation).....	158
4.2.1.3 Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (Gear shaper).....	159
4.2.1.4 Κοπή με εργαλείο τύπου Hob (Hobbing).....	160
4.2.1.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching).....	161
4.2.1.6 Χύτευση τροχών υπό πίεση (Die casting).....	161
4.2.1.7 Έλαση – διέλαση οδοντωτών τροχών (Extruding).....	162
4.2.1.8 Κονεομεταλλουργία (Sintering).....	163
4.2.1.9 Εκβολή πλαστικού (Injection molding).....	163
4.2.2 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών.....	164
4.2.2.1 Λείανση (Grinding - Honing).....	164
4.2.2.2 Lapping.....	165
4.2.2.3 Απόξεση (Shaving).....	166
4.3 Περιγραφή της κατασκευής των νέων οδοντωτών τροχών με γραναζοκόπτη τύπου <i>Hob</i>	166
4.4 Ανάλυση κόστους κατασκευής των οδοντωτών τροχών.....	171
4.4.1 Μεθοδολογία εκτίμησης κόστους κατασκευής.....	172
4.4.1.1 Ανάπτυξη του μοντέλου.....	173
4.4.1.2 Βασικό κόστος κατεργασίας (P_c).....	174
4.4.1.3 Συντελεστής σχετικού κόστους (R_c).....	177
4.4.1.3.1 Καταλληλότητα του υλικού για την κατεργασία (C_{mp}).....	179

4.4.1.3.2 Πολυπλοκότητα σχήματος (Cc).....	179
4.4.1.3.3 Συντελεστής τομής (Cs).....	182
4.4.1.3.4 Συντελεστές ανοχής (Ct) και φινιρίσματος επιφάνειας (Cf).....	183
4.4.1.4 Κόστος υλικού (Mc).....	186
4.4.2 Πραγματικό κόστος κατασκευής.....	187
4.4.2.1 Κόστος κατεργασίας.....	188
4.4.2.1.1 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εργαλειομηχανών.....	188
4.4.2.1.2 Μισθός εργατών.....	189
4.4.2.2 Κόστος υλικού.....	189
4.4.3 Τελικοί συγκριτικοί πίνακες.....	190
4.4.3.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός.....	191
4.4.3.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	192
4.5 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	193
4.6 Βιβλιογραφία.....	195

Συμπεράσματα και προτάσεις.....	197
--	------------

Συμπεράσματα.....	197
Προτάσεις.....	199

Παράρτημα Ι.....	201
-------------------------	------------

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1	Διάφορα είδη μετωπικών οδοντωτών τροχών.....	3
Σχήμα 1.2	Διάφορα είδη κωνικών οδοντωτών τροχών.....	4
Σχήμα 1.3	Οδοντωτός κανόνας.....	4
Σχήμα 1.4	Συστήματα ατέρμονα – κορώνας.....	5
Σχήμα 1.5	Επικυκλική οδόντωση.....	6
Σχήμα 1.6	Βασικά μεγέθη οδοντωτών τροχών με ευθείς οδόντες.....	6
Σχήμα 1.7	Σχέση μετάδοσης σε έναν μονοβάθμιο μειωτήρα.....	7
Σχήμα 1.8	Σχέση μετάδοσης σε έναν πολυβάθμιο μειωτήρα.....	8
Σχήμα 1.9	Βασικός νόμος της οδόντωσης.....	11
Σχήμα 1.10	Ζεύγος οδοντωτών τροχών με εξωτερική οδόντωση εξελιγμένης.....	12
Σχήμα 1.11	Εξωτερική οδόντωση.....	12
Σχήμα 1.12	Κατασκευή της εξελιγμένης καμπύλης.....	16
Σχήμα 1.13	«Προφίλ αναφοράς» (οδοντωτός κανόνας) κατά DIN 867.....	17
Σχήμα 1.14	Οδοντωτός κανόνας και οδοντωτός τροχός σε συνεργασία.....	18
Σχήμα 1.15	Δημιουργία υποκοπής.....	19
Σχήμα 1.16	Μορφή του οδόντα εξαρτώμενη από την μετατόπιση: α. για τροχό με μηδενική μετατόπιση β. για θετική μετατόπιση γ. για αρνητική μετατόπιση. Ζεύγος οδοντωτών τροχών σε θέση: δ. μηδενικής μετατόπισης και ε. θετικής μετατόπισης.....	21
Σχήμα 1.17	Ζεύγος οδοντωτών τροχών με $z_1 = 12$, $z_2 = 25$ και διαφορετικές μετατοπίσεις: α. κανονική (μηδενική) οδόντωση β. V – μηδενική οδόντωση γ. V – οδόντωση.....	22
Σχήμα 1.18	Εικόνες από την διαδικασία αποσυναρμολόγησης του κινητήρα.....	25
Σχήμα 1.19	Το ζεύγος οδοντωτών τροχών προς μελέτη (μονοβάθμιος μειωτήρας).....	26
Σχήμα 1.20	Ο κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν).....	26
Σχήμα 1.21	Ο κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	27

Σχήμα 2.1	Μέτρηση του πλάτους του οδόντα.....	32
Σχήμα 2.2	Μέτρηση διαμέτρου κύκλου κεφαλής.....	32
Σχήμα 2.3	Μέτρηση της διαμέτρου της κεντρικής οπής.....	34
Σχήμα 2.4	Μέτρηση της ακτίνας fillet του οδόντα.....	34
Σχήμα 2.5	Μέτρηση των chamfer.....	35
Σχήμα 2.6	Μέτρηση του πλάτους του οδόντα.....	36
Σχήμα 2.7	Μέτρηση διαμέτρου κύκλου κεφαλής.....	37
Σχήμα 2.8	Μέτρηση της διαμέτρου της κεντρικής οπής και των περιμετρικών οπών.....	38
Σχήμα 2.9	Μέτρηση της απόστασης της περιμέτρου της κεντρικής οπής από την περίμετρο των άλλων οπών.....	39
Σχήμα 2.10	Μέτρηση της ακτίνας fillet του οδόντα.....	39
Σχήμα 2.11	Μέτρηση των chamfer.....	40
Σχήμα 2.12	Μέτρηση του βάθους της μεγάλης εσοχής.....	40
Σχήμα 2.13	Μέτρηση των αποστάσεων της περιμέτρου της κεντρικής οπής από τις περιμέτρους των δύο κύκλων της εσοχής.....	41
Σχήμα 2.14	Μέτρηση της διαμέτρου της ημικύκλιας εσοχής.....	41
Σχήμα 2.15	Μέτρηση της απόστασης των περιμέτρων των περιμετρικών οπών από την ημικύκλια εσοχή.....	42
Σχήμα 2.16	Μέτρηση της μέγιστης απόστασης των κύκλων κεφαλής των τροχών.....	44
Σχήμα 2.17	Η εξειλιγμένη καμπύλη.....	45
Σχήμα 2.18	Προσδιορισμός της εξειλιγμένης καμπύλης.....	46
Σχήμα 2.19	Καμπύλη που σχεδιάστηκε μέσω εξισώσεων.....	47
Σχήμα 2.20	Βήματα σχεδίασης οδοντωτού τροχού.....	48
Σχήμα 2.21	Παράθυρο διαλόγου New.....	49
Σχήμα 2.22	Εισαγωγή εξισώσεων στο Notepad.....	50
Σχήμα 2.23	Η εξειλιγμένη καμπύλη που προέκυψε από τις εξισώσεις.....	50
Σχήμα 2.24	Ο κύκλος κεφαλής που προκύπτει.....	51
Σχήμα 2.25	Ο κύλινδρος που προκύπτει.....	52
Σχήμα 2.26	Οι τρεις κύριοι κύκλοι που σχεδιάστηκαν.....	53
Σχήμα 2.27	Το σημείο αναφοράς που προκύπτει.....	54
Σχήμα 2.28	Το νέο σημείο αναφοράς και η καμπύλη που προκύπτει.....	55
Σχήμα 2.29	Το χαρακτηριστικό MEASURE που προκύπτει στο δένδροδιάγραμμα του μοντέλου.....	56
Σχήμα 2.30	Το αντίγραφο της καμπύλης που προκύπτει.....	57
Σχήμα 2.31	Η νέα θέση της καμπύλης που προκύπτει μετά την δημιουργία της σχέσης.....	58

Σχήμα 2.32	Το ανάποδο αντίγραφο της εξειλιγμένης καμπύλης που προκύπτει...	59
Σχήμα 2.33	Το νέο αντίγραφο της εξειλιγμένης καμπύλης που προκύπτει.....	60
Σχήμα 2.34	Οι τέσσερις καμπύλες που επιλέγονται.....	61
Σχήμα 2.35	Τα ευθύγραμμα τμήματα που προκύπτουν.....	62
Σχήμα 2.36	Διαγραφή των περιττών τμημάτων των καμπυλών.....	62
Σχήμα 2.37	Το περίγραμμα του διακένου που προκύπτει.....	63
Σχήμα 2.38	Το διάκενο που προκύπτει.....	64
Σχήμα 2.39	Οι οδόντες που προκύπτουν.....	65
Σχήμα 2.40	Το αποτέλεσμα που προκύπτει μετά τις επιλογές των επιφανειών....	66
Σχήμα 2.41	Το fillet που προκύπτει στο ένα διάκενο.....	66
Σχήμα 2.42	Το fillet στους οδόντες που προκύπτει.....	67
Σχήμα 2.43	Ο κύκλος που προκύπτει.....	68
Σχήμα 2.44	Η οπή που προκύπτει.....	69
Σχήμα 2.45	Οι άκρες που επιλέγονται.....	70
Σχήμα 2.46	Τα chamfer που προκύπτουν.....	70
Σχήμα 2.47	Η άλλη άκρη της οπής που επιλέγεται.....	71
Σχήμα 2.48	Ο τελικός κινητήριος οδοντωτός τροχός.....	72
Σχήμα 2.49	Ο κινούμενος τροχός που προκύπτει μετά το βήμα 14.....	72
Σχήμα 2.50	Το ευθύγραμμο τμήμα και ο κύκλος που προκύπτουν.....	73
Σχήμα 2.51	Η οπή που προκύπτει.....	74
Σχήμα 2.52	Οι περιμετρικές οπές που προκύπτουν.....	75
Σχήμα 2.53	Οι αναφορές σχεδίασης που επιλέγονται.....	75
Σχήμα 2.54	Το σχέδιο που προκύπτει.....	76
Σχήμα 2.55	Οι εσοχές και το chamfer που προκύπτουν.....	77
Σχήμα 2.56	Οι άκρες των οπών που επιλέγονται.....	78
Σχήμα 2.57	Ο τελικός κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	78
Σχήμα 2.58	Το αποτέλεσμα που προκύπτει.....	79
Σχήμα 2.59	Το ευθύγραμμο τμήμα που προκύπτει.....	80
Σχήμα 2.60	Το ζεύγος των οδοντωτών τροχών σε συνεργασία.....	81
Σχήμα 2.61	«Ποιότητα επιφάνειας» ενός «φυσικού» στερεού σώματος.....	84
Σχήμα 2.62	Τυπική μορφή πλανισμένης επιφάνειας.....	85
Σχήμα 2.63	Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρικών αποκλίσεων μηχανολογικών επιφανειών όπου (α) μορφή πραγματικής επιφάνειας και (β) ανάλυση αποκλίσεων από την επιπεδότητα.....	86
Σχήμα 2.64	Διαδοχικές μεγεθύνσεις επιφανειών.....	87
Σχήμα 2.65	Αρχή λειτουργίας ηλεκτρομηχανικών προφίλομέτρων. Ο στυλίσκος (1) με την προσαρμοσμένη κατάλληλη αδαμάντινη ακίδα (2) ολισθαίνει παράλληλα στην επιφάνεια (3) του αντικειμένου (5).	

	Ακολουθώντας την κατατομή της επιφάνειας, ο στυλίσκος κινείται κατακόρυφα (4) και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του καταγράφονται ως η μετρούμενη (πράσινο χρώμα) κατατομή (6)....	88
Σχήμα 2.66	Τραχύμετρα (α) εργαστηριακό και (β) εργοταξιακό.....	88
Σχήμα 2.67	Κεντρική γραμμή κατατομής, CL και μέση αριθμητική τραχύτητα, Ra.....	89
Σχήμα 2.68	Υπολογισμός του μέγιστου βάθους ή μέγιστης τραχύτητας (Rt) κατατομής.....	90
Σχήμα 2.69	Καμπύλη Φέρουσας Επιφάνειας.....	91
Σχήμα 2.70	Το ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε.....	92
Σχήμα 2.71	Μέτρηση τραχύτητας της επιφάνειας των οδόντων κινητήριου τροχού.....	92
Σχήμα 2.72	Μέτρηση τραχύτητας της επιφάνειας των οδόντων κινούμενου τροχού.....	93
Σχήμα 2.73	Οι όψεις του κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	95
Σχήμα 2.74	Οι αναφορές που επιλέγονται.....	96
Σχήμα 3.1	Πάνω - δημιουργία «σκασιμάτων» (pittings) σε οδόντες, κάτω – θραύση οδόντα.....	103
Σχήμα 3.2	Δυνάμεις σε ζεύγος οδοντωτών τροχών με ευθείς οδόντες.....	104
Σχήμα 3.3	Κατανομή των τάσεων στον οδόντα όπως προκύπτει με εφαρμογή της μεθόδου της φωτοελαστικότητας.....	104
Σχήμα 3.4	Τάσεις στον πόδα του οδόντα με φόρτιση στο σημείο κεφαλής A....	105
Σχήμα 3.5	Συντελεστής γεωμετρίας J για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ($\alpha = 20^\circ$ και $h_a = m$).....	106
Σχήμα 3.6	Συντελεστής διάρκειας ζωής $K_L = Y_N$ λόγω καμπτικών τάσεων.....	109
Σχήμα 3.7	Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για ένα μέταλλο.....	110
Σχήμα 3.8	Φορητό σκληρόμετρο Equotip.....	114
Σχήμα 3.9	Αισθητήρας και οθόνη μετρήσεων του σκληρόμετρου Equotip.....	114
Σχήμα 3.10	Σκληρόμετρο EQUOTIP με χρήση του αισθητήρα EQUOSTAT.....	115
Σχήμα 3.11	Το φορητό σκληρόμετρο ENPQIX EPX300.....	116
Σχήμα 3.12	Μέτρηση σκληρότητας κινητήριου τροχού.....	117
Σχήμα 3.13	Μέτρηση σκληρότητας: πάνω – σώματος, κάτω – οδόντων κινούμενου τροχού.....	118
Σχήμα 3.14	Καμπύλες μέγιστης εφαρμόσιμης τάσης - αριθμού κύκλων για χάλυβα (με μπλε και έχει όριο αντοχής) και αλουμίνιο (με κόκκινο και δεν έχει όριο).....	120
Σχήμα 3.15	Εισαγωγικό παράθυρο για την επιλογή επιπέδου.....	124
Σχήμα 3.16	Το περιβάλλον εργασίας του CES Edupack 2008.....	125

Σχήμα 3.17	Η νέα μορφή του αριστερού μέρους του περιβάλλοντος εργασίας....	125
Σχήμα 3.18	Η επιλογή στο Pick a selection template.....	126
Σχήμα 3.19	Κατηγορίες των δεδομένων προς εισαγωγή.....	126
Σχήμα 3.20	Εισαγωγή της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής της πυκνότητας.....	127
Σχήμα 3.21	Εισαγωγή της ελάχιστης τιμής της αντοχής σε κάμψη και των τιμών σκληρότητας.....	127
Σχήμα 3.22	Εισαγωγή της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας και ότι το υλικό πρέπει να είναι καλός θερμικός αγωγός.....	128
Σχήμα 3.23	Τα πιθανά υλικά προς επιλογή που τηρούν τους περιορισμούς που τέθηκαν.....	128
Σχήμα 3.24	Πίεση μεταξύ δύο κυλίνδρων.....	131
Σχήμα 3.25	Πίεση μεταξύ δύο οδόντων.....	131
Σχήμα 3.26	Συντελεστής κύκλων φόρτισης ή διάρκεια ζωής Z_N λόγω επιφανειακών τάσεων.....	134
Σχήμα 3.27	Παράθυρο δημιουργίας των αξόνων των διαγραμμάτων.....	137
Σχήμα 3.28	Το διάγραμμα συσχετισμού του συντελεστή ελαστικότητας με την αντοχή σε κάμψη (<i>Young's modulus – Yield strength</i>) για όλα τα υλικά της βάσης δεδομένων.....	138
Σχήμα 3.29	Το διάγραμμα συσχετισμού του συντελεστή ελαστικότητας με την αντοχή σε κάμψη για τα υλικά που τηρούν τους περιορισμούς του πρώτου σταδίου.....	139
Σχήμα 3.30	Ταξινόμηση των υλικών με βάση τον συντελεστή ελαστικότητας (<i>Young's modulus</i>).....	139
Σχήμα 3.31	Ταξινόμηση των υλικών με βάση την αντοχή τους σε κάμψη (<i>Yield strength</i>).....	140
Σχήμα 3.32	Το διάγραμμα συντελεστή θερμικής διαστολής (<i>Thermal expansion coefficient</i>).....	141
Σχήμα 3.33	Ταξινόμηση των υλικών με βάση τον συντελεστή θερμικής διαστολής (<i>Thermal expansion coefficient</i>).....	141
Σχήμα 3.34	Το διάγραμμα αντοχής κόπωσης στους 10^7 κύκλους (<i>Fatigue strength at 10^7 cycles</i>).....	142
Σχήμα 3.35	Ταξινόμηση των υλικών με βάση την αντοχή τους σε κόπωση στους 10^7 κύκλους (<i>Fatigue strength at 10^7 cycles</i>).....	142
Σχήμα 3.36	Το διάγραμμα της πυκνότητας (<i>Density</i>).....	143
Σχήμα 3.37	Ταξινόμηση των υλικών με βάση την πυκνότητα τους (<i>Density</i>).....	143
Σχήμα 3.38	Το διάγραμμα της τιμής (<i>Price</i>).....	144
Σχήμα 3.39	Ταξινόμηση των υλικών με βάση την τιμή τους (<i>Price</i>).....	144
Σχήμα 3.40	Τυπική μικροδομή φαιού χυτοσίδηρου (x50).....	148

Σχήμα 3.41	Τυπική μικροδομή όλκιμου χυτοσίδηρου (x50).....	149
Σχήμα 4.1	Κοπές με εργαλείο μορφής σε φρέζα.....	158
Σχήμα 4.2	Κοπές με οδοντωτό κανόνα.....	159
Σχήμα 4.3	Κοπή εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης με τη μέθοδο Fellows	160
Σχήμα 4.4	Κοπτήρες Hob και διαδικασία κοπής.....	160
Σχήμα 4.5	Γλύφανο Broaching και κατεργασμένος τροχός.....	161
Σχήμα 4.6	Χύτευση υπό πίεση (Die casting).....	162
Σχήμα 4.7	Διέλαση οδοντωτών τροχών.....	162
Σχήμα 4.8	Κατασκευή οδοντωτού τροχού με κονεομεταλλουργία.....	163
Σχήμα 4.9	Εκβολή πλαστικού.....	164
Σχήμα 4.10	Εργαλεία λείανσης.....	165
Σχήμα 4.11	Λείανση με την μέθοδο honing.....	165
Σχήμα 4.12	Εργαλείο shaving.....	166
Σχήμα 4.13	Κοπή αρχικών κυλίνδρων με πριονοκορδέλα.....	167
Σχήμα 4.14	Αρχικοί κύλινδροι.....	167
Σχήμα 4.15	Τόρνευση κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	168
Σχήμα 4.16	Τόρνευση κινούμενου οδοντωτού τροχού.....	168
Σχήμα 4.17	Οι κύλινδροι περασμένοι σε άξονες για να τοποθετηθούν στον γριναζοκόπη.....	169
Σχήμα 4.18	Κοπή οδόντων κινητήριου τροχού με γριναζοκόπη τύπου Hob.....	169
Σχήμα 4.19	Κοπή οδόντων κινούμενου τροχού με γριναζοκόπη τύπου Hob.....	170
Σχήμα 4.20	Φρέζα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των οπών του κινούμενου τροχού.....	170
Σχήμα 4.21	Τελικός κινητήριος τροχός.....	171
Σχήμα 4.22	Τελικός κινούμενος τροχός.....	171
Σχήμα 4.23	Βασικό κόστος κατεργασίας (P_c) σε σχέση με την ετήσια παραγόμενη ποσότητα (N) για μηχανικές κατεργασίες.....	175
Σχήμα 4.24	Βασικό κόστος κατεργασίας (P_c) σε σχέση με την ετήσια παραγόμενη ποσότητα (N) για κατεργασίες διαμόρφωσης.....	176
Σχήμα 4.25	Καμπύλες σχετικού κατασκευαστικού κόστους σε σχέση με την ποσότητα.....	178
Σχήμα 4.26	Κατηγορίες σχήματος για τον προσδιορισμό του C_c	180
Σχήμα 4.27	Προσδιορισμός του συντελεστή πολυπλοκότητας σχήματος (C_c) για την κατηγορία σχήματος 'Α'.....	181
Σχήμα 4.28	Προσδιορισμός του συντελεστή τομής (C_s) για μηχανικές κατεργασίες.....	182
Σχήμα 4.29	Προσδιορισμός του συντελεστή τομής (C_s) για κονεομεταλλουργία	183
Σχήμα 4.30	Προσδιορισμός του συντελεστή ανοχής (C_l) για μηχανικές	

	κατεργασίες.....	184
Σχήμα 4.31	Προσδιορισμός του συντελεστή ανοχής (C_t) για κονομεταλλουργία	184
Σχήμα 4.32	Προσδιορισμός του συντελεστή φινιρίσματος επιφάνειας (C_f) για μηχανικές κατεργασίες.....	185
Σχήμα 4.33	Προσδιορισμός του συντελεστή φινιρίσματος επιφάνειας (C_f) για κονομεταλλουργία.....	185

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1	Τυποποιημένες τιμές module σε mm.....	9
Πίνακας 1.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών.....	14
Πίνακας 2.1	Απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον σχεδιασμό του κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	35
Πίνακας 2.2	Απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον σχεδιασμό του κινούμενου οδοντωτού τροχού.....	43
Πίνακας 2.3	Τιμές ανοχών σύμφωνα με ονομαστική διάσταση και ποιότητα...	83
Πίνακας 3.1	Συντελεστής υπερφόρτισης K_o	107
Πίνακας 3.2	Συντελεστής μεγέθους K_s	108
Πίνακας 3.3	Τιμές των σταθερών A, B, C.....	108
Πίνακας 3.4	Συντελεστής αξιοπιστίας K_R	109
Πίνακας 3.5	Επιτρεπόμενες καμπτικές τάσεις S_{at} οδοντωτών τροχών από φαιό και όλκιμο χυτοσίδηρο.....	129
Πίνακας 3.6	Επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση S_{ac} οδοντωτών τροχών από φαιό και όλκιμο χυτοσίδηρο.....	134
Πίνακας 3.7	Συντελεστής αξιοπιστίας K_R	135
Πίνακας 3.8	Χάλυβες κατασκευών.....	145
Πίνακας 3.9	Συντελεστής ελαστικότητας C_P , $\sqrt{MPa}$	146
Πίνακας 3.10	Αρχικά και νέα υλικά οδοντωτών τροχών.....	152
Πίνακας 4.1	Δεδομένα σχετικού κόστους καταλληλότητας του υλικού για την κατεργασία (C_{mp}).....	179
Πίνακας 4.2	Συντελεστής αποβλήτων (W_c) για διάφορες κατεργασίες σύμφωνα με την κατηγορία σχήματος.....	187
Πίνακας 4.3	Κόστος κατασκευής κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	191
Πίνακας 4.4	Κόστος κατασκευής κινούμενου οδοντωτού τροχού.....	192

Περίληψη

Ο στόχος της εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός μηχανολογικού εξαρτήματος, με σκοπό την βελτίωση ενός ήδη υπάρχοντος από τεχνική αλλά και οικονομική σκοπιά. Έμφαση δίνεται στην επιλογή υλικού και στις τεχνολογίες παραγωγής. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα μηχανολογικά σχέδια ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών μιας συγκεκριμένης εφαρμογής (μειωτήρας κινητήρα μοτοσυκλέτας), μέσω του λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Στην συνέχεια, αφού έγινε μελέτη και υπολογισμός κάποιων δεδομένων, συνθηκών και περιορισμών, βρέθηκαν μέσω του λογισμικού *CES Edupack 2008* τα αρχικά υλικά των τροχών (χυτοσίδηροι) και κατόπιν επιλέχθηκαν νέα (χάλυβες). Τέλος, οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάστηκαν εκ νέου με τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν και αναλύθηκε το κόστος κατασκευής τους με τα αρχικά και τα νέα υλικά, με δύο διαφορετικές μεθόδους κατασκευής και για δύο διαφορετικές ετήσιες παραγόμενες ποσότητες, με μια συγκεκριμένη μεθοδολογία εκτίμησης κόστους. Αφού υπολογίστηκε και το πραγματικό κόστος κατασκευής των νέων τροχών, παρατέθηκαν κάποια συμπεράσματα.

Λέξεις – κλειδιά: Οδοντωτοί τροχοί, Ανάπτυξη προϊόντος, Μηχανολογικός σχεδιασμός, Επιλογή υλικού, Τεχνολογίες παραγωγής, Εκτίμηση κόστους κατασκευής

Abstract

“Product research, design and development, with emphasis on material selection and processes”

Thesis submitted to the Department of Production Engineering and Management,
School of Engineering, Democritus University of Thrace, Greece, on November 2012

For the degree:

Diploma in Production Engineering and Management (Dip. Eng.)

Supervisor: Assoc. Prof. P. N. Botsaris

The goal of this project is the research, design and development of a mechanical component, with intent to improve an existing one on technical and economical terms. Emphasis is given to material selection and processes. Firstly, engineering drawings of a pair of gears of a specific application (motorbike gears) were created, using the software *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Afterwards, having done some study and calculation of data, conditions and restrictions, the original materials of gears were found (cast iron) and then new ones were selected (steel), via software *CES Edupack 2008*. Finally, the gears were remanufactured with new materials that were selected and the cost of construction with the original and new materials, with two different processes and two different annual production quantities was analyzed, with a specific cost estimation model. Having calculated the real cost of new gears manufacture, some conclusions were mentioned.

Keywords: Gears, Product development, Mechanical design, Material selection, Processes, Manufacture cost estimation

Αφιερώνεται στους γονείς μου και τον αδερφό μου

Κεφάλαιο 1

Οδοντωτοί τροχοί, μελέτη περίπτωσης

Περιεχόμενα

1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Οδοντωτοί τροχοί.....	2
1.2.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί.....	3
1.2.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί.....	3
1.2.3 Οδοντωτός κανόνας.....	4
1.2.4 Σύστημα ατέρμονα – κορώνας.....	5
1.2.5 Επικυκλική οδόντωση.....	5
1.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη και διαστάσεις οδοντωτών τροχών.....	6
1.4 Οδοντώσεις εξειλιγμένης.....	15
1.4.1 Είδη οδοντώσεων.....	15
1.4.2 Οδοντώσεις εξειλιγμένης.....	15
1.5 Κατασκευή της μορφής του οδόντα – συνθήκες κύλισης.....	16
1.6 Υποκοπές οδοντωτών τροχών.....	18
1.6.1 Οριακός αριθμός οδόντων.....	18
1.6.2 Μετατόπιση.....	20
1.6.3 Διαστάσεις τροχών και με μετατόπιση.....	23
1.7 Μελέτη περίπτωσης.....	24
1.8 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	27
1.9 Βιβλιογραφία.....	28

1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει μια εισαγωγή στους οδοντωτούς τροχούς με μια περιγραφή των διαφόρων τύπων τους και των βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών και διαστάσεων τους. Στην συνέχεια θα περιγραφεί η εξειλιγμένη οδόντωση, η κατασκευή της μορφής του οδόντα, οι συνθήκες κύλισης και οι υποκοπές των οδοντωτών τροχών. Τέλος, θα αναλυθεί μια συγκεκριμένη εφαρμογή ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία.

1.2 Οδοντωτοί τροχοί

Η μετάδοση ισχύος συνιστά μια διαδικασία πολλών σταδίων και πολλαπλών μετατροπών. Για παράδειγμα η ευθύγραμμη κίνηση ενός ιμάντα προκύπτει από τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης του κινητήριου μοτέρ σε ευθύγραμμη κίνηση, ωστόσο η μετατροπή αυτή έγινε σε περισσότερα από ένα στάδια. Οι πολλαπλές αυτές μετατροπές αφορούν διάφορες παραμέτρους της κίνησης και διαμορφώνουν έναν τελικό συντελεστή ισχύος του εκάστοτε μηχανισμού μετάδοσης κίνησης. Το πρώτο στάδιο μιας τυπικής διαδικασίας μετάδοσης ισχύος είναι η μείωση (ή σπανιότητα η αύξηση) των στροφών του κινητήριου μοτέρ που συνδυάζεται με την αλλαγή του άξονα περιστροφής της μεταδιδόμενης κίνησης. Αυτή η πρώτη μετατροπή της κίνησης που παράγεται από την ενέργεια που μεταδίδει ένας κινητήρας στον άξονά του γίνεται από τους μειωτήρες στροφών. Ο άξονας περιστροφής της κίνησης που μεταδίδει ο μειωτήρας μπορεί να είναι παράλληλος, τεμνόμενος ή ασύμβατος με τον άξονα του κινητήρα. Η μετάδοση της κίνησης πραγματοποιείται με τους οδοντωτούς τροχούς (γρανάζια) μέσω των οδόντων του ενός τροχού που εισέρχονται στα αντίστοιχα διάκενα του άλλου.

Πλεονεκτήματα των οδοντωτών τροχών θεωρούνται η μικρή απαιτούμενη συντήρηση, η μεγάλη ασφάλεια λειτουργίας και διάρκεια ζωής, η ακριβής σχέση μετάδοσης, ο μεγάλος βαθμός απόδοσης, η δυνατότητα υπερφόρτισης και ο μικρότερος χώρος που καταλαμβάνουν έναντι των ιμάντων και αλυσίδων.

Μειονεκτήματα είναι το σχετικά μεγάλο κόστος κατασκευής, η θορυβώδης λειτουργία και η μη ελαστική μεταφορά των δυνάμεων.

Ανάλογα με την εφαρμογή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οδοντωτοί τροχοί διαφόρων τύπων που θα περιγραφούν παρακάτω.

1.2.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί

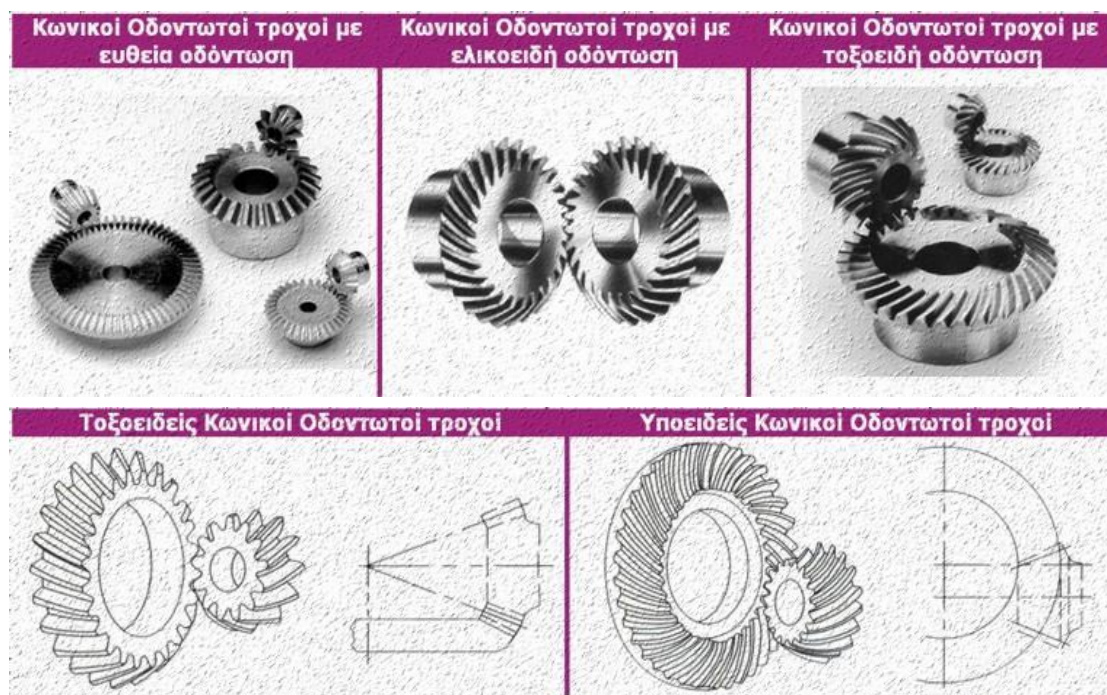
Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί (σχήμα 1.1) μεταδίδουν την κίνηση μεταξύ παραλλήλων αξόνων. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατεργασία της οποίας προκύπτουν οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί έχει κυλινδρική μορφή. Τα δόντια των τροχών μπορούν να είναι είτε παράλληλα, είτε κεκλιμένα προς τον άξονα τους, είτε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία. Οι παράλληλοι τοποθετημένοι τροχοί μπορούν να είναι σε επαφή είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά (δηλαδή ο ένας να βρίσκεται μέσα στον άλλο), ενώ η κεκλιμένη οδόντωση μπορεί να είναι είτε απλή είτε διπλή. Οι οδοντωτοί τροχοί με κεκλιμένα ή ελικοειδή δόντια υπερτερούν των τροχών με ευθεία δόντια διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή και παράγουν λιγότερο θόρυβο κατά τη λειτουργία τους.



Σχήμα 1.1: Διάφορα είδη μετωπικών οδοντωτών τροχών [4]

1.2.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί

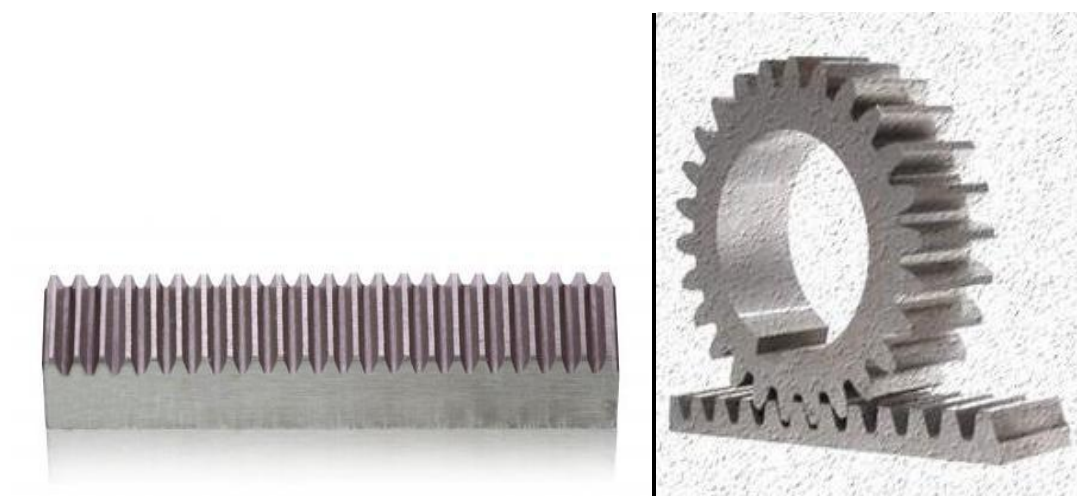
Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί (σχήμα 1.2) χρησιμοποιούνται για μετάδοση κίνησης σε άξονες είτε τεμνόμενους, είτε ασύμβατους. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατεργασία της οποίας προκύπτουν οι κωνικοί τροχοί έχει μορφή κώνου. Στους τροχούς που μεταδίδουν κινήσεις μεταξύ αξόνων οι οποίοι τέμνονται υπό τυχούσα γωνία τα δόντια τους είναι είτε ευθεία, είτε ελικοειδή. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κωνικοί τροχοί με δόντια που έχουν καμπύλη μορφή, είτε αυτά είναι τόξα κύκλου είτε τμήματα εξελιγμένων καμπυλών (βλέπε παράγραφο 1.4). Οι κωνικοί τροχοί που μεταδίδουν κίνηση σε ασύμβατους άξονες έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από εκείνους που μεταδίδουν κίνηση σε τεμνόμενους άξονες διότι κατά τη λειτουργία τους αναπτύσσονται επ' αυτών αυξημένες δυνάμεις τριβής ολίσθησης. Για τη μετάδοση των κινήσεων σε ασύμβατους άξονες χρησιμοποιούνται και οι κοχλιοτοί τροχοί. Ωστόσο αυτοί βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε μικρές σχετικά φορτίσεις αλλά και μικρότερες σχέσεις μετάδοσης.



Σχήμα 1.2: Διάφορα είδη κωνικών οδοντωτών τροχών [4]

1.2.3 Οδοντωτός κανόνας

Ο οδοντωτός κανόνας (σχήμα 1.3) συνιστά ένα γρανάζι το οποίο προέκυψε από την κατεργασία μιας μεταλλικής επιφάνειας που είχε μορφή διαμήκους ράβδου. Τα δόντια του δεν είναι διαταγμένα επί κύκλου, αλλά επί ευθείας. Επιτυγχάνει μετάδοση κίνησης «μετωπικού τύπου» που καταφέρνει να μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη και το αντίστροφο.



Σχήμα 1.3: Οδοντωτός κανόνας [4]

1.2.4 Σύστημα ατέρμονα – κορώνας

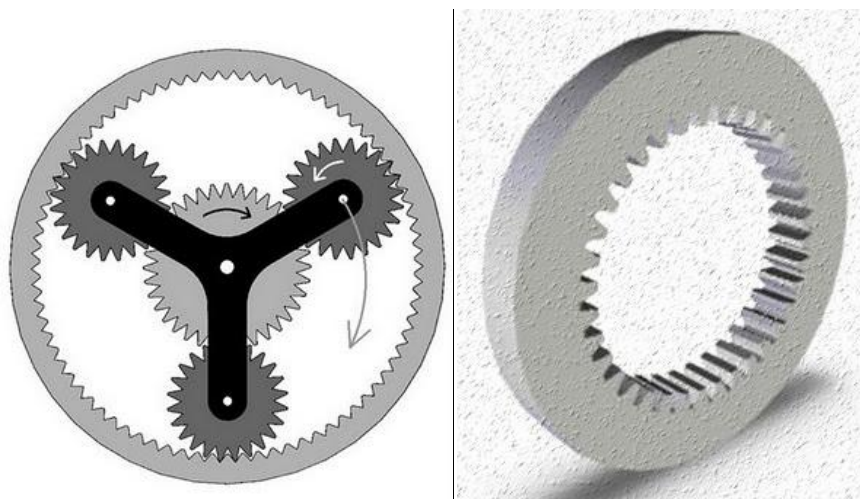
Μια άλλη διάταξη μετάδοσης κίνησης μεταξύ ασύμβατων αξόνων με κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις είναι το σύστημα ατέρμονα κοχλία – γραναζιού (σχήμα 1.4). Αποτελείται από έναν ατέρμονα κοχλία που φέρει κεκλιμένα δόντια και λειτουργεί σαν γρανάτζι. Ο άξονας του ατέρμονα εφάπτεται στην περιφέρεια του οδοντωτού τροχού στον οποίο μεταδίδεται η κίνηση. Αυτός ο τύπος μετάδοσης κίνησης αποδίδει μικρό σχετικά βαθμό απόδοσης, αλλά προσφέρει το πλεονέκτημα της αθόρυβης λειτουργίας γιατί επιτυγχάνει απορρόφηση των δονήσεων.



Σχήμα 1.4: Συστήματα ατέρμονα – κορώνας [5]

1.2.5 Επικυκλική οδόντωση

Η διάταξη αυτού του τύπου που προσομοιάζει το πλανητικό σύστημα αποτελείται από έναν κεντρικό οδοντωτό τροχό που καταλαμβάνει τη θέση του ήλιου και μια σειρά τροχών πλανητών που συνδέονται με τα δόντια του κεντρικού (σχήμα 1.5). Η πλανητική διάταξη προσφέρει τη δυνατότητα για μετάδοση μεγάλης ισχύος καθώς επίσης και για μεγάλες σχέσεις μετάδοσης. Οι πλανητικές οδοντώσεις έχουν λίγο μεγαλύτερο κόστος από τις άλλες γιατί περιλαμβάνουν μεγαλύτερο αριθμό οδοντωτών τροχών, έχουν όμως παράλληλα το πλεονέκτημα ότι συχνά καταλαμβάνουν μικρό χώρο και αποδίδουν μεγάλο βαθμό απόδοσης. [3]

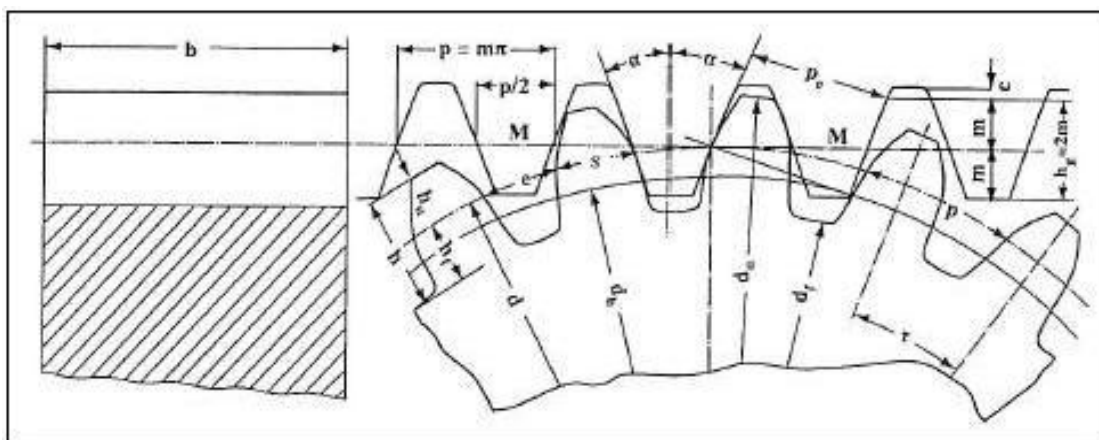


Σχήμα 1.5: Επικυκλική οδόντωση [6]

1.3 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη και διαστάσεις οδοντωτών τροχών

Μπορεί να θεωρηθεί, ότι ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών προέρχεται από δύο λείους κυλίνδρους που εφάπτονται και κυλίσουν συνεχώς, ο δε κινητήριος μεταδίδει την κίνηση στον κινούμενο, με την τριβή, χωρίς ολίσθηση. Εσοχές και προεξοχές που υπάρχουν στην επιφάνεια των κυλίνδρων δημιουργούν τους οδόντες και η μεταξύ τους εμπλοκή μεταβιβάζει την κίνηση από τον ένα στον άλλο. Παρακάτω θα περιγραφούν τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των οδοντωτών τροχών.

Διάμετρος αρχικού κύκλου ή κύκλου κύλισης d (σχήμα 1.6) ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου κατά τον οποίο εφάπτεται ο ένας κύλινδρος πάνω στον άλλο. Επίσης, είναι ο κύκλος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του οδοντωτού τροχού δηλαδή ο κύκλος πάνω στον οποίο κυλίεται το κοπτικό εργαλείο.



Σχήμα 1.6: Βασικά μεγέθη οδοντωτών τροχών με ευθείς οδόντες [1]

Σχέση μετάδοσης **i** ονομάζεται ο λόγος του αριθμού των στροφών n_a (ή της γωνιακής ταχύτητας ω_a) του κινητήριου (πρώτου) τροχού προς τον αριθμό στροφών n_b (ή της γωνιακής ταχύτητας ω_b) του κινούμενου (τελευταίου) τροχού.

$$i = \frac{n_a}{n_b} = \frac{\omega_a}{\omega_b} \quad (1.1\alpha)$$

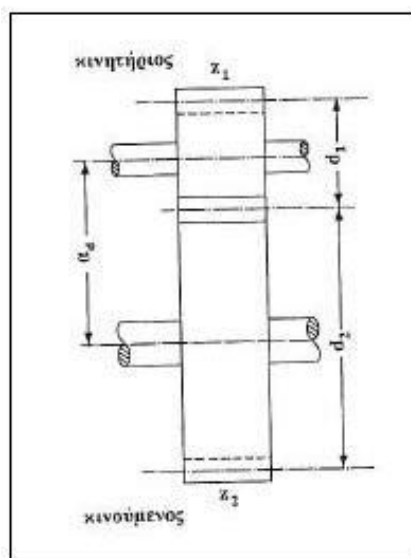
Για έναν μονοβάθμιο μειωτήρα που αποτελείται δηλαδή από δύο οδοντωτούς τροχούς και άρα η μείωση στροφών είναι μίας βαθμίδας (σχήμα 1.7) η σχέση μετάδοσης θα είναι:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (1.1\beta)$$

όταν έχουμε μείωση στροφών (δηλαδή τροχός 1 – πινιόν κινητήριος) και:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{z_1}{z_2} \quad (1.1\gamma)$$

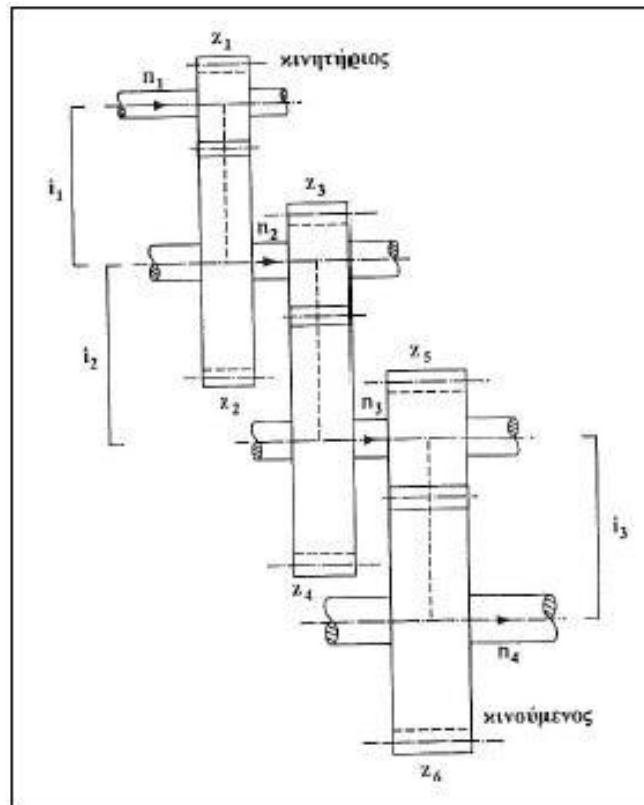
όταν έχουμε αύξηση στροφών (δηλαδή τροχός 2 κινητήριος) όπου z_1 ο αριθμός οδόντων του τροχού 1 και z_2 ο αριθμός οδόντων του τροχού 2.



Σχήμα 1.7: Σχέση μετάδοσης σε έναν μονοβάθμιο μειωτήρα [1]

Για έναν μειωτήρα με πολλές βαθμίδες (σχήμα 1.8) η συνολική σχέση μετάδοσης θα είναι:

$$i_{ολ} = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \dots i_n \quad (1.2)$$



Σχήμα 1.8: Σχέση μετάδοσης σε έναν πολυβάθμιο μειωτήρα [1]

Βήμα p ονομάζεται η απόσταση μεταξύ δύο οδόντων και μετράται σαν τόξο πάνω στον αρχικό κύκλο.

$$p = \frac{\pi \cdot d}{z} \quad \text{σε mm} \quad (1.3)$$

Module η μέτρο m ονομάζεται ο λόγος $\frac{p}{\pi}$ (ή το μήκος της αρχικής διαμέτρου που αντιστοιχεί σε έναν οδόντα).

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z} \quad \text{σε mm} \quad (1.4)$$

Για να περιοριστεί ο αριθμός των απαιτούμενων κοπτικών εργαλείων στη βιομηχανία, χρησιμοποιούνται τα τυποποιημένα module που περιέχονται στον πίνακα 1.1

Πίνακας 1.1: Τυποποιημένες τιμές module σε mm [2]

Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3
0.1			1.25				7		50		
	0.15		1.5			8				55	
0.2				1.75			9		60		
	0.25		2			10					65
0.3				2.25			11			70	
	0.35		2.5			12				75	
0.4				2.75			14		80		
	0.45		3			16				85	
0.5				3.25			18		90		
	0.55			3.5		20				95	
0.6					3.75		22		100		
		0.65	4			25					
	0.7			4.5			28				
	0.75		5			32					
0.8				5.5			36				
	0.9		6			40					
1					6.5		45				

Ύψος κεφαλής h_a ονομάζεται η ακτινική απόσταση μεταξύ αρχικού κύκλου και κύκλου κεφαλής. Λαμβάνεται ίσο με το module.

$$h_a = m \quad (1.5)$$

Ύψος πόδα h_f ονομάζεται η ακτινική απόσταση μεταξύ του αρχικού κύκλου και του κύκλου πόδα. Λαμβάνεται ίσο με 1.167m ή 1.25m ανάλογα με το κοπτικό εργαλείο.

$$h_f = h_a + c = m + c = 1.167 \cdot m \quad (1.6\alpha)$$

$$\text{ή} \quad h_f = h_a + c = m + c = 1.25 \cdot m \quad (1.6\beta)$$

όπου c είναι η χάρη κεφαλής, δηλαδή η χάρη ανάμεσα στους κύκλους κεφαλής και πόδα (σχήμα 1.6). Λαμβάνεται ανάλογα με το κοπτικό εργαλείο $c = 0.167m$ ή συνηθέστερα $c = 0.25m$ (βλέπε παράγραφο 1.5).

Ύψος οδόντα h ονομάζεται το άθροισμα του ύψους κεφαλής και του ύψους πόδα.

$$h = h_a + h_f \quad (1.7)$$

Διάμετρος κύκλου κεφαλής d_a ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου που περιορίζει εξωτερικά τους οδόντες.

$$d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2) \quad (1.8)$$

Διάμετρος κύκλου πόδα d_f ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου που περιορίζει εσωτερικά τους οδόντες.

$$d_f = d - 2 \cdot h_f \quad (1.9)$$

Απόσταση αξόνων a_d ονομάζεται το ημιάθροισμα των διαμέτρων των αρχικών κύκλων.

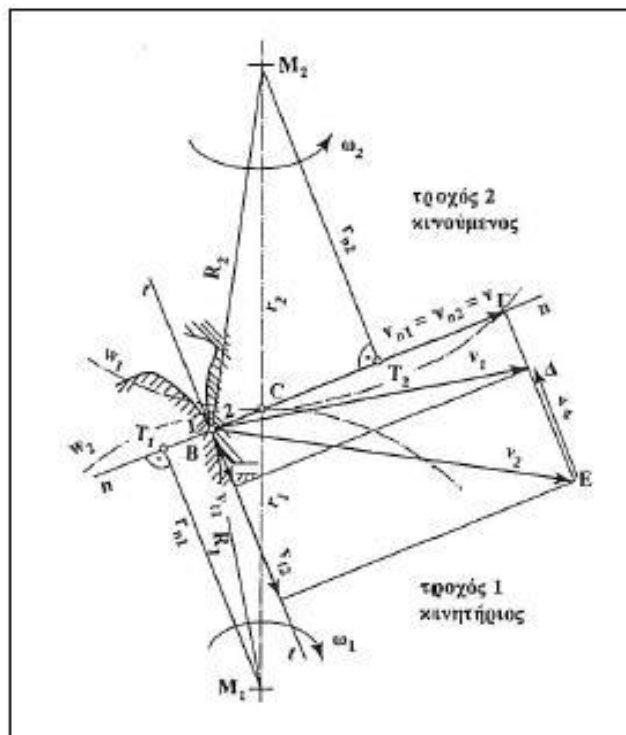
$$\alpha_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2} \quad (1.10)$$

Πάχος οδόντων s το οποίο μετράται πάνω στον αρχικό κύκλο είναι $s = p - e$ όπου e το διάκενο μεταξύ δύο οδόντων. Θεωρητικά το πάχος s πρέπει να είναι ίσο με το διάκενο $e = p/2$. Για την αντιμετώπιση όμως ανακριβειών κατασκευής και τοποθέτησης, πιθανών θερμικών διαστολών και λίπανσης, είναι απαραίτητη μια χάρη κατατομής, δηλαδή το διάκενο πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερο από το πάχος του οδόντα. Το πάχος s και το διάκενο e εξαρτώνται από την κατεργασία των οδόντων και έχουν τα ακόλουθα μεγέθη:

$$\text{Για ακατέργαστους οδόντες } s = \frac{19}{40} p \quad e = \frac{21}{40} p$$

$$\text{Για κατεργασμένους οδόντες } s = \frac{39}{80} \text{ ή } \frac{79}{160} \text{ ή } \frac{1}{2} p \quad e = \frac{41}{80} \text{ ή } \frac{81}{160} \text{ ή } \frac{1}{2} p$$

Σύμφωνα με τον βασικό νόμο της οδόντωσης για να μεταφερθεί η κίνηση από τον έναν οδοντωτό τροχό στον συνεργαζόμενο ομοιόμορφα, δηλαδή ο αρχικός κύκλος του ενός τροχού να κυλίνεται χωρίς ολίσθηση πάνω στον αρχικό κύκλο του συνεργαζόμενου, θα πρέπει η κάθετος στο εκάστοτε σημείο επαφής των δύο συνεργαζόμενων κατατομών να περνάει από το σημείο (κέντρο) κύλισης C (σχήμα 1.9).



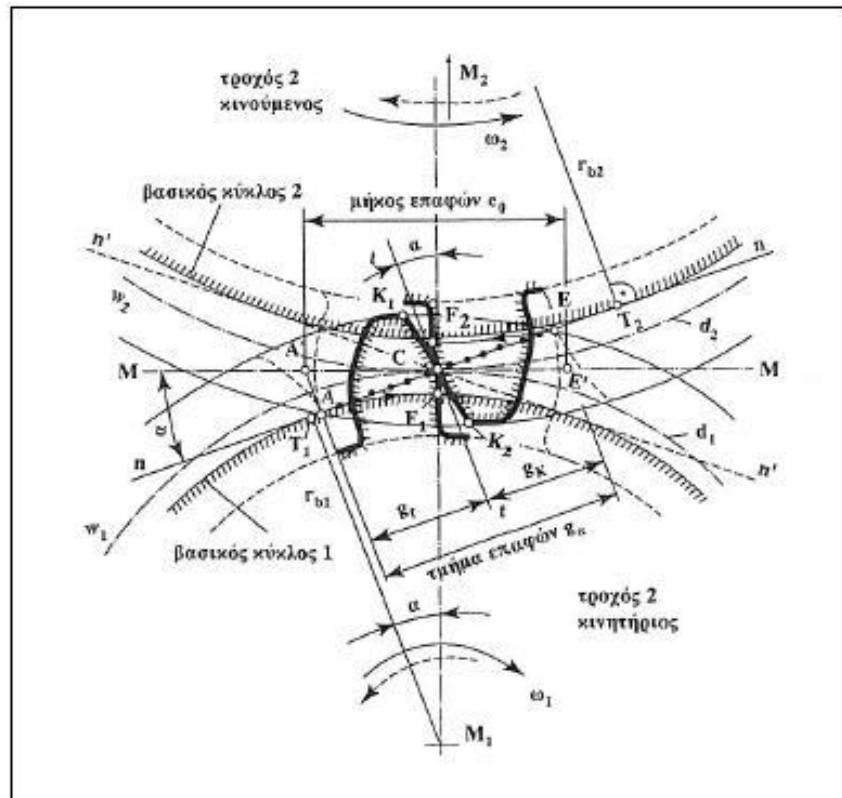
Σχήμα 1.9: Βασικός νόμος της οδόντωσης [1]

Γραμμή ή τροχιά επαφών ονομάζεται η γραμμή n-n πάνω στην οποία κινείται κατά την διάρκεια της εμπλοκής το εκάστοτε σημείο επαφής E (σχήμα 1.10).

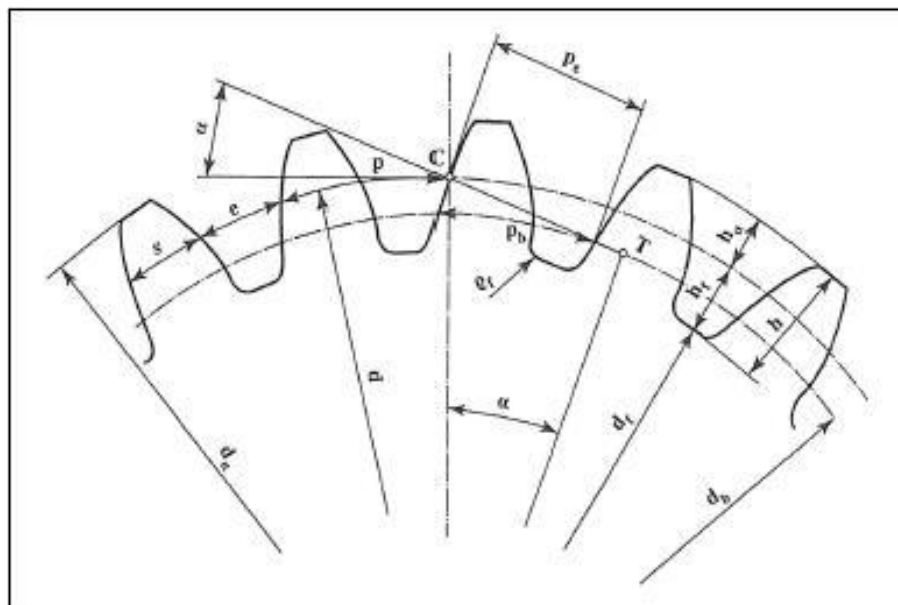
Τμήμα επαφών g_a το μέρος της γραμμής επαφών που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια της επαφής των οδόντων και περιορίζεται από τους δύο κύκλους κεφαλής. Είναι:

$$g_a = 0,5 \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} \right) - \alpha_d \cdot \sin \alpha \quad \text{σε mm} \quad (1.11)$$

d_{a1}, d_{a2}	διάμετρος κύκλου κεφαλής πινιόν και τροχού σε mm, από σχέση (1.8)
d_{b1}, d_{b2}	διάμετρος βασικού κύκλου πινιόν και τροχού σε mm, από σχέση (1.11) (βλέπε παρακάτω)
α	γωνία επαφής $\alpha = 20^\circ$ (βλέπε παρακάτω)
α_d	απόσταση αξόνων σε mm από σχέση (1.10)



Σχήμα 1.10: Ζεύγος οδοντωτών τροχών με εξωτερική οδόντωση εξελιγμένης [1]



Σχήμα 1.11: Εξωτερική οδόντωση [1]

Γωνία επαφής α ονομάζεται η οξεία γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της γραμμής επαφών n-n και της εφαπτομένης στον κύκλο κύλισης στο σημείο C. Τρεις τυποποιημένες τιμές της γωνίας επαφής είναι: 14.5° , 20° και 25° αλλά η πιο συνήθης γωνία που χρησιμοποιείται στους περισσότερους οδοντωτούς τροχούς είναι των 20° . Γενικότερα μια μικρή γωνία επαφής έχει ως αποτέλεσμα περισσότερη μεταφερόμενη

ισχύ και μικρότερη πίεση που στα έδρανα, αλλά μια μεγαλύτερη γωνία καθιστά πιο ισχυρό τον οδόντα.

Διάμετρος βασικού κύκλου d_b ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου που μαζί με τον κύκλο κεφαλής περιορίζουν το τμήμα επαφών g_a .

$$d_b = d \cdot \cos \alpha \quad (1.11)$$

Βήμα βασικού κύκλου p_b ονομάζεται το μήκος του τόξου μεταξύ δύο οδόντων πάνω στον βασικό κύκλο.

$$p_b = p \cdot \cos \alpha \quad (1.12)$$

Βήμα επαφών p_e ονομάζεται η απόσταση, πάνω στη γραμμή επαφών, ανάμεσα σε δύο συνεχείς (δεξιές ή αριστερές) κατατομές οδόντων του ίδιου τροχού. Από το σχήμα 1.11 προκύπτει ότι το p_e ισούται με το βήμα βασικού κύκλου p_b , διότι η γραμμή επαφών εκ κατασκευής κυλίνεται πάνω στον βασικό κύκλο d_b . Είναι λοιπόν:

$$p_e = p_b = p \cdot \cos \alpha \quad (1.13)$$

Το τμήμα επαφών g_a πρέπει να είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το βήμα επαφών p_e για να βρίσκεται διαρκώς σε επαφή τουλάχιστον ένα ζεύγος οδόντων. Αν $g_a < p_e$, μετά το τέλος της επαφής ενός ζεύγους οδόντων, ο κινούμενος τροχός θα παραμείνει για λίγο ακίνητος, διότι το επόμενο ζεύγος οδόντων δεν έχει αρχίσει ακόμη την επαφή του. Όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα επαφών g_a , τόσο πιο ήρεμη και ομοιόμορφη είναι η περιστροφή των τροχών.

Βαθμός επικάλυψης ε_a ονομάζεται ο λόγος του τμήματος επαφών g_a προς το βήμα επαφών p_e . Για μια απρόσκοπτη συνεργασία ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών θα πρέπει να είναι $\varepsilon_a \geq 1,1$ κατά το δυνατόν $\varepsilon_a \geq 1,25$. Ο βαθμός επικάλυψης δίνει τον αριθμό των συνεργαζομένων οδόντων και είναι μέτρο για την κατανομή της περιφερειακής δύναμης πάνω στους οδόντες. Για ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών με παράλληλους οδόντες χωρίς μετατόπιση (βλέπε παρακάτω), ο βαθμός επικάλυψης δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon_a = \frac{g_a}{p_e} = \frac{0,5 \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} \right) - \alpha_d \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha} \quad (1.14)$$

Στον παρακάτω πίνακα 1.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά μεγέθη των οδοντωτών τροχών (σχήμα 1.6, 1.11)

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών

Περιγραφή	Τύπος
Πλάτος οδόντα	b
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2)$
Διάμετρος κύκλου πόδα	$d_f = d - 2 \cdot h_f$
Διάμετρος βασικού κύκλου	$d_b = d \cdot \cos \alpha$
Διάμετρος αρχικού κύκλου	d
Βήμα αρχικού κύκλου	$p = (\pi \cdot d) / z$
Βήμα βασικού κύκλου	$p_b = m \cdot \pi \cdot \cos \alpha$
Πάχος οδόντα	$s = p - e$
Διάκενο μεταξύ των οδόντων	$e = p - s$
Αριθμός οδόντων	z
Module	$m = p / \pi$
Σχέση μετάδοσης	$i = n_1 / n_2$
Ύψος κεφαλής	$h_a = m$
Ύψος πόδα	$h_f = h_a + c$
Ύψος οδόντα	$h = h_a + h_f$
Χάρη κεφαλής	c
Γωνία επαφής	α
Απόσταση αξόνων	$a_d = (d_1 + d_2) / 2$
Τμήμα επαφών	$g_a = 0,5 \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} \right)$
Βήμα επαφών	$p_e = p_b = p \cdot \cos \alpha$
Βαθμός επικάλυψης	$\varepsilon_\alpha = \frac{g_a}{p_e}$

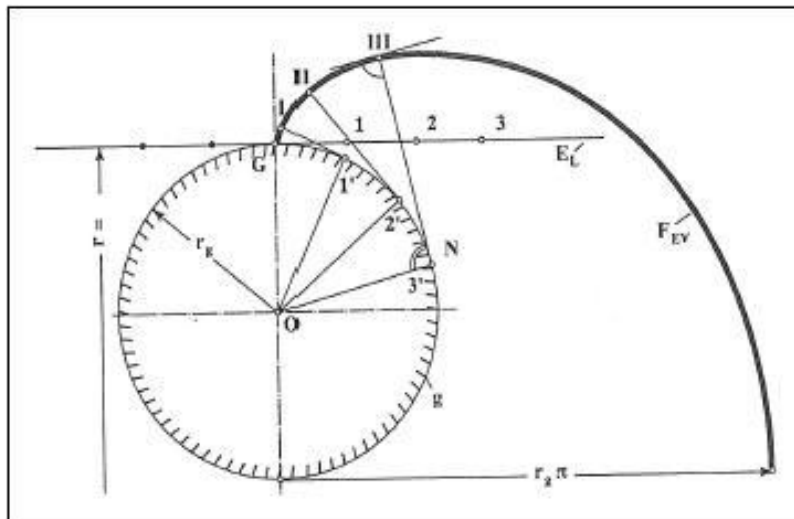
1.4 Οδοντώσεις εξειλιγμένης

1.4.1 Είδη οδοντώσεων

Οι μορφές των κατατομών των οδόντων μπορούν να είναι τυχαίες, αρκεί να πληρούται ο βασικός νόμος της οδόντωσης. Για να απλοποιηθεί όμως η κατασκευή των οδόντων είναι σκόπιμο να επιλέγονται ορισμένες γεωμετρικές καμπύλες. Τα βασικά είδη οδοντώσεων είναι οι *κυκλοειδής* οδοντώσεις που χωρίζονται σε *επικυκλοειδής*, *υποκυκλοειδής* και *ορθοκυκλοειδής* και οι οδοντώσεις *εξειλιγμένης*. Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν μόνο οι οδοντώσεις εξειλιγμένης, εφόσον χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στην μηχανολογία και οι οδοντωτοί τροχοί που θα μελετηθούν χρησιμοποιούν αυτήν την οδόντωση.

1.4.2 Οδοντώσεις εξειλιγμένης

Εξειλιγμένη είναι η καμπύλη που παράγεται από σημείο μιας ευθείας E_L η οποία κυλίνεται πάνω σε ένα κύκλο, τον βασικό κύκλο g (σχήμα 1.12). Για να χαράξουμε την εξειλιγμένη παίρνουμε πάνω στην περιφέρεια g και στην ευθεία E_L ίσα τμήματα από το σημείο G . Έτσι έχουμε τα σημεία $1,2,3$ και $1',2',3'$. Με κέντρο το $3'$ και ακτίνα $3G$ καθώς και με κέντρο το G και ακτίνα $33'$ χαράζουμε δύο τόξα κύκλου. Το σημείο III της τομής τους είναι σημείο της ζητούμενης εξειλιγμένης. Η ευθεία $3'III$ είναι κάθετος πάνω στην εξειλιγμένη, το δε σημείο $3'$ είναι το κέντρο καμπυλότητας για το σημείο III . Η εξειλιγμένη καμπύλη χρησιμοποιείται στην μηχανολογία για την κατατομή των οδόντων, επειδή η κατασκευή των οδόντων είναι τόσο ευκολότερη όσο πιο απλή είναι η τροχιά επαφών. Στην καμπύλη αυτή η τροχιά επαφών είναι η ευθεία γραμμή $n-n$ που περνά από το σημείο κύλισης C και σχηματίζει με την εφαπτομένη του κύκλου κύλισης στο σημείο C τη γωνία επαφής α (σχήμα 1.10) (βλέπε και κεφάλαιο 3 – παράγραφο 3.3)



Σχήμα 1.12: Κατασκευή της εξειλιγμένης καμπύλης [1]

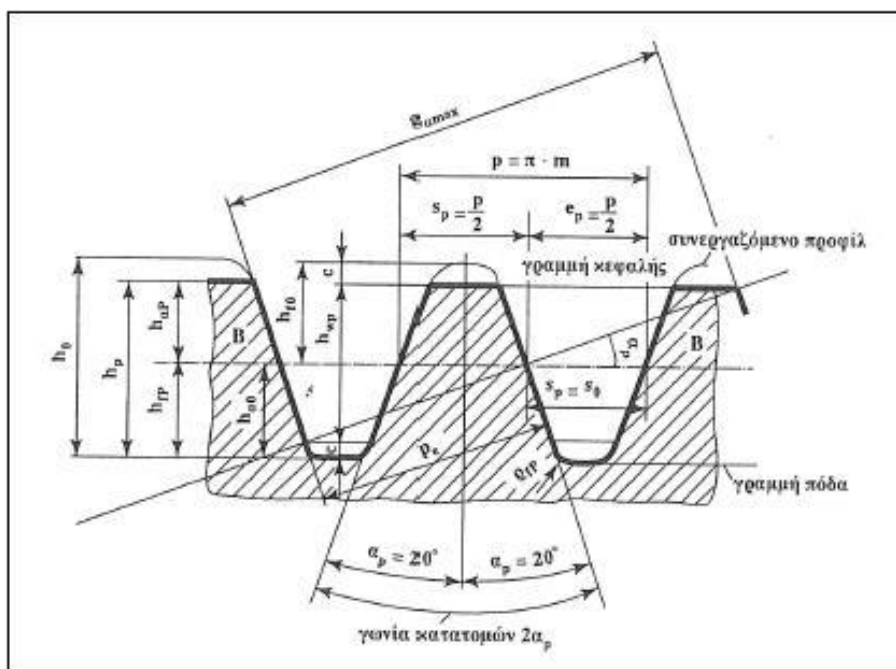
Οι οδοντώσεις με εξειλιγμένη έχουν επικρατήσει πλήρως διότι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Μπορούν να κατασκευασθούν με μεγάλη ακρίβεια με απλό εργαλείο του οποίου οι κατατομές είναι ευθείες.
- Μικρές μεταβολές στην απόσταση των κέντρων των τροχών δεν επηρεάζουν τις συνθήκες επαφής των οδόντων.
- Με το ίδιο εργαλείο μπορούν να κατασκευασθούν και οδόντες με μετατόπιση (βλέπε παράγραφο 1.6.2)
- Είναι τροχοί ανταλλάξιμοι διότι τα τμήματα της γραμμής επαφών δεξιά και αριστερά από τη διάκεντρο είναι εφαρμόσιμα.
- Η διεύθυνση της κάθετης δύναμης πάνω στην κατατομή παραμένει αμετάβλητη (διεύθυνση γραμμής επαφών).
- Σαν μειονέκτημα θεωρείται ότι για μικρό αριθμό οδόντων οι κορυφές των οδόντων του μεγάλου (ή του κοπτικού εργαλείου) υποσκάπτουν τη βάση των οδόντων του μικρού τροχού και εμφανίζονται έτσι οι λεγόμενες υποκοπές (βλέπε παράγραφο 1.6). Στην περίπτωση αυτή χειροτερεύουν οι συνθήκες επαφής των οδόντων (μείωση του βαθμού επικάλυψης) και εξασθενίζει η βάση του οδόντα με κίνδυνο να σπάσει.

1.5 Κατασκευή της μορφής του οδόντα – συνθήκες κύλισης

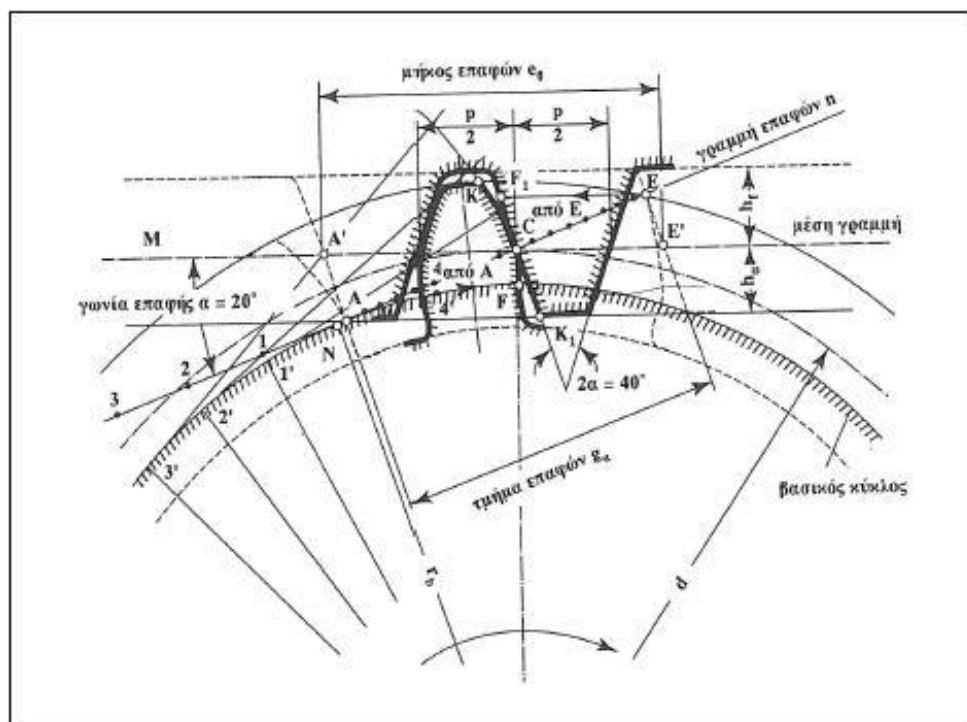
Η μορφή και οι διαστάσεις της οδόντωσης με εξειλιγμένη καθορίζονται από το λεγόμενο «προφίλ αναφοράς» κατά DIN 867 (σχήμα 1.13). Το προφίλ αυτό φέρει

ο οδοντωτός κανόνας με ευθείς κατατομές και ανταποκρίνεται επίσης στο προφίλ των κοπτικών εργαλείων για την κατασκευή οδοντωτών τροχών (κοπτικό πλανίσματος με την μέθοδο MAAG ή κοπτικό με μορφή ατέρμονα κοχλία – βλέπε κεφάλαιο 4 παράγραφο 4.1).



Σχήμα 1.13: «Προφίλ αναφοράς» (οδοντωτός κανόνας) κατά DIN 867 [1]

Η γωνία της κατατομής είναι ίση με το διπλάσιο της γωνίας επαφής $\alpha = 20^\circ$. Η τροχιά επαφών είναι μια ευθεία δηλ. το σημείο επαφής δύο κατατομών μετακινείται κατά την διάρκεια της συνεργασίας κατά μήκος μιας ευθείας. Η κατασκευή της μορφής του οδόντα και οι συνθήκες εμπλοκής και κύλισης δίνονται στο σχήμα 1.14, που παρουσιάζει έναν οδοντωτό κανόνα και έναν οδοντωτό τροχό σε συνεργασία. Ο οδοντωτός κανόνας έχει το προφίλ αναφοράς με ύψος κεφαλής $h_a = m$ και ύψος πόδα $h_f = h_a + c = m + c = 1.167 \cdot m$ για προφίλ αναφοράς I και $h_f = 1.25 \cdot m$ για προφίλ αναφοράς II (κατά DIN 3972). Κατά μέσο όρο $h_f \approx 1.2 \cdot m$ και χάρη κεφαλής $c \approx 0.25 \cdot m$. Ο οδοντωτός τροχός έχει διάμετρο αρχικού κύκλου $d = m \cdot z$.



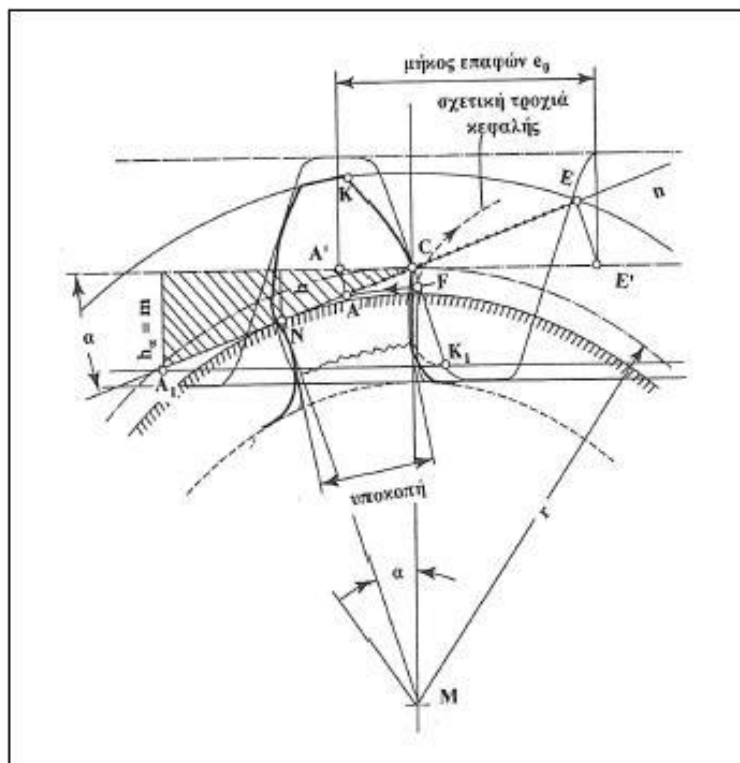
Σχήμα 1.14: Οδοντωτός κανόνας και οδοντωτός τροχός σε συνεργασία [1]

1.6 Υποκοπές οδοντωτών τροχών

1.6.1 Οριακός αριθμός οδόντων

Οδοντωτοί τροχοί εξελεγμένης που έχουν αριθμό οδόντων μικρότερο από ένα ορισμένο οριακό αριθμό παρουσιάζουν υποκοπές δηλ. η σχετική τροχιά της κεφαλής του κοπτικού εργαλείου αποτελείται, έξω από τον βασικό κύκλο, ένα τμήμα από την εξελεγμένη κατατομή του οδόντα και μειώνει έτσι το μήκος της κατατομής που παίρνει μέρος στην εμπλοκή. Συνέπεια αυτού είναι η ελάττωση του τμήματος επαφών που οδηγεί στη μείωση του βαθμού επικάλυψης και χειροτέρευση των συνθηκών εμπλοκής. Συγχρόνως αυξάνει ο κίνδυνος θραύσης λόγω μείωσης του πάχους του οδόντα στην βάση.

Το σχήμα 1.15 παρουσιάζει υποκοπή σε ένα τροχό με $z = 9$ οδόντες. Το σημείο κεφαλής K_1 του οδοντωτού κανόνα - κοπτικού εργαλείου διαγράφει, κατά την κύλισή του, τη σχετική τροχιά κεφαλής (διακεκομμένη γραμμή) που τέμνει την εξελεγμένη κατατομή στο σημείο F έξω από τον βασικό κύκλο. Επομένως το κάτω από το F ευρισκόμενο τμήμα της κατατομής του οδόντα, δεν μπορεί να πάρει μέρος στην εμπλοκή, την οποία πραγματοποιεί μόνο το τμήμα $\overline{FK}$.



Σχήμα 1.15: Δημιουργία υποκοπής [1]

Αν περιστραφεί ο τροχός προς τα αριστερά τόσο ώστε το F να πέσει πάνω στη γραμμή επαφών, λαμβάνεται το σημείο A σαν αρχή του τμήματος επαφών που τελειώνει στο E. Το τμήμα επαφών $\overline{AE}$ είναι πολύ ελαττωμένο σε σχέση με το τμήμα επαφών $\overline{A_1E}$ σε κανονική οδόντωση. Ο βαθμός επικάλυψης γίνεται $\varepsilon_a < 1$. Επιπλέον η εξασθένιση του πόδα του οδόντα που συνεπάγεται η υποκοπή, αυξάνει τον κίνδυνο θραύσης.

Ο οριακός αριθμός οδόντων $\mathbf{z}_g$ για να μην δημιουργηθούν υποκοπές δίνεται από την σχέση:

$$z_g = \frac{2}{\sin^2 \alpha} \quad (1.15)$$

Με την τυποποιημένη γωνία επαφής $\alpha = 20^\circ$, ο οριακός αριθμός οδόντων γίνεται θεωρητικά $z_g = 17$. Πρακτικά ο αριθμός των οδόντων μπορεί να φθάσει, χωρίς κίνδυνο για τις συνθήκες εμπλοκής, μέχρι $z'_g \approx 5/6 \cdot z_g \approx 14$

Για να αποφευχθεί η υποκοπή θα μπορούσε π.χ. να μειωθεί το ύψος κεφαλής h_a κατά το τμήμα εκείνο που προκαλεί την υποκοπή δηλ. το σημείο κεφαλής K_1 (σχήμα 1.13) να μετακινηθεί τόσο προς τα άνω ώστε η τροχιά του να μην «σκάβει». Με αυτόν τον τρόπο θα προέκυπταν κοντόχοντροι οδόντες μεγάλης αντοχής. Ένας άλλος τρόπος θα ήταν να αυξηθεί η γωνία επαφής α οπότε θα ελαττώνονταν ο οριακός αριθμός οδόντων z_g (βλέπε σχέση 1.15). Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν άλλα

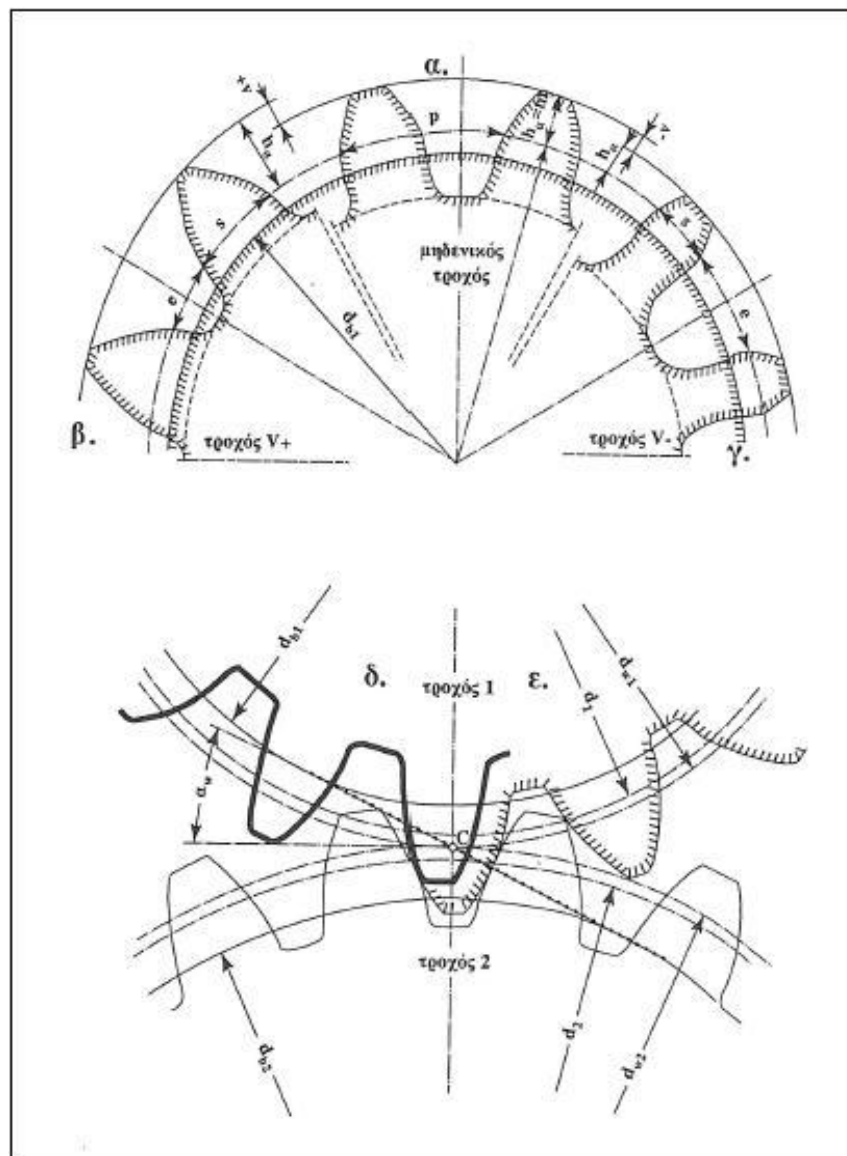
κοπτικά εργαλεία, πράγμα ευνόητα αντιοικονομικό. Εκτός όμως από αυτό και στις δύο περιπτώσεις θα χειρότερευε ο βαθμός επικάλυψης. Σκοπιμότερη είναι λοιπόν η λεγόμενη «μετατόπιση» που μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς αλλαγή των κοινών κοπτικών εργαλείων.

1.6.2 Μετατόπιση

Στη μετατόπιση, η μέση γραμμή του προφίλ αναφοράς, δεν περνά πλέον από το σημείο κύλισης C αλλά έχει μετατοπιστεί σε σχέση με αυτό προς τα έξω, πιο μακριά από το κέντρο του τροχού (θετικά) ή προς τα μέσα, προς το κέντρο του τροχού (αρνητικά). Οι μετατοπίσεις αυτές αντιστοιχούν σε μια απομάκρυνση ή εισχώρηση του κοπτικού εργαλείου. Με θετική μετατόπιση μπορούν να αποφευχθούν οι υποκοπές και να αυξηθεί η αντοχή των οδόντων. Με αρνητική μετατόπιση επιτυγχάνεται αύξηση του βαθμού επικάλυψης. Επιπλέον, με τη μετατόπιση, επιτυγχάνονται ορισμένες αποστάσεις αξόνων που προβλέπονται π.χ. από κατασκευαστικούς λόγους. Ανάλογα με τη θέση της μέσης γραμμής του κοπτικού δηλ. ανάλογα με το είδος της μετατόπισης διακρίνουμε:

- Τροχούς με μηδενική μετατόπιση που είναι οι κανονικοί οδοντωτοί τροχοί. Η μέση γραμμή εφάπτεται στον αρχικό κύκλο. Αρχικός κύκλος και κύκλος λειτουργίας συμπίπτουν (σχήμα 1.16α).
- Τροχούς με μετατόπιση (*τροχοί V*) γενικά. Αρχικός κύκλος και βήμα είναι αμετάβλητα σε σχέση με τους αντίστοιχους τροχούς με μηδενική μετατόπιση.
- Τροχούς με θετική μετατόπιση (*τροχοί V+*). Κύκλος κεφαλής και πόδα μεγαλώνουν ανάλογα με την μετατόπιση. Το πάχος του οδόντα γίνεται $s > p/2$, το διάκενο $e < p/2$ (σχήμα 1.16β).
- Τροχούς με αρνητική μετατόπιση (*τροχοί V-*). Κύκλος κεφαλής και πόδα μικραίνουν ανάλογα με την μετατόπιση. Το πάχος του οδόντα γίνεται $s < p/2$, το διάκενο $e > p/2$ (σχήμα 1.16γ).

Το σχήμα 1.16δ δείχνει ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών σε θέση μηδενικής και το 1.16ε σε θετικής ($V+$) μετατόπισης.



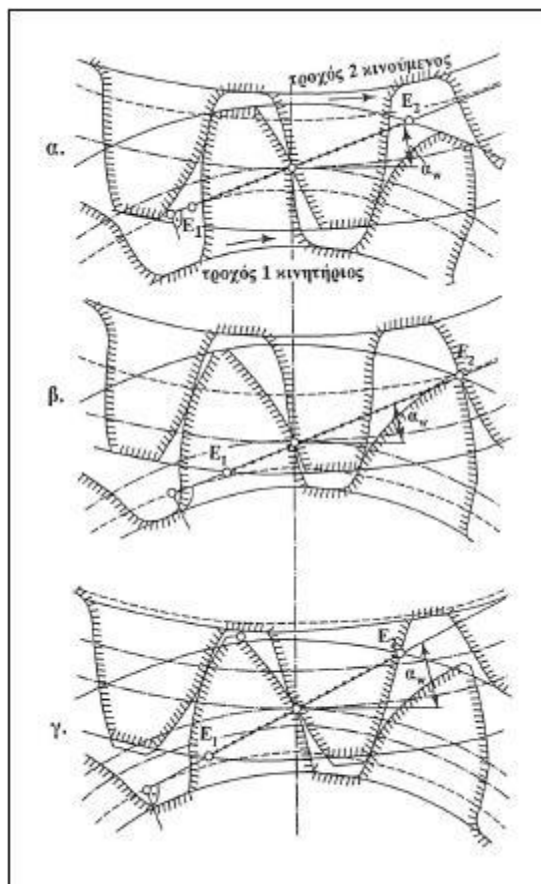
Σχήμα 1.16: Μορφή του οδόντα εξαρτώμενη από την μετατόπιση: α. για τροχό με μηδενική μετατόπιση β. για θετική μετατόπιση γ. για αρνητική μετατόπιση. Ζεύγος οδοντωτών τροχών σε θέση: δ. μηδενικής μετατόπισης και ε. θετικής μετατόπισης [1]

Τροχοί με μετατόπιση και με μηδενική μετατόπιση μπορούν και συνδυάζονται κατά βούληση σε μειωτήρες χωρίς να διαταράσσονται οι συνθήκες εμπλοκής και κύλισης. Ανάλογα με το ζεύγος των συνεργαζόμενων τροχών διακρίνουμε:

- Μηδενικούς μειωτήρες με ζεύγος συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών μηδενικής μετατόπισης και κανονική απόσταση αξόνων $\alpha_d = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2}$. Οι αρχικοί κύκλοι εφάπτονται. Εφαρμογή σε κάθε είδους μειωτήρες για μέσες φορτίσεις και στροφές και αριθμούς οδόντων $z_1, z_2 > z'_g$ (σχήμα 1.17α).
- Μηδενικούς μειωτήρες με μετατόπιση (V – μηδενικοί μειωτήρες) στους οποίους το συνεργαζόμενο ζεύγος οδοντωτών τροχών αποτελείται από ένα

τροχό V+ και ένα V- με την ίδια θετική και αρνητική μετατόπιση. Η απόσταση των αξόνων a_d παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με τον αντίστοιχο μηδενικό μειωτήρα. Οι αρχικοί κύκλοι εφάπτονται στο σημείο κύλισης. Με κατάλληλη εκλογή της μετατόπισης είναι δυνατόν να επιτευχθεί ίδιο πάχος στον πόδα του οδόντα για τον τροχό και το πινιόν. Θα πρέπει να ισχύει $z_1 + z_2 \geq 28$. Εφαρμογή σε μειωτήρες με μεγάλες σχέσεις μετάδοσης και υψηλές φορτίσεις (σχήμα 1.17β).

- Μειωτήρες με μετατόπιση (V – μειωτήρες) όπου συνεργάζονται τροχοί V με τροχούς μηδενικής μετατόπισης ή τροχοί V μεταξύ τους. Στο πινιόν δίνεται κατά το δυνατόν μια θετική μετατόπιση. Οι αρχικοί κύκλοι δεν εφάπτονται πλέον μεταξύ τους. Η κύλιση γίνεται πάνω σε νέους κύκλους που ονομάζονται κύκλοι λειτουργίας και δεν συμπίπτουν με τους αρχικούς. Δημιουργείται έτσι και μια νέα γωνία επαφής κατά την λειτουργία $\alpha_w > \alpha = 20^\circ$. Επίσης προκύπτει και μια νέα απόσταση αξόνων $a > a_d$ ή $a < a_d$. Εφαρμογή σε μειωτήρες με σκοπό την τήρηση συγκεκριμένης απόστασης αξόνων ή την επίτευξη μεγάλης αντοχής ή μεγάλου βαθμού επικάλυψης (σχήμα 1.17γ).



Σχήμα 1.17: Ζεύγος οδοντωτών τροχών με $z_1 = 12$, $z_2 = 25$ και διαφορετικές μετατοπίσεις: α. κανονική (μηδενική) οδόντωση β. V – μηδενική οδόντωση γ. V – οδόντωση [1]

Για υπολογιστικούς λόγους η μετατόπιση v δίνεται σαν γινόμενο ενός συντελεστή μετατόπισης x που εξαρτάται από τον αριθμό οδόντων και το module m . Κατά DIN 3992 συντελεστής μετατόπισης x είναι η μετατόπιση σε ένα τροχό με $m = 1$. Ισχύει λοιπόν:

$$v = x \cdot m \quad \text{σε mm} \quad (1.16)$$

Με $\frac{\sin^2 \alpha}{2} = \frac{1}{z_g}$ από σχέση 1.15 και $z_g = 17$ λαμβάνουμε τον θεωρητικό συντελεστή μετατόπισης:

$$x_{th} = \frac{z_g - z}{z_g} = \frac{17 - z}{17} \quad (1.17)$$

Ο πρακτικός συντελεστής μετατόπισης τότε για $z'_g = 14$ θα είναι:

$$x = \frac{14 - z}{17} \quad (1.18)$$

1.6.3 Διαστάσεις τροχών με μετατόπιση

- Τροχοί με μηδενική (δηλ. χωρίς) μετατόπιση (μηδενικοί τροχοί, κανονικοί). Έχουν διαστάσεις όπως δίνονται στην παράγραφο 1.3
- Τροχοί V+ και V-. Οι αρχικοί και οι βασικοί κύκλοι παραμένουν αμετάβλητοι

$$d = m \cdot z \text{ και } d_b = d \cdot \cos \alpha$$

Οι κύκλοι κεφαλής d_a και πόδα d_f μεγαλώνουν οι μικραίνουν λόγω της μετατόπισης $v = x \cdot m$ κατά $2 \cdot v$ (σχήμα 1.16).

$$d_a = d + 2 \cdot m \pm 2 \cdot v \quad \text{σε mm} \quad (1.19\alpha)$$

$$d_f = d - 2 \cdot h_f \pm 2 \cdot v \quad \text{σε mm} \quad (1.19\beta)$$

$h_f = 1.167 \cdot m$ για προφίλ αναφοράς I και $h_f = 1.25 \cdot m$ για προφίλ αναφοράς II
 $+2 \cdot v$ για τροχούς V+, $-2 \cdot v$ για τροχούς V- (v απόλυτη τιμή)

Το πάχος του οδόντα πάνω στον αρχικό κύκλο μεγαλώνει ή μικραίνει έναντι της κανονικής οδόντωσης κατά $2 \cdot v \cdot \tan \alpha = 2 \cdot x \cdot m \cdot \tan \alpha$.

$$s = \frac{p}{2} \pm 2 \cdot x \cdot m \cdot \tan \alpha = m \left(\frac{\pi}{2} \pm 2 \cdot x \cdot \tan \alpha \right) \quad \text{σε mm} \quad (1.20)$$

+ για τροχούς V+, - για τροχούς V- (x απόλυτη τιμή) [1]

1.7 Μελέτη περίπτωσης

Οι διάφοροι τύποι μειωτήρων καθορίζονται από τη μετατροπή της κίνησης που είναι επιθυμητή και αξιοποιούν διάφορους τύπους οδοντωτών τροχών από αυτούς που προαναφέρθηκαν, προκειμένου να επιτύχουν τη ζητούμενη σχέση μετάδοσης. Στους διάφορους τύπους άλλωστε των μειωτήρων χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχοι τύποι γραναζιών. Για παράδειγμα, σε ένα ευθύγραμμο μειωτήρα που είναι μειωτήρας παράλληλων αξόνων χρησιμοποιούνται μετωπικά γρανάζια, ενώ στους γωνιακούς μειωτήρες χρησιμοποιούνται κωνικά γρανάζια ή γρανάζια ατέρμονα κοχλία – κορώνας. Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφεί μια συγκεκριμένη εφαρμογή ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών.

Το ζεύγος οδοντωτών τροχών προς μελέτη είναι ένας μονοβάθμιος μειωτήρας στροφών παράλληλων αξόνων. Οι τροχοί είναι μετωπικοί με ευθεία οδόντωση. Ο μειωτήρας βρίσκεται στον μονοκύλινδρο κινητήρα μοτοσυκλέτας *Honda C50* και μεταφέρει την ισχύ από τον στροφαλοφόρο άξονα στον πρωτεύοντα άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων. Ο κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν), είναι τοποθετημένος επάνω στον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα και περιστρέφεται μέσω εδράνου ολίσθησης γύρω του. Επίσης, είναι συνδεδεμένος μέσω ενός οδοντωτού τροχού εσωτερικής οδόντωσης με τον συμπλέκτη ο οποίος του μεταφέρει την ισχύ του στροφαλοφόρου άξονα. Ο κινούμενος οδοντωτός τροχός του μειωτήρα είναι τοποθετημένος επάνω στον πρωτεύοντα άξονα του κιβωτίου ταχυτήτων και του μεταφέρει την ισχύ που παραλαμβάνει από τον πρώτο τροχό. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σχήματα της εφαρμογής. Στο σχήμα 1.18 στην πάνω εικόνα παρουσιάζεται ο κινητήρας πριν την αποσυναρμολόγηση του. Στην μεσαία εικόνα, διακρίνεται ο κινούμενος οδοντωτός τροχός, ο οποίος συνδέεται με τον κινητήριο τροχό (δεν διακρίνεται), όπου με την σειρά συνδέεται με τον συμπλέκτη και στην συνέχεια με τον στροφαλοφόρο άξονα. Στην κάτω εικόνα μπορεί να διακριθεί το ζεύγος των τροχών σε συνεργασία, ο πρωτεύοντας άξονας του κιβωτίου ταχυτήτων που συνδέεται με τον κινούμενο οδοντωτό τροχό, καθώς και ο στροφαλοφόρος που συνδέεται με τον κινητήριο. Στο σχήμα 1.19 παρουσιάζεται το ζεύγος τροχών που θα μελετηθεί σε συνεργασία, ενώ στα 1.20, 121 οι οδοντωτοί τροχοί ξεχωριστά.

Τα δεδομένα της εφαρμογής που είναι γνωστά είναι τα εξής:

- Η ισχύς που αποδίδει ο κινητήρας στον στροφαλοφόρο άξονα είναι 4.8 HP
- Οι στροφές ανά λεπτό (*rpm*) του κινητήρα που αποδίδει αυτήν την ισχύ είναι 10000 *rpm*.



Σχήμα 1.18: Εικόνες από την διαδικασία αποσυναρμολόγησης του κινητήρα



Σχήμα 1.19: Το ζεύγος οδοντωτών τροχών προς μελέτη (μονοβάθμιος μειωτήρας)



Σχήμα 1.20: Ο κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν)



Σχήμα 1.21: Ο κινούμενος οδοντωτός τροχός

1.8 Σύνοψη - συμπεράσματα

Στον παρών κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στους οδοντωτούς τροχούς, περιγράφοντας τους διάφορους τύπους τους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μεγέθη τους, καθώς επίσης μια παρουσίαση του απαραίτητου θεωρητικού υπόβαθρου που θα χρειαστεί στα επόμενα κεφάλαια για την μελέτη και τον σχεδιασμό του ζεύγους οδοντωτών τροχών της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τέλος, έγινε μια περιγραφή της εφαρμογής της οποίας οι τροχοί (μειωτήρας) θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία μηχανών για τη μετάδοση κίνησης και τα διάφορα είδη τους μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε απαίτηση κατά τον σχεδιασμό μιας μηχανολογικής κατασκευής. Επίσης, κατά την ανάλυση των χαρακτηριστικών τους μεγεθών και διαστάσεων φάνηκε το πόσο πολύπλοκα μηχανολογικά εξαρτήματα είναι. Τέλος, η αποσυναρμολόγηση του κινητήρα της μοτοσυκλέτας για την λήψη του ζεύγους οδοντωτών τροχών ήταν μια καλή ευκαιρία κατανόησης τεχνικών σχεδίων, αφού χωρίς αυτά θα ήταν πολύ πιο δύσκολη και χρονοβόρα, αλλά και κατανόησης της λειτουργίας των διάφορων μηχανολογικών εξαρτημάτων του.

1.9 Βιβλιογραφία

- [1] Ιωάννης Κ. Στεργίου, Κωνσταντίνος Ι. Στεργίου, 2002, «Στοιχεία Μηχανών II: Μετάδοση κίνησης», Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα.
- [2] Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, 2009, «Στοιχεία Μηχανών: Στοιχεία μεταφοράς ισχύος, Τόμος Β», Εκδόσεις Τζιόλα.

URLs:

- [3]<http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=73>
- [4]<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/Drawing/THEORIA/EIDH%20TROXWN.html>
- [5]<http://engineering.indiabizclub.com/products/worm+wheel>
- [6]<http://etam8-16.blogspot.com/>

Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός οδοντωτών τροχών

Περιεχόμενα

2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Μετρήσεις και υπολογισμοί γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οδοντωτών τροχών.....	31
2.2.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν).....	31
2.2.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	36
2.2.3 Απόσταση αξόνων.....	43
2.3 Σχεδιασμός των οδοντωτών τροχών μέσω του λογισμικού <i>Pro/ENGINEER Wildfire 4</i>	44
2.3.1 Εισαγωγή.....	44
2.3.1.1 Η οδόντωση εξειλιγμένης καμπύλης.....	45
2.3.1.2 Σχεδιασμός καμπύλης από εξίσωση.....	46
2.3.1.3 Σχεδίαση του οδοντωτού τροχού.....	47
2.3.2 Κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν).....	48
2.3.2.1 Δημιουργία της εξειλιγμένης καμπύλης μέσω εξισώσεων.....	48
2.3.2.2 Δημιουργία του κυλίνδρου.....	50
2.3.2.3 Σχεδιασμός των τριών κύριων κύκλων (αρχικός, βασικός, πόδα).....	52
2.3.2.4 Δημιουργία σημείου αναφοράς.....	53
2.3.2.5 Δημιουργία ενός νέου σημείου αναφοράς και μίας καμπύλης.....	54
2.3.2.6 Δημιουργία χαρακτηριστικού αποτίμησης (evaluate).....	55
2.3.2.7 Αντιγραφή της εξειλιγμένης καμπύλης.....	56
2.3.2.8 Προσθήκη μιας σχέσης και ανανέωση (regenerate) του αντικειμένου..	57

2.3.2.9 Ανάποδη αντιγραφή (mirror) του αντιγράφου της εξειλιγμένης καμπύλης.....	58
2.3.2.10 Δημιουργία κι άλλου αντιγράφου της εξειλιγμένης καμπύλης.....	59
2.3.2.11 Δημιουργία του διάκενου ανάμεσα στους οδόντες.....	60
2.3.2.12 Δημιουργία των οδόντων με αντιγραφή του διάκενου περιμετρικά (Pattern).....	64
2.3.2.13 Δημιουργία του fillet των οδόντων.....	65
2.3.2.14 Δημιουργία της οπής.....	67
2.3.2.15 Δημιουργία των Chamfer του οδόντα και της οπής.....	69
2.3.3 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	72
2.3.3.1 Δημιουργία των περιμετρικών οπών.....	73
2.3.3.2 Δημιουργία εσοχών και Chamfer του οδόντα.....	75
2.3.3.3 Δημιουργία των Chamfer στις οπές.....	77
2.3.4 Ζεύγος οδοντωτών τροχών σε συνεργασία.....	78
2.3.4.1 Εισαγωγή του κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	78
2.3.4.2 Εισαγωγή και τοποθέτηση του κινούμενου οδοντωτού τροχού.....	79
2.3.5 Ανοχές.....	81
2.3.5.1 Παραδοχές.....	82
2.3.5.2 Σύστημα ανοχών ISO.....	82
2.3.6 Τραχύτητα επιφάνειας.....	83
2.3.6.1 Τοπογραφία επιφανειών.....	84
2.3.6.2 Αποκλίσεις μηχανολογικών επιφανειών από την επιπεδότητα.....	85
2.3.6.3 Τραχύτητα επιφανειών.....	86
2.3.6.4 Μέτρηση γεωμετρικών αποκλίσεων επιφανειών σε δυο διαστάσεις... ..	87
2.3.6.4.1 Ηλεκτρομηχανικά Τραχύμετρα.....	88
2.3.6.5 Μέτρα τραχύτητας.....	89
2.3.6.5.1 Μέση γραμμή.....	89
2.3.6.5.2 Μέση αριθμητική τραχύτητα Ra.....	90
2.3.6.5.3 Μέγιστο βάθος ή μέγιστη τραχύτητα Rt.....	90
2.3.6.5.4 Καμπύλη Φέρουσας Επιφάνειας.....	91
2.3.6.6 Μέτρηση της μέσης τραχύτητας (Ra) των οδόντων των τροχών.....	91
2.3.7 Τελικά μηχανολογικά σχέδια.....	93
2.3.7.1 Μηχανολογικό σχέδιο κινητήριου οδοντωτού τροχού.....	93
2.3.7.2 Εκτυπωμένα τελικά μηχανολογικά σχέδια.....	96
2.4 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	97
2.5 Βιβλιογραφία.....	98

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα περιγραφεί η διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και διαστάσεων των δύο οδοντωτών τροχών που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον σχεδιασμό τους μέσω H/Y. Στην συνέχεια θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία τρισδιάστατης απεικόνισης των τροχών μέσω του σχεδιαστικού λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Κατόπιν, θα γίνει μια γενική περιγραφή των ανοχών διαστάσεων και της εύρεσης των ανοχών για τις διαστάσεις των οδοντωτών τροχών, που στην συνέχεια θα εισαχθούν στα μηχανολογικά σχέδια. Επίσης, θα γίνει αναφορά στην τραχύτητα επιφάνειας και στην διαδικασία μέτρησης της τραχύτητας των επιφανειών των οδόντων των τροχών, που επίσης απαιτείται στα σχέδια τους. Τέλος, θα περιγραφεί η διαδικασία δημιουργίας των τελικών μηχανολογικών σχεδίων των τροχών από τις τρισδιάστατες απεικονίσεις τους, με την χρήση του ίδιου λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*.

2.2 Διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οδοντωτών τροχών

Οι δύο οδοντωτοί τροχοί θα σχεδιαστούν με την βοήθεια H/Y, με το λογισμικό *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Για τον σχεδιασμό τους απαιτείται να μετρηθούν και να υπολογιστούν κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, ώστε να εισαχθούν σαν δεδομένα στο λογισμικό. Αρχικά θα μελετηθεί ο κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν) και κατόπιν ο κινούμενος.

2.2.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τον σχεδιασμό του κινητήριου οδοντωτού τροχού είναι τα εξής:

- Πλάτος οδόντα b
- Διάμετρος κύκλου κεφαλής d_a
- Διάμετρος κύκλου πόδα d_f
- Διάμετρος βασικού κύκλου d_b
- Διάμετρος αρχικού κύκλου d
- Βήμα αρχικού κύκλου σε μοίρες p

Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός οδοντωτών τροχών

- Πάχος οδόντα σε μοίρες s
- Αριθμός οδόντων z
- Διάμετρος κεντρικής οπής
- Ακτίνα fillet οδόντα
- Chamfer οδόντα
- Chamfer κεντρικής οπής

Κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά από τα παραπάνω θα μετρηθούν πάνω στον οδοντωτό τροχό με την βοήθεια μετρητικού οργάνου (παχύμετρου) και κάποια άλλα θα υπολογιστούν με μαθηματικούς τύπους.

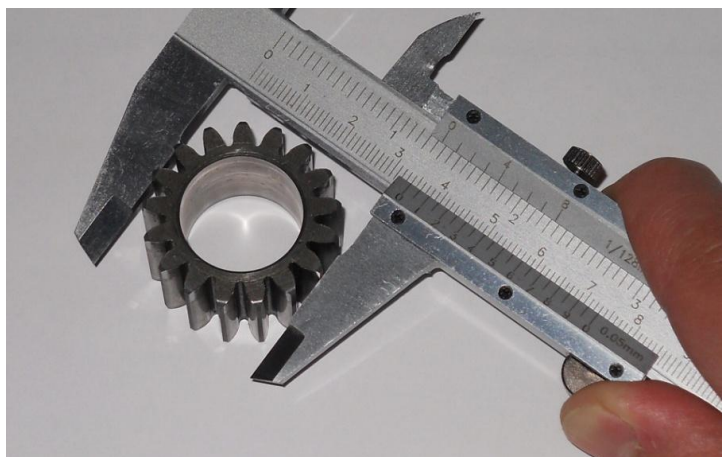
Το πρώτο γεωμετρικό χαρακτηριστικό του τροχού που μετρήθηκε με χρήση παχυμέτρου είναι το πλάτος του οδόντα $b = 20 \text{ mm}$ (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Μέτρηση του πλάτους του οδόντα

Επίσης μετρήθηκαν οι οδόντες του τροχού $z = 17$ οδόντες.

Κατόπιν έγινε μέτρηση της διαμέτρου κύκλου κεφαλής του τροχού $d_a = 34.5 \text{ mm}$ (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Μέτρηση διαμέτρου κύκλου κεφαλής

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί το *module* από την σχέση 1.8 ως εξής:

$$d_a = m \cdot (z + 2) \Rightarrow 34.5 = m \cdot (17 + 2) \Rightarrow m \approx 1.82$$

Από τον πίνακα 1.1 με τις τυποποιημένες τιμές module επιλέγεται η κοντινότερη τιμή $m = 1.75 \text{ mm}$.

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί η θεωρητική τιμή της διαμέτρου του κύκλου κεφαλής και θα είναι:

$$d_a = m \cdot (z + 2) = 1.75 \cdot (17 + 2) = 33.25 \text{ mm}$$

Παρατηρείται ότι η πραγματική τιμή της διαμέτρου του κύκλου κεφαλής που μετρήθηκε διαφέρει από την θεωρητική και είναι μεγαλύτερη ($34.5 > 33.25$). Επομένως, ο οδοντωτός τροχός έχει υποστεί θετική μετατόπιση (τροχός V+) η οποία πρέπει να βρεθεί για να υπολογιστούν η διάμετρος κύκλου πόδα και το πάχος οδόντα στον αρχικό κύκλο που έχουν μεταβληθεί. Ο αριθμός των οδόντων του οδοντωτού τροχού είναι ο θεωρητικά οριακός αριθμός για την δημιουργία υποκοπών ($z = z_g = 17$) και μεγαλύτερος από τον πρακτικά οριακό αριθμό ($z = 17 > z'_g = 14$). Επομένως, εφόσον δεν υπάρχει κίνδυνος για δημιουργία υποκοπών, εφαρμόστηκε στον τροχό μια θετική μετατόπιση για να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη απόσταση αξόνων για κατασκευαστικούς λόγους, αλλά πιθανώς και για αύξηση της αντοχής του. Η μετατόπιση v μπορεί να βρεθεί από την σχέση 1.19α για τροχούς V+ ξέροντας την πραγματική διάμετρο κύκλου κεφαλής με μετατόπιση ως εξής:

$$d_a = d + 2 \cdot m + 2 \cdot v \Leftrightarrow v = \frac{d_a - d - 2 \cdot m}{2} = \frac{34.5 - 29.75 - 2 \cdot 1.75}{2} = 0.625$$

Η γωνία επαφής δεν μπορεί να μετρηθεί ούτε να υπολογιστεί εάν δεν είναι γνωστή η διάμετρος βασικού κύκλου. Θα θεωρηθεί $\alpha = 20^\circ$ καθώς είναι η συνηθέστερη τιμή. Με την γωνία επαφής και γνωρίζοντας το module και την τιμή της μετατόπισης μπορούν να υπολογιστούν τα εξής:

$$\text{Διάμετρος αρχικού κύκλου } d = m \cdot z = 1.75 \cdot 17 \approx 29.75 \text{ mm (σχέση 1.4)}$$

$$\text{Διάμετρος βασικού κύκλου } d_b = d \cdot \cos \alpha = 29.75 \cdot \cos 20^\circ \approx 27.96 \text{ mm (σχέση 1.11)}$$

$$\text{Διάμετρος κύκλου πόδα } d_f = d - 2 \cdot h_f + 2 \cdot v = d - 2 \cdot 1.25 \cdot m + 2 \cdot v = 29.75 - 2 \cdot 1.25 \cdot 1.75 + 2 \cdot 0.625 \approx 26.63 \text{ mm (σχέση 1.19β για τροχούς V+)}$$

παίρνοντας $h_f = 1.25 \cdot m$ για προφίλ αναφοράς II σαν το πιο σύνηθες.

$$\text{Βήμα αρχικού κύκλου σε μοίρες } p = \frac{360 \cdot m}{d} = \frac{360 \cdot 1.75}{29.75} = 21.17647059^\circ$$

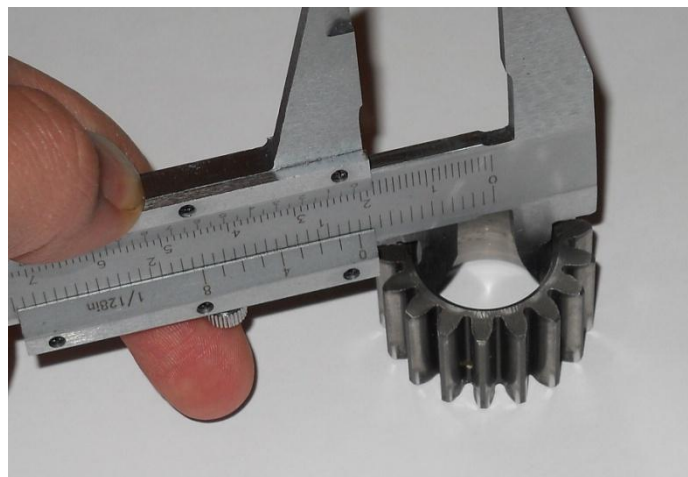
(ο τύπος προκύπτει από την σχέση 1.4 μετατρέποντας το μήκος τόξου σε μοίρες – η τιμή του βήματος που θα εισαχθεί στο λογισμικό θα χρειαστεί με μεγάλη ακρίβεια για την αποφυγή σχεδιαστικών λαθών)

Πάχος οδόντα σε μοίρες

$$s = \frac{79}{160} \cdot p + \frac{2 \cdot v \cdot \tan \alpha \cdot 360}{d \cdot \pi} = \frac{79}{160} \cdot 21.18 + \frac{2 \cdot 0.625 \cdot \tan 20^\circ \cdot 360}{29.75 \cdot \pi} \approx 12.21^\circ$$

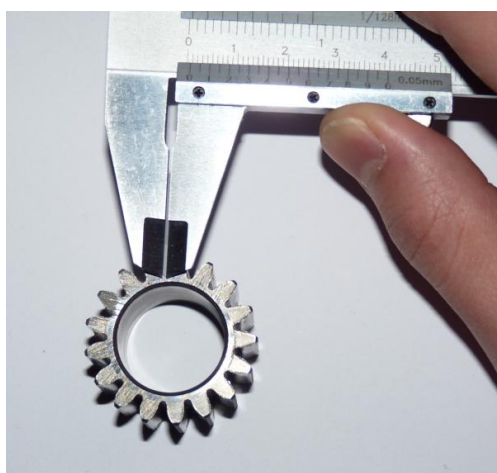
(από την σχέση 1.20 για τροχούς V+, παίρνοντας για το πάχος χωρίς μετατόπιση αντί για $p/2$ την μεσαία τιμή για κατεργασμένους οδόντες και μετατρέποντας το μήκος τόξου σε μοίρες)

Επόμενο γεωμετρικό χαρακτηριστικό του τροχού που μετρήθηκε είναι η διάμετρος της κεντρικής οπής του τροχού 21 mm (σχήμα 2.3).

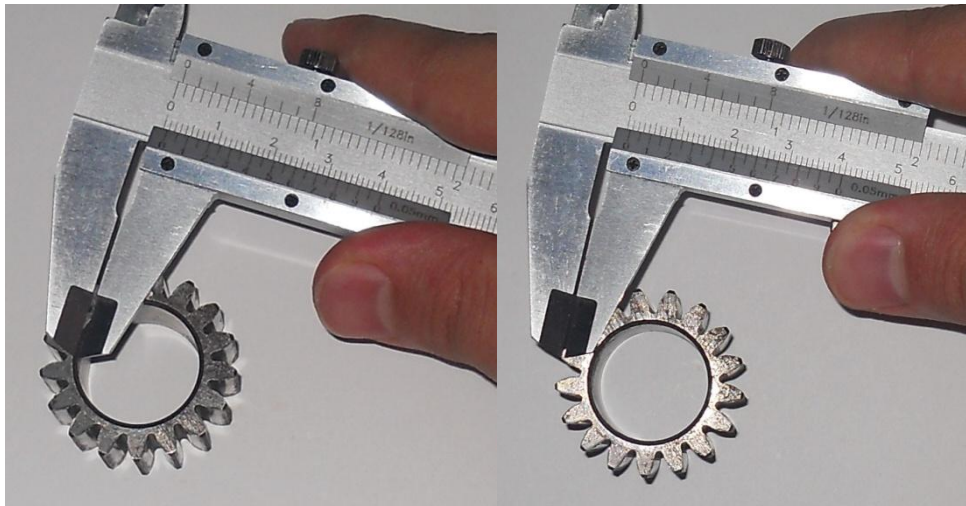


Σχήμα 2.3: Μέτρηση της διαμέτρου της κεντρικής οπής

Τέλος, μετρήθηκε η ακτίνα του fillet στον οδόντα 0.65 mm (σχήμα 2.4) και για τον υπολογισμό των chamfer μετρήθηκαν οι δύο πλευρές των ορθογώνιων τριγώνων τα οποία αφαιρούνται (όχι η υποτείνουσα) (σχήμα 2.5), οι οποίες και στις τρεις περιπτώσεις είναι ίσες δηλαδή τα τρίγωνα είναι ισοσκελή. Είναι στον οδόντα 0.6 mm και στην κεντρική οπή 0.6 mm από την μία πλευρά και 0.8 mm από την άλλη. Η μέτρηση των διαστάσεων των fillet και chamfer και στους δύο οδοντωτούς τροχούς γίνεται κατά προσέγγιση, εφόσον δεν επηρεάζουν την λειτουργία των τροχών.



Σχήμα 2.4: Μέτρηση της ακτίνας fillet του οδόντα



Σχήμα 2.5: Μέτρηση των chamfer

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήριου οδοντωτού τροχού με τις τιμές τους.

Πίνακας 2.1: Απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον σχεδιασμό του κινητήριου οδοντωτού τροχού

Περιγραφή	Συμβολισμός	Τιμή
Πλάτος οδόντα	b	20 mm
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	d_a	34.5 mm
Διάμετρος κύκλου πόδα	d_f	26.63 mm
Διάμετρος βασικού κύκλου	d_b	27.96 mm
Διάμετρος αρχικού κύκλου	d	29.75 mm
Βήμα αρχικού κύκλου σε μοίρες	p	21.17647059°
Πάχος οδόντα σε μοίρες	s	12.21°
Αριθμός οδόντων	z	17 οδόντες
Διάμετρος κεντρικής οπής	-	21 mm
Ακτίνα fillet οδόντα	-	0.65 mm
Chamfer οδόντα	-	0.6 mm
Chamfer κεντρικής οπής	-	0.6 mm/0.8 mm

2.2.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τον σχεδιασμό του κινητήριου οδοντωτού τροχού είναι τα εξής:

- Πλάτος οδόντα b
- Διάμετρος κύκλου κεφαλής d_a
- Διάμετρος κύκλου πόδα d_f
- Διάμετρος βασικού κύκλου d_b
- Διάμετρος αρχικού κύκλου d
- Βήμα αρχικού κύκλου σε μοίρες p
- Πάχος οδόντα σε μοίρες s
- Αριθμός οδόντων z
- Διάμετρος κεντρικής οπής και περιμετρικών οπών
- Ακτίνα τοποθέτησης περιμετρικών οπών
- Ακτίνα fillet οδόντα
- Chamfer οδόντα
- Chamfer οπών
- Βάθος μεγάλης εσοχής
- Ακτίνες μεγάλης εσοχής
- Ακτίνα ημικύκλιας εσοχής
- Ακτίνα τοποθέτησης ημικύκλιας εσοχής

Αρχικά μετρήθηκε με χρήση παχυμέτρου το πλάτος του οδόντα $b = 13 \text{ mm}$ (σχήμα 2.6) και μετρήθηκαν οι οδόντες $z = 69$ οδόντες. Άρα η σχέση μετάδοσης

$$\text{είναι: } i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{69}{17} \approx 4.06$$



Σχήμα 2.6: Μέτρηση του πλάτους του οδόντα

Κατόπιν έγινε μέτρηση της διαμέτρου κύκλου κεφαλής του τροχού $d_a = 121.5$ mm (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Μέτρηση διαμέτρου κύκλου κεφαλής

Η θεωρητική τιμή της διαμέτρου του κύκλου κεφαλής και θα είναι:

$$d_a = m \cdot (z + 2) = 1.75 \cdot (69 + 2) = 124.25 \text{ mm}$$

Παρατηρείται και εδώ ότι η πραγματική τιμή της διαμέτρου του κύκλου κεφαλής που μετρήθηκε διαφέρει από την θεωρητική και είναι μικρότερη ($121.5 < 124.25$). Επομένως, ο οδοντωτός τροχός έχει υποστεί αρνητική μετατόπιση (τροχός V-) η οποία πρέπει να βρεθεί. Προφανώς εφόσον ο κινητήριος οδοντωτός τροχός που έχει λιγότερους οδόντες δεν έχει κίνδυνο για δημιουργία υποκοπών, δεν θα έχει ούτε ο κινούμενος που έχει πολλούς περισσότερους οδόντες. Και εδώ η μετατόπιση εφαρμόστηκε για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη απόσταση αξόνων. Η μετατόπιση v θα βρεθεί από την σχέση 1.19α για τροχούς V- ξέροντας την πραγματική διάμετρο κύκλου κεφαλής με μετατόπιση ως εξής:

$$d_a = d + 2 \cdot m - 2 \cdot v \Leftrightarrow v = \frac{d + 2 \cdot m - d_a}{2} = \frac{120.75 + 2 \cdot 1.75 - 121.5}{2} = 1.375$$

Θεωρώντας την γωνία επαφής $\alpha = 20^\circ$ και γνωρίζοντας το module και την τιμή της μετατόπισης μπορούν να υπολογιστούν τα εξής:

$$\text{Διάμετρος αρχικού κύκλου } d = m \cdot z = 1.75 \cdot 69 \approx 120.75 \text{ mm (σχέση 1.4)}$$

$$\text{Διάμετρος βασικού κύκλου } d_b = d \cdot \cos \alpha = 120.75 \cdot \cos 20^\circ \approx 113.47 \text{ mm (σχέση 1.11)}$$

$$\text{Διάμετρος κύκλου πόδα } d_f = d - 2 \cdot h_f - 2 \cdot v = d - 2 \cdot 1.25 \cdot m - 2 \cdot v = 120.75 - 2 \cdot 1.25 \cdot 1.75 - 2 \cdot 1.375 \approx 113.63 \text{ mm (σχέση 1.19β για τροχούς V+)}$$

παίρνοντας $h_f = 1.25 \cdot m$ για προφίλ αναφοράς II σαν το πιο σύνηθες.

$$\text{Βήμα αρχικού κύκλου σε μοίρες } p = \frac{360 \cdot m}{d} = \frac{360 \cdot 1.75}{120.75} = 5.217391304^\circ$$

(ο τύπος προκύπτει από την σχέση 1.4 μετατρέποντας το μήκος τόξου σε μοίρες - η τιμή του βήματος που θα εισαχθεί στο λογισμικό θα χρειαστεί με μεγάλη ακρίβεια για την αποφυγή σχεδιαστικών λαθών)

Πάχος οδόντα σε μοίρες

$$s = \frac{79}{160} \cdot p - \frac{2 \cdot v \cdot \tan \alpha \cdot 360}{d \cdot \pi} = \frac{79}{160} \cdot 5.22 - \frac{2 \cdot 1.375 \cdot \tan 20^\circ \cdot 360}{120.75 \cdot \pi} \approx 1.63^\circ$$

(από την σχέση 1.20 για τροχούς V-, παίρνοντας για το πάχος χωρίς μετατόπιση αντί για $p/2$ την μεσαία τιμή για κατεργασμένους οδόντες και μετατρέποντας το μήκος τόξου σε μοίρες)

Στην συνέχεια μετρήθηκε η διάμετρος της κεντρικής οπής 30 mm και των άλλων έξι περιμετρικών οπών του τροχού 26 mm (σχήμα 2.8). Η ακτίνα τοποθέτησης των περιμετρικών οπών υπολογίστηκε μετρώντας την απόσταση της περιμέτρου της κεντρικής οπής από την περίμετρο των άλλων οπών (σχήμα 2.9) 3 mm και προσθέτοντας τις ακτίνες της κεντρικής και των περιμετρικών οπών $3 + 15 + 13 = 31$ mm.

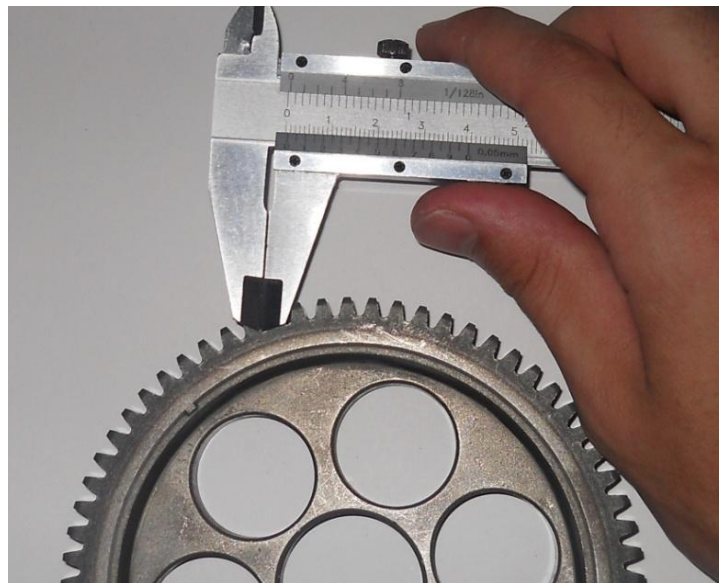


Σχήμα 2.8: Μέτρηση της διαμέτρου της κεντρικής οπής και των περιμετρικών οπών

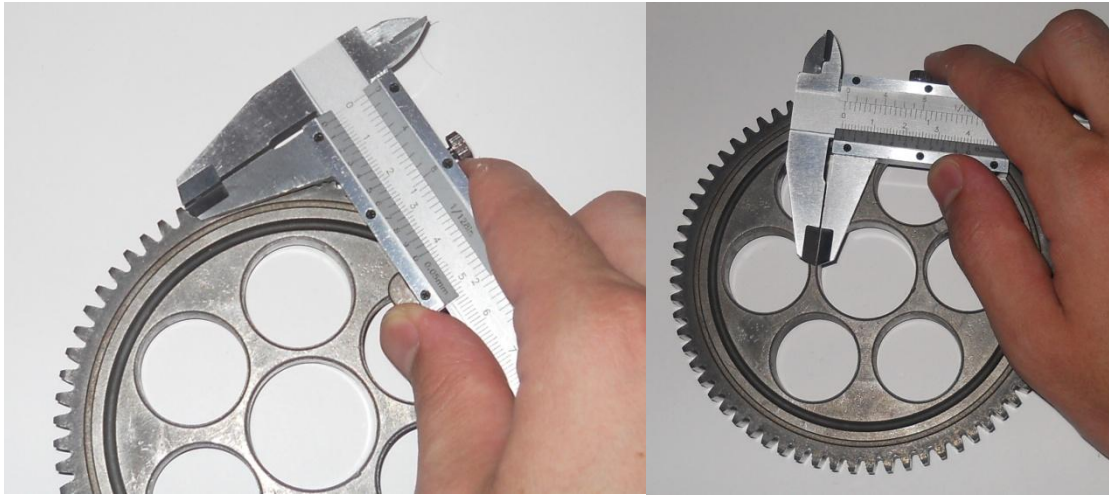
Το επόμενο γεωμετρικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν είναι η ακτίνα του fillet στον οδόντα 0.2 mm (σχήμα 2.10) και για τον υπολογισμό των chamfer μετρήθηκαν οι πλευρές των τριγώνων που θα αφαιρεθούν 0.3 mm η μικρή και 1.5 mm η μεγάλη στον οδόντα και 0.6 mm και οι δύο στις οπές (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.9: Μέτρηση της απόστασης της περιμέτρου της κεντρικής οπής από την περίμετρο των άλλων οπών



Σχήμα 2.10: Μέτρηση της ακτίνας fillet του οδόντα

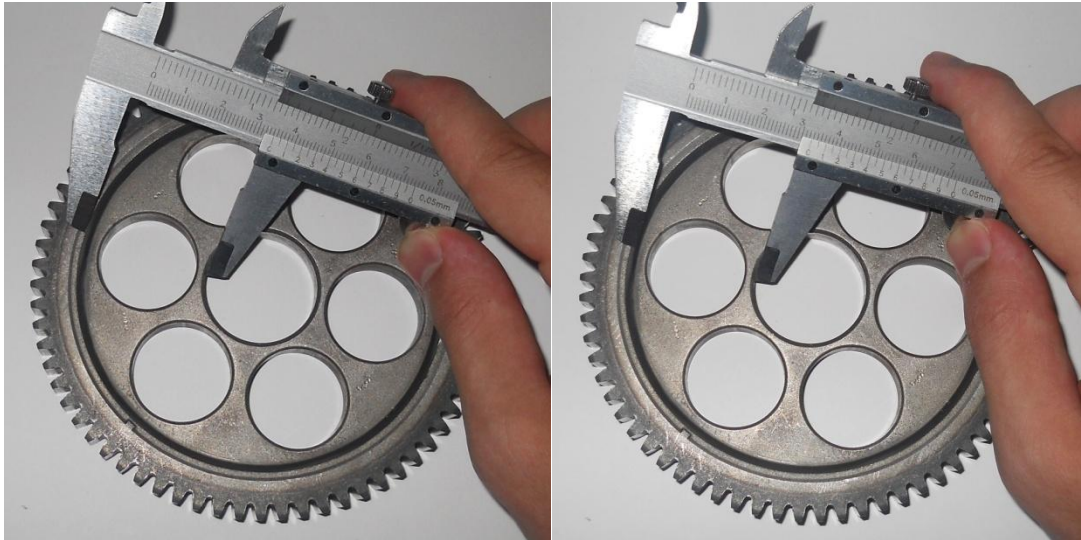


Σχήμα 2.11: Μέτρηση των chamfer

Κατόπιν μετρήθηκε το βάθος της μεγάλης εσοχής 4 mm (σχήμα 2.12) και οι ακτίνες των κύκλων της υπολογίστηκαν μετρώντας τις αποστάσεις της περιμέτρου της κεντρικής οπής από τις περιμέτρους των δύο κύκλων της (σχήμα 2.13) 31.5 mm και 33.5 mm και προσθέτοντας την ακτίνα της κεντρικής οπής $31.5 + 15 = 46.5$ mm η μικρή και $33.5 + 15 = 48.5$ mm η μεγάλη.



Σχήμα 2.12: Μέτρηση του βάθους της μεγάλης εσοχής



Σχήμα 2.13: Μέτρηση των αποστάσεων της περιμέτρου της κεντρικής οπής από τις περιμέτρους των δύο κύκλων της εσοχής

Τέλος, υπολογίστηκε η ακτίνα της ημικύκλιας εσοχής μετρώντας την διάμετρο της $3 \text{ mm} / 2 = 1.5 \text{ mm}$ (σχήμα 2.14) και η ακτίνα τοποθέτησης της εσοχής μετρώντας την απόσταση των περιμέτρων των περιμετρικών οπών από την εσοχή (σχήμα 2.15) 2 mm και προσθέτοντας την ακτίνα τοποθέτησης των περιμετρικών οπών και την ακτίνα των οπών $2 + 31 + 13 = 46 \text{ mm}$.



Σχήμα 2.14: Μέτρηση της διαμέτρου της ημικύκλιας εσοχής



Σχήμα 2.15: Μέτρηση της απόστασης των περιμέτρων των περιμετρικών οπών από την ημικύκλια εσοχή

Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινούμενου οδοντωτού τροχού με τις τιμές τους.

Πίνακας 2.2: Απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον σχεδιασμό του κινούμενου οδοντωτού τροχού

Περιγραφή	Συμβολισμός	Τιμή
Πλάτος οδόντα	b	13 mm
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	d_a	121.5 mm
Διάμετρος κύκλου πόδα	d_f	113.63 mm
Διάμετρος βασικού κύκλου	d_b	113.47 mm
Διάμετρος αρχικού κύκλου	d	120.75 mm
Βήμα αρχικού κύκλου σε μοίρες	p	5.217391304°
Πάχος οδόντα σε μοίρες	s	1.63°
Αριθμός οδόντων	z	69 οδόντες
Διάμετρος κεντρικής οπής και περιμετρικών οπών	-	30 mm / 26 mm
Ακτίνα τοποθέτησης περιμετρικών οπών	-	31 mm
Ακτίνα fillet οδόντα	-	0.2 mm
Chamfer οδόντα	-	0.3 mm / 1.5 mm
Chamfer οπών	-	0.6 mm
Βάθος μεγάλης εσοχής	-	4 mm
Ακτίνες μεγάλης εσοχής	-	46.5 mm / 48.5 mm
Ακτίνα ημικύκλιας εσοχής	-	1.5 mm
Ακτίνα τοποθέτησης ημικύκλιας εσοχής	-	46 mm

2.2.3 Απόσταση αξόνων

Ένα άλλο απαραίτητο γεωμετρικό χαρακτηριστικό που πρέπει να υπολογιστεί για τον σχεδιασμό του ζεύγους των οδοντωτών τροχών σε συνεργασία είναι η απόσταση των αξόνων τους. Για να υπολογιστεί η απόσταση των αξόνων αρχικά μετρήθηκε η μέγιστη απόσταση των κύκλων κεφαλής των τροχών 152.4 mm ενώ οι τροχοί βρίσκονται σε συνεργασία (σχήμα 2.16). Κατόπιν από την τιμή που μετρήθηκε αφαιρούνται οι ακτίνες των κύκλων κεφαλής των τροχών

$$\alpha = 152.4 - \frac{d_{a1} + d_{a2}}{2} = 152.4 - \frac{34.5 + 121.5}{2} = 74.4 \text{ mm}$$



Σχήμα 2.16: Μέτρηση της μέγιστης απόστασης των κύκλων κεφαλής των τροχών

2.3 Σχεδιασμός των οδοντωτών τροχών μέσω του λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*

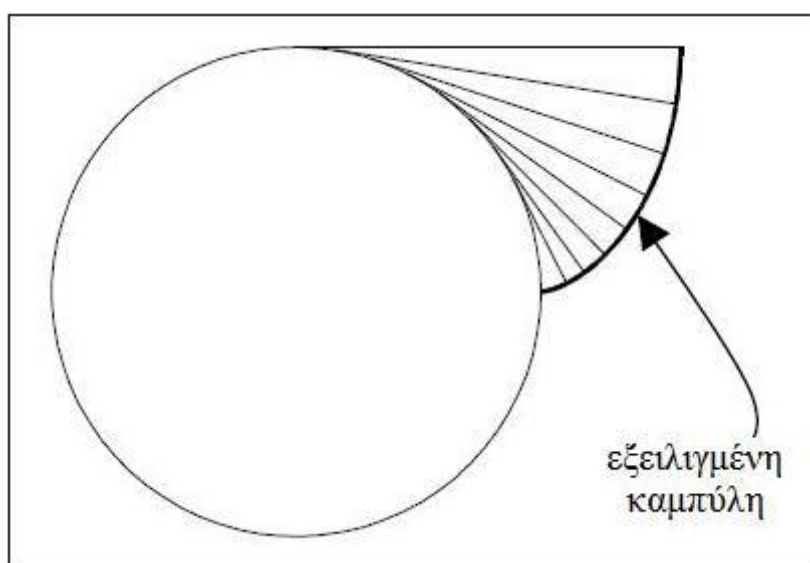
Αφού μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδοντωτών τροχών μπορεί ξεκινήσει η διαδικασία σχεδιασμού τους, πρώτα με την δημιουργία των τρισδιάστατων απεικονίσεων τους και κατόπιν με την δημιουργία των τελικών μηχανολογικών σχεδίων τους. Αρχικά θα γίνει μια εισαγωγή στη μέθοδο σχεδιασμού ενός οδοντωτού τροχού στο *Pro/ENGINEER Wildfire 4*.

2.3.1 Εισαγωγή

Το *Pro/ENGINEER* είναι μία παραμετρική, ολοκληρωμένη λύση για 3D CAD/CAM/CAE που δημιουργήθηκε από την εταιρία Parametric Technology Corporation (PTC) στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Ήταν το πρώτο λογισμικό στην αγορά σχετικό με παραμετρική, βασιζόμενη στα χαρακτηριστικά μοντελοποίηση στερεών. Η εφαρμογή τρέχει σε πλατφόρμα Microsoft Windows και παρέχει μοντελοποίηση στερεών και συναρμολόγησης, μηχανολογικό σχεδιασμό, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και σχεδιασμό ψηφιακού ελέγχου (NC) και κατεργασιών με εργαλειομηχανές για μηχανολόγους μηχανικούς. [3]

2.3.1.1 Η οδόντωση εξειλιγμένης καμπύλης

Οι οδοντωτοί τροχοί που θα σχεδιαστούν χρησιμοποιούν την οδόντωση εξειλιγμένης καμπύλης. Για την καλύτερη κατανόηση της εξειλιγμένης καμπύλης μπορεί να θεωρηθεί ένας κύλινδρος και ένα σκοινί το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω του. Η καμπύλη εξειλιγμένης είναι η νοητή καμπύλη που διαγράφει η άκρη του σκοινιού, καθώς το σκοινί τεντωμένο ξετυλίγεται γύρω από τον κύλινδρο. (σχήμα 2.17)

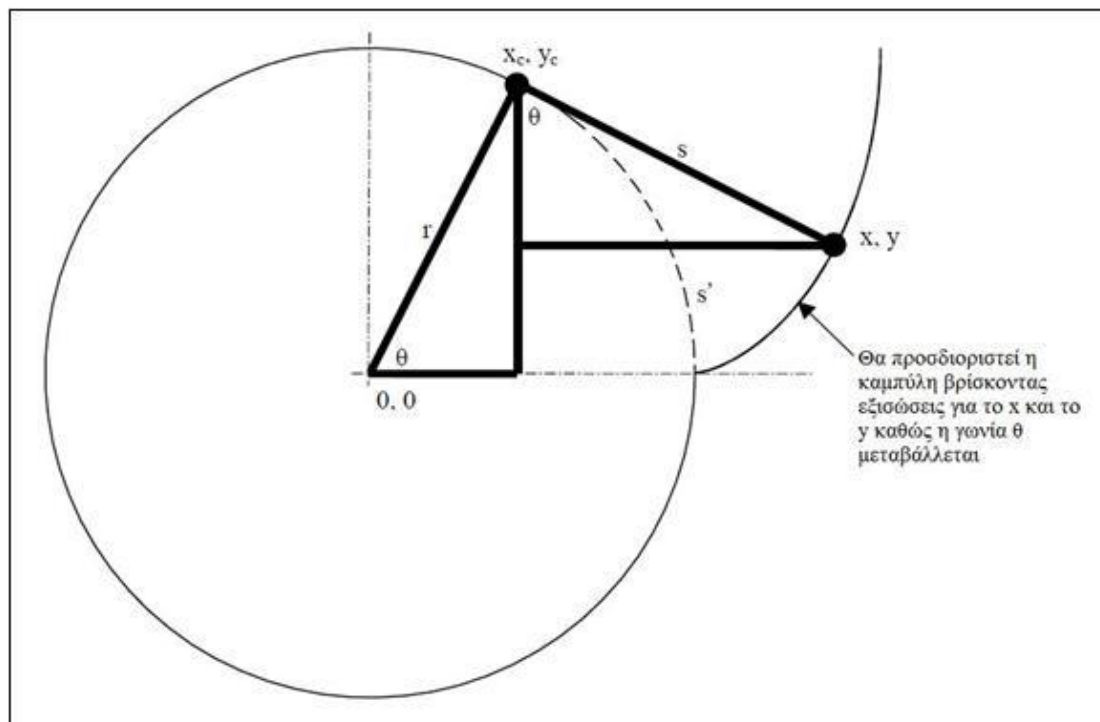


Σχήμα 2.17: Η εξειλιγμένη καμπύλη [4]

Οι δύο παράμετροι που ελέγχουν την καμπύλη εξειλιγμένης είναι η διάμετρος του κύλινδρου και η γωνία που το σκοινί έχει ξετυλιχτεί γύρω από τον κύλινδρο. Στο παραπάνω παράδειγμα το σκοινί έχει ξετυλιχτεί 90° γύρω από τον κύλινδρο.

Η ανάπτυξη των μαθηματικών εξισώσεων για την εξειλιγμένη καμπύλη χρησιμοποιεί απλή τριγωνομετρία. Θα αναπτυχθούν οι εξισώσεις για μια εξειλιγμένη καμπύλη που δημιουργείται όταν ξετυλιχτεί το σκοινί 90° γύρω από τον κύλινδρο με φορά αντίστροφη του ρολογιού.

Η περίμετρος του κύκλου προσδιορίζεται από τον τύπο $c = 2 \cdot \pi \cdot r$. Τότε το ένα τέταρτο (90°) της περιμέτρου του κύκλου είναι $c = \frac{\pi \cdot r}{2}$. Στο σχήμα 2.18 παρακάτω, το ευθύγραμμο τμήμα s έχει το ίδιο μήκος με το τμήμα της περιμέτρου που το σκοινί έχει ξετυλιχτεί (s').



Σχήμα 2.18: Προσδιορισμός της εξειλιγμένης καμπύλης [4]

Χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρία βρίσκεται ότι:

$$\begin{aligned} x_c &= r \cdot \cos\theta & x &= x_c + (s \cdot \sin\theta) \\ y_c &= r \cdot \sin\theta & y &= y_c - (s \cdot \cos\theta) \end{aligned}$$

2.3.1.2 Σχεδιασμός καμπύλης από εξίσωση

Για τον σχεδιασμό καμπυλών μέσω του *Pro/ENGINEER* μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαθηματικές εξισώσεις. Όταν χρησιμοποιείται αυτό το χαρακτηριστικό, χρησιμοποιείται μία μεταβλητή του συστήματος t , η οποία κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 μεταβάλλοντας το μήκος της καμπύλης. Για την εξειλιγμένη καμπύλη θα θεωρηθεί η γωνία (ang) ίση με t φορές τις 90°. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβλητή ang θα κυμαίνεται από 0° μέχρι 90°.

Για τον προσδιορισμό του s θα συνδυαστεί η εξίσωση της περιμέτρου του κύκλου και μεταβλητή t οπότε θα είναι:

$$s = \left(\frac{\pi \cdot r}{2} \right) \cdot t$$

Σε αυτό το παράδειγμα η διάμετρος του κυλίνδρου είναι 38 mm. Αυτή είναι η διάμετρος βασικού κύκλου. Η ακτίνα r του κυλίνδρου είναι 19 mm. Οι εξισώσεις που θα εισαχθούν στο *Pro/ENGINEER* είναι:

$$r = 38$$

$$\text{ang} = t * 90$$

$$s = (\text{PI} * r * t) / 2$$

$$x_c = 19 * \cos(\text{ang})$$

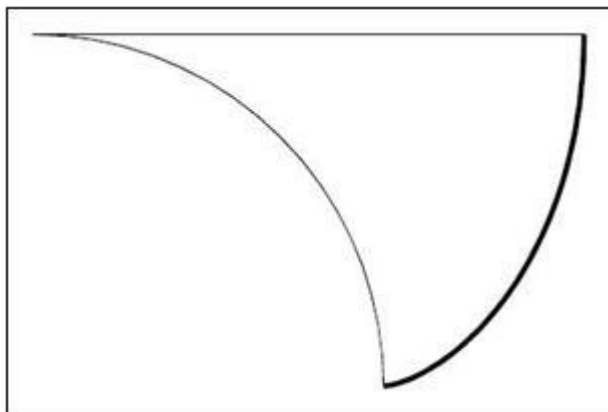
$$y_c = 19 * \sin(\text{ang})$$

$$x = x_c + (s * \sin(\text{ang}))$$

$$y = y_c - (s * \cos(\text{ang}))$$

$$z = 0$$

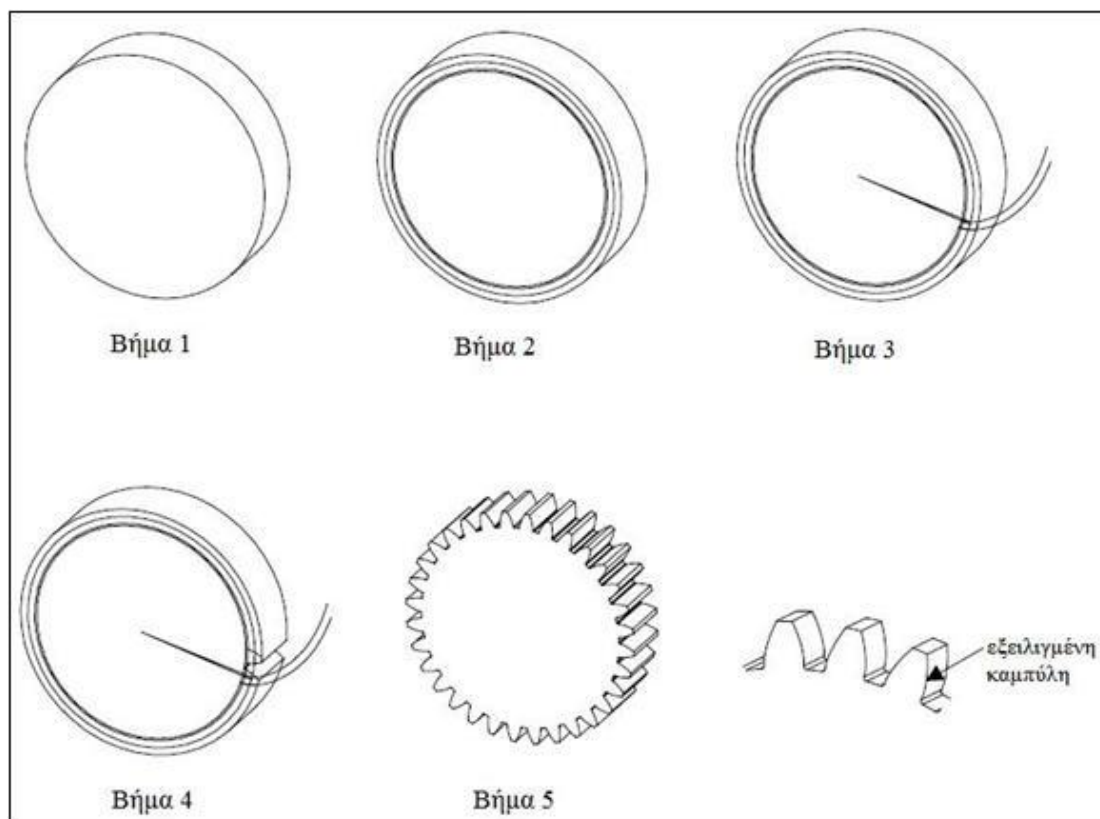
Η καμπύλη που θα προκύψει είναι η σκουρόχρωμη στο σχήμα 2.19 παρακάτω.



Σχήμα 2.19: Καμπύλη που σχεδιάστηκε μέσω εξισώσεων [4]

2.3.1.3 Σχεδίαση του οδοντωτού τροχού

Ο σχεδιασμός του οδοντωτού τροχού στο *Pro/ENGINEER* ξεκινά δημιουργώντας έναν κύλινδρο στην διάμετρο κύκλου κεφαλής του τροχού (σχήμα 2.20 – βήμα 1). Στην συνέχεια σχεδιάζονται ο κύκλος πόδα, ο βασικός και ο αρχικός κύκλος του τροχού (βήμα 2). Δημιουργείται η εξειλιγμένη καμπύλη και μετακινείται στην σωστή θέση για να ορίσει την μία πλευρά ενός οδόντα (βήμα 3). Η καμπύλη αντιγράφεται ανάποδα χρησιμοποιώντας το χαρακτηριστικό *mirror* και δημιουργείται το διάκενο ανάμεσα στους οδόντες χρησιμοποιώντας τα άκρα των εξειλιγμένων καμπυλών (βήμα 4). Το διάκενο αντιγράφεται περιμετρικά στον κύλινδρο δημιουργώντας τους υπόλοιπους οδόντες και τέλος στρογγυλοποιούνται οι βάσεις τους (*fillet*). Ο ολοκληρωμένος οδοντωτός τροχός παρουσιάζεται στο βήμα 5. [4]



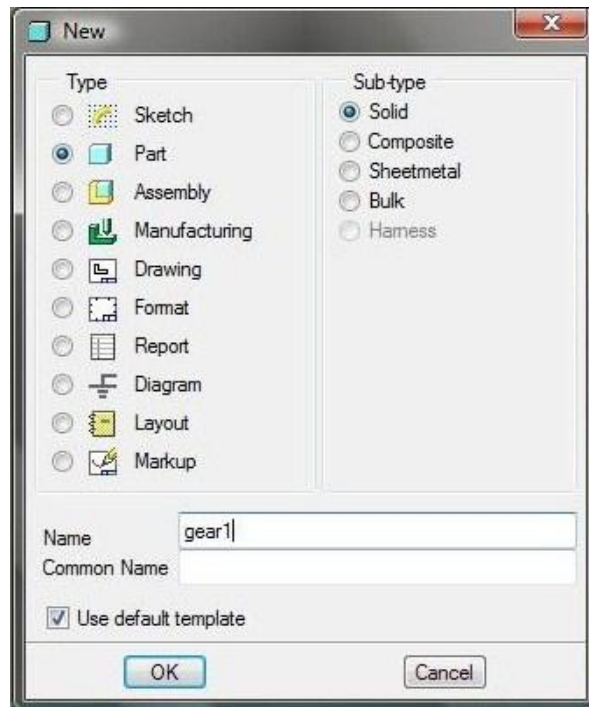
Σχήμα 2.20: Βήματα σχεδίασης οδοντωτού τροχού [4]

2.3.2 Κινητήριος οδοντωτός τροχός (πινιόν)

Αφού έγινε μια εισαγωγή στον σχεδιασμό ενός οδοντωτού τροχού μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού, τώρα θα περιγραφούν αναλυτικά τα βήματα για την δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης του κινητήριου οδοντωτού τροχού.

2.3.2.1 Δημιουργία της εξειλιγμένης καμπύλης μέσω εξισώσεων

Αφού γίνει εκκίνηση του λογισμικού, αρχικά επιλέγεται η εντολή **file, new**, στο παράθυρο διαλόγου **New** που εμφανίζεται εισάγεται “gear1” σαν όνομα του νέου αντικειμένου που θα σχεδιαστεί και επιλέγεται το **OK** (σχήμα 2.21). Κατόπιν ορίζεται η τοποθεσία που θα αποθηκεύεται το αντικείμενο επιλέγοντας **File, Set Working Directory**, στο παράθυρο διαλόγου **Select Working Directory** την επιθυμητή τοποθεσία και το **OK**.



Σχήμα 2.21: Παράθυρο διαλόγου New

Επιλέγεται **Insert, Model Datum, Curve, From Equation, Done**. Επιλέγεται με αριστερό κλικ το σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο περίπου της οθόνης και μετά **Cartesian**. Στο παράθυρο του Notepad που θα ανοίξει εισάγονται οι παρακάτω εξισώσεις (σχήμα 2.22):

$$r = 13.98$$

$$\text{ang} = t * 90$$

$$s = (\text{PI} * r * t) / 2$$

$$xc = r * \cos(\text{ang})$$

$$yc = r * \sin(\text{ang})$$

$$x = xc + (s * \sin(\text{ang}))$$

$$y = yc - (s * \cos(\text{ang}))$$

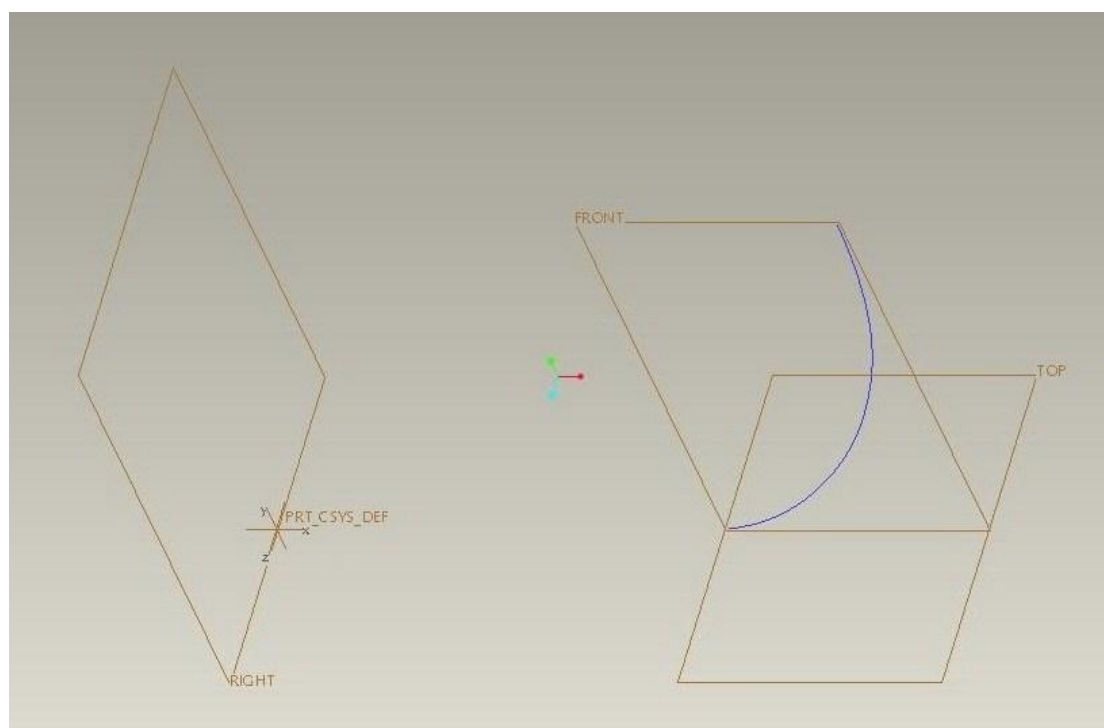
$$z = 0$$

(όπου r η ακτίνα βασικού κύκλου $27.96/2 = 13.98$)

```
rel.ptd - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
/* For cartesian coordinate system, enter parametric equation
/* in terms of t (which will vary from 0 to 1) for x, y and z
/* For example: for a circle in x-y plane, centered at origin
/* and radius = 4, the parametric equations will be:
/*      x = 4 * cos ( t * 360 )
/*      y = 4 * sin ( t * 360 )
/*      z = 0
/* -----
r = 13.98
ang = t * 90
s = (PI * r * t ) / 2
xc = r * cos(ang)
yc = r * sin(ang)
x = xc + ( s * sin(ang))
y = yc - ( s * cos(ang))
z = 0
```

Σχήμα 2.22: Εισαγωγή εξισώσεων στο Notepad

Κατόπιν επιλέγεται **File, Save** και **File, Exit** στο Notepad. Επιλέγεται **OK** στο παράθυρο διαλόγου. Η καμπύλη που προέκυψε θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία της οδόντωσης εξειλιγμένης (σχήμα 2.23).

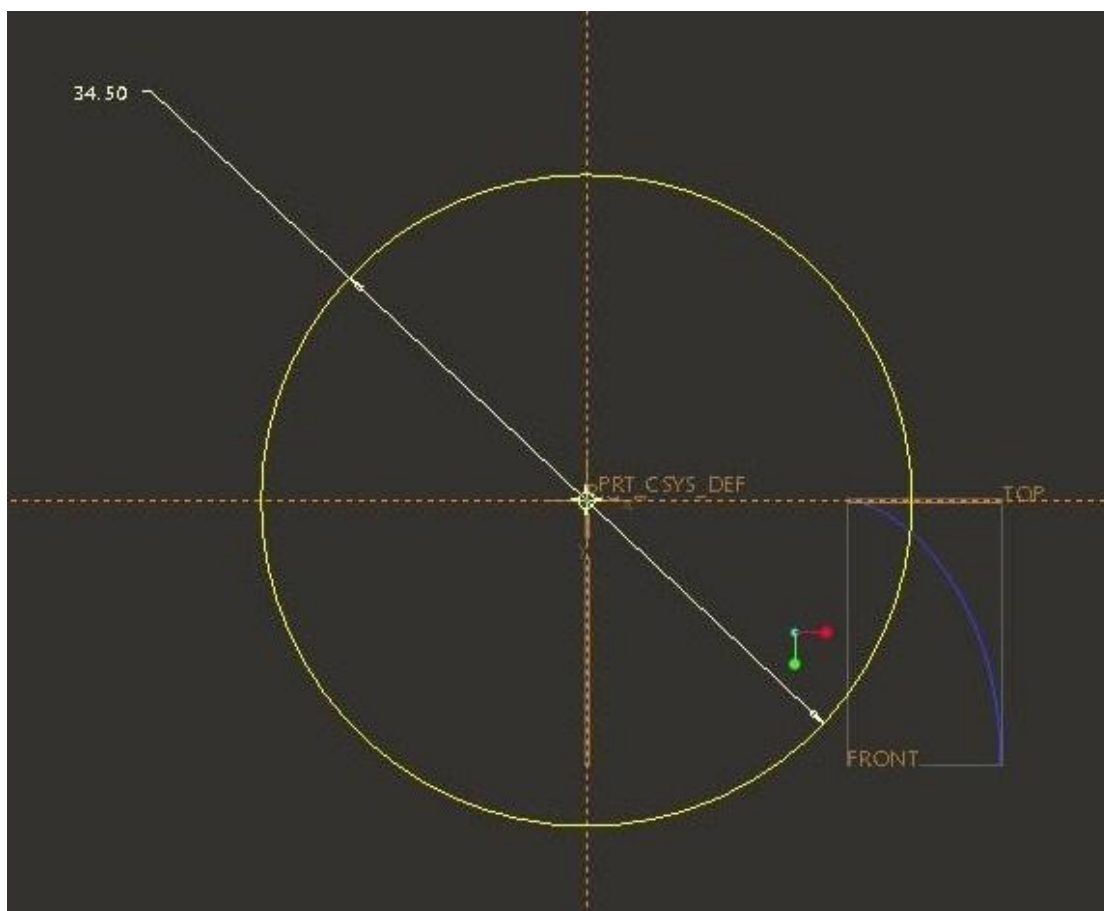


Σχήμα 2.23: Η εξειλιγμένη καμπύλη που προέκυψε από τις εξισώσεις

2.3.2.2 Δημιουργία του κυλίνδρου

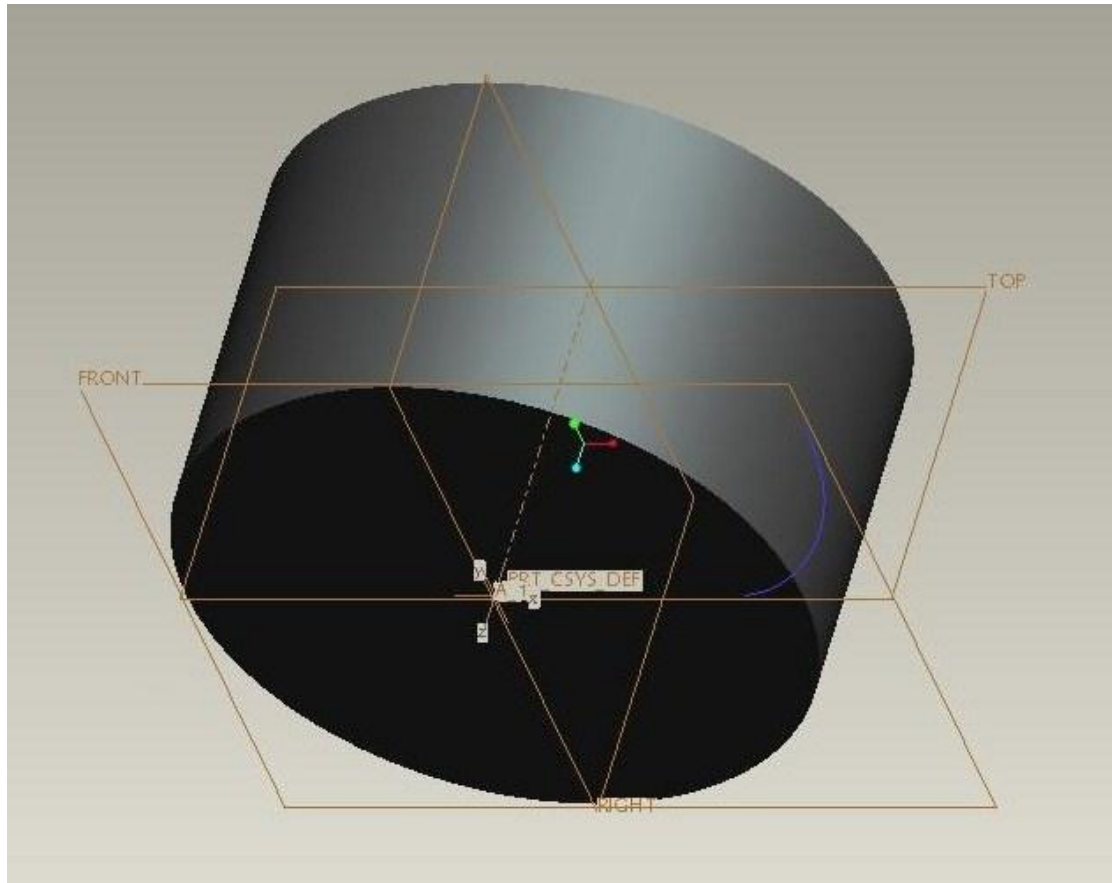
Αρχικά επιλέγεται το επίπεδο (datum plane) **FRONT** είτε από αριστερά στο δένδροδιάγραμμα είτε πάνω στην περιοχή σχεδίασης και κατόπιν το εικονίδιο

Extrude  . Κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ κάπου πάνω στην περιοχή σχεδίασης επιλέγεται **Define Internal Sketch**. Στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Flip** και μετά **Sketch**. Επιλέγοντας το εικονίδιο **circle**  από την γραμμή εργαλείων δεξιά σχεδιάζεται ένας κύκλος με κέντρο την αρχή των αξόνων (references) και διάμετρο την διάμετρο κύκλου κεφαλής $d_a = 34.5$. Αρχικά επιλέγεται με αριστερό κλικ η αρχή των αξόνων, κατόπιν μια τυχαία διάμετρος και στην συνέχεια αλλάζεται η διάσταση της διαμέτρου πάνω στο σχέδιο επιλέγοντας την με διπλό κλικ, δίνοντας την επιθυμητή και πατώντας **Enter**. Ο κύκλος που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24. Για να ολοκληρωθεί το σχέδιο επιλέγεται το εικονίδιο **done**  κάτω δεξιά.



Σχήμα 2.24: Ο κύκλος κεφαλής που προκύπτει

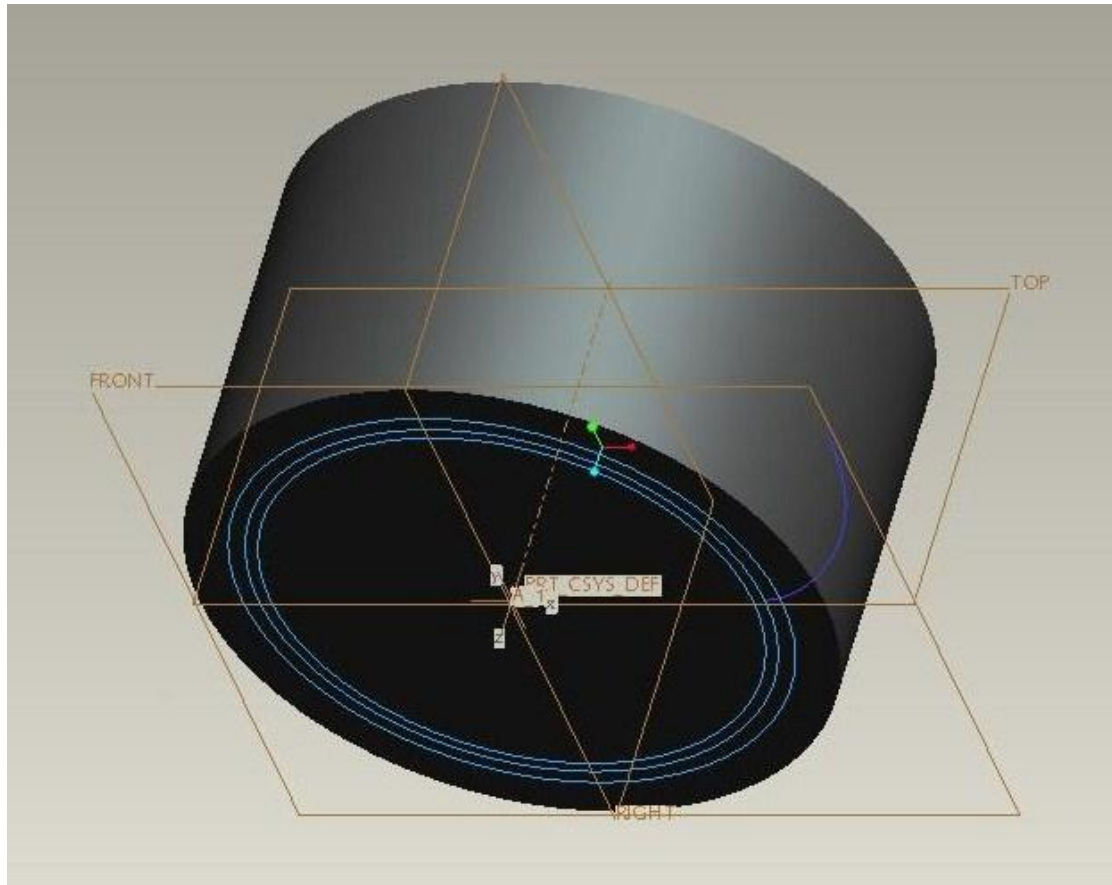
Τέλος, για να δημιουργηθεί ο κύλινδρος πάνω αριστερά εισάγεται η τιμή του πλάτους του οδόντα $b = 20$, πατιέται το **Enter** και επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Επιλέγεται **View, Orientation, Standard Orientation**. Ο κύλινδρος που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.25: Ο κύλινδρος που προκύπτει

2.3.2.3 Σχεδιασμός των τριών κύριων κύκλων (αρχικός, βασικός, πόδα)

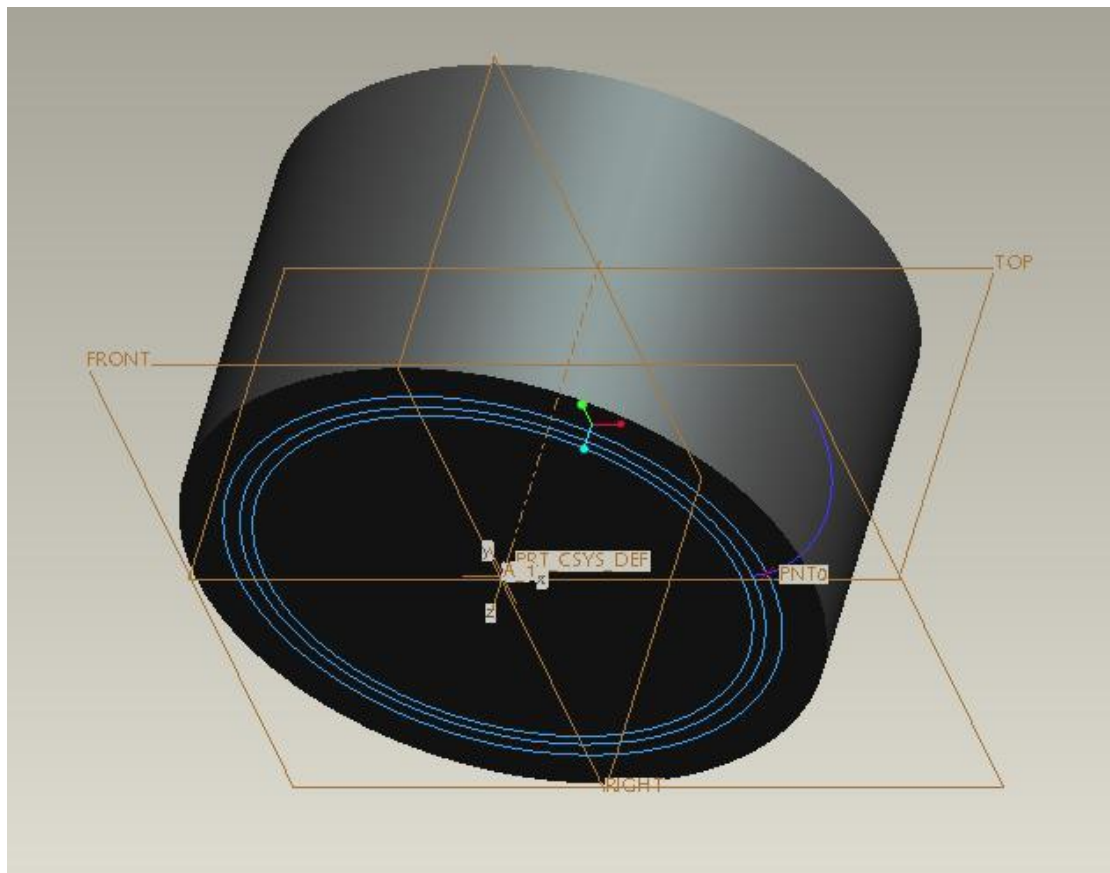
Για το σχεδιασμό του αρχικού, του βασικού και του κύκλου πόδα αρχικά επιλέγεται το επίπεδο (datum plane) **FRONT**. Στην συνέχεια επιλέγεται το εικονίδιο **sketch**  στην γραμμή εργαλείων πάνω δεξιά και στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Sketch**. Σχεδιάζονται οι τρεις κύκλοι με το εικονίδιο **circle**  όπως παραπάνω με κέντρο την αρχή των αξόνων και διαμέτρους $d = 29.75$, $d_b = 27.96$ και $d_f = 26.63$. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.26: Οι τρεις κύριοι κύκλοι που σχεδιάστηκαν

2.3.2.4 Δημιουργία σημείου αναφοράς

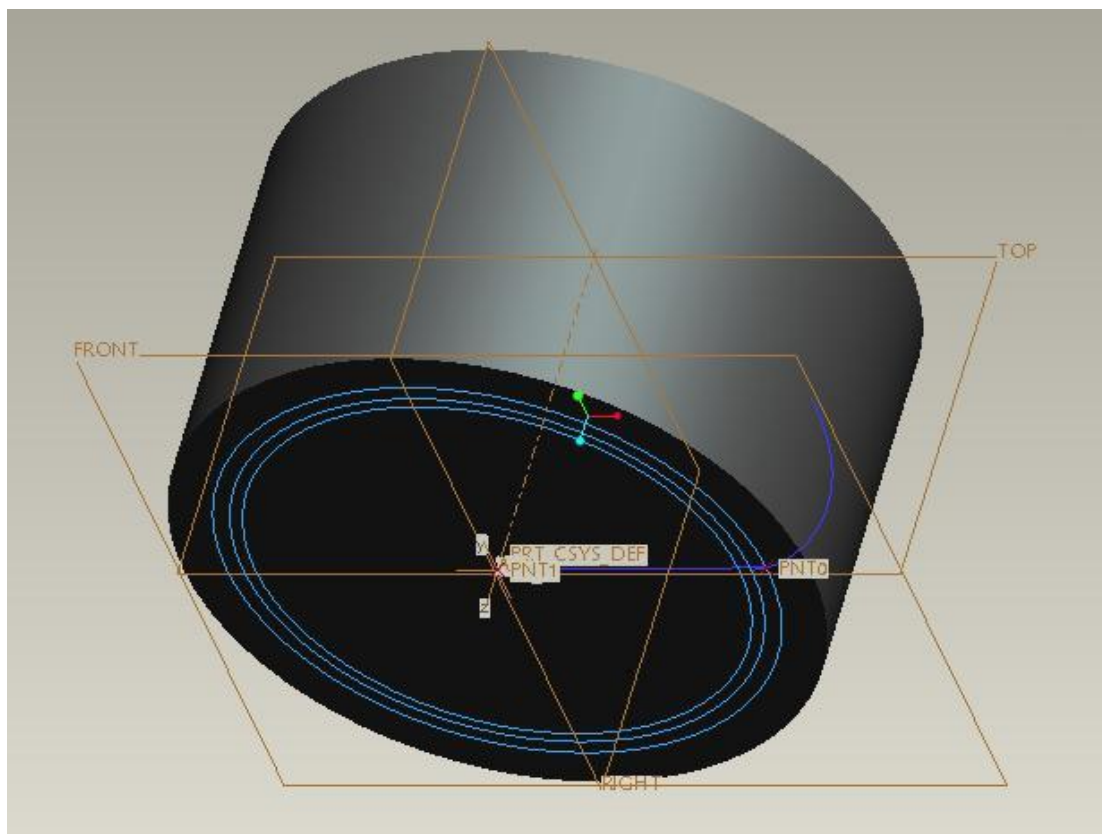
Αρχικά ορίζεται το φίλτρο επιλογής κάτω δεξιά σε **Datums** και επιλέγεται η εξειλιγμένη καμπύλη και ο αρχικός κύκλος με αριστερό κλικ και κρατημένο το πλήκτρο **Ctrl**. Κατόπιν επιλέγεται από την γραμμή εργαλείων δεξιά το εικονίδιο **Point**  και μετά στο παράθυρο διαλόγου **DATUM POINT** το **OK** για να δημιουργηθεί το σημείο αναφοράς όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.27.



Σχήμα 2.27: Το σημείο αναφοράς που προκύπτει

2.3.2.5 Δημιουργία ενός νέου σημείου αναφοράς και μίας καμπύλης

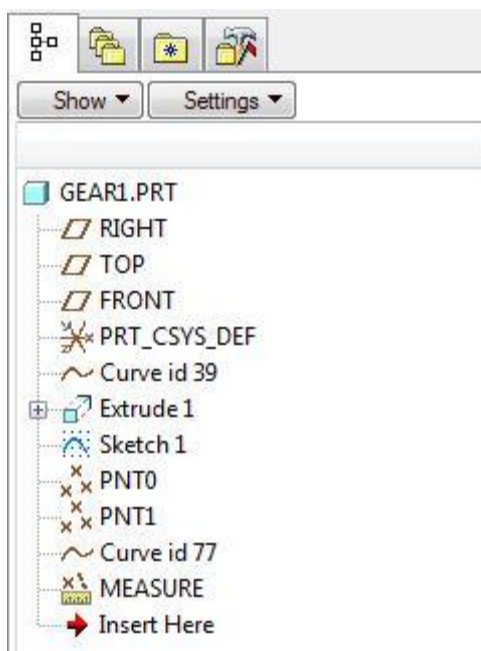
Το φίλτρο επιλογής κάτω δεξιά παραμένει ορισμένο σε **Datums**. Για την δημιουργία του άλλου σημείου αναφοράς επιλέγονται τα επίπεδα **RIGHT**, **TOP** και **FRONT**, μετά το εικονίδιο **Point**  και το **OK**. Στην συνέχεια επιλέγονται **Insert**, **Model Datum**, **Curve**, **Done**, τα δύο σημεία αναφοράς και μετά **Done** και **OK**. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.28.



Σχήμα 2.28: Το νέο σημείο αναφοράς και η καμπύλη που προκύπτει

2.3.2.6 Δημιουργία χαρακτηριστικού αποτίμησης (evaluate)

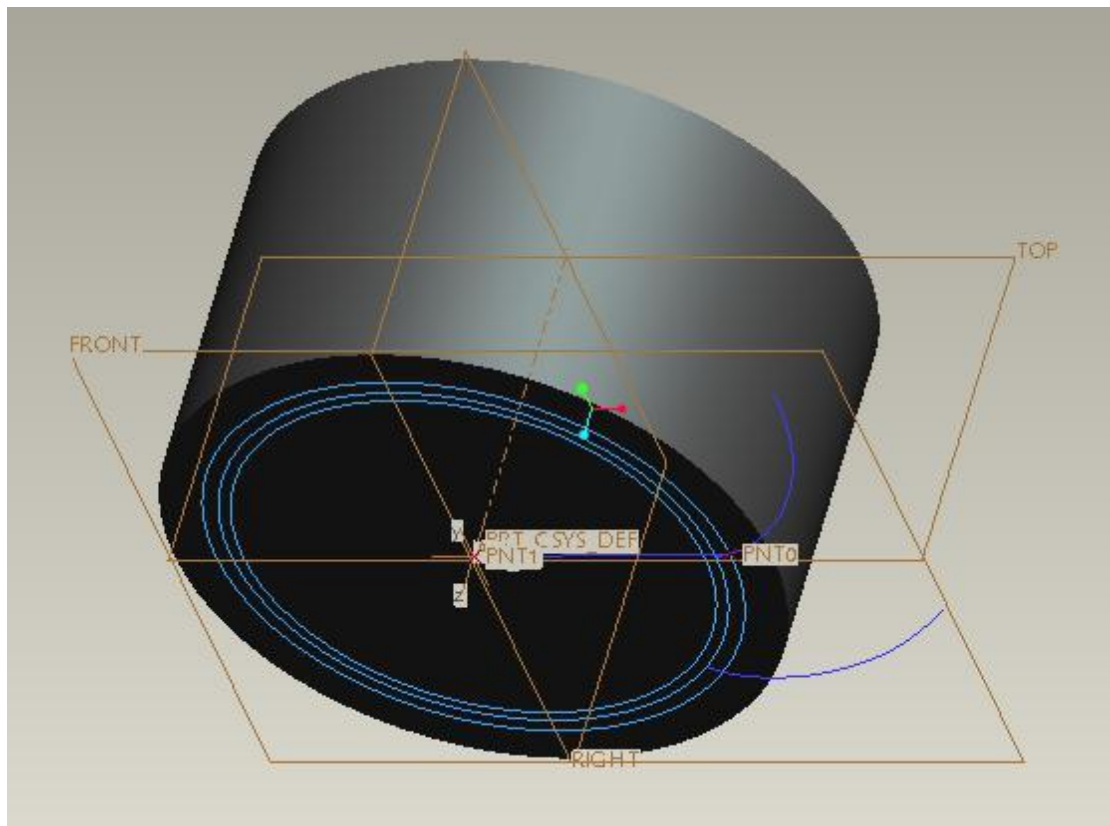
Αρχικά επιλέγονται **Tools, Options** και στο παράθυρο διαλόγου **Options** στο κενό κάτω από το *Option* εισάγεται “allow_anatomic_features”, κατόπιν δίπλα, κάτω από το *Value* επιλέγεται το **yes**, το **Add/Change** και το **OK**. Στην συνέχεια επιλέγονται **Insert, Model Datum, Evaluate** και εισάγεται “measure” για όνομα του χαρακτηριστικού και έπειτα το **Create** και εισάγεται “angle” για όνομα της παραμέτρου μέτρησης. Επιλέγεται **Angle**, μετά το επίπεδο **TOP** και με το **Ctrl** πατημένο η καμπύλη που σχεδιάστηκε ανάμεσα στα δύο σημεία αναφοράς προηγουμένως. Τέλος, επιλέγεται **Done**. Αριστερά στο δένδροδιάγραμμα του μοντέλου (model tree) έχει δημιουργηθεί το χαρακτηριστικό **MEASURE** (σχήμα 2.29).



Σχήμα 2.29: Το χαρακτηριστικό MEASURE που προκύπτει στο δενδροδιάγραμμα του μοντέλου

2.3.2.7 Αντιγραφή της εξειλιγμένης καμπύλης

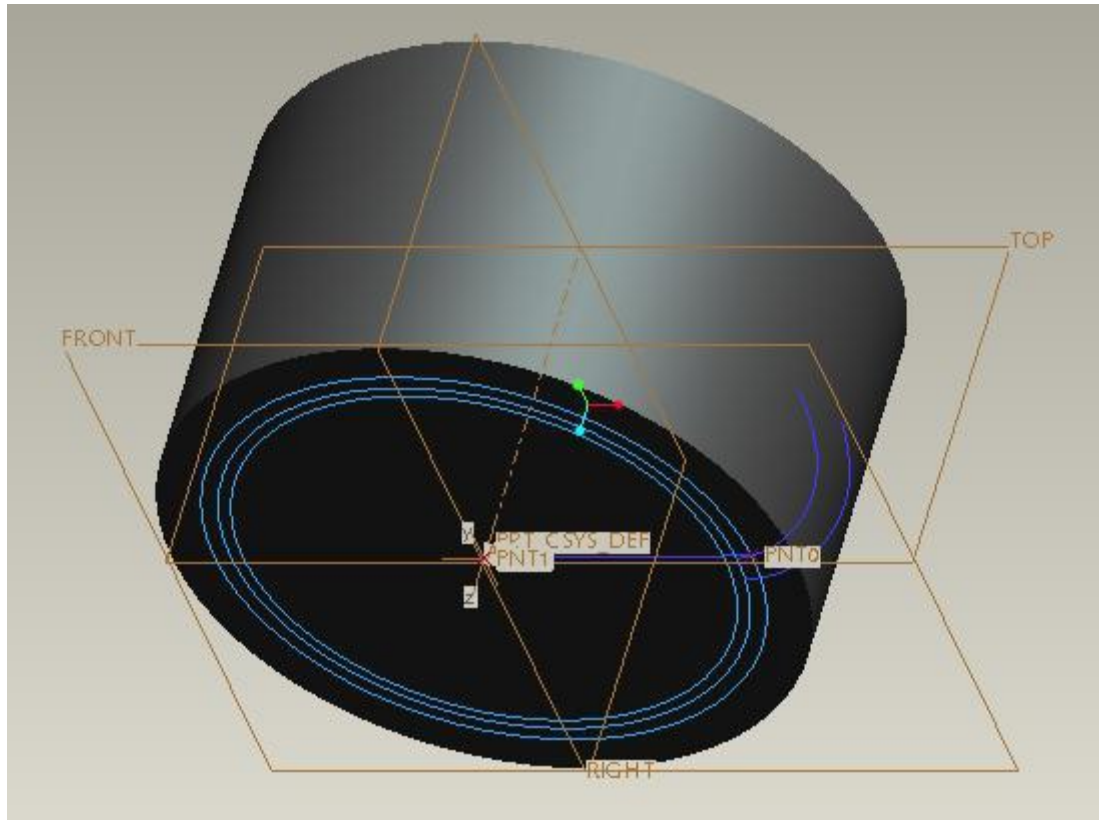
Αρχικά ορίζεται το φίλτρο επιλογής κάτω δεξιά σε **Features**, επιλέγεται η εξειλιγμένη καμπύλη και μετά **Edit, Copy, Edit, Paste Special**. Στο παράθυρο διαλόγου **Paste Special** τσεκάρεται το κουτάκι δίπλα στο **Apply Move/Rotate transformations to copies** και μετά επιλέγεται το **OK**. Κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ κάπου στην περιοχή σχεδίασης επιλέγεται το **Rotate**, κατόπιν ο άξονας στο κέντρο του κυλίνδρου και μετά εισάγεται πάνω αριστερά η γωνία περιστροφής $-2 \cdot P \approx -42.35$. Τέλος πατιέται το **Enter** και επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.30.



Σχήμα 2.30: Το αντίγραφο της καμπύλης που προκύπτει

2.3.2.8 Προσθήκη μιας σχέσης και ανανέωση (regenerate) του αντικειμένου

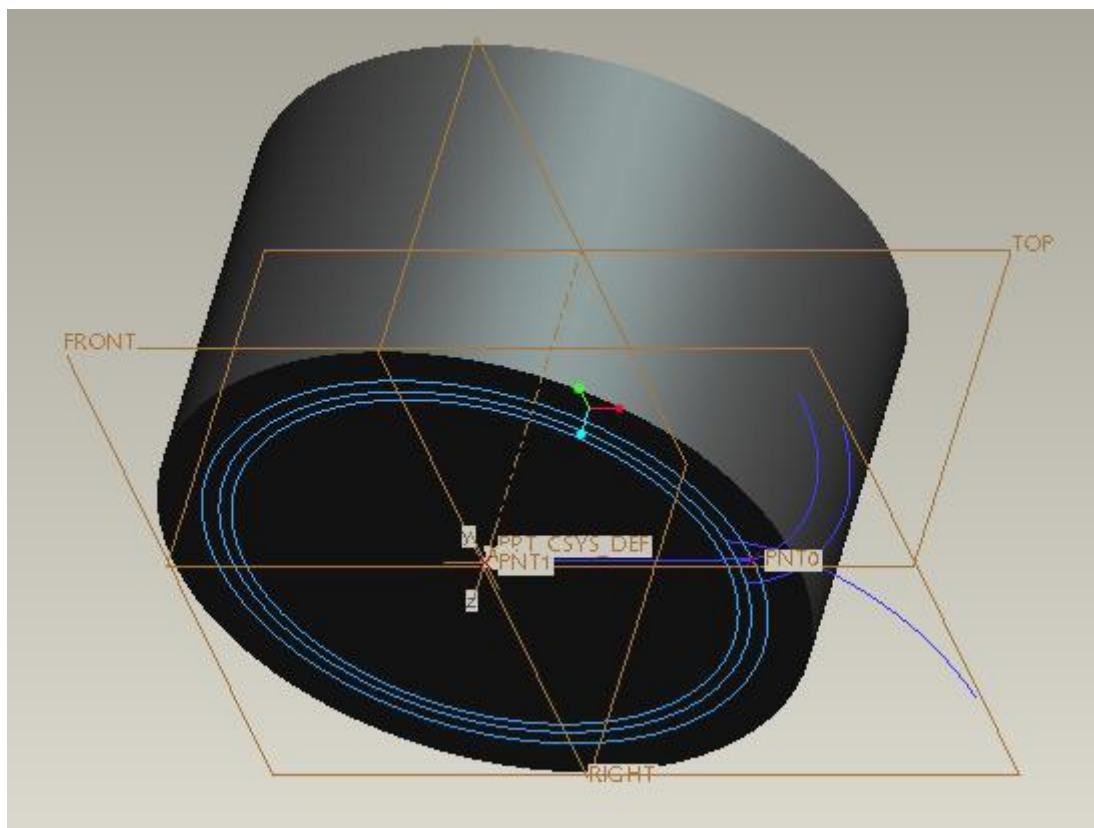
Επιλέγεται με διπλό κλικ το αντίγραφο της καμπύλης που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα και κατόπιν πάλι με διπλό κλικ η διάσταση 42.35. Στο κουτάκι της τιμής της διάστασης εισάγεται “angle:FID_MEASURE + (12.21 / 2)”, όπου 12.21 το πάχος του οδόντα σε μοίρες, μετά πατιέται το **Enter** και στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγεται το **Yes** για να εισαχθεί η σχέση. Τέλος επιλέγεται **Edit, Regenerate**. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.31.



Σχήμα 2.31: Η νέα θέση της καμπύλης που προκύπτει μετά την δημιουργία της σχέσης

2.3.2.9 Ανάποδη αντιγραφή (*mirror*) του αντιγράφου της εξειλιγμένης καμπύλης

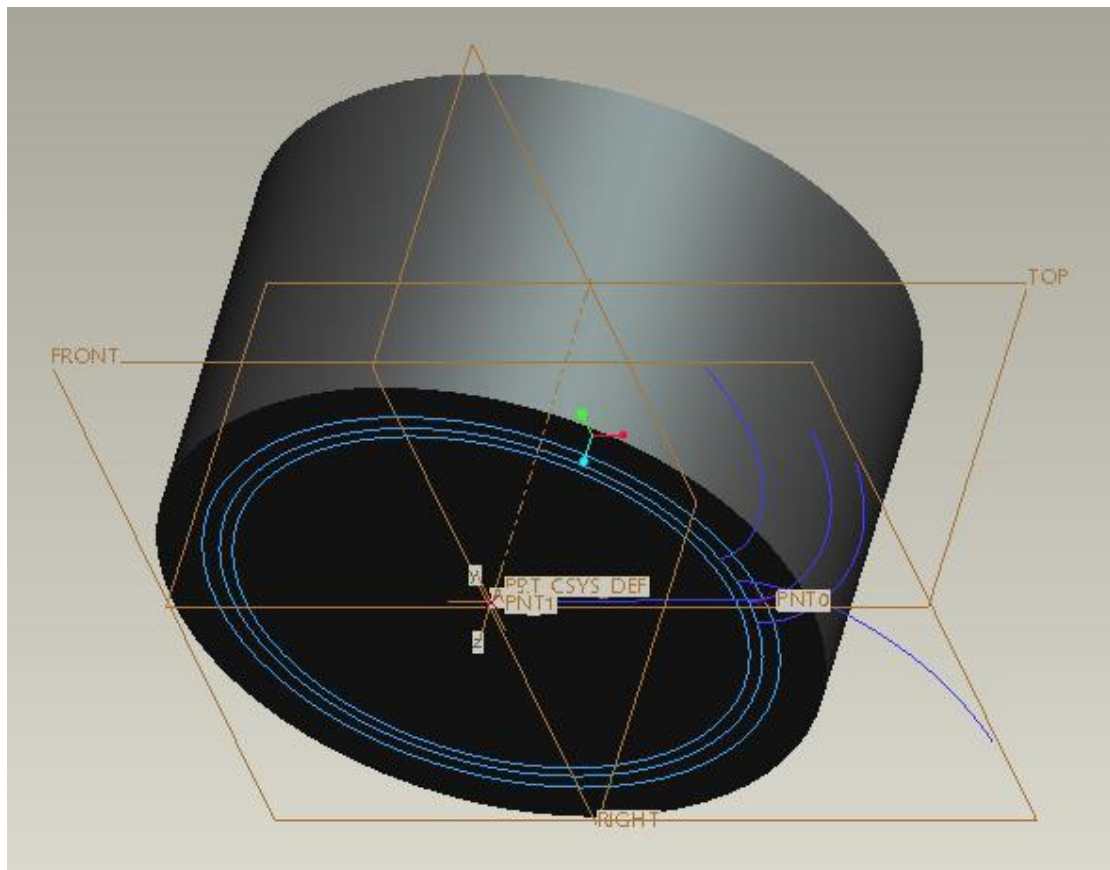
Επιλέγεται το αντίγραφο της καμπύλης και μετά **Edit, Mirror**. Κατόπιν το επίπεδο **TOP** και μετά το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.32: Το ανάποδο αντίγραφο της εξειλιγμένης καμπύλης που προκύπτει

2.3.2.10 Δημιουργία κι άλλου αντιγράφου της εξειλιγμένης καμπύλης

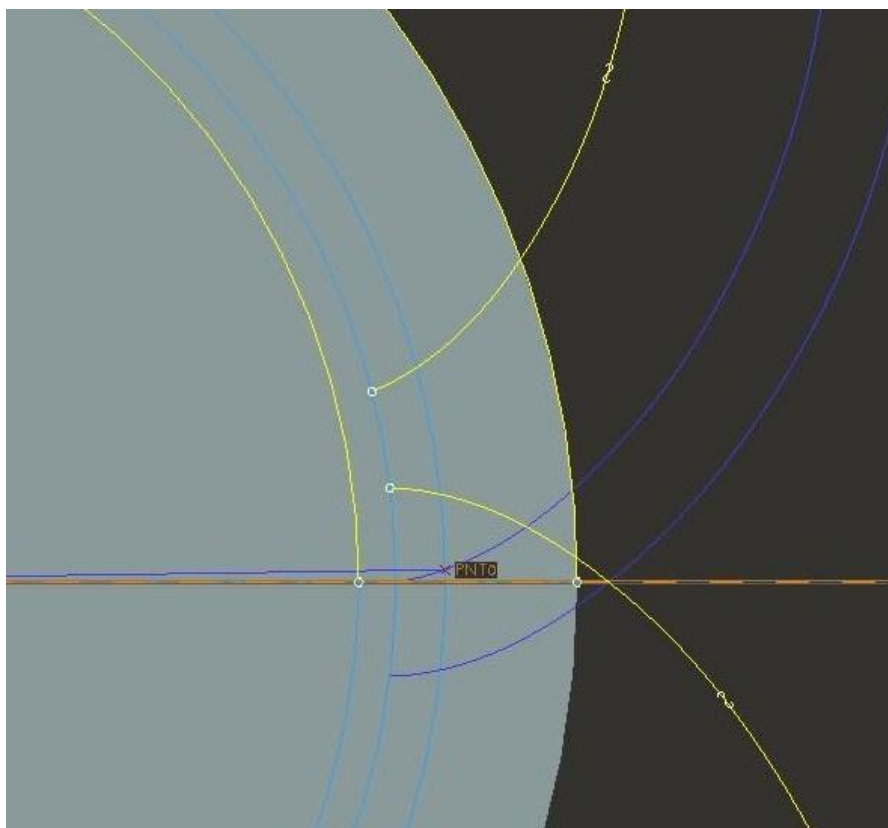
Επιλέγεται το αντίγραφο της καμπύλης (που δημιουργήθηκε στο βήμα 7), μετά **Edit, Copy, Edit, Paste Special**, στο παράθυρο διαλόγου **Paste Special** τσεκάρεται το κουτάκι δίπλα στο **Apply Move/Rotate transformations to copies** και μετά επιλέγεται το **OK**. Κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ κάπου στην περιοχή σχεδίασης επιλέγεται το **Rotate**, κατόπιν ο άξονας στο κέντρο του κυλίνδρου και μετά εισάγεται πάνω αριστερά η γωνία περιστροφής $-P = -21.17647059$. Τέλος πατιέται το **Enter** και επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.33.



Σχήμα 2.33: Το νέο αντίγραφο της εξειλιγμένης καμπύλης που προκύπτει

2.3.2.11 Δημιουργία του διάκενου ανάμεσα στους οδόντες

Για την δημιουργία του διάκενου αρχικά επιλέγεται το επίπεδο **FRONT** και κατόπιν το εικονίδιο **sketch** . Στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Sketch**, επιλέγεται το εικονίδιο **Use** , επιλέγονται οι τέσσερις καμπύλες που παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα στο σχήμα 2.34 και κατόπιν στο παράθυρο διαλόγου **Type** το **Close**.



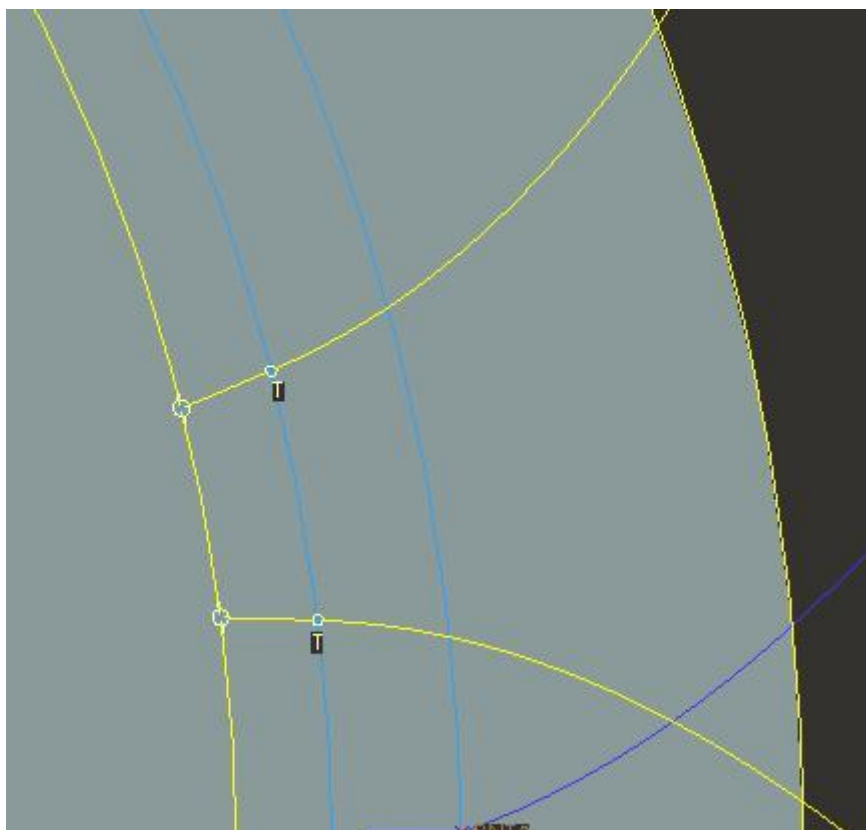
Σχήμα 2.34: Οι τέσσερις καμπύλες που επιλέγονται

Στην συνέχεια επιλέγεται το εικονίδιο **Line** από την γραμμή εργαλείων δεξιά και σχεδιάζονται δύο ευθύγραμμα τμήματα εφαπτόμενα στις εξειλιγμένες καμπύλες όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.35. Για να είναι τα ευθύγραμμα τμήματα εφαπτόμενα πρέπει να έχει εμφανιστεί το σύμβολο T (tangency) όπως στο σχήμα. Έπειτα,

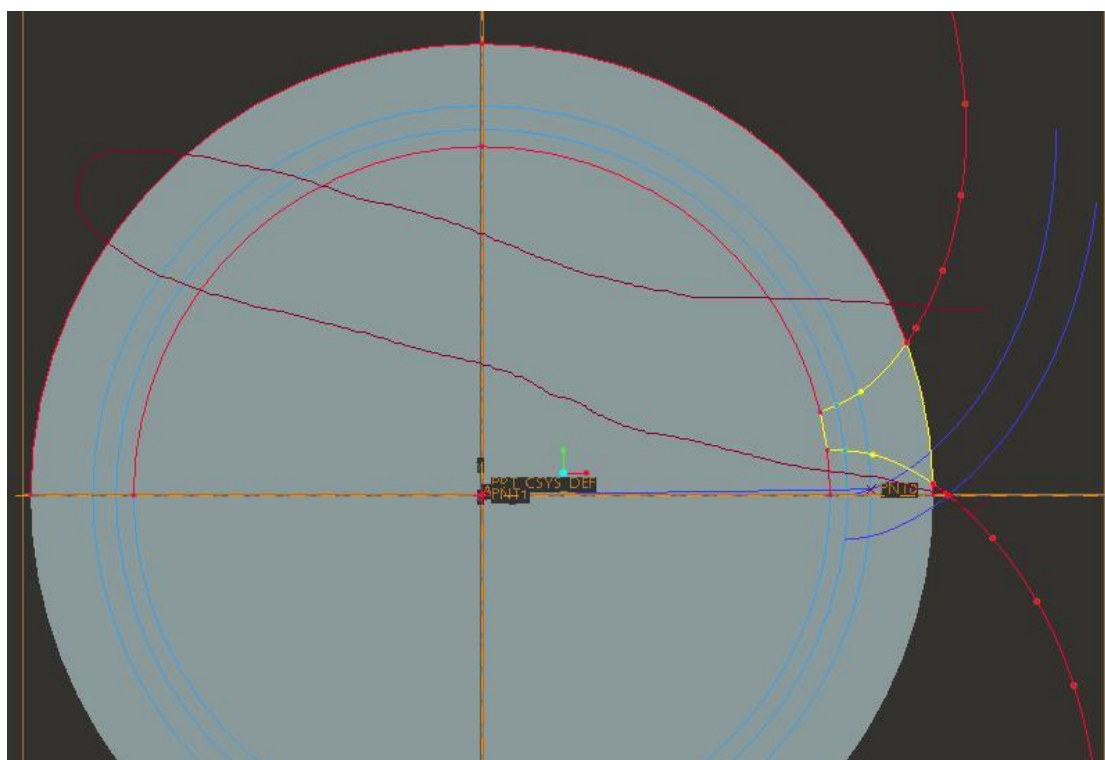
επιλέγεται το εικονίδιο **Delete Segment**  και κρατώντας πατημένο το αριστερό κλικ σχεδιάζεται μια γραμμή που τέμνει τα περιττά τμήματα των καμπυλών που επιθυμείται να διαγραφούν (σχήμα 2.36) ώστε να μείνει μόνο το περίγραμμα του διακένου (σχήμα 2.37). Για να ολοκληρωθεί το σχέδιο επιλέγεται το εικονίδιο **done**



κάτω δεξιά.



Σχήμα 2.35: Τα ευθύγραμμα τμήματα που προκύπτουν

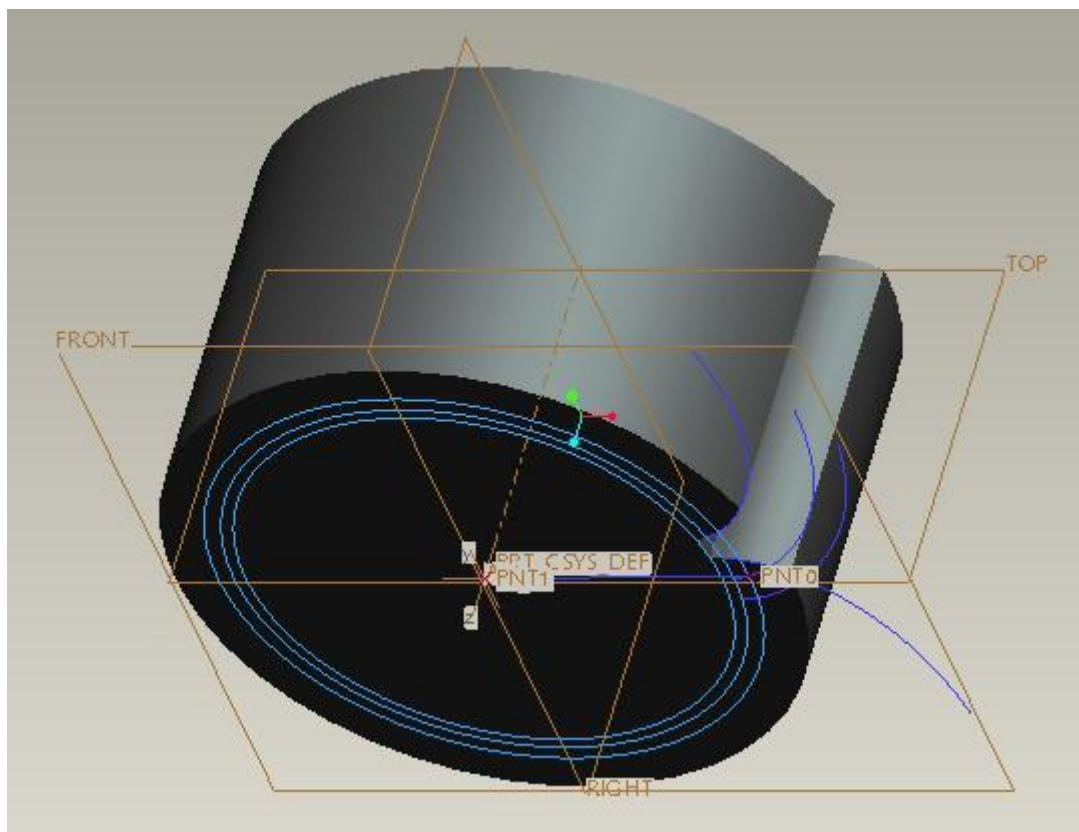


Σχήμα 2.36: Διαγραφή των περιττών τμημάτων των καμπυλών



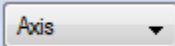
Σχήμα 2.37: Το περίγραμμα του διακένου που προκύπτει

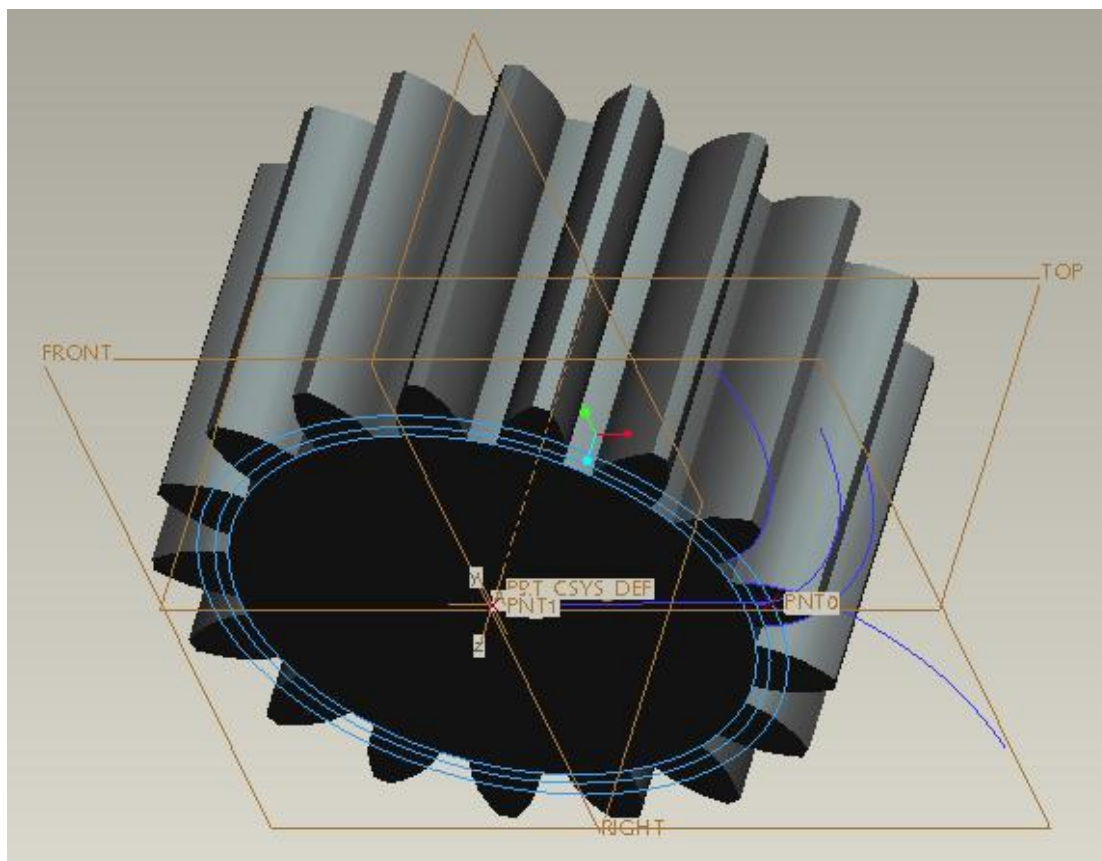
Τέλος, για να δημιουργηθεί το διάκενο επιλέγεται το περίγραμμα του διακένου, το εικονίδιο **Extrude** , μετά πάνω αριστερά το **Remove material**  για να αφαιρεθεί υλικό, δίπλα ακριβώς το  για να αλλάξει η φορά της κοπής, το  για να γίνει η κοπή σε όλο το πλάτος του κυλίνδρου και τέλος το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά για να ολοκληρωθεί η κοπή. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.38.



Σχήμα 2.38: Το διάκενο που προκύπτει

2.3.2.12 Δημιουργία των οδόντων με αντιγραφή του διακένου περιμετρικά (Pattern)

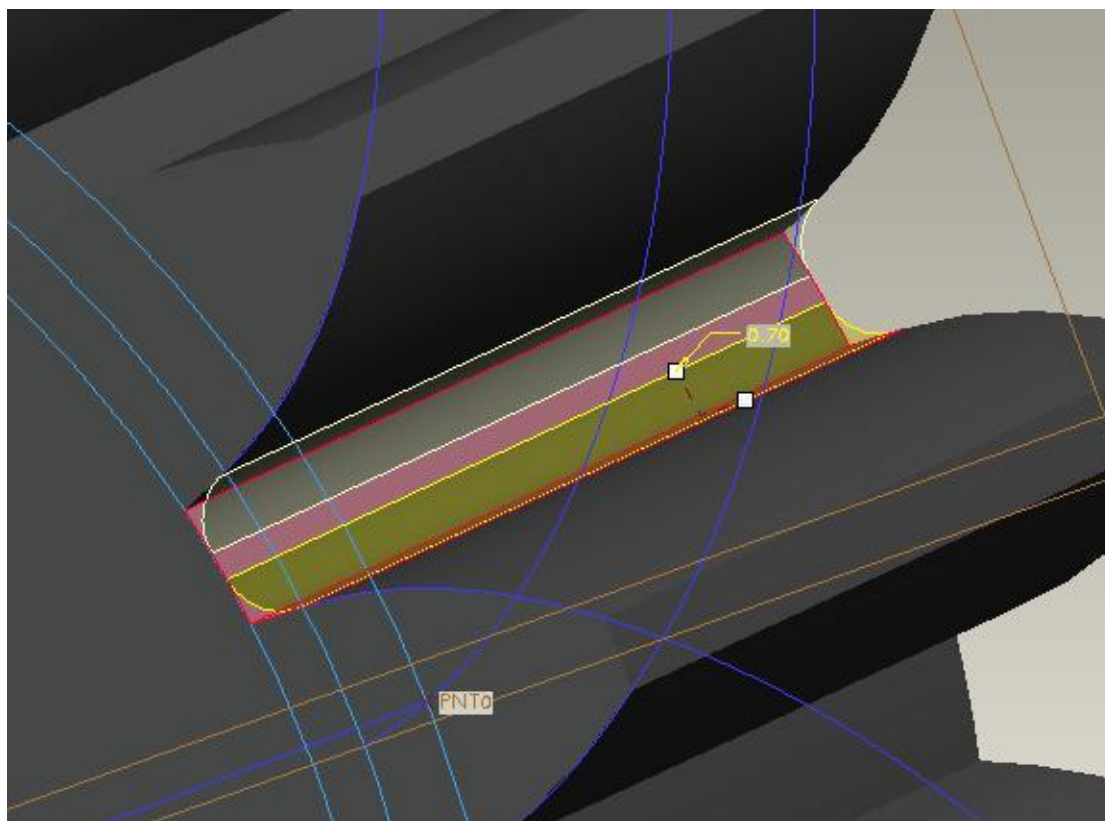
Αρχικά ορίζεται το φίλτρο επιλογής κάτω δεξιά σε **Features**, επιλέγεται το διάκενο που μόλις δημιουργήθηκε και στην συνέχεια το εικονίδιο **Pattern**  στην γραμμή εργαλείων δεξιά. Κατόπιν επιλέγεται το είδος του Pattern επιλέγοντας το **Axis**  πάνω αριστερά και τον άξονα στο κέντρο του κυλίνδρου. Πάνω αριστερά εισάγεται ο αριθμός των διακένων που θα δημιουργηθούν που είναι 17 ίσος με τον αριθμό των οδόντων, πατιέται το **Enter**, δίπλα εισάγεται η γωνία μεταξύ των αντιγράφων που είναι η τιμή του βήματος σε μοίρες $P = 21.17647059$ και πατιέται το **Enter**. Τέλος επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.39.



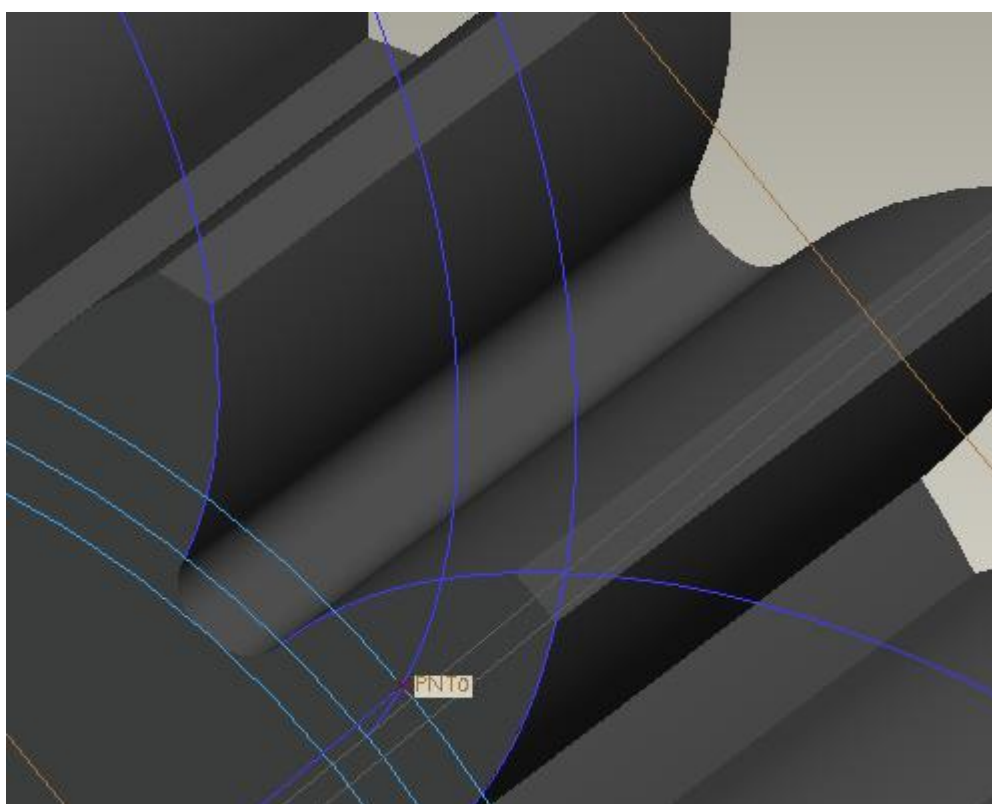
Σχήμα 2.39: Οι οδόντες που προκύπτουν

2.3.2.13 Δημιουργία του *fillet* των οδόντων

Αρχικά επιλέγεται το εικονίδιο **Round**  στην γραμμή εργαλείων δεξιά και κατόπιν επιλέγονται με το **Ctrl** πατημένο οι δύο επιφάνειες στις οποίες θέλουμε να γίνει το fillet, η μία στην βάση του οδόντα και η άλλη στον κύλινδρο. Το ίδιο γίνεται άλλη μια φορά για τον διπλανό οδόντα και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.40. Στην συνέχεια πάνω αριστερά εισάγεται η ακτίνα του fillet 0.65 και επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.41.

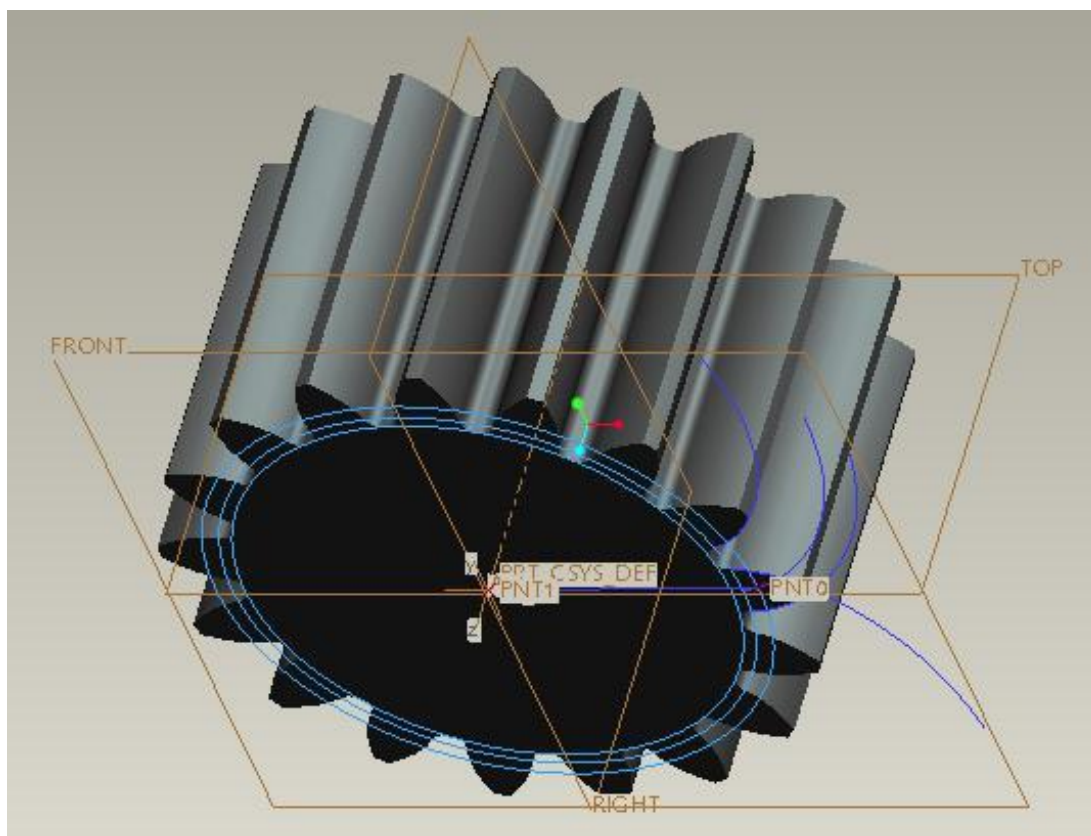


Σχήμα 2.40: Το αποτέλεσμα που προκύπτει μετά τις επιλογές των επιφανειών



Σχήμα 2.41: Το fillet που προκύπτει στο ένα διάκενο

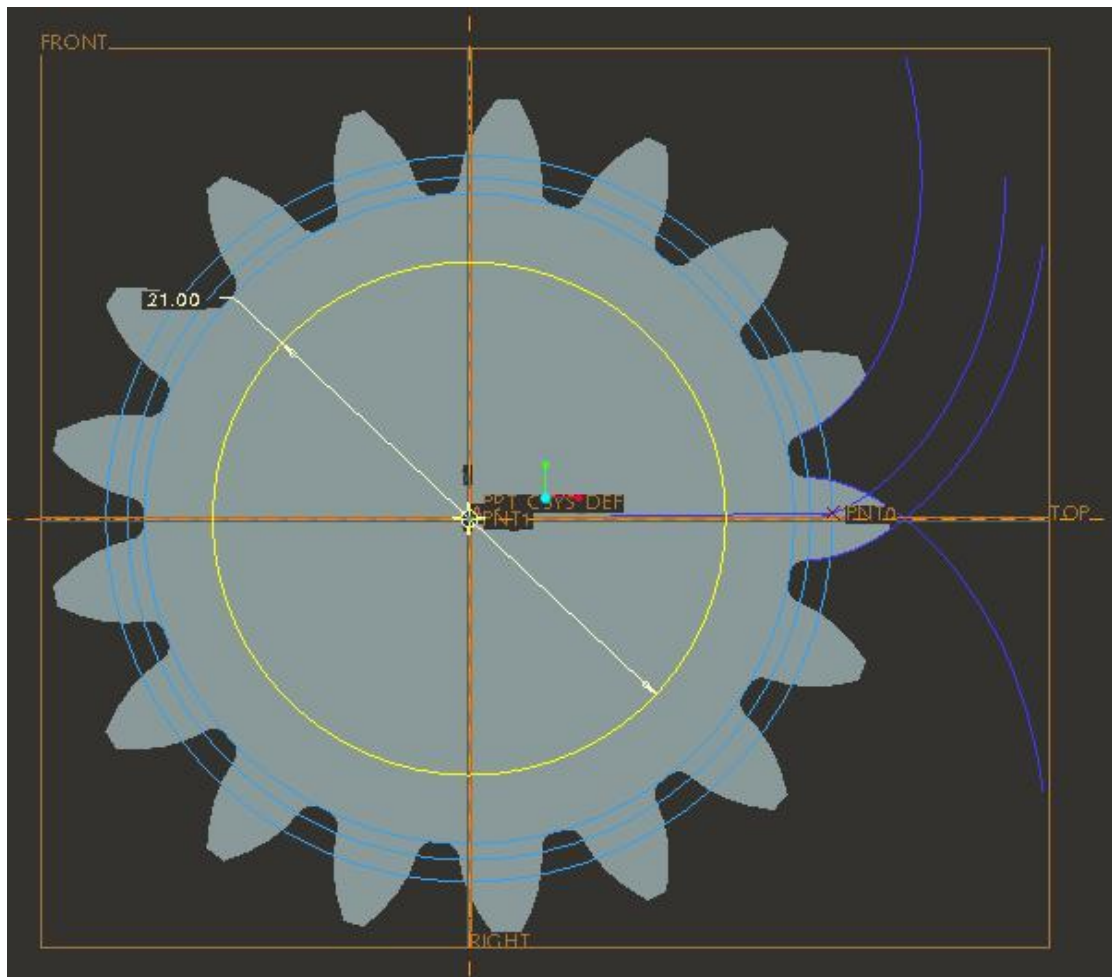
Για να αντιγραφεί το fillet σε όλα τα διάκενα θα χρησιμοποιηθεί το **Pattern**. Επιλέγεται το fillet που δημιουργήθηκε, το εικονίδιο **Pattern**  στην γραμμή εργαλείων δεξιά και κατόπιν το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.42.



Σχήμα 2.42: Το fillet στους οδόντες που προκύπτει

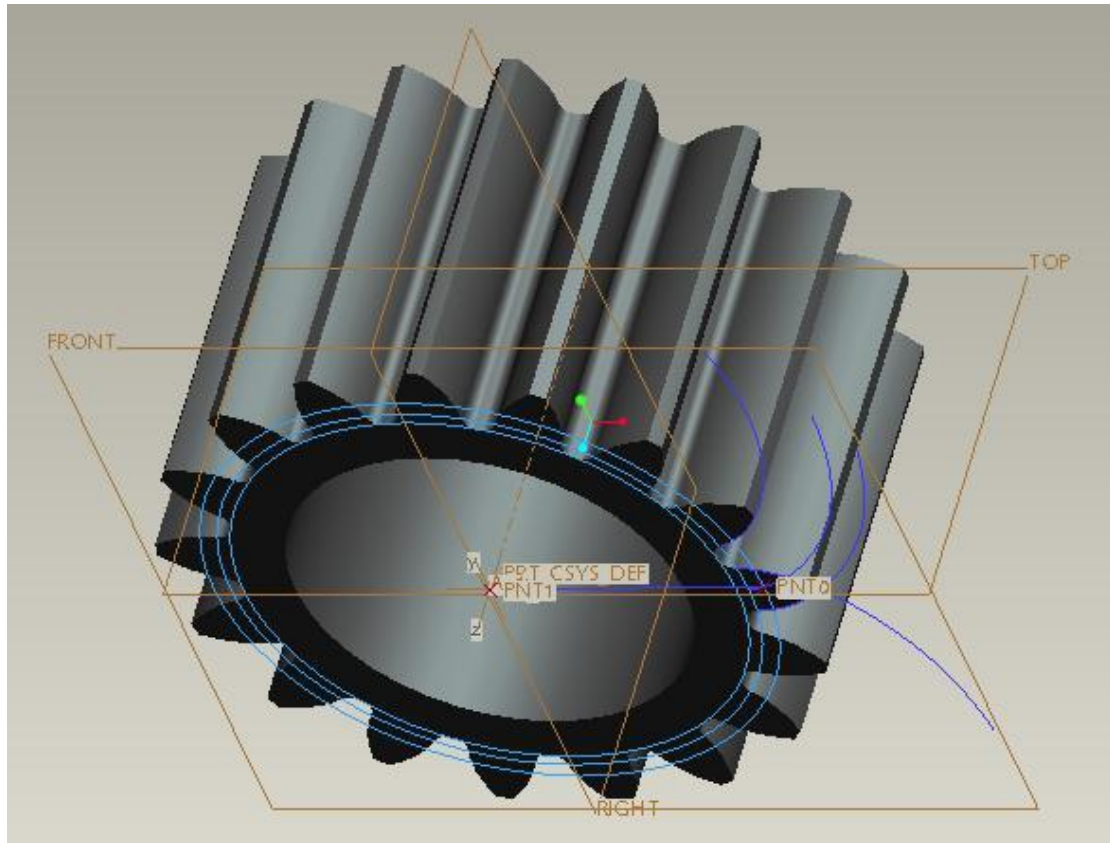
2.3.2.14 Δημιουργία της οπής

Αρχικά επιλέγεται το επίπεδο (datum plane) **FRONT** και κατόπιν το εικονίδιο **Extrude** . Κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ κάπου πάνω στην περιοχή σχεδίασης επιλέγεται **Define Internal Sketch**. Στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Sketch**. Επιλέγοντας το εικονίδιο **circle**  από την γραμμή εργαλείων δεξιά σχεδιάζεται ένας κύκλος με κέντρο την αρχή των αξόνων και διάμετρο 21 (σχήμα 2.43). Για να ολοκληρωθεί το σχέδιο επιλέγεται το εικονίδιο **done**  κάτω δεξιά.



Σχήμα 2.43: Ο κύκλος που προκύπτει

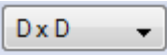
Τέλος, για να δημιουργηθεί η οπή επιλέγεται πάνω αριστερά το **Remove material**  για να αφαιρεθεί υλικό, δίπλα ακριβώς το  για να αλλάξει η φορά της κοπής, το  για να γίνει η κοπή σε όλο το πλάτος του κυλίνδρου και τέλος το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά για να ολοκληρωθεί η κοπή. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.44.

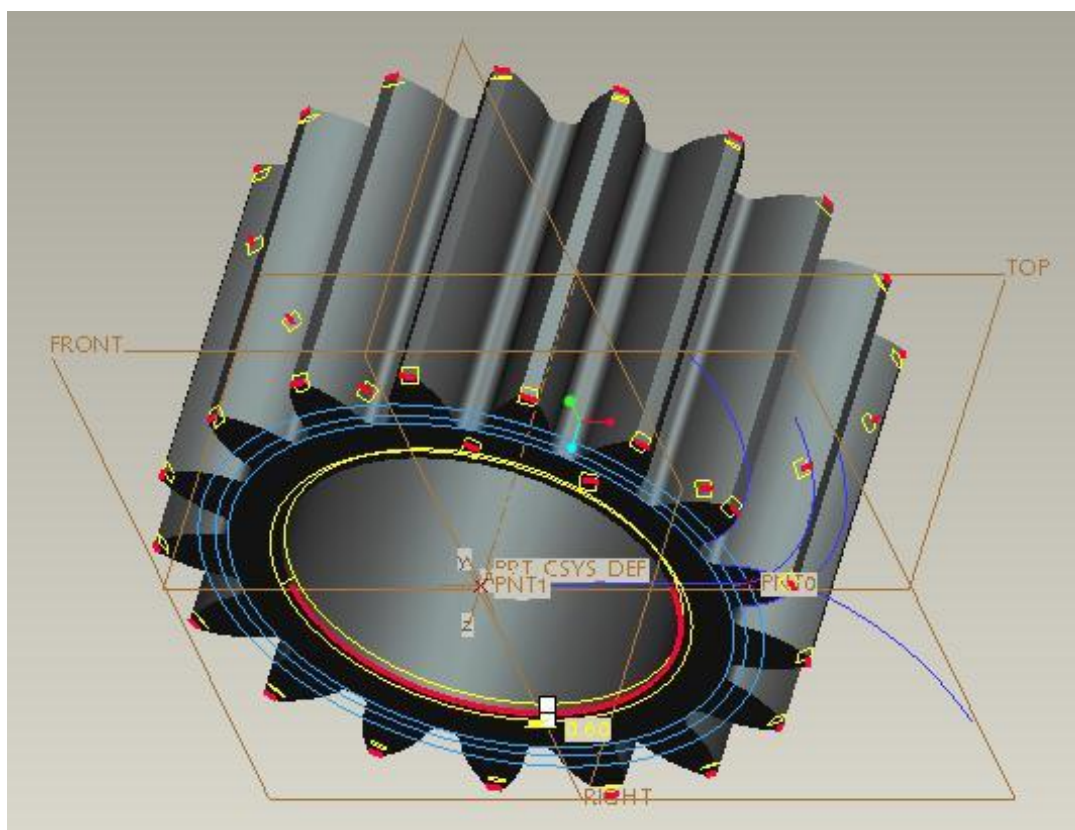


Σχήμα 2.44: Η οπή που προκύπτει

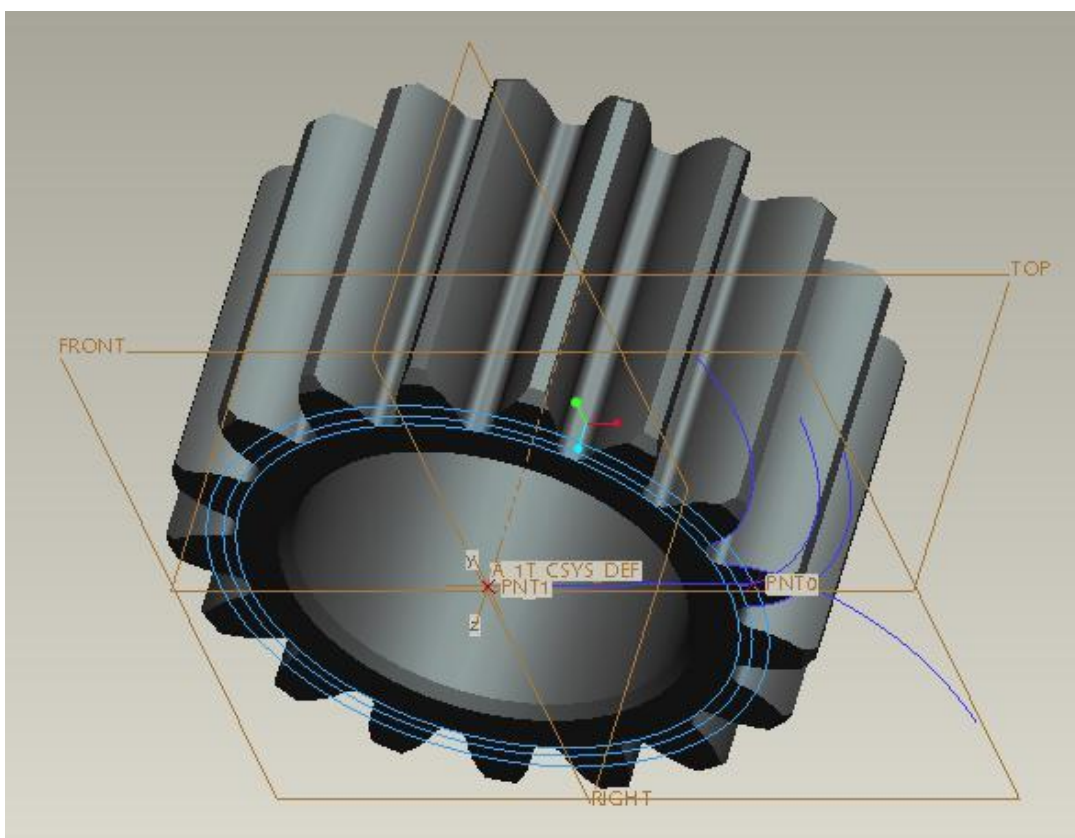
2.3.2.15 Δημιουργία των *chamfer* του οδόντα και της οπής

Αρχικά επιλέγεται το εικονίδιο **Edge Chamfer**  και κρατώντας πατημένο το **Ctrl** επιλέγονται οι άκρες των οδόντων και η μία άκρη της οπής (σχήμα 2.45).

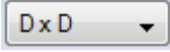
Κατόπιν επιλέγεται πάνω αριστερά το  εφόσον το ορθογώνια τρίγωνα που θα αφαιρεθούν είναι ισοσκελή, δίπλα εισάγεται η τιμή 0.6 για το μήκος των πλευρών και πατιέται το **Enter**. Για να ολοκληρωθούν τα *chamfer* επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.46.

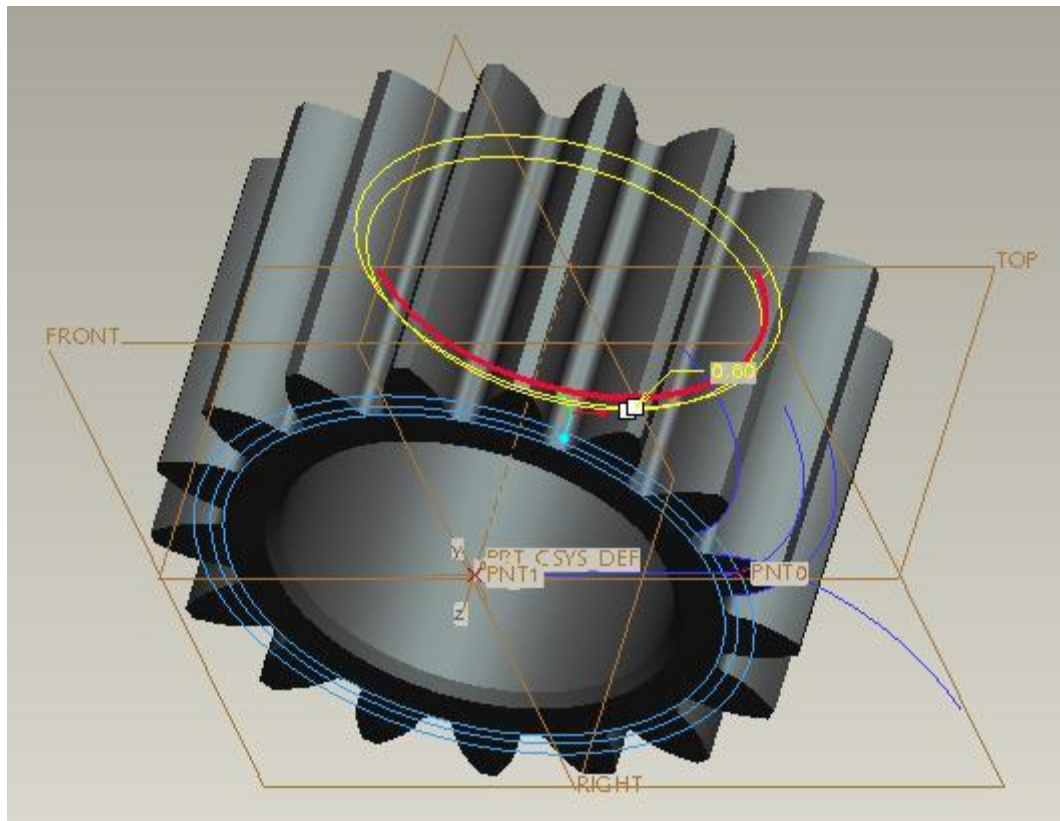


Σχήμα 2.45: Οι άκρες που επιλέγονται

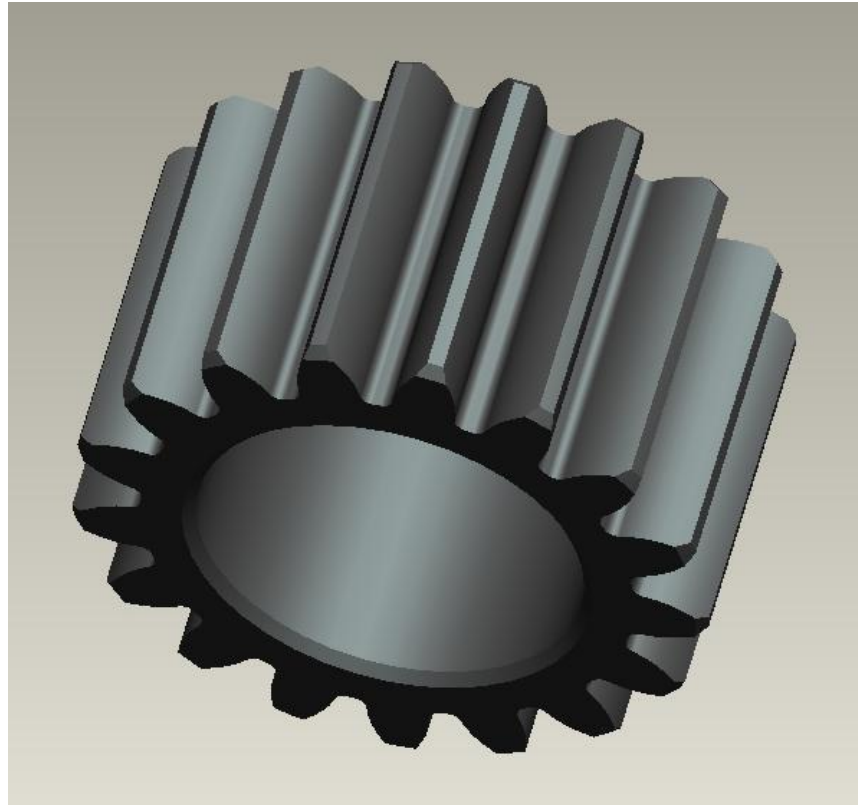


Σχήμα 2.46: Τα chamfer που προκύπτουν

Τέλος, για την δημιουργία και του άλλου chamfer στην άλλη άκρη της οπής επιλέγεται πάλι το εικονίδιο **Edge Chamfer** , η άλλη άκρη της οπής (σχήμα 2.47), πάνω αριστερά το , εισάγεται η τιμή 0.8 για το μήκος των πλευρών, πατιέται το **Enter** και επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Αποθηκεύεται ο οδοντωτός τροχός επιλέγοντας **File, Save** και στο παράθυρο διαλόγου **Save Object** το **OK**. Ο τελικός κινητήριος οδοντωτός τροχός παρουσιάζεται στο σχήμα 2.48.



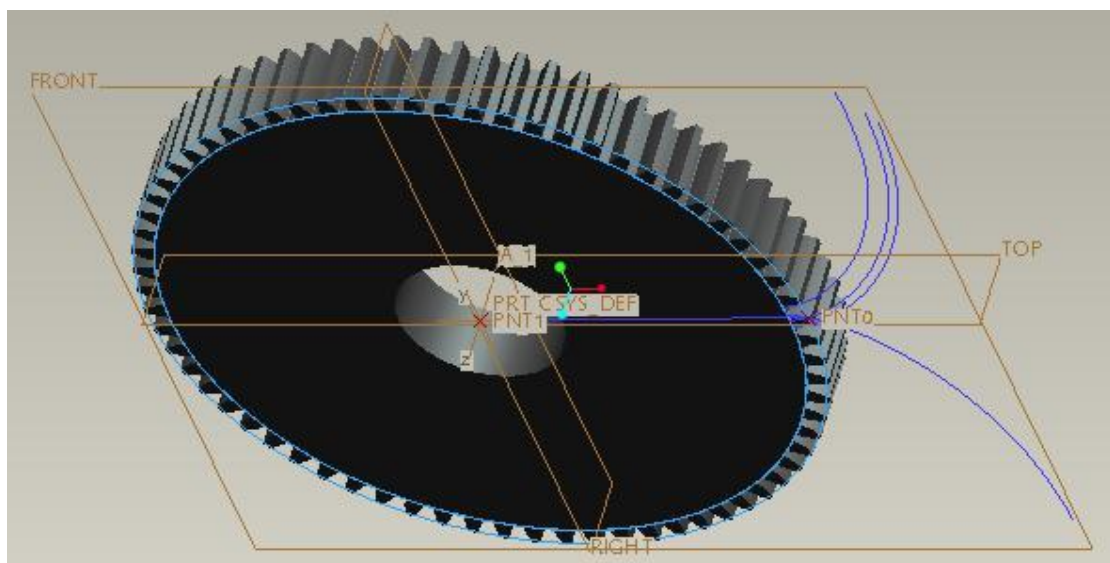
Σχήμα 2.47: Η άλλη άκρη της οπής που επιλέγεται



Σχήμα 2.48: Ο τελικός κινητήριος οδοντωτός τροχός

2.3.3 Κινούμενος οδοντωτός τροχός

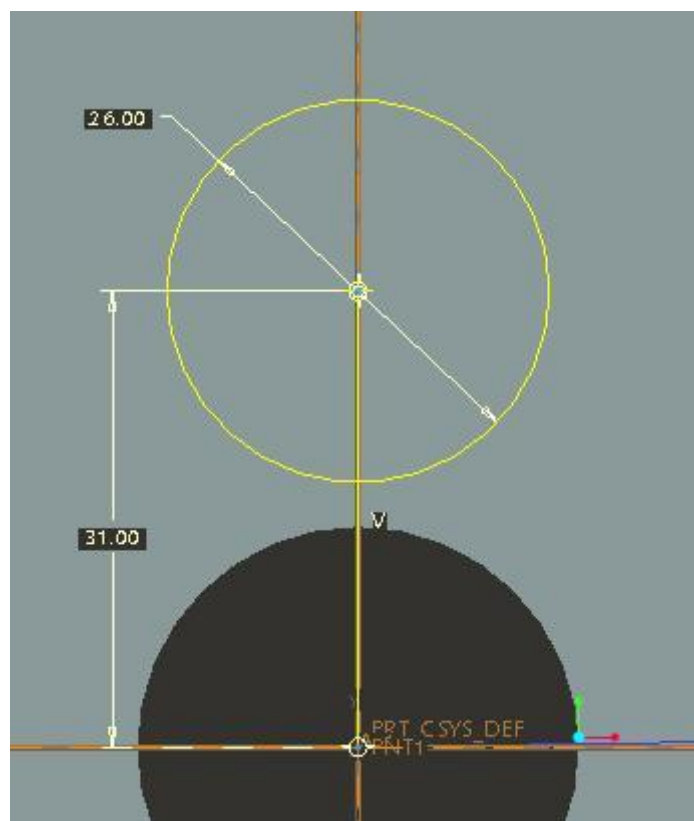
Για τον κινούμενο οδοντωτό τροχό τα 14 πρώτα βήματα είναι ίδια με του κινητήριου (μέχρι δηλαδή και την παράγραφο 2.3.2.14) και αλλάζουν μόνο οι εισαγόμενες τιμές. Το αποτέλεσμα μετά το βήμα 14 για τον κινούμενο τροχό παρουσιάζεται στο σχήμα 2.49.



Σχήμα 2.49: Ο κινούμενος τροχός που προκύπτει μετά το βήμα 14

2.3.3.1 Δημιουργία των περιμετρικών οπών

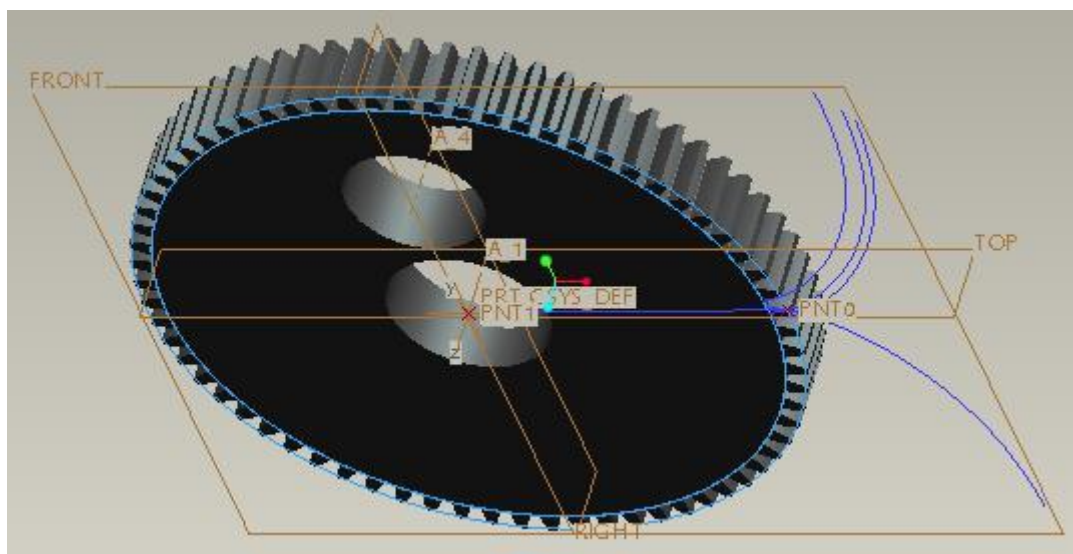
Αρχικά επιλέγεται το επίπεδο (datum plane) **FRONT** και κατόπιν το εικονίδιο **Extrude** . Κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ κάπου πάνω στην περιοχή σχεδίασης επιλέγεται **Define Internal Sketch**. Στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Sketch**. Επιλέγεται το εικονίδιο **Line**  από την γραμμή εργαλείων δεξιά και σχεδιάζεται ένα κάθετο ευθύγραμμο τμήμα με την μία άκρη του στην αρχή των αξόνων και με μήκος 31 όσο η ακτίνα τοποθέτησης των περιμετρικών οπών. Στην συνέχεια επιλέγοντας το εικονίδιο **circle**  σχεδιάζεται ένας κύκλος με κέντρο την άλλη άκρη του ευθυγράμμου τμήματος και διάμετρο 26 όσο η διάμετρος των περιμετρικών οπών (σχήμα 2.50). Τώρα το ευθύγραμμο τμήμα διαγράφεται επιλέγοντας το και πατώντας **Delete**. Για να ολοκληρωθεί το σχέδιο επιλέγεται το εικονίδιο **done**  κάτω δεξιά.



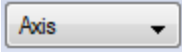
Σχήμα 2.50: Το ευθύγραμμο τμήμα και ο κύκλος που προκύπτουν

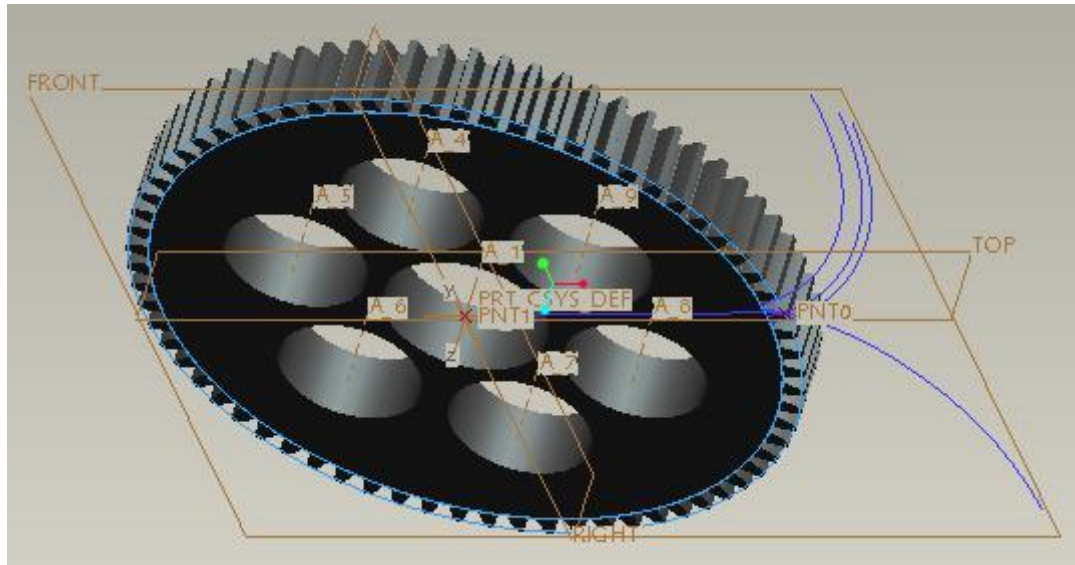
Τέλος, για να δημιουργηθεί η οπή επιλέγεται πάνω αριστερά το **Remove material**  για να αφαιρεθεί υλικό, δίπλα ακριβώς το  για να αλλάξει η φορά της κοπής, το  για να γίνει η κοπή σε όλο το πλάτος του κυλίνδρου και τέλος

το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά για να ολοκληρωθεί η κοπή. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.51.



Σχήμα 2.51: Η οπή που προκύπτει

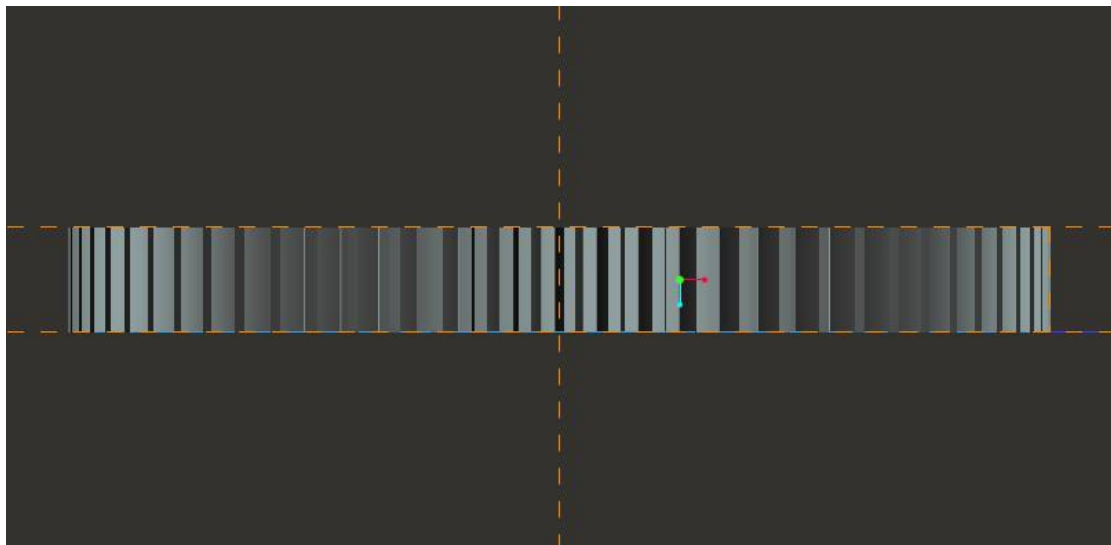
Τώρα για την δημιουργία και των υπολοίπων οπών θα γίνει αντιγραφή της οπής περιμετρικά με την χρήση του **Pattern**. Επιλέγεται η οπή που δημιουργήθηκε, το εικονίδιο **Pattern**  στην γραμμή εργαλείων δεξιά και κατόπιν επιλέγεται το είδος του Pattern επιλέγοντας το **Axis**  πάνω αριστερά και τον άξονα στο κέντρο του κυλίνδρου. Πάνω αριστερά εισάγεται ο αριθμός των οπών που θα δημιουργηθούν που είναι 6, πατιέται το **Enter**, δίπλα εισάγεται η γωνία μεταξύ των αντιγράφων που είναι $360/6 = 60$ και πατιέται το **Enter**. Τέλος επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.52.



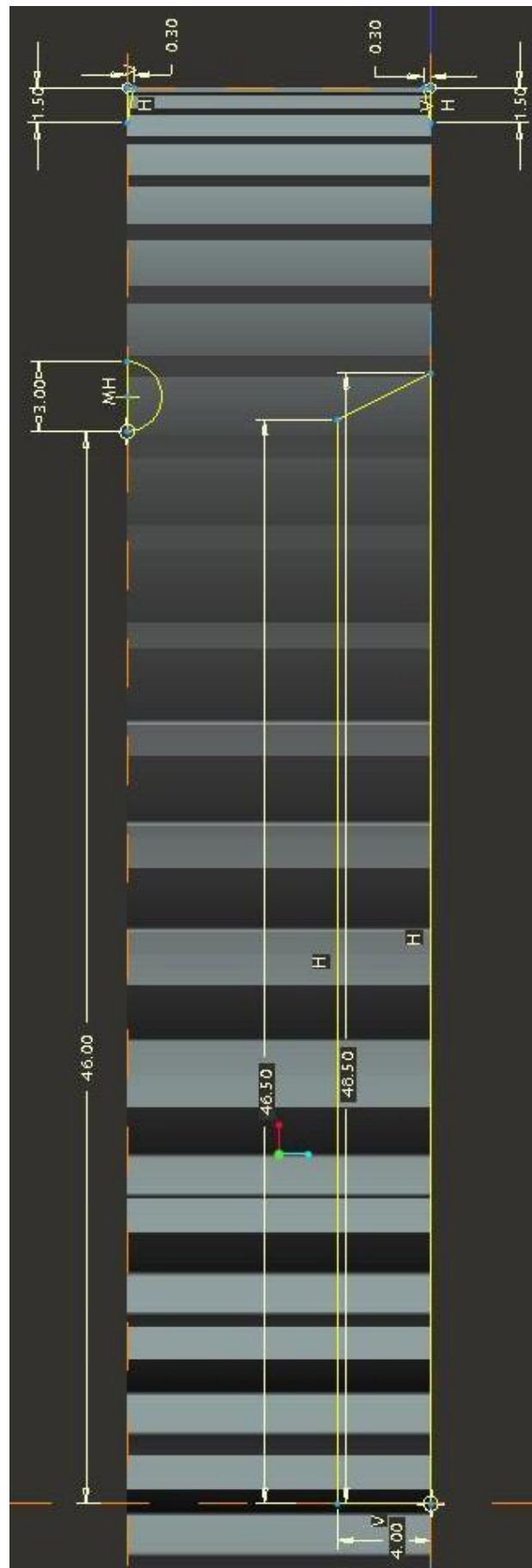
Σχήμα 2.52: Οι περιμετρικές σπές που προκύπτουν

2.3.3.2 Δημιουργία εσοκών και chamfer του οδόντα

Αρχικά επιλέγεται το επίπεδο **TOP** (ή **RIGHT**) και κατόπιν το εικονίδιο **sketch** . Στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Sketch**, επιλέγεται **Sketch**, **References** και για αναφορές σχεδίασης τα άκρα του τροχού που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.53 με διακεκομμένες γραμμές. Στην συνέχεια δημιουργείται το σχέδιο που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.54 και για να ολοκληρωθεί το σχέδιο επιλέγεται το εικονίδιο **done**  κάτω δεξιά.

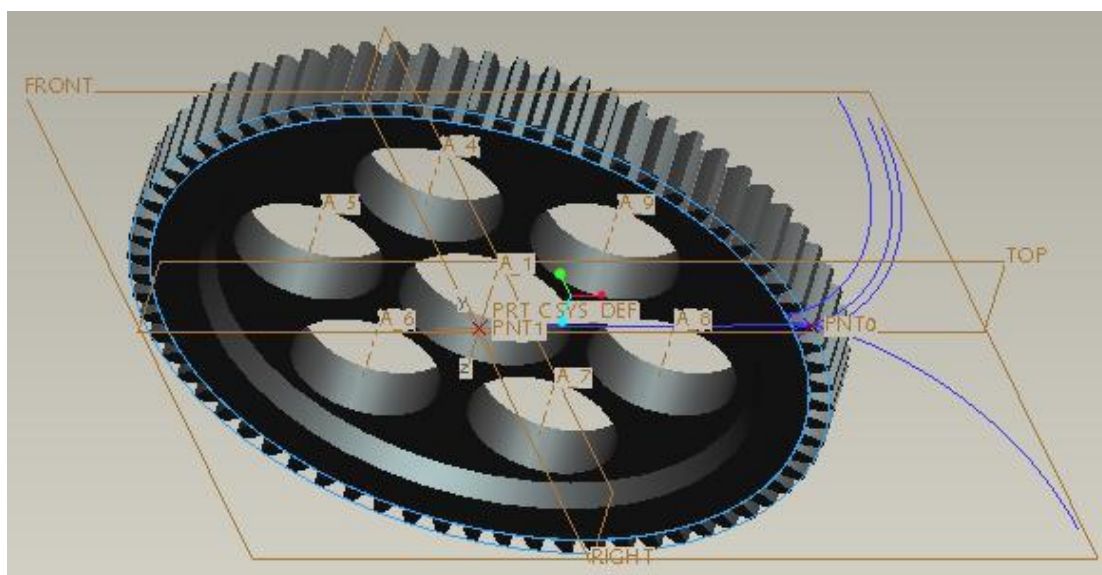


Σχήμα 2.53: Οι αναφορές σχεδίασης που επιλέγονται



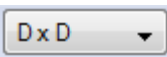
Σχήμα 2.54: Το σχέδιο που προκύπτει

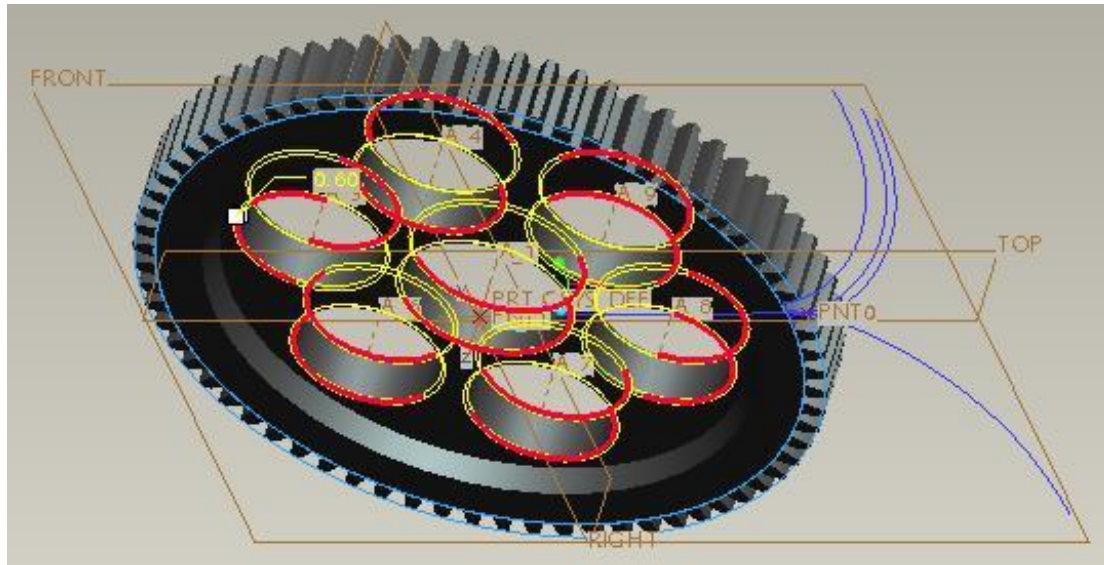
Για την δημιουργία των εσοχών και του chamfer επιλέγεται το σχέδιο που μόλις δημιουργήθηκε, κατόπιν το εικονίδιο **Revolve** , επιλέγεται ο άξονας στο κέντρο του κυλίνδρου, πάνω αριστερά το **Remove material**  για να αφαιρεθεί υλικό και τέλος το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά για να ολοκληρωθεί η κοπή. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.55.



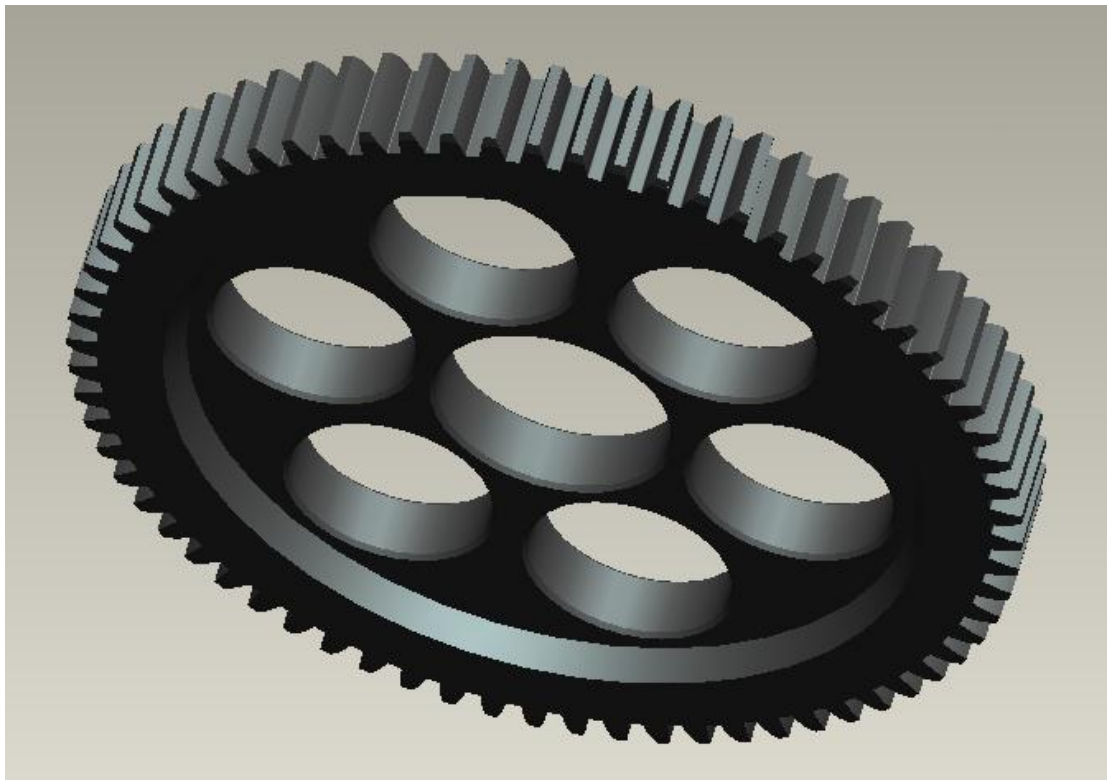
Σχήμα 2.55: Οι εσοχές και το chamfer που προκύπτουν

2.3.3.3 Δημιουργία των chamfer στις οπές

Αρχικά επιλέγεται το εικονίδιο **Edge Chamfer**  και κρατώντας πατημένο το **Ctrl** επιλέγονται όλες οι άκρες των οπών (σχήμα 2.56). Κατόπιν επιλέγεται πάνω αριστερά το **D x D**  εφόσον το ορθογώνια τρίγωνα που θα αφαιρεθούν είναι ισοσκελή, δίπλα εισάγεται η τιμή 0.6 για το μήκος των πλευρών και πατιέται το **Enter**. Για να ολοκληρωθούν τα chamfer επιλέγεται το εικονίδιο **done**  πάνω δεξιά. Αποθηκεύεται ο οδοντωτός τροχός επιλέγοντας **File, Save** και στο παράθυρο διαλόγου **Save Object** το **OK**. Ο τελικός κινούμενος οδοντωτός τροχός παρουσιάζεται στο σχήμα 2.57.



Σχήμα 2.56: Οι άκρες των οπών που επιλέγονται



Σχήμα 2.57: Ο τελικός κινούμενος οδοντωτός τροχός

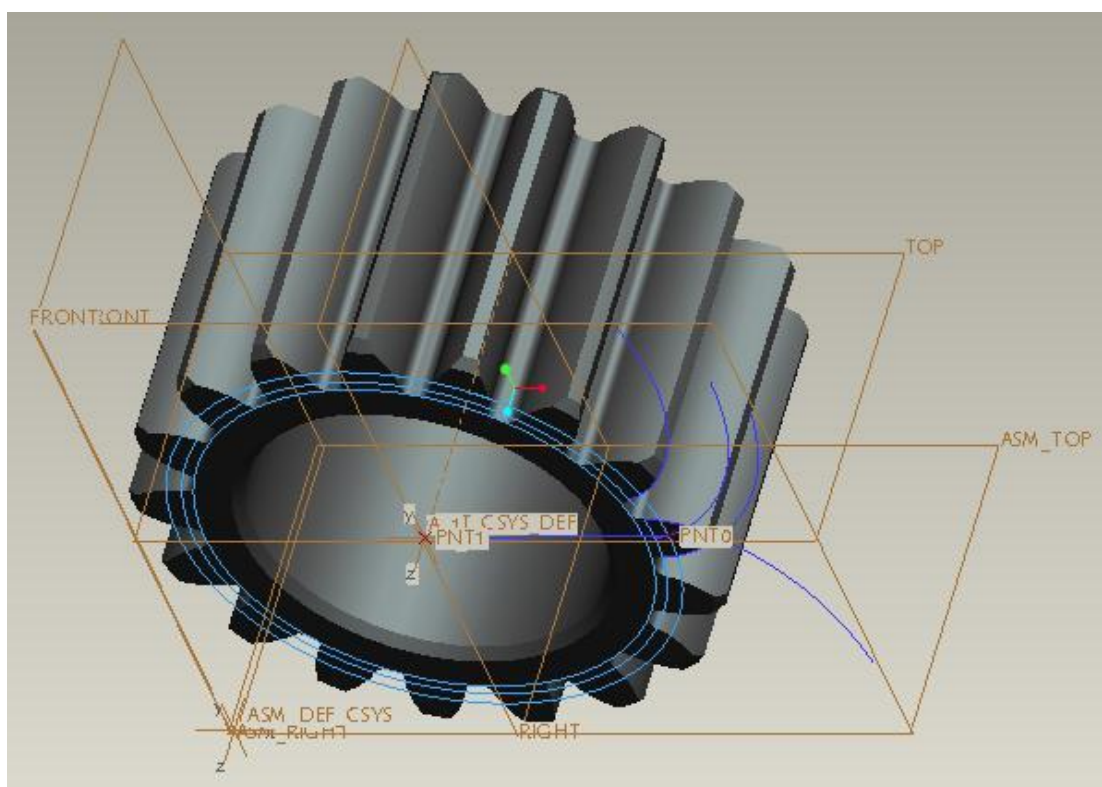
2.3.4 Ζεύγος οδοντωτών τροχών σε συνεργασία

2.3.4.1 Εισαγωγή του κινητήριου οδοντωτού τροχού

Αφού γίνει εκκίνηση του λογισμικού, αρχικά επιλέγεται η εντολή **file, new**, στο παράθυρο διαλόγου **New** που εμφανίζεται κάτω από το **Type** επιλέγεται το

Assembly, εισάγεται “gears” σαν όνομα του ζεύγους των οδοντωτών τροχών που θα δημιουργηθεί και επιλέγεται το **OK**. Κατόπιν ορίζεται η τοποθεσία που θα αποθηκεύεται το αντικείμενο επιλέγοντας **File, Set Working Directory**, στο παράθυρο διαλόγου **Select Working Directory** την επιθυμητή τοποθεσία και το **OK**.

Στην συνέχεια επιλέγεται το **Create**  από την γραμμή εργαλείων δεξιά, στο παράθυρο διαλόγου **Component Create** που εμφανίζεται επιλέγεται το **OK**, στο παράθυρο **Creation Options** επιλέγεται το **Browse**, στο παράθυρο **Choose Template** βρίσκεται η τοποθεσία που αποθηκεύτηκε ο κινητήριος τροχός, επιλέγεται και κατόπιν επιλέγεται το **Open** και στο παράθυρο **Creation Options** το **OK**. Πάνω δεξιά επιλέγεται το εικονίδιο **done** . Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.58.

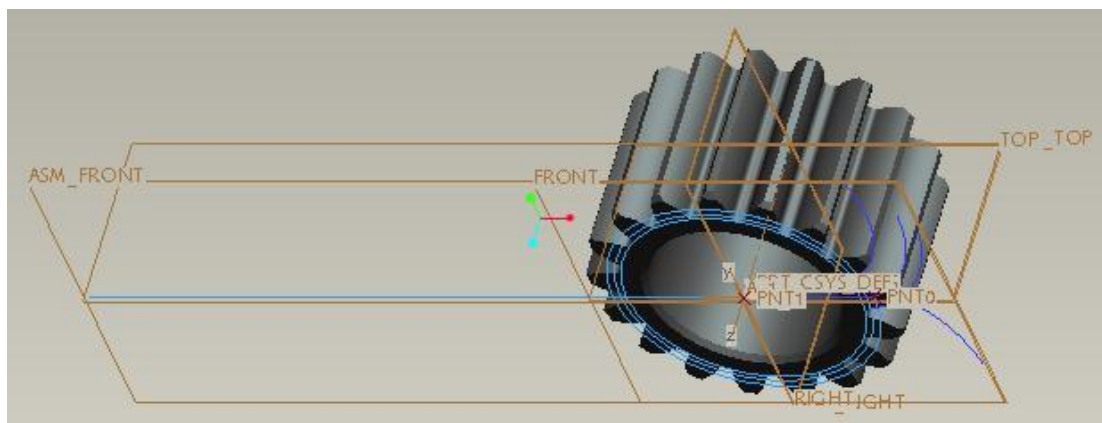


Σχήμα 2.58: Το αποτέλεσμα που προκύπτει

2.3.4.2 Εισαγωγή και τοποθέτηση του κινούμενου οδοντωτού τροχού

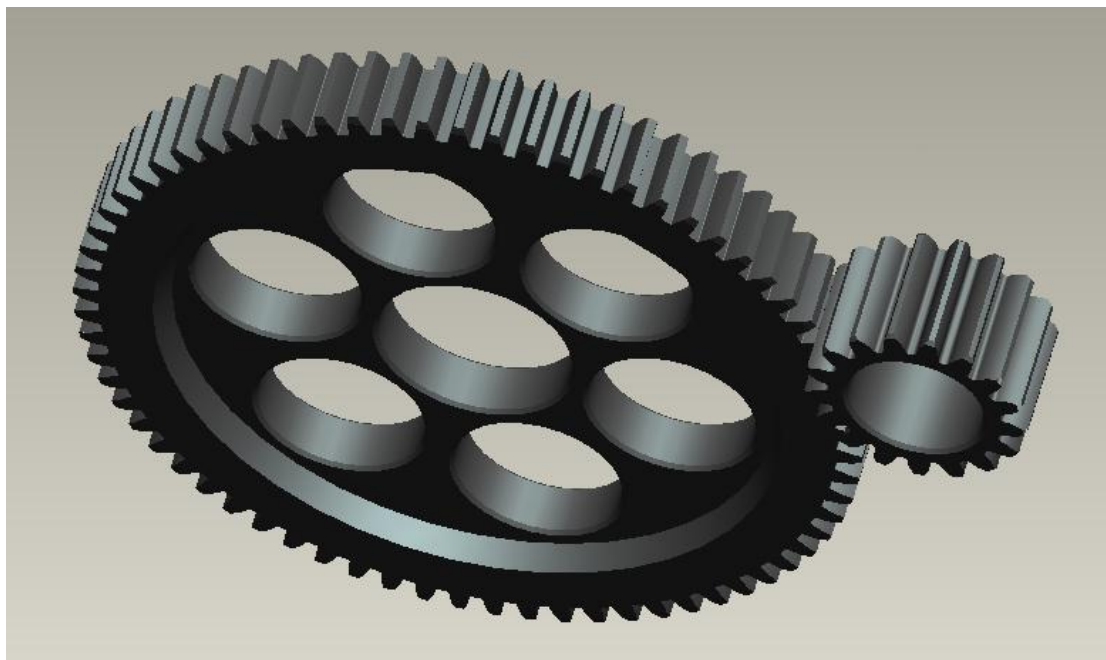
Για να τοποθετηθεί ο κινούμενος οδοντωτός τροχός πάνω στον κινητήριο πρέπει αρχικά να σχεδιαστεί ένα ευθύγραμμο τμήμα ίσο με την απόσταση των αξόνων στο οποίο τα άκρα θα τοποθετηθούν τα κέντρα των οδοντωτών τροχών.

Αρχικά επιλέγεται το επίπεδο **FRONT** και κατόπιν το εικονίδιο **sketch** . Στο παράθυρο διαλόγου **Sketch** επιλέγεται **Sketch**, επιλέγεται το εικονίδιο **Line**  από την γραμμή εργαλείων δεξιά και σχεδιάζεται ένα οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα με την δεξιά άκρη του στο κέντρο του οδοντωτού τροχού και με μήκος 74.4 όσο η απόσταση των αξόνων. Για να ολοκληρωθεί το σχέδιο επιλέγεται το εικονίδιο **done**  κάτω δεξιά. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.59.



Σχήμα 2.59: Το ευθύγραμμο τμήμα που προκύπτει

Στην συνέχεια θα εισαχθεί στο σχέδιο και ο κινούμενος οδοντωτός τροχός και τοποθετηθεί κατάλληλα. Επιλέγεται το εικονίδιο **Assemble**  από την γραμμή εργαλείων δεξιά, στο παράθυρο διαλόγου **Open** που εμφανίζεται βρίσκεται η τοποθεσία που αποθηκεύτηκε ο κινούμενος τροχός, επιλέγεται και κατόπιν επιλέγεται το **Open**. Στην συνέχεια επιλέγεται ο άξονας στο κέντρο του κινούμενου οδοντωτού τροχού και κατόπιν το άλλο άκρο του ευθυγράμμου τμήματος που σχεδιάστηκε προηγουμένως. Τέλος επιλέγεται πάνω δεξιά το εικονίδιο **done** . Γίνεται αποθήκευση επιλέγοντας **File, Save** και στο παράθυρο διαλόγου **Save Object** το **OK**. Το ζεύγος των οδοντωτών τροχών σε συνεργασία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.60.



Σχήμα 2.60: Το ζεύγος των οδοντωτών τροχών σε συνεργασία

2.3.5 Ανοχές

Για να γίνουν τα τελικά μηχανολογικά σχέδια είναι απαραίτητο να βρεθούν οι ανοχές των διαστάσεων τους. Ανοχή γενικά είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης δυνατής τιμής μιας διάστασης ενός τεμαχίου. Η εισαγωγή της έννοιας ανοχών καθώς σχετίζεται με τα εξής ζητήματα:

- αδυναμία οποιασδήποτε μεθόδου κατεργασίας να παράγει επαναληπτικά ακριβώς την ίδια ονομαστική διάσταση
- αύξηση του κόστους εκθετικά με τον περιορισμό των ανεκτών αποκλίσεων από την ονομαστική διάσταση
- ανάγκη εναλλαξιμότητας των μηχανολογικών εξαρτημάτων ενός συναρμολογημένου συνόλου

Εναλλαξιμότητα είναι η δυνατότητα αντικατάστασης ενός τεμαχίου από ένα άλλο με την ίδια λειτουργική συμπεριφορά. Η εναλλαξιμότητα δύο τεμαχίων προκύπτει από τον περιορισμό της απόκλισης των διαστάσεων τους από μια ονομαστική διάσταση. Η ανάγκη της εναλλαξιμότητας συνδέεται με την εύκολη αντικατάσταση εξαρτημάτων που έχουν φθαρεί, αστοχήσει κλπ, με την εύκολη συναρμολόγηση χωρίς ειδικούς τεχνίτες, εξοπλισμό κλπ, καθώς και με τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής.

2.3.5.1 Παραδοχές

Θερμοκρασία αναφοράς για τις μετρήσεις διαστάσεων είναι 20 °C, έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις. Βάσει του συντελεστή θερμικής διαστολής του χάλυβα, μήκος 100 mm μεταβάλλεται κατά 10 μm με κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 10°C.

Ονομαστική διάσταση (N) είναι αυτή που αναγράφεται στο σχέδιο (ιδανική - επιθυμητή). *Πραγματική διάσταση* είναι αυτή που προκύπτει από μετρήσεις. *Οριακές διαστάσεις* είναι οι δύο τιμές (μέγιστη και ελάχιστη) ανάμεσα στις οποίες πρέπει να βρίσκεται η πραγματική διάσταση και αναγράφονται επίσης στο σχέδιο. Αυτές για τους άξονες (προεξοχές) συμβολίζονται με A_μ και A_ϵ , για τα τρύματα (κοιλότητες) συμβολίζονται με B_μ και B_ϵ αντίστοιχα. *Άνω απόκλιση* είναι η διαφορά της μέγιστης διάστασης από την ονομαστική $A_0 = A_\mu - N$ ή $B_0 = B_\mu - N$. *Κάτω απόκλιση* είναι η διαφορά της ελάχιστης διάστασης από την ονομαστική $A_k = A_\epsilon - N$ ή $B_k = B_\epsilon - N$. *Βασική απόκλιση* είναι η κατ' απόλυτη τιμή μικρότερη από τις αποκλίσεις A_0 και A_k . *Ανοχή (T)* είναι η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη διάσταση $T_A = A_\mu - A_\epsilon = A_0 - A_k$ ή $T_B = B_\mu - B_\epsilon = B_0 - B_k$

2.3.5.2 Σύστημα ανοχών ISO

Για την τυποποίηση των ανοχών ορίζονται 22 ποιότητες που συμβολίζονται ως IT1-IT22. Ο όρος ποιότητα ανοχής χαρακτηρίζει το μέγεθος της ανοχής, το οποίο αντιστοιχεί στην απαιτούμενη ακρίβεια κατασκευής. Η βάση υπολογισμού είναι η ποιότητα IT6. Κάθε ποιότητα πάνω από την IT6 υπολογίζεται με πολλαπλασιασμό της προηγούμενης με το συντελεστή 1.6. Οι ποιότητες IT5 και κάτω υπολογίζονται ξεχωριστά (διαφορετικά).

Οι ποιότητες IT6 και κάτω χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οργάνων μέτρησης, ελεγκτήρων και σε συσχετισμό με την κατεργασία της υπερλείανσης (lapping, superfinishing). Η ποιότητα IT6 σπανιότερα χρησιμοποιείται και σε μηχανουργικές εφαρμογές. Οι ποιότητες IT7-IT11 χρησιμοποιούνται στις συνήθεις μηχανουργικές κατεργασίες. Οι ποιότητες IT12-IT18 εφαρμόζονται στις κατεργασίες διαμόρφωσης όπως εξέλαση, διέλαση, σφυρηλάτηση κλπ.

Στα μηχανολογικά σχέδια των οδοντωτών τροχών που θα δημιουργηθούν θα χρησιμοποιηθεί η ποιότητα IT11, εφόσον οι τροχοί θα κατασκευαστούν με συνήθεις μηχανουργικές κατεργασίες (βλέπε κεφάλαιο 4 - παράγραφο 4.3) και δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια. Ακόμη, η ανοχή δεν πρέπει να είναι ποτέ μικρότερη από όσο είναι ανάγκη, καθώς όπως θα φανεί και παρακάτω κατά την ανάλυση κόστους της κατασκευής, μικρότερη ανοχή σημαίνει και υψηλότερο κόστος.

Για την ποιότητα IT6 η ανοχή ισούται με $10 \cdot i$ όπου i είναι η μονάδα ανοχής η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$i = 0.45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0.001 \cdot D$$

όπου i σε μm και D σε mm . D είναι ο γεωμετρικός μέσος των άκρων του διαστήματος τιμών, όπου ανήκει η ονομαστική διάσταση της ανοχής, δηλαδή $D = \sqrt{D_1 \cdot D_2}$. Τα 13 κύρια διαστήματα (D_1, D_2) που ορίζονται είναι:

(1,3] (3-6] (6,10] (10,18] (18,30] (30,50] (50,80] (80,120] (120,180] (180,250]
(250,315] (315,400] (400,500]

Για την πιο εύκολη εύρεση της ανοχής σύμφωνα με την ονομαστική διάσταση και την ποιότητα δίνεται ο πίνακας 2.3 παρακάτω. [2]

Πίνακας 2.3: Τιμές ανοχών σύμφωνα με ονομαστική διάσταση και ποιότητα [5]

Ονομαστική διάσταση [mm]		Διαφορά μέγιστης από την ελάχιστη διάσταση [μm]									
Από	Μέχρι και	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13
-	3	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140
3	6	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180
6	10	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220
10	18	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270
18	30	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330
30	50	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390
50	80	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460
80	120	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540
120	180	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630
180	250	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720
250	315	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810
315	400	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890
400	500	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970

2.3.6 Τραχύτητα επιφάνειας

Ένα άλλο στοιχείο που απαιτείται για την δημιουργία των μηχανολογικών σχεδίων των τροχών είναι η μέση τραχύτητα (R_a) των επιφανειών των οδόντων τους που έρχονται σε επαφή. Η τραχύτητα πρέπει να παρουσιάζεται στα σχέδια, καθώς έχει ιδιαίτερη σημασία ειδικά σε περιπτώσεις συνεργαζόμενων επιφανειών. Είναι συνάρτηση με την ακρίβεια ή την ανοχή σε ένα εξάρτημα, καθορίζει την ποιότητα της επιφάνειάς του και πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την κατασκευή του για την επιλογή κατάλληλων κατεργασιών.

2.3.6.1 Τοπογραφία επιφανειών

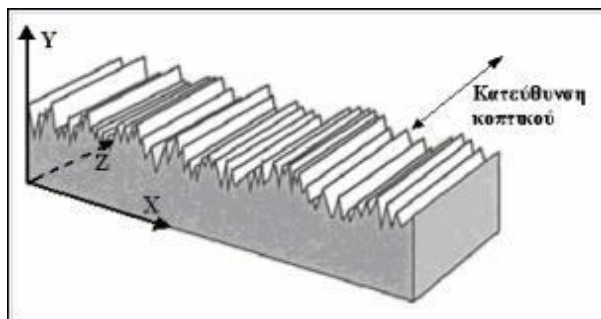
Στα στερεά σώματα, η έννοια της *απολύτως λείας επιφάνειας*, μιας επιφάνειας δηλαδή, όλα τα άτομα της οποίας ανήκουν στο ίδιο γεωμετρικό επίπεδο, δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί. Ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένο το στερεό, και τον τρόπο δημιουργίας των εξωτερικών επιφανειών του (τεχνική παραγωγής στερεού, κατεργασία μορφοποίησης, διεργασία επιφανειακής ενίσχυσης), η έννοια του λείου δύναται να προσεγγισθεί περισσότερο ή λιγότερο. Η παρατήρηση της επιφάνειας, ακόμη και σε ατομικό επίπεδο, θα αναδείξει ανωμαλίες της γεωμετρίας της, με τη μορφή διαδοχικών εξάρσεων/βυθίσεων του ανάγλυφου, το σύνολο των οποίων συνιστά την *επιφανειακή τοπογραφία*. Για κάθε τεχνολογική εφαρμογή και προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση της επιφάνειας, στη φάση του σχεδιασμού του στερεού (π.χ. μεταλλικό εξάρτημα μηχανής) προκαθορίζονται τα αποδεκτά γεωμετρικά όρια της επιφανειακής τοπογραφίας του, προκαθορίζεται δηλαδή, η αποδεκτή *ποιότητα της επιφάνειας*. Κατά τη λειτουργία του στερεού σώματος, ενδέχεται η ποιότητα της επιφάνειά του να μεταβληθεί, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το σώμα λειτουργεί σε επαφή με άλλο στερεό, σε διαβρωτικό περιβάλλον, ή/και υπό καθεστώς μηχανικών φορτίσεων. Έτσι, λοιπόν, μια μηχανολογική, «τεχνητή» επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρογραφία του ανάγλυφου του «φυσικού στερεού» Γη (σχήμα 2.61) που χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη βουνών, πεδιάδων, κοιλάδων κ.λπ.



Σχήμα 2.61: «Ποιότητα επιφάνειας» ενός «φυσικού» στερεού σώματος [6]

Στην περίπτωση μηχανολογικών εξαρτημάτων, τα οποία λαμβάνουν το τελικό τους σχήμα/διαστάσεις κύρια με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, οι επιφάνειές τους εμφανίζουν προσανατολισμένο ανάγλυφο (σχήμα 2.62) καθώς σε τέτοιες κατεργασίες, το κοπτικό άκρο κινείται και αφαιρεί υλικό σε μία διεύθυνση, προσδίδοντας έτσι στη λαμβανόμενη επιφάνεια προσανατολισμένα και επαναλαμβανόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή μέγιστες ανωμαλίες στην κάθετη προς τον άξονα κατεργασίας διεύθυνση (άξονας X, σχήμα 2.62) και ελάχιστες κατά τη διεύθυνση πρόωσης του κοπτικού άκρου (άξονας Z, σχήμα 2.62). Αυτή

ακριβώς η ιδιομορφία των μηχανολογικών επιφανειών, επιτρέπει τη δισδιάστατη αναπαραγωγή της επιφάνειας η οποία είναι αντιπροσωπευτική του πραγματικού ανάγλυφου.

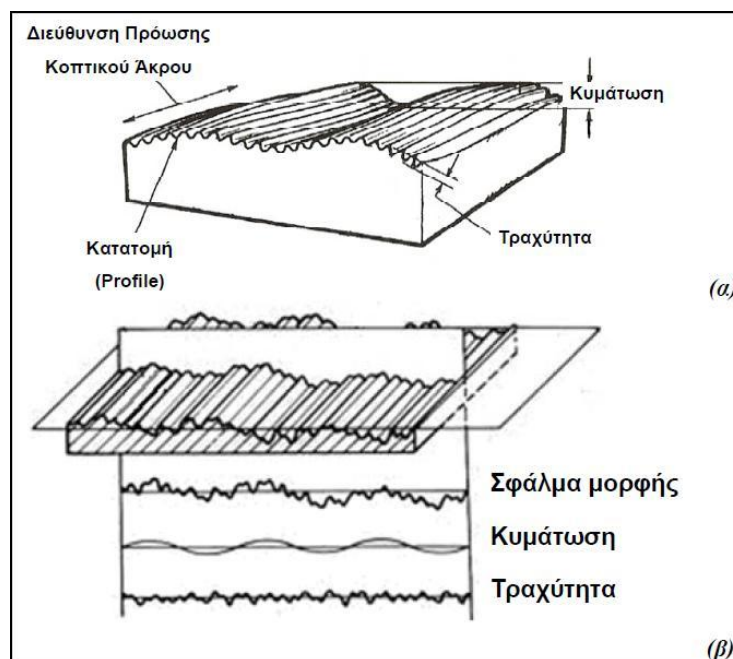


Σχήμα 2.62: Τυπική μορφή πλανισμένης επιφάνειας [6]

2.3.6.2 Αποκλίσεις μηχανολογικών επιφανειών από την επιπεδότητα

Η εικόνα ενός στερεού σώματος, κοντά στην επιφάνεια, γενικά, έχει τη μορφή του σχήματος 2.63α. Μια μηχανολογική επιφάνεια παρουσιάζει γεωμετρικές αποκλίσεις από την επιπεδότητα, δηλαδή από το μαθηματικά «απόλυτα λείο», οι οποίες είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους, συνδέονται με τις συνθήκες κατεργασίας (ρύθμιση εργαλειομηχανής, γεωμετρία κοπτικού άκρου, παράμετροι αφαίρεσης υλικού) και μπορούν να προσεγγισθούν με κυματομορφές (σχήμα 2.63β). Αυτές είναι οι εξής:

- *Σφάλμα μορφής* που συνδέεται με τη λανθασμένη ρύθμιση της εργαλειομηχανής ή/και των παραμέτρων κατεργασίας και μπορεί να είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών (mm). Συνήθως γίνεται αντιληπτό ως σημαντική υψομετρική απόκλιση μεταξύ του τμήματος της επιφάνειας που δημιουργείται στα πρώτα στάδια της κατεργασίας και εκείνου που προκύπτει με την ολοκλήρωσή της.
- *Κυμάτωση* που συνδέεται με ταλαντώσεις του μηχανήματος, κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, είναι της τάξεως του χιλιοστού (mm) και γίνεται αντιληπτή ως περιοδικά επαναλαμβανόμενες μακροσκοπικές εξάρσεις/βυθίσεις του συνολικού ανάγλυφου.
- *Τραχύτητα* που συνδέεται με τη γεωμετρία των κοπτικών άκρων, είναι της τάξεως των μερικών δεκάτων του χιλιοστού (μm) και είναι η κύρια συνιστώσα της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας, αφού οι προηγούμενες γεωμετρικές αποκλίσεις από την επιπεδότητα οφείλονται σε λανθασμένες επιλογές/ενέργειες του χειριστή της εργαλειομηχανής.



Σχήμα 2.63: Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρικών αποκλίσεων μηχανολογικών επιφανειών όπου (α) μορφή πραγματικής επιφάνειας και (β) ανάλυση αποκλίσεων από την επιπεδότητα [6]

2.3.6.3 Τραχύτητα επιφανειών

Όπως αναφέρθηκε, ο όρος *Τραχύτητα επιφάνειας* χρησιμοποιείται για την περιγραφή των γεωμετρικών αποκλίσεων της επιφάνειας από την επιπεδότητα, οι οποίες οφείλονται:

(α) Στη γεωμετρία (*μακροσκοπική και μικροσκοπική*) του κοπτικού άκρου ή του μέσου απόξεσης που προκαλεί αφαίρεση υλικού, κατά την κατεργασία της επιφάνειας.

(β) Στις συνθήκες λειτουργίας της επιφάνειας. Είναι προφανές, ότι οι επιφάνειες συζευγμένων στοιχείων μηχανών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση υφίστανται εκτράχυνση ή λείανση κατά τη λειτουργία τους, ενώ η δράση χημικών παραγόντων του περιβάλλοντος ενδέχεται να οδηγήσει σε διάβρωση της μεταλλικής επιφάνειας και σε δημιουργία, γενικά, εντονότερου ανάγλυφου.

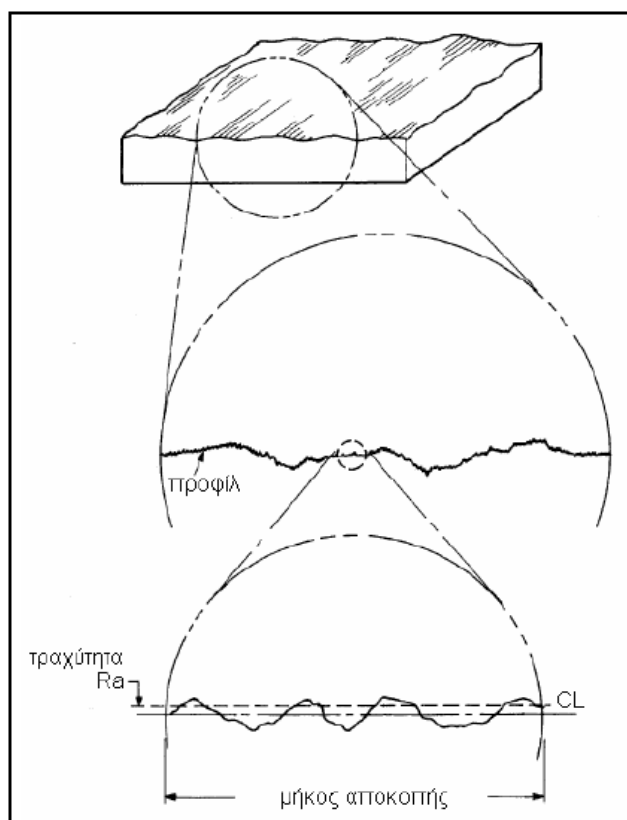
Για τις συνήθεις μηχανολογικές επιφάνειες είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού (2-100 μm). Για μικρότερων διαστάσεων γεωμετρικές αποκλίσεις της τάξης του νανομέτρου (nm), χρησιμοποιείται ο όρος *Μικρο- ή Νανο-τραχύτητα*, για να αποδώσει αποκλίσεις σε ατομική κλίμακα.

Η γνώση και ο έλεγχος της τραχύτητας μια επιφάνειας είναι πολύ σημαντικά στοιχεία, τόσο για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής μιας μεταλλικής κατασκευής, όσο και για το μη καταστροφικό έλεγχό της κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Είναι γνωστό ότι επιφανειακές εσοχές, οι βυθίσες δηλαδή του ανάγλυφου, αποτελούν

σημεία έναρξης ρωμών, στην περίπτωση εναλλασσόμενων μηχανικών φορτίσεων (κόπωση) ή/και διάβρωσης, στην περίπτωση λειτουργίας σε χημικά επιβαρυνμένο περιβάλλον.

2.3.6.4 Μέτρηση γεωμετρικών αποκλίσεων επιφανειών σε δυο διαστάσεις

Η *Κατατομή* (profile) της επιφάνειας προσδιορίζεται με την ιχνηλάτηση των ανωμαλιών της (σχήμα 2.64), με τη χρήση τεχνικών που στηρίζονται σε μηχανικά, ηλεκτρικά ή οπτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη σάρωση της επιφάνειας σε μια ευθεία. Οι διατάξεις με τις οποίες επιτυγχάνεται η ιχνηλάτηση καλούνται *Κατατομόμετρα* ή *Προφιλόμετρα* ή *Τραχύμετρα*. Ανάλογα με το φαινόμενο στο οποίο στηρίζεται η λειτουργία τους, διακρίνουμε τα *Μηχανικά Ταχύμετρα*, *Ηλεκτρομηχανικά Τραχύμετρα*, *Οπτικά Προφιλόμετρα*, κ.λπ.



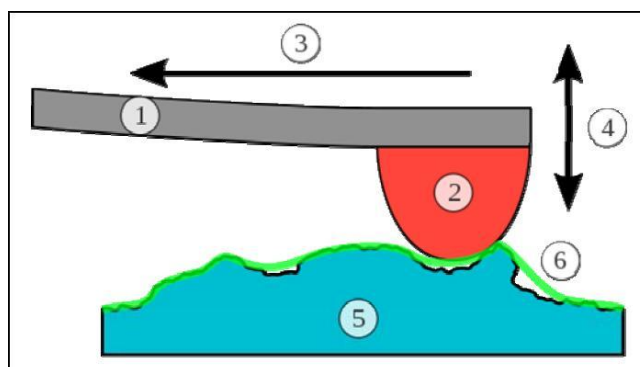
Σχήμα 2.64: Διαδοχικές μεγεθύνσεις επιφανειών [6]

Από το σύνολο των υφιστάμενων τεχνικών, οι ηλεκτρομηχανικές αποδείχθηκαν οι πιο εύχρηστες και κατάλληλες για γρήγορη και αξιόπιστη αξιολόγηση της ποιότητας της επιφάνειας, διότι επιτρέπουν αφενός την άμεση

καταγραφή/αναπαραγωγή της κατατομής και αφετέρου την ποσοτικοποίηση της, με τον υπολογισμό διαφόρων *Μέτρων Τραχύτητας*.

2.3.6.4.1 Ηλεκτρομηχανικά Τραχύμετρα

Τα ηλεκτρομηχανικά τραχύμετρα στηρίζονται στην «ανάγνωση» του ανάγλυφου μιας επιφάνειας, κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής την οποία έχουμε προεπιλέξει, ενώ ολισθαίνει επ' αυτής ένας στυλίσκος ευαίσθητης ακίδας τυποποιημένης γεωμετρίας (σχήμα 2.65). Υπάρχουν δύο είδη, τα εργαστηριακά και τα εργοταξιακά (σχήμα 2.66) και διαφέρουν μεταξύ τους, κυρίως, ως προς την ικανότητα μέτρησης πολύ λείων επιφανειών.



Σχήμα 2.65: Αρχή λειτουργίας ηλεκτρομηχανικών προφίλομέτρων. Ο στυλίσκος (1) με την προσαρμοσμένη κατάλληλη αδαμάντινη ακίδα (2) ολισθαίνει παράλληλα στην επιφάνεια (3) του αντικειμένου (5). Ακολουθώντας την κατατομή της επιφάνειας, ο στυλίσκος κινείται κατακόρυφα (4) και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του καταγράφονται ως η μετρούμενη (πράσινο χρώμα) κατατομή (6). [6]



Σχήμα 2.66: Τραχύμετρα (α) εργαστηριακό και (β) εργοταξιακό [6]

Σημαντικό ρόλο κατά την μέτρηση παίζει το *μήκος ολοκλήρωσης ή αποκοπής* (cut-off length). Οι επιφάνειες, γενικά, έχουν τοπογραφικές ανωμαλίες λόγω της τραχύτητας, με διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις και ύψη κορυφών. Για την ορθή μέτρηση της πραγματικής τραχύτητας, είναι απαραίτητη η επιλογή ενός μήκους ολοκλήρωσης αρκετά μεγάλου, ώστε να περιλαμβάνει ένα πλήρως αντιπροσωπευτικό δείγμα της επιφάνειας, αλλά ταυτοχρόνως και αρκετά μικρού, ώστε η μέτρηση να είναι ταχεία και να μην εμπεριέχει τιμές που σχετίζονται, π.χ. με την κυμάτωση, και αλλοιώνουν το αποτέλεσμα της μέτρησης.

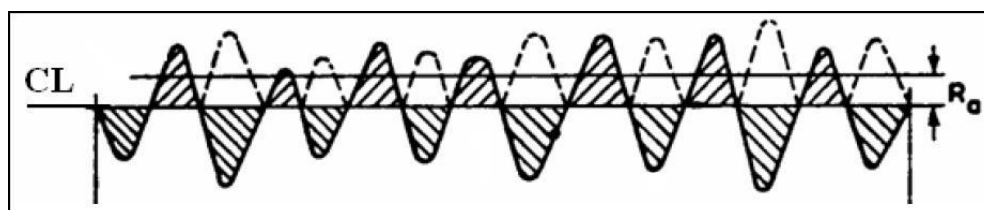
Μετά την μέτρηση τους, οι κατατομές «ποσοτικοποιούνται» με τον υπολογισμό παραμέτρων που καλούνται μέτρα τραχύτητας, τα οποία είναι απλά μέσες αποκλίσεις από κάποια γραμμή αναφοράς ή στατιστικές παράμετροι και τα οποία θα περιγραφούν παρακάτω.

2.3.6.5 Μέτρα τραχύτητας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η τραχύτητα αποτελεί καθοριστικό στοιχείο της ποιότητας της επιφάνειας και για το χαρακτηρισμό της έχουν προταθεί διάφορα συστήματα μέτρησης/αναφοράς, ως προς τα οποία ορίζονται και τα «μέτρα της τραχύτητας», με διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα το καθένα.

2.3.6.5.1 Μέση γραμμή

Ο καθορισμός της μέσης γραμμής στα τραχύμετρα είναι πρακτικά ανέφικτος και γι' αυτό, ως σύστημα αναφοράς προτάθηκε η *Κεντρική Γραμμή* (central line – CL), η οποία είναι μια ευθεία γραμμή (σχήμα 2.67), τέτοια ώστε τα αποκτώμενα εμβαδά μεταξύ αυτής και του πραγματικού περιγράμματος της κατατομής, προς τα άνω και προς τα κάτω, να είναι ίσα, για προκαθορισμένο μήκος δειγματοληψίας (L).



Σχήμα 2.67: Κεντρική γραμμή κατατομής, CL και μέση αριθμητική τραχύτητα, Ra [6]

Η θέση της κεντρικής γραμμής ορίζεται, ώστε αν αυτή ληφθεί σαν αρχή των τεταγμένων να ικανοποιείται η σχέση:

$$\int_0^L y dx = 0$$

Δηλαδή, η κεντρική γραμμή τέμνει κατά τέτοιο τρόπο την κατατομή της επιφάνειας, ώστε τα σχηματιζόμενα εμβαδά μεταξύ αυτής και της κατατομής εκατέρωθεν αυτής, να είναι ίσα.

2.3.6.5.2 Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a

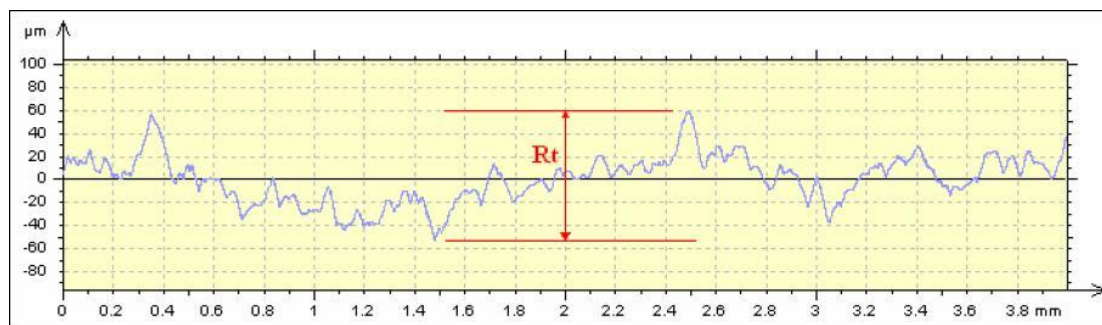
Ως μέση αριθμητική τραχύτητα (R_a) ορίζεται το μέτρο της τραχύτητας που δίνεται από την σχέση:

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y| dx$$

Παριστάνει τη μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων της πραγματικής κατατομής από την κεντρική γραμμή, στο δεδομένο μήκος δειγματοληψίας (σχήμα 2.67). Η τραχύτητα R_a είναι η πλέον διαδεδομένη, διότι ο προσδιορισμός της κεντρικής γραμμής γίνεται αυτόματα από τα ηλεκτρικά όργανα μέτρησης (τραχύμετρα) και, κατά συνέπεια, η διαδικασία προσδιορισμού της είναι ταχύτατη.

2.3.6.5.3 Μέγιστο βάθος ή μέγιστη τραχύτητα R_t

Μέγιστο βάθος ή μέγιστη τραχύτητα (R_t) είναι η υψομετρική διαφορά της υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών από τη βαθύτερη κοιλάδα (σχήμα 2.68), εντός του μήκους δειγματοληψίας.



Σχήμα 2.68: Υπολογισμός του μέγιστου βάθους ή μέγιστης τραχύτητας (R_t) κατατομής [6]

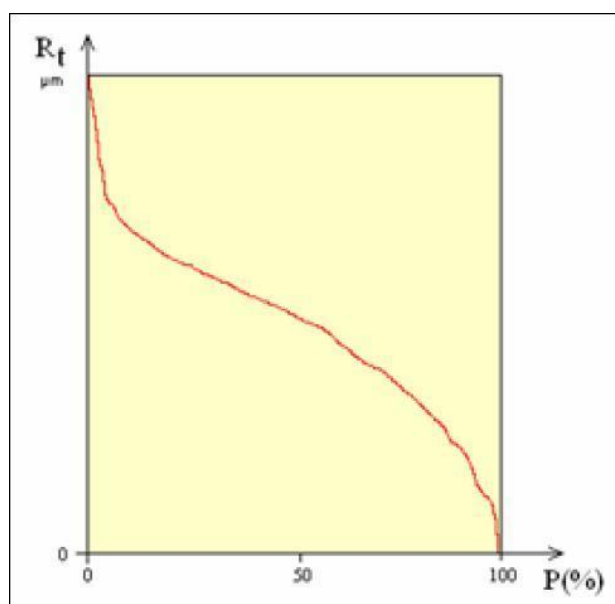
Το μέγιστο βάθος R_t μετράται πολύ εύκολα, έχει όμως το μειονέκτημα να παρουσιάζει ευαισθησία σε τυχαίες τοπικές ανωμαλίες, π.χ. αμυχή στην επιφάνεια, εντός του μήκους δειγματοληψίας και οι οποίες δε χαρακτηρίζουν την κατατομή.

2.3.6.5.4 Καμπύλη Φέρουσας Επιφάνειας

Καμπύλη φέρουσας επιφάνειας λέγεται η καμπύλη που παριστάνει την αθροιστική συχνότητα εμφάνισης ύψους ανωμαλίας μεγαλύτερου από δεδομένη στάθμη (σχήμα 2.69) και δίνει σημαντικές πληροφορίες για την πραγματική επιφάνεια:

$$P_{(y>h)} = \int_h^{\infty} p(y)dy$$

όπου $p(y)$ η συνάρτηση κατανομής υψών που δείχνει την πιθανότητα κάποιο σημείο της επιφάνειας να έχει ύψος μεταξύ $y + dy$. [6]



Σχήμα 2.69: Καμπύλη Φέρουσας Επιφάνειας [6]

2.3.6.6 Μέτρηση της μέσης τραχύτητας (R_a) των οδόντων των τροχών

Η μέση τραχύτητα της επιφάνειας των οδόντων των τροχών μετρήθηκε με την χρήση του ηλεκτρομηχανικού φορητού τραχυμέτρου *TIME TR-110*. Το μήκος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.8 mm. Στον κινητήριο τροχό είναι $R_a = 2 \mu m$ και στον κινούμενο $R_a = 2.2 \mu m$. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από την διαδικασία των μετρήσεων.



Σχήμα 2.70: Το ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 2.71: Μέτρηση τραχύτητας της επιφάνειας των οδόντων κινητήριου τροχού



Σχήμα 2.72: Μέτρηση τραχύτητας της επιφάνειας των οδόντων κινούμενου τροχού

2.3.7 Τελικά μηχανολογικά σχέδια

2.3.7.1 Μηχανολογικό σχέδιο κινητήριου οδοντωτού τροχού

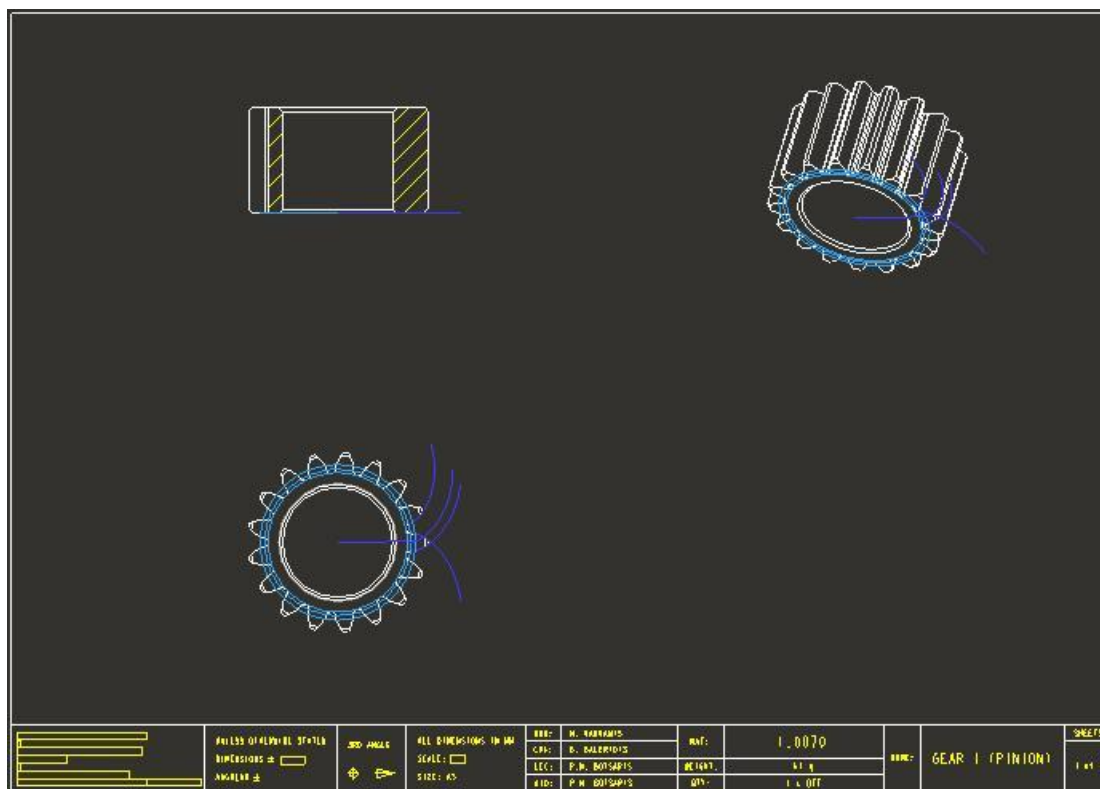
Αφού ανοιχτεί το λογισμικό, αρχικά επιλέγεται η εντολή **file, new**, στο παράθυρο διαλόγου **New** που εμφανίζεται κάτω από το *Type* επιλέγεται το **Drawing**, εισάγεται “gear1” σαν όνομα του σχεδίου του κινητήριου τροχού που θα δημιουργηθεί, διαγράφεται η επιλογή δίπλα στο **Use default template** και επιλέγεται το **OK**. Στο παράθυρο **New Drawing** στο *Default Model* επιλέγεται το **Browse**, στο παράθυρο διαλόγου **Open** που εμφανίζεται βρίσκεται η τοποθεσία που αποθηκεύτηκε ο κινητήριος οδοντωτός τροχός, επιλέγεται και κατόπιν επιλέγεται το **Open**. Στην συνέχεια στο *Specify Template* από κάτω επιλέγεται το **Empty with format**, στο *Format* επιλέγεται το **Browse**, στο παράθυρο διαλόγου **Open** που εμφανίζεται επιλέγεται το επιθυμητό αποθηκευμένο υπόμνημα και κατόπιν επιλέγεται το **Open**. Επιλέγεται το **OK**. Κατόπιν ορίζεται η τοποθεσία που θα αποθηκευτεί το αντικείμενο επιλέγοντας **File, Set Working Directory**, στο παράθυρο διαλόγου **Select Working Directory** την επιθυμητή τοποθεσία και το **OK**. Αλλάζετε η κλίμακα του σχεδίου από 1:1 σε 2:1 πατώντας διπλό κλικ στο **SCALE** στην επιφάνεια

σχεδίασης κάτω αριστερά, εισάγοντας δίπλα στο *Enter value for scale* την τιμή 2 και επιλέγοντας το εικονίδιο **Accept value** .

Για να συμπληρωθούν οι απαραίτητες πληροφορίες που λείπουν στο υπόμνημα επιλέγεται **Insert, Note**, στο παράθυρο διαλόγου **Menu Manager** επιλέγεται κάτω το **Make Note**, με αριστερό κλικ επιλέγεται το σημείο πάνω στο υπόμνημα που θα μπει η σημείωση, δίπλα στο *Enter NOTE* εισάγεται η σημείωση, επιλέγεται το εικονίδιο **Accept value** , μετά το **Cancel input**  στο παράθυρο **Menu Manager** το **Done/Return** και για να ολοκληρωθεί η εισαγωγή. Εάν πατηθεί διπλό κλικ επάνω στην σημείωση μπορεί να επεξεργαστεί (αλλαγή μεγέθους των χαρακτήρων) και με μονό μπορεί να μετακινηθεί.

Για να εισαχθούν όψεις του οδοντωτού τροχού πάνω στην επιφάνεια σχεδίασης επιλέγεται **Insert, Drawing View, General**, επιλέγεται με το ποντίκι ένα σημείο πάνω στο σχέδιο που θα τοποθετηθεί η όψη, στο παράθυρο διαλόγου **Drawing View** έχοντας επιλεγμένο στο *Categories* το **View Type**, κάτω από το *Model view names* επιλέγεται η επιθυμητή όψη που θα εμφανίζεται και κάτω δεξιά επιλέγεται το **Apply**. Κατόπιν, επιλέγοντας στο *Categories* το **View Display**, δίπλα στο *Display style* επιλέγεται το πώς θα εμφανίζεται η όψη. Εάν πρέπει η όψη να εμφανιστεί σε τομή επιλέγεται το **Sections**, κάτω από το *Section options* το **2D cross-section**, από κάτω το εικονίδιο **Add** , στο παράθυρο διαλόγου **Menu Manager** το **Done**, στην συνέχεια εισάγεται ένα όνομα για την τομή, πατιέται το **Enter** και επιλέγεται πάνω στο σχέδιο το επίπεδο που θα γίνει η τομή. Τέλος, για να ολοκληρωθεί η όψη επιλέγεται το **OK**.

Στο σχέδιο θα παρουσιάζονται δύο βασικές όψεις, μια προόψη κάτω αριστερά (**FRONT**) και μια άνοψη σε τομή πάνω αριστερά (**TOP**). Επίσης πάνω δεξιά θα υπάρχει και μια τρισδιάστατη απεικόνιση του οδοντωτού τροχού (**Standard Orientation**). Για την δημιουργία της τομής την άνοψης επιλέγεται το επίπεδο **TOP**. Ακόμη, για την προόψη επιλέγεται στο *Display style* το **Hidden** ώστε οι μη ορατές ακμές του τροχού να εμφανίζονται με διακεκομμένες γραμμές, ενώ για την άνοψη και την τρισδιάστατη απεικόνιση επιλέγεται το **No Hidden** για να μην εμφανίζονται καθόλου. Αφού εισαχθούν οι όψεις μπορούν να μετακινηθούν επιλέγοντας τις, κρατώντας πατημένο το αριστερό κλικ και σύροντας τις στην επιθυμητή θέση. Οι όψεις παρουσιάζονται στο σχήμα 2.73.



Σχήμα 2.73: Οι όψεις του κινητήριου οδοντωτού τροχού

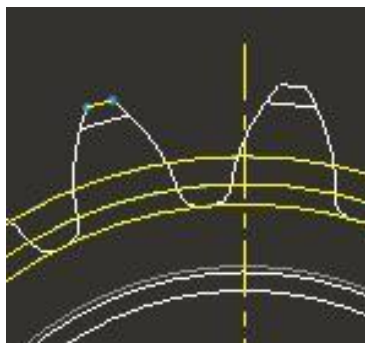
Στην συνέχεια για να εισαχθούν στις όψεις οι απαραίτητες διαστάσεις αρχικά επιλέγεται πάνω στο σχέδιο η προώψη, κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ κάπου πάνω στην όψη επιλέγεται το **Show Dimensions**. Το ίδιο γίνεται και για την άνοψη και κατόπιν διαγράφονται οι διαστάσεις που δεν χρειάζονται επιλέγοντας τις και πατώντας **Delete**, ή μετακινούνται για να είναι πιο ευδιάκριτες επιλέγοντας τις και κρατώντας πατημένο το αριστερό κλικ, σύροντας τις στην επιθυμητή θέση. Οι διαστάσεις των fillet και chamfer δεν είναι απαραίτητο να εισαχθούν, καθώς τα fillet θα δημιουργηθούν αυτόματα κατά την κοπή των οδόντων, ενώ τα chamfer θα δημιουργηθούν κατά προσέγγιση εφόσον δεν επηρεάζουν την λειτουργία των τροχών.

Οι ανοχές στις διαστάσεις εισάγονται πατώντας διπλό κλικ πάνω στην διάσταση, στο παράθυρο **Dimension Properties** που ανοίγει επιλέγεται η καρτέλα **Dimension Text** και δίπλα στο $@D$ εισάγεται η ανοχή (επιλέγεται από τον πίνακα 2.3 για ποιότητα IT11) εισάγοντας το σύμβολο $\pm$ επιλέγοντας το **Text Symbol** κάτω δεξιά και επιλέγοντας **OK**. Η ανοχή που χρησιμοποιείται στις περισσότερες διαστάσεις δεν μπαίνει πάνω στις διαστάσεις αλλά κάτω στο υπόμνημα.

Για να εισαχθεί στην επιφάνεια των οδόντων του τροχού το σύμβολο με την τιμή της τραχύτητας της, επιλέγεται **Insert, Surface Finish**, στο παράθυρο **Menu Manager** το **Retrieve**, στο παράθυρο **Open** επιλέγεται από τον φάκελο **machined** (σύμβολα τραχύτητας επιφάνειας που δημιουργήθηκε με αφαίρεση υλικού) το σύμβολο **standard1.sym** και κατόπιν το **Open**. Στο **Menu Manager** επιλέγεται

Leader, On Surface και **Filled Dot**, στην συνέχεια επιλέγεται με το ποντίκι πάνω στο σχέδιο στην άνοψη ή επιφάνεια του οδόντα, στο παράθυρο το **Done** και επιλέγεται πάνω στο σχέδιο το σημείο που θα τοποθετηθεί. Στην συνέχεια εισάγεται δίπλα στο *Enter value for roughness_height* η τιμή της μέσης τραχύτητας Ra, επιλέγεται το εικονίδιο **Accept value**  και τέλος επιλέγεται στο παράθυρο **Done, Done/Return**.

Τέλος, θα εισαχθούν αξονικές γραμμές και θα σχεδιαστούν βοηθητικοί κύκλοι για τους τέσσερις κύριους κύκλους του τροχού στην προόψη. Για την εισαγωγή των αξονικών επιλέγεται **View, Show and Erase**, στο παράθυρο **Show/Erase** το εικονίδιο , από κάτω στο *Show By* το **Part**, επιλέγεται μια όψη πάνω στο σχέδιο, στο παράθυρο **Select** το **OK** και στο παράθυρο **Show/Erase** το **Close**. Για να σχεδιαστούν οι βοηθητικοί κύκλοι επιλέγεται δεξιά στην γραμμή εργαλείων δίπλα από το εικονίδιο **circle**  το βελάκι και κατόπιν το **Construction Circle** , κατόπιν στο παράθυρο **Snapping References** το εικονίδιο  και επιλέγονται για αναφορές η αξονική γραμμή της προόψης, η ακμή στην κεφαλή του οδόντα και οι τρεις κύκλοι με μπλε χρώμα (σχήμα 2.74). Στην συνέχεια στο παράθυρο **Select** επιλέγεται το **OK** και σχεδιάζονται τέσσερις κύκλοι επιλέγοντας για κέντρο το κέντρο του τροχού και στη συνέχεια τις τέσσερις αναφορές που επιλέχθηκαν. Αποθηκεύεται το σχέδιο επιλέγοντας **File, Save** και στο παράθυρο διαλόγου **Save Object** το **OK**.



Σχήμα 2.74: Οι αναφορές που επιλέγονται

2.3.7.2 Εκτυπωμένα τελικά μηχανολογικά σχέδια

Τα άλλα δύο μηχανολογικά σχέδια, του κινούμενου τροχού και του ζεύγους οδοντωτών τροχών σε συνεργασία, σχεδιάζονται με την ίδια ακριβώς διαδικασία. Πριν τυπωθούν τα σχέδια σβήνονται οι καμπύλες με μπλε χρώμα που δεν χρειάζεται να είναι ορατές. Αρχικά εμφανίζεται το δένδροδιάγραμμα του μοντέλου επιλέγοντας αριστερά **Show, Model Tree**, κατόπιν επιλέγονται οι καμπύλες στο δένδροδιάγραμμα

και πατώντας δεξί κλικ επιλέγεται το **Hide**. Για να τυπωθούν τα σχέδια επιλέγεται **File, Print**, στο παράθυρο διαλόγου **Print** επιλέγεται το **Configure**, στο παράθυρο **Printer Configuration** στο *Size* επιλέγεται **A3**, επιλέγεται το **OK**, στο παράθυρο **Print** επιλέγεται πάλι το **OK** και τέλος στο παράθυρο **Εκτύπωση** επιλέγεται πάνω ο εκτυπωτής και κατόπιν το **OK**. Τα τρία εκτυπωμένα τελικά μηχανολογικά σχέδια παρουσιάζονται στο παράρτημα Ι στο τέλος της εργασίας.

2.4 Σύνοψη - συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία μέτρησης και υπολογισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και διαστάσεων των δύο οδοντωτών τροχών, που χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα για τον σχεδιασμό τους μέσω του λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Στην συνέχεια έγινε μια αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας τρισδιάστατης απεικόνισης των τροχών και κατόπιν της δημιουργίας των μηχανολογικών σχεδίων τους με το συγκεκριμένο λογισμικό.

Ο σχεδιασμός των οδοντωτών τροχών με την χρήση του λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4* ήταν μια καλή ευκαιρία εκμάθησης ενός πανίσχυρου λογισμικού που χρησιμοποιείται σε διάφορες επιχειρήσεις και βιομηχανίες σε ολόκληρο τον κόσμο. Κατά την εκπόνηση αυτού του κεφαλαίου φάνηκε το πόσο πολύπλοκη διαδικασία είναι να γίνουν τα μηχανολογικά σχέδια δύο ήδη κατασκευασμένων οδοντωτών τροχών και πόσο μπορεί να απλουστευτεί η διαδικασία με την βοήθεια του H/Y. Εφόσον με την χρήση ενός σχεδιαστικού λογισμικού (CAD), δημιουργήθηκαν οι τρισδιάστατες απεικονίσεις των τροχών, με λίγα και απλά βήματα προέκυψαν και τα σχέδια τους. Εντυπωσιακό είναι πως με τη σύγχρονη τεχνολογία, μπορούν σε μικρό χρονικό διάστημα να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων μεγάλης πολυπλοκότητας, όπως οι οδοντωτοί τροχοί και σχεδόν αμέσως να δημιουργηθούν τα μηχανολογικά τους σχέδια.

Τέλος, οι ανοχές διαστάσεων στα μηχανολογικά σχέδια εξαρτημάτων, παρέχουν πληροφορίες για την ακρίβεια της κατασκευής, ενώ η επιφανειακή τραχύτητα είναι ένας δείκτης ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας. Η τραχύτητα συνεργαζόμενων επιφανειών πρέπει να αναγράφεται στα μηχανολογικά σχέδια, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εξαρτημάτων ή στοιχείων μηχανών που απαιτείται αυξημένη ποιότητα και μειωμένες τριβές.

2.5 Βιβλιογραφία

- [1] Ιωάννης Κ. Στεργίου, Κωνσταντίνος Ι. Στεργίου, 2002, «Στοιχεία Μηχανών II: Μετάδοση κίνησης», Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα.
- [2] Ε. Παπαδανιήλ, 1979, «Σημειώσεις και Πίνακες Μηχανουργικής Τεχνολογίας, Τεύχος Κ-116», ΕΜΠ.
- [3] Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, 2007, «Μηχανολογικό Σχέδιο», Εκδόσεις Τζιόλα.

URLs:

- [3]<http://www.ptc.com/company/history-and-acquisitions.htm>
- [4]<http://www.cadquest.com/books/pdf/gears.pdf>
- [5]<http://www.cad.sun.ac.za/catalogs/DFMGuidelines/ToleranceCapabilities.pdf>
- [6]http://meklab.teipir.gr/files/TRB/Notes/CH1_Roughness_N.pdf

Κεφάλαιο 3

Εύρεση των υλικών των οδοντωτών τροχών και επιλογή νέων

Περιεχόμενα

3.1 Εισαγωγή.....	101
3.2 Ανάλυση των δεδομένων, των συνθηκών και των περιορισμών για την εύρεση των υλικών και την επιλογή νέων.....	102
3.2.1 Αντοχή σε κάμψη (<i>Yield strength</i>).....	102
3.2.1.1 Τάσεις στους οδόντες.....	103
3.2.1.2 Υπολογισμός καμπτικής τάσης στους οδόντες.....	105
3.2.1.3 Αντοχή υλικών οδοντωτών τροχών σε κάμψη (<i>Yield strength</i>).....	110
3.2.2 Πυκνότητα (<i>Density</i>).....	111
3.2.3 Σκληρότητα (<i>Hardness</i>).....	112
3.2.3.1 Μέθοδοι σκληρομέτρησης.....	112
3.2.3.2 Στατικές μέθοδοι.....	113
3.2.3.3 Δυναμικές μέθοδοι ή μέθοδος EQUOTIP.....	113
3.2.3.4 Μέτρηση σκληρότητας των οδοντωτών τροχών.....	115
3.2.4 Συντελεστής ελαστικότητας – αντοχή σε κάμψη (<i>Young's modulus – Yield strength</i>).....	118
3.2.5 Αντοχή κόπωσης στους 10^7 κύκλους (<i>Fatigue strength at 10^7 cycles</i>).....	119
3.2.6 Συντελεστής θερμικής διαστολής (<i>Thermal expansion coefficient</i>).....	120
3.2.7 Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (<i>Maximum service temperature</i>).....	121
3.2.8 Θερμικός αγωγός ή μονωτής (<i>Thermal conductor or insulator</i>).....	122
3.2.9 Τιμή (<i>Price</i>).....	123
3.3 Εφαρμογή του λογισμικού CES Edupack 2008 για την εύρεση των υλικών των οδοντωτών τροχών.....	123

3.3.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός.....	124
3.3.1.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών....	124
3.3.1.2 Τελική επιλογή του υλικού.....	128
3.3.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	129
3.3.2.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών....	129
3.3.2.2 Τελική επιλογή του υλικού.....	130
3.4 Έλεγχος αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση.....	130
3.5 Εφαρμογή του λογισμικού <i>CES Edupack 2008</i> για την επιλογή νέων υλικών των οδοντωτών τροχών.....	136
3.5.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών.....	136
3.5.2 Εισαγωγή κριτηρίων και τελική επιλογή των υλικών.....	137
3.5.3 Επιλογή συγκεκριμένων χαλύβων για τους οδοντωτούς τροχούς.....	145
3.6 Έλεγχος αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση με τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν.....	146
3.7 Σύγκριση μεταξύ αρχικών και νέων υλικών των οδοντωτών τροχών.....	147
3.7.1 Χυτοσίδηροι.....	147
3.7.1.1 Φαιός ή γκρίζος χυτοσίδηρος.....	148
3.7.1.2 Όλκιμος χυτοσίδηρος ή χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη.....	149
3.7.2 Χάλυβες.....	150
3.7.2.1 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες.....	151
3.8 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	152
3.9 Βιβλιογραφία.....	154

3.1 Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή, καθώς η τεχνολογία των υλικών έχει εξελιχθεί κατά πολύ, τα διαθέσιμα υλικά που μπορούν να εκλεγούν για την κατασκευή ενός μηχανολογικού εξαρτήματος είναι πάρα πολλά και μπορούν να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε σχεδιαστική ανάγκη. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα μέσω των σύγχρονων τεχνολογιών παραγωγής να κατασκευαστούν πανίσχυρα υλικά, που παλαιότερα φάνταζε αδιανόητο, ώστε να κατασκευαστούν υψηλής ποιότητας εξαρτήματα με τεράστιες αντοχές και παράλληλα πολύ μικρές ανοχές διαστάσεων.

Τα υλικά έχουν κάποια χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες τους και προκειμένου να δημιουργηθεί το επιθυμητό τελικό προϊόν, απαιτείται ένα συγκεκριμένο προφίλ αυτών των ιδιοτήτων, τις οποίες θα πρέπει να μπορεί να κατανοήσει ο μηχανικός. Πολύ σημαντικό στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας επιλογής υλικού για την κατασκευή ενός προϊόντος, είναι να μην γίνεται καμία διάκριση μεταξύ των υλικών και να θεωρούνται όλα ως υποψήφια. Η διαδικασία ξεκινά με την αναγνώριση του επιθυμητού προφίλ χαρακτηριστικών και στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση αυτού του προφίλ με αυτά των πραγματικών μηχανολογικών υλικών, προκειμένου να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός.

Αναλυτικότερα, το πρώτο βήμα στην διαδικασία επιλογής είναι η «διερμηνεία» (*translation*), δηλαδή η διερεύνηση των σχεδιαστικών απαιτήσεων και ο προσδιορισμός των περιορισμών που επιβάλλονται στην επιλογή υλικού. Το εύρος των επιλογών περιορίζεται, με την διαλογή και απομάκρυνση (*screening-out*) των υλικών που δεν πληρούν τους περιορισμούς. Στη συνέχεια, μεγαλύτερος περιορισμός του εύρους των επιλογών επιτυγχάνεται με την ταξινόμηση (*ranking*) των υποψήφιων υλικών βάση της ικανότητας τους να μεγιστοποιούν την απόδοση. Τα κριτήρια για την διαλογή και την ταξινόμηση αντλούνται από τις σχεδιαστικές απαιτήσεις, μέσω μιας ανάλυσης της λειτουργίας, των στόχων και των ελεύθερων μεταβλητών. Η όλη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε λογισμικά όπως το *CES Edupack 2008*, τα οποία μπορούν να ενισχύσουν την επιλογή μέσω H/Y. [1]

Εφόσον στο προηγούμενο κεφάλαιο έγιναν τα μηχανολογικά σχέδια των οδοντωτών τροχών, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει διερεύνηση των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένοι και κατόπιν επιλογή νέων υλικών από τα οποία θα κατασκευαστούν εκ νέου. Η διερεύνηση και η επιλογή νέων υλικών θα γίνει μέσω του λογισμικού *CES Edupack 2008*, αφού αρχικά όμως αναλυθούν κάποια δεδομένα, συνθήκες και περιορισμοί που θα εισαχθούν στο λογισμικό. Κατόπιν θα βρεθούν τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι τροχοί και θα επαληθευθεί η αντοχή τους μέσω ελέγχου αντοχής των οδόντων τους σε επιφανειακή πίεση με τα συγκεκριμένα υλικά. Στην συνέχεια, θα επιλεγούν νέα υλικά για τους οδοντωτούς

τροχούς και θα γίνει εκ νέου έλεγχος αντοχής των οδόντων σε επιφανειακή πίεση με τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν. Τέλος, θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ των αρχικών και των νέων υλικών των οδοντωτών τροχών.

3.2 Ανάλυση των δεδομένων, των συνθηκών και των περιορισμών για την εύρεση των υλικών και την επιλογή νέων

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια ανάλυση των δεδομένων, των συνθηκών και των περιορισμών που θα εισαχθούν στο λογισμικό *Pro/ENGINEER Wildfire 4* για να βρεθούν αρχικά τα υλικά των οδοντωτών τροχών και κατόπιν να επιλεγούν νέα. Όπως περιγράφηκε και στην εισαγωγή, για την επιλογή νέων υλικών αρχικά θα εισαχθούν κάποια δεδομένα στο λογισμικό σαν περιορισμοί ώστε να περιοριστεί το εύρος των επιλογών. Κατόπιν, θα γίνει η τελική επιλογή μέσω μιας ταξινόμησης των υλικών σύμφωνα με την ικανότητα τους να ικανοποιούν κάποια κριτήρια που θα οριστούν. Όσο αναφορά την εύρεση των αρχικών υλικών, θα γίνει μόνο με το πρώτο στάδιο της εισαγωγής περιορισμών στο λογισμικό. Αρχικά θα υπολογιστεί η αντοχή των οδόντων των τροχών σε κάμψη ώστε να βρεθεί η επιθυμητή αντοχή των υλικών σε κάμψη. Κατόπιν θα υπολογιστεί η πυκνότητα και θα μετρηθεί η σκληρότητα των υλικών των τροχών. Στην συνέχεια θα αναλυθούν ο συντελεστής ελαστικότητας σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη, η αντοχή κόπωσης στους 10^7 κύκλους, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας, εάν το υλικό είναι θερμικός αγωγός η μονωτής και η τιμή του υλικού.

3.2.1 Αντοχή σε κάμψη (Yield strength)

Οι καταπονήσεις που δέχονται οι οδόντες των τροχών κατά την λειτουργία είναι σε κάμψη και επιφανειακή πίεση. Κατά την κάμψη υπάρχει κίνδυνος θραύσης των οδόντων και κατά την επιφανειακή πίεση φθοράς της επιφάνειας τους, δημιουργίας δηλαδή «σκαψιμάτων» (*pittings*) (σχήμα 3.1). Αρχικά θα υπολογιστεί η αντοχή των οδόντων σε κάμψη (*Yield strength*), ώστε να βρεθεί η επιθυμητή αντοχή των υλικών σε κάμψη που θα εισαχθεί σαν περιορισμός κατά την εύρεση των αρχικών υλικών αλλά και την επιλογή νέων. Κατόπιν αφού βρεθούν τα υλικά των τροχών, μέσω ελέγχου αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση με τα συγκεκριμένα υλικά, θα γίνει επαλήθευση της επιλογής των υλικών.

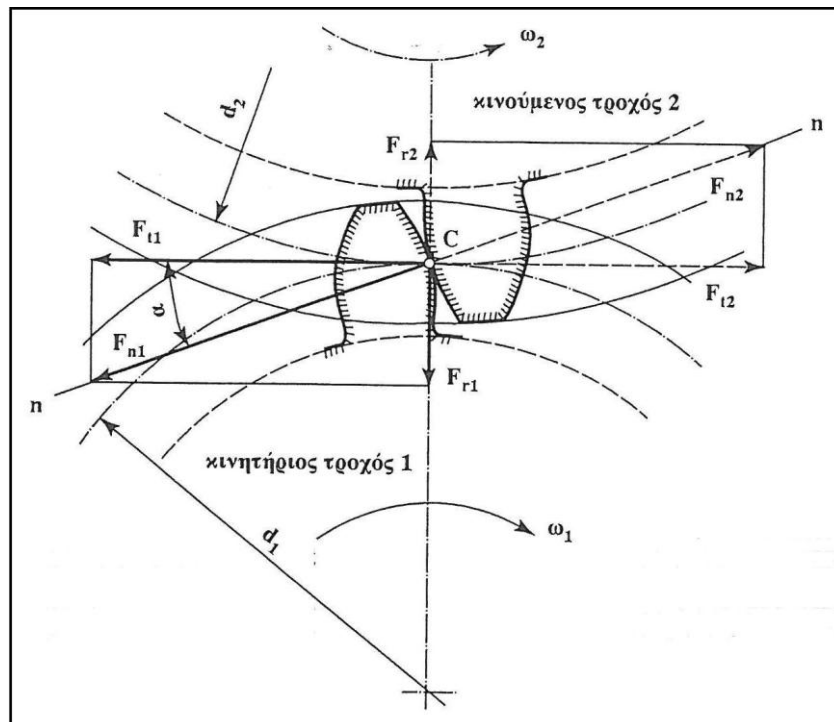


Σχήμα 3.1: Πάνω - δημιουργία «σκαψιμάτων» (*pittings*) σε οδόντες, κάτω – θραύση οδόντα [7]

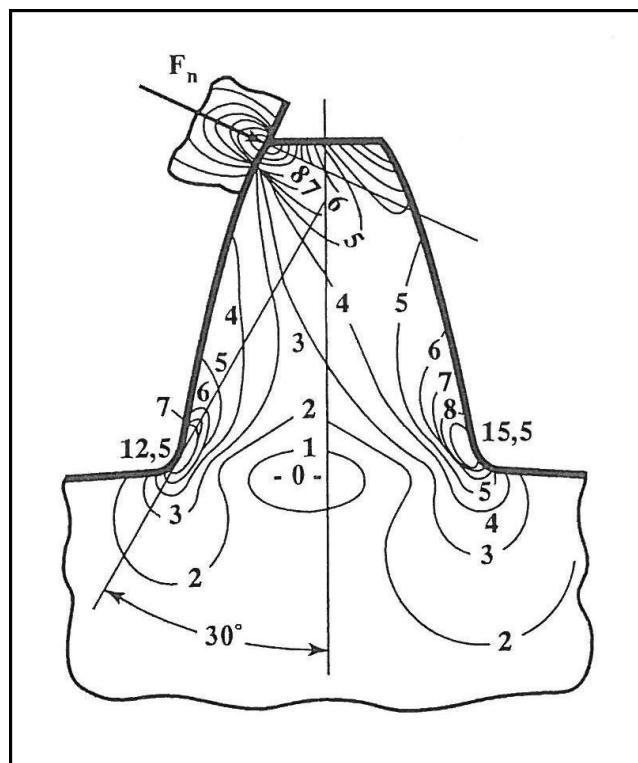
3.2.1.1 Τάσεις στους οδόντες

Αν θεωρήσουμε ότι κατά την συνεργασία δύο οδοντωτών τροχών με ευθείς οδόντες, μόνο ένα ζεύγος οδόντων βρίσκεται σε επαφή, τότε η κατατομή του οδόντα 1 που δίνει κίνηση, πιέζει την κατατομή του οδόντα 2 που παίρνει την κίνηση. Η κάθετη δύναμη F_n που εφαρμόζεται στο σημείο επαφής των οδόντων συμπίπτει με τη γραμμή επαφών n-n και περνά από το σημείο κύλισης C (σχήμα 3.2). Η F_n θεωρείται ότι ενεργεί στο μέσο του πλάτους b του οδόντα. Η δύναμη F_{n1} ενεργεί στην κατατομή του οδόντα 1 κατά την διεύθυνση μιας πιθανής θραύσης του. Αν δεν ληφθούν υπόψη η τριβές η ίση και αντίθετη δύναμη F_{n2} θέτει σε κίνηση τον τροχό 2 και ενεργεί επίσης κατά την διεύθυνση μιας πιθανής θραύσης του οδόντα 2. Οι δυνάμεις F_{n1} , F_{n2} αναλύονται στις ακτινικές συνιστώσες F_{r1} , F_{r2} και στις εφαπτομενικές συνιστώσες που ενεργούν σαν περιφερειακές δυνάμεις F_{t1} , F_{t2} μεταφέροντας τη ροπή στρέψης από τον τροχό 1 στον τροχό 2.

Για τον υπολογισμό σε θραύση θεωρούμε τον οδόντα σαν καμπτομένη δοκό. Οι τάσεις που δημιουργούνται στον οδόντα από την κάθετη δύναμη F_n , εμφανίζονται παραστατικά, με τη βοήθεια της φωτοελαστικότητας, πάνω σε ένα δοκίμιο από ειδικό διαφανές υλικό (συνθετική ρητίνη) που τοποθετείται σε πολωμένο φως. Όταν το δοκίμιο φορτιστεί, εμφανίζει σειρά από χαρακτηριστικές γραμμές (ισόχρωμες) που αποτελούν μέτρο για την κατανομή και το μέγεθος των τάσεων (σχήμα 3.3).



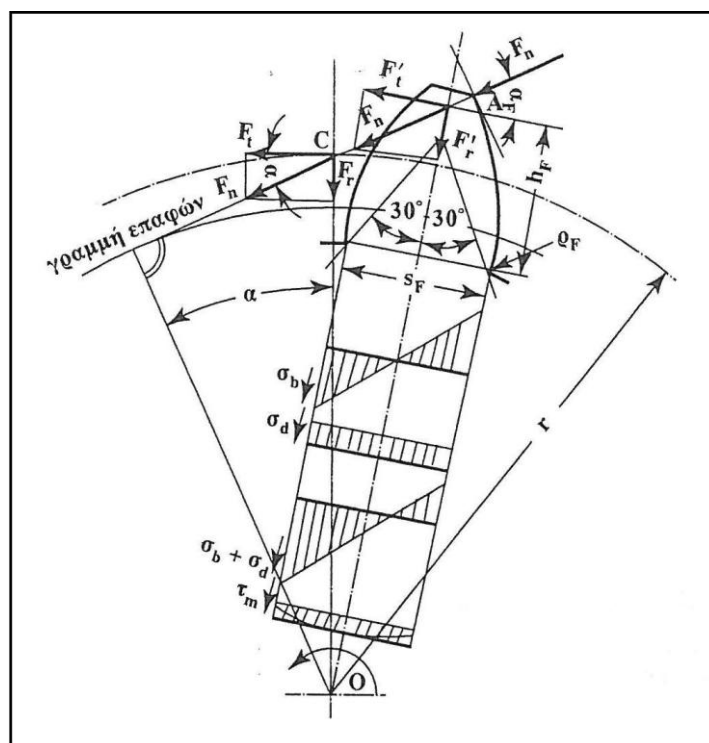
Σχήμα 3.2: Δυνάμεις σε ζεύγος οδοντωτών τροχών με ευθείς οδόντες [2]



Σχήμα 3.3: Κατανομή των τάσεων στον οδόντα όπως προκύπτει με εφαρμογή της μεθόδου της φωτοελαστικότητας [2]

Η μέγιστη καταπόνηση προκαλείται στον πόδα του οδόντα όταν η κάθετη δύναμη F_n , που ενεργεί κατά μήκος της γραμμής επαφών, εφαρμόζεται στην άκρη της

κεφαλής του οδόντα (σχήμα 3.4). Επιπλέον υποτίθεται ότι ολόκληρη η F_n παραλαμβάνεται από έναν μόνο οδόντα. Σαν διατομή για τον υπολογισμό λαμβάνεται η επιφάνεια του ορθογωνίου παραλληλογράμμου με τις διαστάσεις b (πλάτος οδόντα) και S_F (απόσταση των σημείων επαφής των υπό γωνία 30° εφαπτόμενων στην στρογγύλευση του πόδα). Αν η F_n αναλυθεί στις συνιστώσες F_r' και F_t' , είναι προφανές ότι η F_r' προκαλεί τάσεις θλίψης σ_d και η F_t' τάσεις κάμψης σ_b και επιπλέον διάτμησης τ_m (σχήμα 3.4). Αυτές οι επιμέρους τάσεις δίνουν όλες μαζί μια ισοδύναμη σ_v . Έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι, αν στον υπολογισμό παραληφθούν οι τάσεις θλίψης και διάτμησης το αποτέλεσμα ελάχιστα μεταβάλλεται. Γι' αυτό το λόγο ο υπολογισμός γίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια με βάση μόνο την καθαρή τάση κάμψης σ_b , οι δε τάσεις που παραλήφθηκαν λαμβάνονται υπόψη με συντελεστές διόρθωσης. [2]



Σχήμα 3.4: Τάσεις στον πόδα του οδόντα με φόρτιση στο σημείο κεφαλής A [2]

3.2.1.2 Υπολογισμός καμπτικής τάσης στους οδόντες

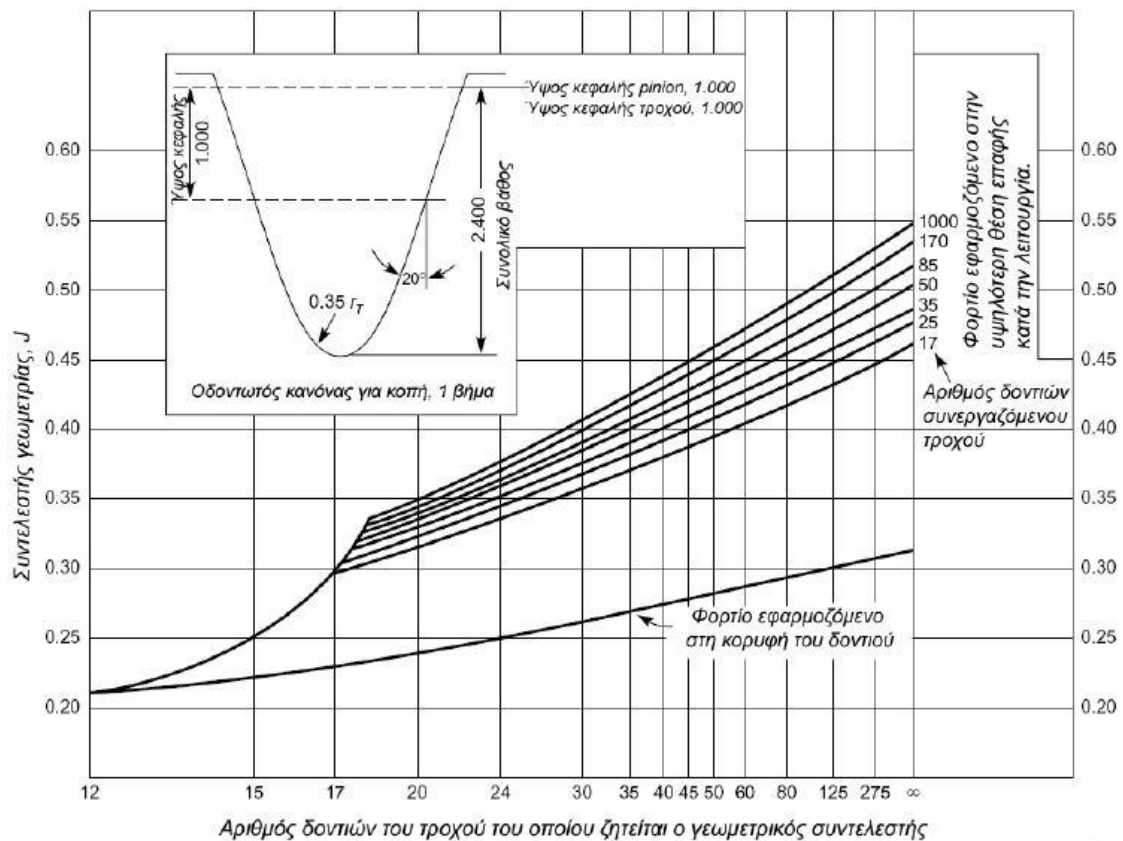
Η καμπτική τάση σ_t στους οδόντες των τροχών κατά AGMA (American Gear Manufacturers Association) προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{m \cdot b \cdot J} \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_s \cdot K_m \cdot K_B \leq S_{\varepsilon\pi} = \frac{S_{at} \cdot K_L}{S_F \cdot K_T \cdot K_R} \quad (3.1)$$

- F_t είναι η ασκούμενη στο δόντι δύναμη σε N με $F_t = \frac{M_t}{d/2}$, όπου d η αρχική διάμετρος του κινητήριου τροχού σε cm, M_t η στρεπτική ροπή στον άξονα σε $\text{kp} \cdot \text{cm}$ με $M_t = 71620 \cdot \frac{N}{n_1}$, όπου N η ισχύς σε HP του κινητήριου άξονα που μεταδίδεται στον κινούμενο μέσω του ζεύγους των οδοντωτών τροχών και n_1 η στροφές ανά λεπτό (rpm) του κινητήριου άξονα στις οποίες αποδίδεται αυτή η ισχύς. Οπότε θα είναι $M_t = 71620 \cdot \frac{4.8}{10000} \approx 34.38 \text{ kp} \cdot \text{cm}$ και άρα θα είναι

$$F_t = \frac{34.38}{2.975/2} = \frac{34.38}{1.4875} \approx 23.11 \text{ kp} = 226.63 \text{ N}$$

- $m = 1.75$ το module σε mm.
- b το πλάτος επαφής των οδόντων όπου κατανέμεται το φορτίο σε mm. Εδώ που τα πλάτη των οδόντων των τροχών είναι διαφορετικά επιλέγεται το μικρότερο. Επομένως $b = 13 \text{ mm}$.
- J είναι ο γεωμετρικός συντελεστής, ο οποίος είναι ο μόνος που διαφέρει για τους δύο οδοντωτούς τροχούς. Από σχήμα 3.5 για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό είναι $J \approx 0.3$ και για τον κινούμενο $J \approx 0.41$.



Σχήμα 3.5: Συντελεστής γεωμετρίας J για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ($\alpha = 20^\circ$ και $h_a = m$) [3]

- K_o ο συντελεστής υπερφόρτισης. Λαμβάνει υπ' όψη του τα λειτουργικά χαρακτηριστικά κινητήριας και κινούμενης μηχανής. Θεωρείται ότι δεν υπάρχει υπερφόρτιση ($K_o = 1$) όταν ένας εντελώς ομαλά λειτουργών ηλεκτροκινητήρας κινεί μια επίσης ομαλά λειτουργούσα κινούμενη μηχανή. Σε κάθε απόκλιση από την ιδεατή αυτή κατάσταση πρέπει να χρησιμοποιείται συντελεστής υπερφόρτισης διάφορος της μονάδας από τον πίνακα 3.1. Για μονοκύλινδρο μηχανή με ελαφριές κρούσεις είναι $K_o = 1.7$.

Πίνακας 3.1: Συντελεστής υπερφόρτισης K_o [3]

Χαρακτηριστικά κινητήριας μηχανής	Χαρακτηριστικά κινούμενης μηχανής			
	Ομοιόμορφο φορτίο	Ελαφρές κρούσεις	Μέτριες κρούσεις	Ισχυρές κρούσεις
Ομοιόμορφη στρωτή λειτουργία (πχ. ηλεκτροκινητήρες, τουρμπίνες)	1.00	1.25	1.50	1.75
Ελαφρές κρούσεις (πχ. πολυκύλινδρες βενζινομηχανές)	1.20	1.40	1.75	2.25
Μέτριες κρούσεις (πχ. μονοκύλινδρες μηχανές)	1.30	1.70	2.00	2.75

- K_v ο δυναμικός συντελεστής εξαρτώμενος από την γραμμική ταχύτητα του τροχού και την ακρίβεια κατασκευής Q_v . Για $5 \leq Q_v \leq 11$ δίνεται από την

$$\text{σχέση } K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200 \cdot v_t}}{A} \right)^B \text{ όπου } B = \frac{(12 - Q_v)^{2/3}}{4} \text{ και } A = 50 + 56 \cdot (1 - B).$$

$$\text{Για ακρίβεια κατασκευής } Q_v = 7 \text{ θα είναι } B = \frac{(12 - 7)^{2/3}}{4} \approx 0.73 \text{ και}$$

$$A = 50 + 56 \cdot (1 - 0.73) \approx 65.12.$$

Η γραμμική ταχύτητα των τροχών είναι

$$v_t = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000 \cdot 60} = \frac{\pi \cdot 29.75 \cdot 10000}{1000 \cdot 60} \approx 15.57 \text{ m/s.}$$

$$\text{Οπότε θα είναι } K_v = \left(\frac{65.12 + \sqrt{200 \cdot 15.57}}{65.12} \right)^{0.73} \approx 1.57$$

- $K_s = 1$ ο συντελεστής μεγέθους από τον πίνακα 3.2 για module $m = 1.75 \leq 5$.

Πίνακας 3.2: Συντελεστής μεγέθους K_s [3]

Module	Συντελεστής μεγέθους
≤ 5	1.00
6.00	1.05
8.00	1.15
12.00	1.25
20.00	1.40

- K_m ο συντελεστής διανομής του φορτίου κατά το πλάτος του οδόντα. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπ' όψη του το φαινόμενο της άνισης κατανομής του φορτίου κατά το πλάτος του δοντιού. Αυτό μπορεί να προέρχεται από έλλειψη παραλληλίας μεταξύ των αξόνων που φέρουν τους οδοντωτούς τροχούς και γίνεται πιο έντονο όταν αυξάνει το πλάτος του τροχού. Ο συντελεστής υπολογίζεται από τον τύπο $K_m = 1 + C_{pf} + C_{ma}$ όπου

C_{pf} ο συντελεστής αναλογίας πινιόν που για πλάτος επαφής $b \leq 25$ mm είναι

$$C_{pf} = \frac{b}{10 \cdot d} - 0.025 = \frac{13}{10 \cdot 29.75} - 0.025 \approx 0.0187 \text{ και}$$

C_{ma} ο συντελεστής ευθυγράμμισης εμπλοκής όπου $C_{ma} = A + B \cdot b + C \cdot b^2$ με τις τιμές των σταθερών A, B και C να δίνονται από τον πίνακα 3.3 για εμπορικά κιβώτια ταχυτήτων. Οπότε θα είναι $C_{ma} = 0.127 + 6.2205 \cdot 10^{-4} \cdot 13 - 1.6942 \cdot 10^{-7} \cdot 13^2 \approx 0.1351$.

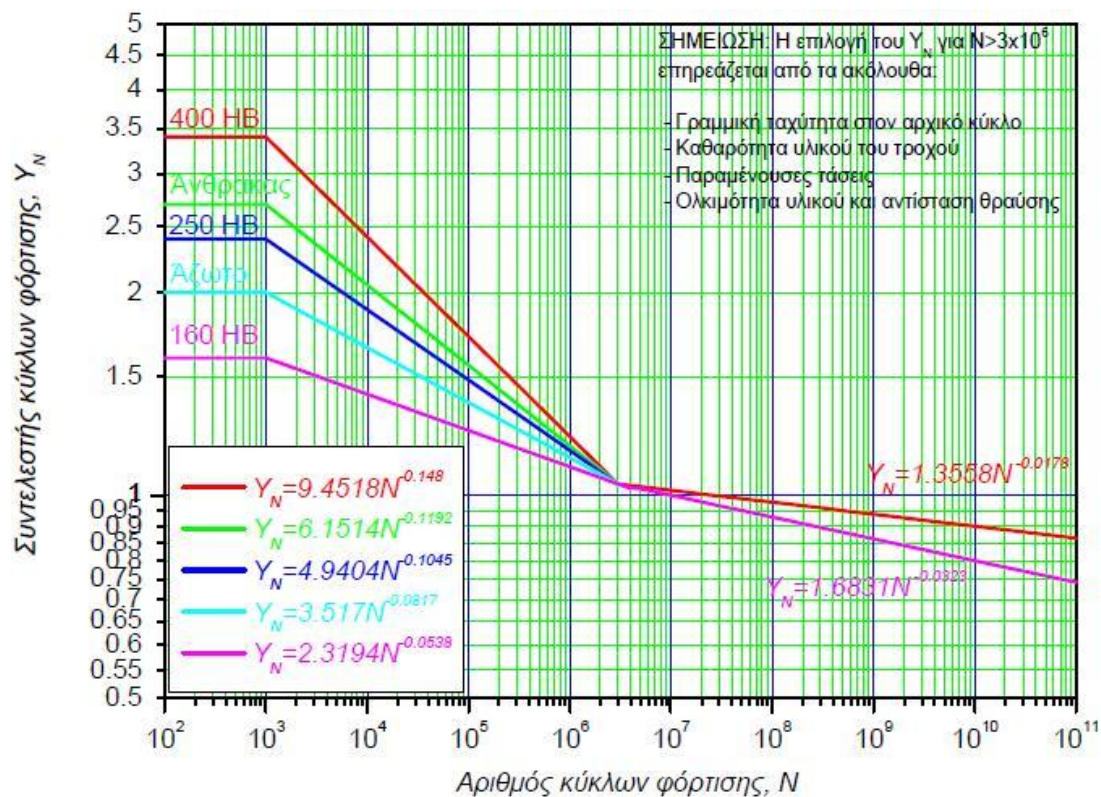
Πίνακας 3.3: Τιμές των σταθερών A, B, C [3]

Είδος κιβωτίου	A	B	C
για ανοιχτούς τροχούς στο περιβάλλον	0.247	6.5748E-04	-1.1858E-07
για εμπορικά κιβώτια ταχυτήτων	0.127	6.2205E-04	-1.6942E-07
για κιβώτια ακριβείας	0.0675	5.0394E-04	-1.4353E-07
για κιβώτια εξαιρετικής ακριβείας	0.038	3.9764E-04	-1.2741E-07

Επομένως ο συντελεστής θα είναι $K_m = 1 + 0.0187 + 0.1351 \approx 1.1538$

- K_B ο συντελεστής πάχους στεφάνης. Εφόσον ο οδοντωτοί τροχοί δεν έχουν στεφάνη είναι $K_B = 1$.
- $S_{επ}$ η επιτρεπόμενη τάση στον πόδα σε MPa.
- S_{at} η αντοχή του υλικού του οδοντωτού τροχού σε κάμψη σε MPa (Yield strength).

- $K_L = 1$ ο συντελεστής διάρκειας ζωής από σχήμα 3.6 για 10^7 κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 3.6: Συντελεστής διάρκειας ζωής $K_L = Y_N$ λόγω καμπτικών τάσεων [3]

- $S_F = 1$ ο συντελεστής ασφαλείας κατ' επιλογή του σχεδιαστή.
- K_T ο συντελεστής θερμοκρασίας, όπου $K_T = 1$ για θερμοκρασία λειτουργίας των τροχών $T \leq 120^\circ\text{C}$. Να σημειωθεί ότι μεγαλύτερη θερμοκρασία από το όριο των 120°C μειώνει την αντοχή του υλικού, αλλά και επηρεάζεται η συμπεριφορά του λιπαντικού.
- $K_R = 1$ ο συντελεστής αξιοπιστίας από πίνακα 3.4 και αστοχία 1 σε 100 δηλαδή 99% αξιοπιστία. [3]

Πίνακας 3.4: Συντελεστής αξιοπιστίας K_R [3]

Απαίτηση	K_R
1 αστοχία σε 10000	1.50
1 αστοχία σε 1000	1.25
1 αστοχία σε 100	1.00
1 αστοχία σε 10	0.85
1 αστοχία σε 2	0.70

Επομένως η σχέση 3.1 για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό θα γίνει:

$$\sigma_t = \frac{226.63}{1.75 \cdot 13 \cdot 0.3} \cdot 1.7 \cdot 1.57 \cdot 1 \cdot 1.1538 \cdot 1 \leq S_{\varepsilon\pi} = \frac{S_{at} \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1}$$

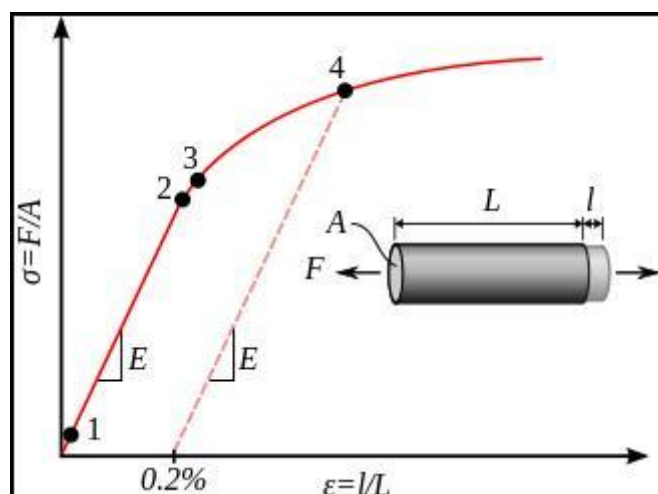
και για τον κινούμενο:

$$\sigma_t = \frac{226.63}{1.75 \cdot 13 \cdot 0.41} \cdot 1.7 \cdot 1.57 \cdot 1 \cdot 1.1538 \cdot 1 \leq S_{\varepsilon\pi} = \frac{S_{at} \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1}$$

3.2.1.3 Αντοχή υλικών οδοντωτών τροχών σε κάμψη (Yield strength)

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για ένα μεταλλικό δοκίμιο. Το σημείο 3 της καμπύλης είναι το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας (Yield strength), σ_y και μέχρι αυτό το σημείο η παραμόρφωση του δοκιμίου είναι ανάλογη της τάσης και το υλικό εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά, αν δηλαδή αποσυρθεί η δύναμη τότε το δοκίμιο επιστρέφει στις αρχικές του διαστάσεις. Στο σημείο αυτό η τάση που ασκείται στο υλικό είναι η μέγιστη που μπορεί να ασκηθεί χωρίς το υλικό να παραμορφωθεί μόνιμα. Μετά από το αρχικό σύντομο στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης, το δοκίμιο παραμορφώνεται πλαστικά, αυξάνοντας το μήκος του και μειώνοντας το πλάτος του. Μετά το πέρασμα από το μέγιστο φορτίο, το δοκίμιο αρχίζει να εμφανίζει τοπική ελάττωση της διατομής που είναι γνωστή ως φαινόμενο δημιουργίας λαιμού. Αυτή η ανομοιομορφία στην παραμόρφωση οδηγεί γρήγορα το υλικό σε θραύση μέσα στην περιοχή του λαιμού. [4]

Εάν επιλύσουμε την σχέση 3.1 ως προς την αντοχή του υλικού σε κάμψη θα πρέπει η επιτρεπόμενη καμπτική τάση για το υλικό του κινητήριου τροχού να είναι $S_{at1} \geq 102.26 \text{ MPa}$ και για του κινούμενου $S_{at2} \geq 74.82 \text{ MPa}$.



Σχήμα 3.7: Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για ένα μέταλλο [8]

3.2.2 Πυκνότητα (Density)

Η πυκνότητα (*Density*) (μονάδες: kg/m^3) είναι η μάζα ανά μονάδα όγκου και θα χρειαστεί να υπολογιστεί για να εισαχθεί σαν περιορισμός στο λογισμικό στην εύρεση των υλικών των τροχών. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των υλικών των οδοντωτών τροχών τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η μάζα των τροχών. Όσο μεγαλύτερη όμως είναι η μάζα τους, τόσο περισσότερες θα είναι οι απώλειες ισχύος στον κινούμενο άξονα κατά την περιστροφή των οδοντωτών τροχών λόγω αδράνειας. Επομένως, κατά την επιλογή νέων υλικών τα πιθανά υλικά θα ταξινομηθούν με βάση την πυκνότητα τους, καθώς η όσο το δυνατόν μικρότερη πυκνότητα θα είναι ένα κριτήριο για την επιλογή.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας πρέπει να βρεθεί η μάζα και ο όγκος των οδοντωτών τροχών. Αρχικά μετρήθηκε η μάζα με ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας, για τον κινητήριο τροχό $m_1 = 55 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ και για τον κινούμενο $m_2 = 526 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$. Κατόπιν βρέθηκε ο όγκος των τροχών από τις τρισδιάστατες απεικονίσεις τους στο λογισμικό *Pro/ENGINEER Wildfire 4*. Για την εύρεση του όγκου, αφού αρχικά ανοιχτεί το αποθηκευμένο αρχείο της απεικόνισης του τροχού, επιλέγεται **Analysis, Model, Mass Properties**, στο παράθυρο διαλόγου **Mass Properties** που ανοίγει

επιλέγεται το εικονίδιο **Compute**  κάτω δεξιά και πάνω στο πλαίσιο εμφανίζονται διάφορες πληροφορίες για το σχεδιασμένο αντικείμενο. Για τον κινητήριο τροχό ο όγκος (volume) είναι $V_1 = 7.7814 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ και για τον κινούμενο $V_2 = 7.6066 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Οπότε η πυκνότητα για τον κινητήριο τροχό θα είναι:

$$d_1 = \frac{m_1}{V_1} = \frac{55 \cdot 10^{-3}}{7.7814 \cdot 10^{-6}} \approx 7068 \text{ kg/m}^3$$

και για τον κινούμενο:

$$d_2 = \frac{m_2}{V_2} = \frac{526 \cdot 10^{-3}}{7.6066 \cdot 10^{-5}} \approx 6915 \text{ kg/m}^3$$

Λόγω πιθανών αποκλίσεων των πραγματικών πυκνοτήτων από αυτών που υπολογίστηκαν, στο λογισμικό θα εισαχθούν τιμές $\pm 200 \text{ kg/m}^3$ των πραγματικών, δίνοντας ένα ποσοστό απόκλισης περίπου $\pm 3\%$. Οπότε οι ελάχιστες τιμές της πυκνότητας των υλικών θα είναι για τον κινητήριο τροχό 6868 kg/m^3 και για τον κινούμενο 6715 kg/m^3 , ενώ οι μέγιστες 7268 kg/m^3 για τον κινητήριο και 7115 kg/m^3 για τον κινούμενο.

3.2.3 Σκληρότητα (Hardness)

Ένας άλλος περιορισμός που θα εισαχθεί στο λογισμικό για την εύρεση των αρχικών αλλά και την επιλογή νέων υλικών είναι η σκληρότητα (*Hardness*) των υλικών. Η σκληρότητα μπορεί να μετρηθεί πάνω στους οδοντωτούς τροχούς με την χρήση φορητού σκληρόμετρου.

3.2.3.1 Μέθοδοι σκληρομέτρησης

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα είναι αποδεδειγμένη η τεράστια σπουδαιότητα για την βιομηχανία μετάλλου και πλαστικού της μέτρησης της σκληρότητας ενός μεταλλικού ή πλαστικού δοκιμίου. Η σκληρομέτρηση δίνει αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με τον έλεγχο των εισερχομένων, των πρώτων υλών, των ενδιάμεσων όπως και των τελικών προϊόντων και έτσι συμβάλει ουσιαστικά στον ολοκληρωμένο Ποιοτικό Έλεγχο και την Διασφάλιση Ποιότητας μιας επιχείρησης. Αν και δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός της σκληρότητας, θα μπορούσε να δοθεί ο παρακάτω: *Σκληρότητα ορίζεται η βαθμός αντίστασης ενός υλικού στην πλαστική παραμόρφωση που προκαλείτε από την διείσδυση άλλων σωμάτων σε αυτό.* Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με διάφορα θέματα που χαρακτηρίζουν τα υλικά όπως για παράδειγμα:

- Προσδιορισμός υλικού
- Έλεγχος ορθής διαδικασίας θερμικής κατεργασίας
- Έλεγχος ποιότητας επιφανειακών κατεργασιών
- Συμπεριφορά και αντοχή του υλικού κατά την διάρκεια του χρόνου
- Συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες φθοράς και καταπόνησης
- Έλεγχος μείωσης αντοχής μετά από θερμική κατεργασία
- Πληροφορίες σχετικά με αντοχή σε εφελκυσμό

Σε γενικές γραμμές η σκληρομέτρηση έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Είναι μια γρήγορη, απλή, εύκολη και αξιόπιστη μέτρηση
- Δίνει στοιχεία σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και έτσι μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile strength). Μεγαλύτερη σκληρότητα συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή σε παραμόρφωση.
- Είναι ένας Μη-Καταστροφικός έλεγχος

Η σκληρότητα είναι ένα χαρακτηριστικό του υλικού και η τιμή της έχει άμεση σχέση με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εύρεση της. Οι μέθοδοι

σκληρομέτρησης, αναλόγως με το αν θα εφαρμοστούν στατικά ή κρουστικά φορτία, χωρίζονται στις παρακάτω πιο διαδεδομένες μεθόδους:

α) Στατικές μέθοδοι

β) Δυναμικές μέθοδοι ή μέθοδος EQUOTIP

3.2.3.2 Στατικές μέθοδοι

Η βασική αρχή των Στατικών μεθόδων έγκειται στην αρχή του ότι μέσω μιας συσκευής που λέγεται διεισδυτής, ασκείται στο δοκίμιο στατικά, ένα συγκεκριμένο φορτίο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και δημιουργεί ένα αποτύπωμα πάνω σε αυτό. Η τιμή της σκληρότητας προκύπτει από την ανάγνωση των στοιχείων του αποτυπώματος. Οι πλέον γνωστές Στατικές Μέθοδοι σκληρομέτρησης είναι:

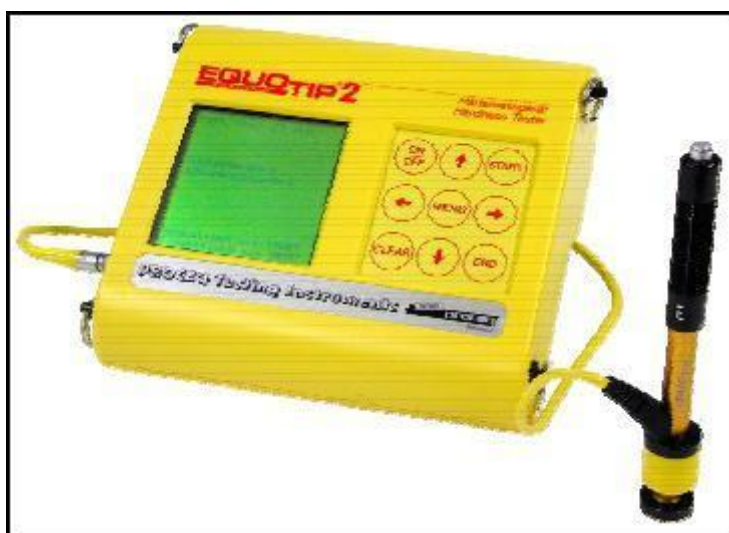
- ROCKWELL
- ROCKWELL SUPERFICIAL
- BRINELL
- VICKERS
- KNOOP Ή ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ
- SHORE A & SHORE A

3.2.3.3 Δυναμικές μέθοδοι ή μέθοδος EQUOTIP

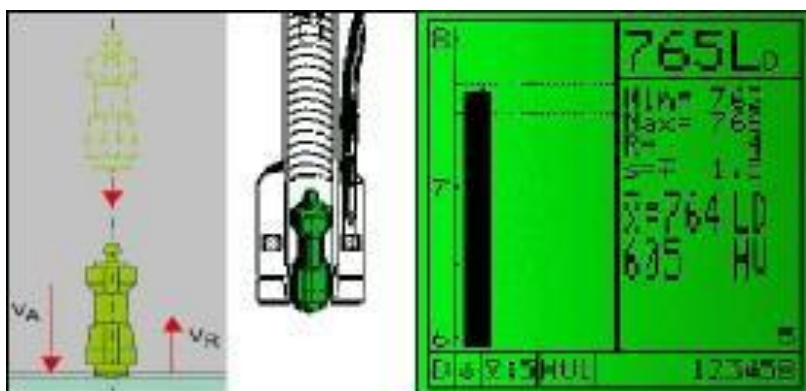
Οι στατικές μέθοδοι όπως Brinell (1900), Rockwell (1919) και Vickers (1925) εξυπηρέτησαν την βιομηχανία για πάνω από 100 χρόνια, είναι εντυπωσιακό όμως ότι για πολλές δεκαετίες δεν είχε ανακαλυφθεί καμία νέα μέθοδος σκληρομέτρησης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα όλων των παραπάνω μεθόδων ήταν ότι οι συσκευές ήταν επιτραπέζιες-σταθερές οπότε καθιστούσαν την σκληρομέτρηση ασύμφορη και χρονοβόρα λόγω του κόστους και του απαιτούμενου χρόνου μεταφοράς των δοκιμών στην συσκευή. Ήταν σχεδόν πριν 30 χρόνια όταν ανακαλύφθηκε η μέθοδος EQUOTIP (1975) η οποία και έγινε συνώνυμη με τα *Φορητά Σκληρόμετρα* (σχήμα 3.8, 3.9). Χάρis σε αυτή την μέθοδο η σκληρομέτρηση μπορούσε πλέον να γίνει επιτόπου, εύκολα μα κυρίως εξίσου αξιόπιστα με τις σταθερές μεθόδους. Η λειτουργία της μεθόδου είναι απλή. Συνοπτικά, το σώμα πρόσκρουσης (το οποίο βρίσκεται εσωτερικά στον αισθητήρα) απελευθερώνεται από ένα ελατήριο και προσπίπτει πάνω στο δοκίμιο. Η ταχύτητα πτώσης και αναπήδησης του μετρούνται (εσωτερικά του αισθητήρα) σε απόσταση 1 mm από το δοκίμιο. Από την διαφορά στις ταχύτητες, πριν και μετά την αναπήδηση, προκύπτει η τιμή της σκληρότητας του μετάλλου. Τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου αυτής είναι:

- Άνετη μεταφορά

- Ευκολία στην χρήση
- Άμεση ανάγνωση του αποτελέσματος της μέτρησης
- Υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων
- Υψηλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων
- Δυνατότητα αυτόματης μετατροπής σε όλες τις άλλες γνωστές κλίμακες σκληρομέτρησης όπως HRC, HRB, HV, HB, Shore D
- Μέτρηση προς κάθε κατεύθυνση
- Μέτρηση καμπύλων & κοίλων επιφανειών
- Χρήση για όλα τα μεταλλικά υλικά καθώς και τα σκληρά πλαστικά
- Μεγάλο εύρος μετρήσεων, σε όλες τις γνωστές κλίμακες HRC, HRB, HV, HB, Shore D όπως και εύρεση της τιμής σ_t
- Μεγάλη σειρά από αισθητήρες για κάλυψη των περισσότερων εφαρμογών



Σχήμα 3.8: Φορητό σκληρόμετρο Equotip [9]



Σχήμα 3.9: Αισθητήρας και οθόνη μετρήσεων του σκληρόμετρου Equotip [9]

Παράλληλα η εξέλιξη της μεθόδου αυτής δεν σταμάτησε εκεί. Στην συνέχεια προστέθηκε ένας νέος αισθητήρας ο EQUOSTAT. Ο αισθητήρας αυτός επέτρεψε

στον χρήστη, παράλληλα με την Δυναμική σκληρομέτρηση, να μπορεί να πραγματοποιεί και Στατική σκληρομέτρηση (σχήμα 3.10). Βασιζόμενο στην ίδια περίπου φιλοσοφία της μεθόδου Rockwell, το σκληρόμετρο EQUOTIP, με χρήση του αισθητήρα EQUOSTAT, μπορεί να σκληρομετρήσει μικρά ή/και λεπτά τεμάχια. Η αξιοπιστία της συσκευής όπως και της διαδικασίας μέτρησης καθιερώθηκε και στην Αμερική αφού δημιουργήθηκε και το ανάλογο πρότυπο (ASTM A 956-96 Standard Test Method for Equotip Hardness testing). [9]



Σχήμα 3.10: Σκληρόμετρο EQUOTIP με χρήση του αισθητήρα EQUOSTAT [9]

3.2.3.4 Μέτρηση σκληρότητας των οδοντωτών τροχών

Η σκληρότητα των οδοντωτών τροχών μετρήθηκε με δυναμική μέθοδο με τη χρήση του φορητού σκληρόμετρου *ENPQIX EPX300* (σχήμα 3.11). Στον κινητήριο τροχό η σκληρότητα στους οδόντες μετρήθηκε 202 HB, καθώς ίδια μετρήθηκε και στο σώμα. Στον κινούμενο μετρήθηκε 203 HB στους οδόντες και 67 HB στο σώμα. Για να καλυφθούν όμως πιθανές αποκλίσεις των πραγματικών τιμών σκληρότητας από αυτές που μετρήθηκαν, λόγω σφαλμάτων στις μετρήσεις, στο λογισμικό θα εισαχθεί για τα 202/203 HB ελάχιστη σκληρότητα 190 HB και μέγιστη 210 HB και για τα 67 HB από 61 HB μέχρι 73 HB. Δίνεται δηλαδή ένα εμπειρικό ποσοστό απόκλισης περίπου $\pm 5\%$ για τις μετρήσεις στους οδόντες και $\pm 9\%$ για την μέτρηση στο σώμα του τροχού. Επίσης, οι τιμές της σκληρότητας πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό όχι σε HB αλλά σε HV άρα για 202/203 HB θα είναι 190-220 HV και για 67 HB 80-90 HV.

Η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στην σκληρότητα του κινούμενου τροχού ανάμεσα στους οδόντες και το σώμα του, ενώ το υλικό είναι παντού ίδιο, μπορεί να δικαιολογηθεί με την εφαρμογή κάποιας πιθανόν θερμικής κατεργασίας στους οδόντες του τροχού μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του τροχού, για επιφανειακή σκλήρυνση και αύξηση της αντοχής του. Με τον όρο *θερμική κατεργασία* ορίζεται μία διεργασία, κατά την οποία το επεξεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται ένα συγκεκριμένο θερμικό κύκλο με τα στάδια της θέρμανσης από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή θερμοκρασία, την παραμονή στην εν λόγω θερμοκρασία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και κατόπιν την ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. [10] Πιθανόν και ο κινητήριος τροχός να έχει υποστεί κάποια τέτοια επεξεργασία, λόγω των μικρών του διαστάσεων σε όλη την επιφάνεια του, καθώς είναι πολύ συνηθισμένη μέθοδος αύξησης της αντοχής σε οδοντωτούς τροχούς που παραλαμβάνουν μεγάλα φορτία. Αυτό θα εξακριβωθεί παρακάτω στην παράγραφο εύρεσης των αρχικών υλικών των τροχών.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από την διαδικασία των μετρήσεων.



Σχήμα 3.11: Το φορητό σκληρόμετρο ENPQIX EPX300



Σχήμα 3.12: Μέτρηση σκληρότητας κινητήριου τροχού



Σχήμα 3.13: Μέτρηση σκληρότητας: πάνω – σώματος, κάτω – οδόντων κινούμενου τροχού

3.2.4 Συντελεστής ελαστικότητας – αντοχή σε κάμψη (Young's modulus – Yield strength)

Συντελεστής ελαστικότητας (Young's modulus), E , (μονάδες: GPa ή GN/m²) ορίζεται ως η κλίση του γραμμικού ελαστικού τμήματος της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης (σχήμα 3.7). Ο συντελεστής ελαστικότητας, E , είναι γνωστός επίσης ως το μέτρο εφελκυσμού που είναι ένα μέτρο της ακαμψίας ενός ελαστικού υλικού

και είναι μια ποσότητα που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τα υλικά περιγράφοντας την αντίδραση στην ελαστική ή συμπιεστική φόρτιση. Σε ανισότροπα υλικά, υλικά δηλαδή που δεν διατηρούν σε όλο τον όγκο τους τις ίδιες ιδιότητες, ο συντελεστής ελαστικότητας μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές, ανάλογα με την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης σε σχέση με τη δομή του υλικού. [1]

Όσο μικρότερο συντελεστή ελαστικότητας έχουν τα υλικά των οδοντωτών τροχών, τόσο περισσότερο θα παραμορφώνονται οι οδόντες τους υπό την επίδραση των καμπτικών τάσεων και τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι απώλειες ισχύος στον κινούμενο άξονα κατά την λειτουργία. Επίσης, όταν υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση στους οδόντες, αυξάνεται και η θερμοκρασία των υλικών και όπως θα περιγραφεί και παρακάτω οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας δεν είναι επιθυμητές. Επομένως, είναι σημαντικό τα υλικά των οδοντωτών τροχών να έχουν υψηλό συντελεστή ελαστικότητας.

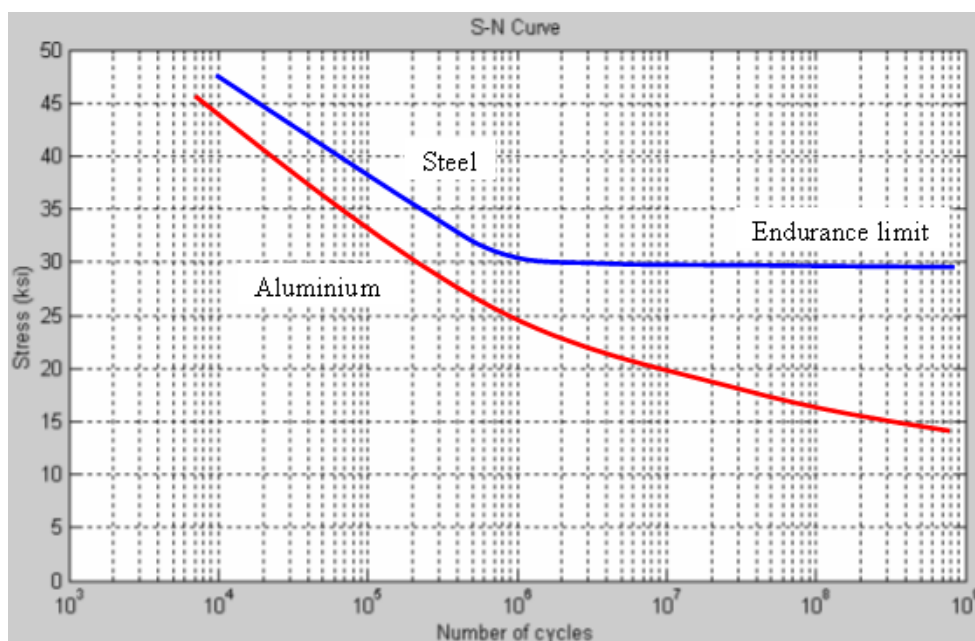
Σαν ένα άλλο σημαντικό κριτήριο επιλογής νέων υλικών για τους οδοντωτούς τροχούς θα χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα *συντελεστή ελαστικότητας – αντοχής σε κάμψη* (*Young's modulus – Yield strength*), στο οποίο θα παρουσιάζονται τα πιθανά υλικά προς επιλογή που έχουν περάσει το πρώτο στάδιο τηρώντας τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, με βάση τον συντελεστή ελαστικότητας τους και την αντοχή τους σε κάμψη. Τα υλικά που θα επιλεγούν πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν υψηλότερο συντελεστή ελαστικότητας, αλλά και όσο το δυνατόν υψηλότερη αντοχή σε κάμψη και όχι οριακή, λόγω πιθανών αποκλίσεων των πραγματικών καμπτικών τάσεων στους οδόντες από των υπολογισμένων. Το διάγραμμα θα περιγραφεί πιο αναλυτικά στην παράγραφο επιλογής νέων υλικών με την εφαρμογή του λογισμικού.

3.2.5 Αντοχή κόπωσης στους 10^7 κύκλους (Fatigue strength at 10^7 cycles)

Στην επιστήμη των υλικών, κόπωση (Fatigue) είναι η προοδευτική δομική βλάβη που συμβαίνει όταν ένα υλικό υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση. Οι ονομαστικές μέγιστες τιμές τάσης κόπωσης είναι μικρότερες από το απόλυτο όριο τάσης εφελκυσμού και μπορεί να είναι κάτω του ορίου τάσης κάμψης του υλικού. Η κόπωση συμβαίνει όταν ένα υλικό υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη φόρτωση και αποφόρτιση. Αν τα φορτία είναι πάνω από ένα ορισμένο όριο, μικροσκοπικές ρωγμές θα αρχίσουν να σχηματίζονται στην επιφάνεια. Τελικά μια ρωγμή θα φτάσει σε ένα κρίσιμο μέγεθος και η δομή ξαφνικά θα σπάσει.

Σιδηρούχα κράματα και κράματα τιτανίου έχουν ένα διακριτό όριο αντοχής, κάτω από το οποίο φαίνεται να μην υπάρχει αριθμός κύκλων που θα προκαλέσει την αστοχία ή και αν υπάρχει είναι πολύ μεγάλος ($N > 10^7$). Άλλα δομικά μέταλλα όπως

το αλουμίνιο και ο χαλκός, δεν έχουν διακριτό όριο και τελικά αποτυγχάνουν ακόμη και με μικρές τιμές τάσεως (σχήμα 3.14). Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένας αριθμός κύκλων (συνήθως 10^7) επιλέγεται έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει την διάρκεια ζωής του υλικού σε κόπωση. [1]



Σχήμα 3.14: Καμπύλες μέγιστης εφαρμόσιμης τάσης - αριθμού κύκλων για χάλυβα (με μπλε και έχει όριο αντοχής) και αλουμίνιο (με κόκκινο και δεν έχει όριο) [11]

Σαν κριτήριο επιλογής νέων υλικών για τους οδοντωτούς τροχούς θα χρησιμοποιηθεί η αντοχή σε κόπωση στους 10^7 κύκλους (Fatigue strength at 10^7 cycles), (μονάδες: MPa). Τα πιθανά υλικά θα ταξινομηθούν με βάση την αντοχή τους σε κόπωση και θα επιλεγούν αυτά με όσο το δυνατόν υψηλότερη αντοχή.

3.2.6 Συντελεστής θερμικής διαστολής (Thermal expansion coefficient)

Αν θεωρηθούν τα άτομα ως μικροί αρμονικοί ταλαντωτές, η άνοδος της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση στο πλάτος των μεταξύ τους ταλαντώσεων, χωρίς όμως να αλλάζει η μέση διατομική απόσταση και συνεπώς χωρίς διαστολή. Η υπόθεση της αρμονικότητας δεν είναι παρά μια πρώτη προσέγγιση. Αν τα άτομα απομακρυνθούν κατά $\pm \delta$ από την θέση ισορροπίας τους, η απωστική δύναμη κατά την προσέγγιση δύο ατόμων είναι μεγαλύτερη από την ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται όταν αυτά απομακρύνονται. Έτσι συμπεραίνεται ότι οι κατά μέσο όρο ατομικές δονήσεις πραγματοποιούνται με μεγαλύτερο πλάτος (ενισχυόμενες) κατά τη

φορά της απομάκρυνσης απ' ότι κατά την φορά της προσέγγισης και συνεπώς προκύπτει διαστολή του μετάλλου. [4]

Ο βαθμός διαστολής σε σχέση με την αλλαγή στη θερμοκρασία ονομάζεται συντελεστής θερμικής διαστολής (Thermal expansion coefficient), α , (μονάδες: $\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$) και γενικά μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής περιγράφει πώς το μέγεθος ενός αντικειμένου μεταβάλλεται με μια αλλαγή στη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, μετρά την κλασματική αλλαγή στο μέγεθος ανά αλλαγή βαθμού στη θερμοκρασία σε μία σταθερή πίεση. Οι τύποι των συντελεστών που έχουν αναπτυχθεί είναι ογκομετρικός, γραμμικός και έκτασης μιας επιφάνειας. [1] Ποιος θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την συγκεκριμένη εφαρμογή και ποιες διαστάσεις θεωρούνται σημαντικές. Το λογισμικό *CES Edupack 2008* χρησιμοποιεί τον συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής, που δείχνει δηλαδή την μεταβολή του μήκους με την μεταβολή της θερμοκρασίας.

Τα υλικά των οδοντωτών τροχών πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής ώστε η αύξηση των διαστάσεων κυρίως στους οδόντες με την αύξηση της θερμοκρασίας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Μια μεγάλη διαστολή των οδόντων, εφόσον θα μεταβληθούν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, θα οδηγήσει στην μη σωστή τους εμπλοκή και ομαλή λειτουργία, αλλά και σε αύξηση των τριβών, οπότε και περεταίρω αύξηση της θερμοκρασίας και μεγάλες απώλειες ισχύος. Επομένως, σαν κριτήριο επιλογής νέων υλικών για τους οδοντωτούς τροχούς θα χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής θερμικής διαστολής και τα πιθανά υλικά αφού ταξινομηθούν με βάση τον συντελεστή τους, θα επιλεγούν αυτά με όσο το δυνατόν μικρότερο.

3.2.7 Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (Maximum service temperature)

Οι ιδιότητες ενός υλικού αλλάζουν με την αύξηση της θερμοκρασίας, συνήθως προς το χειρότερο. Η αντοχή του μειώνεται, αρχίζει να παραμορφώνεται, είναι πιθανόν να οξειδωθεί, αλλοιώνεται ή αποσυντίθεται. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια οριακή θερμοκρασία που ονομάζεται μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (*Maximum service temperature*), T_{max} , (μονάδες: K ή C) μέχρι την οποία το υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς η οξείδωση, η χημική αλλαγή, ή η υπερβολική καταπόνηση να αποτελέσει πρόβλημα. Για τα μέταλλα η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως γύρω στα δύο τρίτα της θερμοκρασίας τήξεως. [5]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στον συντελεστή θερμοκρασίας K_T για τον υπολογισμό της καμπτικής τάσης στους οδόντες, η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των οδοντωτών τροχών είναι 120°C . Οπότε η μέγιστη θερμοκρασία

λειτουργίας των αρχικών αλλά και των νέων υλικών που θα επιλεγούν και θα εισαχθεί σαν περιορισμός στο λογισμικό, πρέπει να είναι τουλάχιστον 120 °C για να μην υπάρξει αστοχία.

3.2.8 Θερμικός αγωγός ή μονωτής (Thermal conductor or insulator)

Η θερμική αγωγιμότητα χαρακτηρίζει την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός υλικού. Διακρίνουμε δύο κατηγορίες υλικών σύμφωνα με το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας που επιδεικνύουν:

- Στερεά με ελεύθερα ηλεκτρόνια (μεταλλικά υλικά)
- Στερεά χωρίς ελεύθερα ηλεκτρόνια (ομοιοπολικά και ιοντικά υλικά)

Στην περίπτωση των μετάλλων, με την αύξηση της θερμοκρασίας η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων αυξάνεται, με αποτέλεσμα αυτά να μετακινούνται από τη ζώνη υψηλής θερμοκρασίας στη ζώνη χαμηλής θερμοκρασίας, μεταδίδοντας μέρος της κινητικής τους ενέργειας μέσω ελαστικών συγκρούσεων, στα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος. Οι ατομικές δονήσεις οι οποίες προκαλούνται (φωνόνια) επιφέρουν αύξηση της θερμοκρασίας της ψυχρότερης ζώνης, με αποτέλεσμα τη θερμική ενεργοποίηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε αυτή την ζώνη. Καθώς τα ηλεκτρόνια αυτά τείνουν να μετακινηθούν προς τη θερμότερη ζώνη, όπου θα ανακτούσαν την επιπλέον κινητική ενέργεια, η διεργασία αυτή συνεχίζεται με δυναμικό τρόπο. [4]

Τα υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα ονομάζονται θερμικοί αγωγοί (*Thermal conductors*) ενώ με μικρή θερμικοί μονωτές (*Thermal insulator*). Τα υλικά των οδοντωτών τροχών πρέπει να είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας, να έχουν δηλαδή υψηλή θερμική αγωγιμότητα, καθώς έτσι θα μπορούν ευκολότερα να αποβάλλουν την θερμότητα που αναπτύσσεται κατά την λειτουργία των τροχών λόγω τριβής. Έτσι θα κρυνώνουν πιο γρήγορα και δεν θα αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως δεν είναι επιθυμητές, λόγω αλλαγής των ιδιοτήτων των υλικών, της αλλοίωσης της συμπεριφοράς του λιπαντικού, της υπερβολικής διαστολής των οδόντων κ.λπ. Επομένως ένας άλλος περιορισμός που θα εισαχθεί στο λογισμικό για την επιλογή των αρχικών αλλά και των νέων υλικών θα είναι τα υλικά να είναι καλοί θερμικοί αγωγοί (*Good conductor*).

3.2.9 Τιμή (Price)

Ένας τελευταίος παράγοντας που θα καθορίσει την επιλογή των νέων υλικών για τους οδοντωτούς τροχούς είναι η τιμή τους (*Price*), C_m , (μονάδες: €/kg). Τα πιθανά υλικά αφού ταξινομηθούν με βάση την τιμή τους, θα επιλεγούν αυτά με όσο το δυνατόν μικρότερη.

Η τιμές εκτείνονται σε μία ευρεία κλίμακα, καθώς μπορεί μερικά υλικά να κοστίζουν 0.2 €/kg, ενώ κάποια άλλα μέχρι και 1000 €/kg. Επίσης, καθώς εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα του υλικού, η ποσότητα που θα αγοραστεί κ.λπ., αυξομειώνονται συνεχώς και εδώ δίνονται κατά προσέγγιση, για αγορά μεγάλων ποσοτήτων από ένα πρωτογενή παραγωγό το έτος 2008. Βέβαια, παρόλο που δεν μπορούν να δοθούν με ακρίβεια είναι χρήσιμες στην ταξινόμηση των υλικών, ειδικά στα αρχικά στάδια επιλογής. [1]

Οι διαφορές στην τιμή μεταξύ κάποιων υλικών μπορεί αρχικά να φαίνονται αμελητέες όμως σε παραγωγές μεγάλου μεγέθους ή σε μεγάλες κατασκευές η διαφορά στο κόστος γίνεται αισθητή και δεν μπορεί να θεωρηθεί σε καμία περίπτωση αμελητέα.

3.3 Εφαρμογή του λογισμικού CES Edupack 2008 για την εύρεση των υλικών των οδοντωτών τροχών

Το λογισμικό *CES (Cambridge Engineering Selector) Edupack* αναπτύχθηκε από την εταιρία Granta Design σε συνεργασία με τον καθηγητή Michael F. Ashby του Τμήματος Μηχανολόγων του Πανεπιστημίου του Cambridge. Πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο, που επιτρέπει στους χρήστες την αναζήτηση και ανάλυση δεδομένων που περιέχονται στις βάσεις δεδομένων του και την εφαρμογή μιας συστηματικής μεθοδολογίας για την επιλογή οντοτήτων προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση. [1]

Το λογισμικό *CES Edupack 2008* προσφέρει βοήθεια στους παρακάτω τομείς:

- Στην επιστήμη των υλικών
- Στον βιομηχανικό σχεδιασμό και τον σχεδιασμό προϊόντων
- Στον οικολογικό σχεδιασμό
- Στις μηχανολογικές κατασκευές
- Στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και αλλού

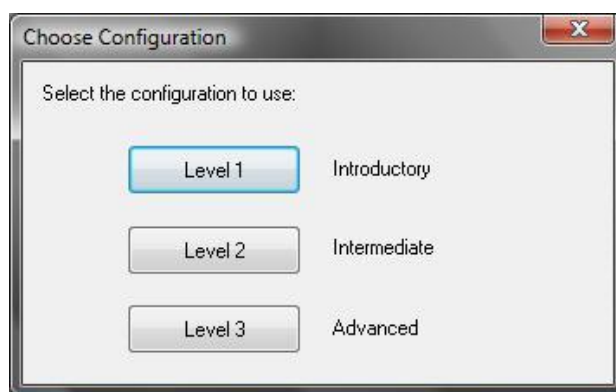
Η βάση δεδομένων του *CES Edupack 2008* δίνει πληροφορίες για τα υλικά και τις κατεργασίες και μέσω κάποιων διαδικασιών δίνει την δυνατότητα επιλογής των καταλληλότερων εξ' αυτών.

Στην συνέχεια θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την εύρεση του αρχικών υλικών των οδοντωτών τροχών εισάγοντας τους απαραίτητους περιορισμούς στο λογισμικό.

3.3.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός

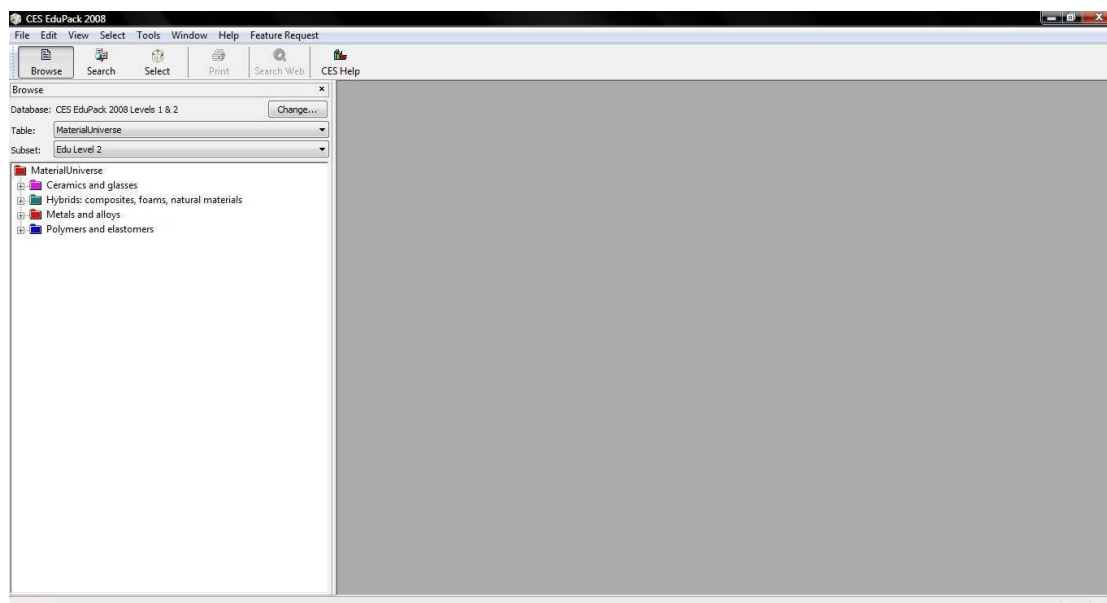
3.3.1.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται το αρχικό παράθυρο διαλόγου **Choose Configuration** όπου ζητείται να γίνει επιλογή μεταξύ τριών επιπέδων (*Levels*) (σχήμα 3.15). Το Επίπεδο 1 (*Level 1*) περιέχει δεδομένα για τα περίπου 60 πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά και τις 70 πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες κατεργασίες. Το Επίπεδο 2 (*Level 2*) περιέχει 90 υλικά και περίπου 100 κατεργασίες επεξεργασίας, συμπεριλαμβανόμενων και των υλικών και κατεργασιών του Επιπέδου 1. Το επίπεδο 3 περιέχει πάνω από 3000 υλικά συμπεριλαμβανόμενων και αυτών των Επιπέδων 1 και 2. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέγεται το ενδιάμεσο Επίπεδο 2. Στην συνέχεια αφού επιλεγεί το επίπεδο, εμφανίζεται το παράθυρο του περιβάλλοντος εργασίας (σχήμα 3.16).



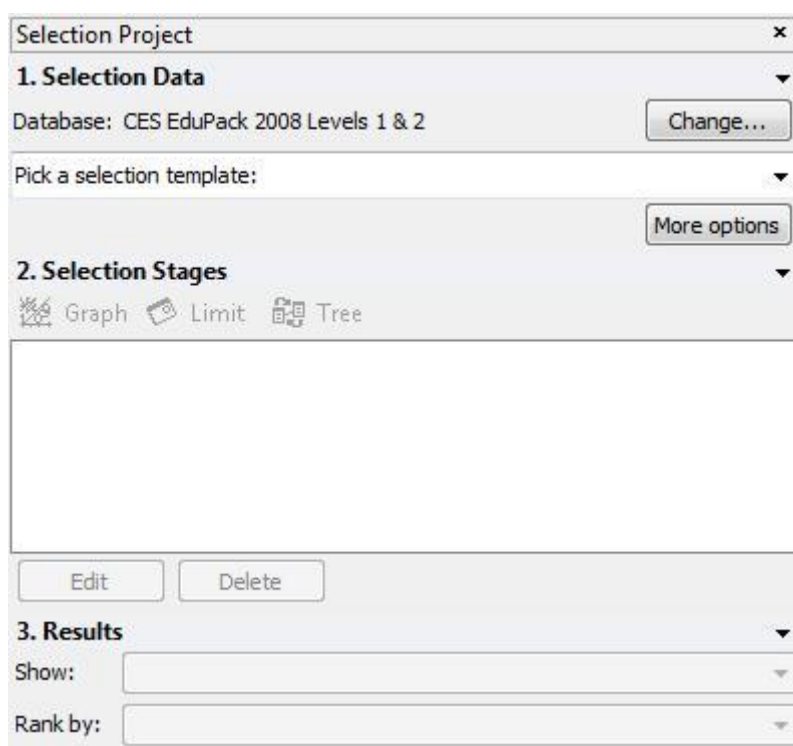
Σχήμα 3.15: Εισαγωγικό παράθυρο για την επιλογή επιπέδου

Κεφάλαιο 3: Εύρεση των υλικών των οδοντωτών τροχών και επιλογή νέων



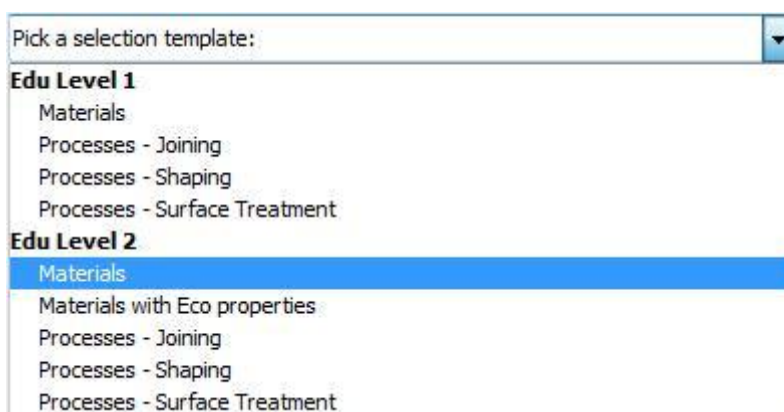
Σχήμα 3.16: Το περιβάλλον εργασίας του *CES EduPack 2008*

Από την εργαλειοθήκη στο πάνω αριστερό μέρος του περιβάλλοντος εργασίας επιλέγεται το εικονίδιο **Select** . Το αριστερό μέρος του παραθύρου παίρνει την μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17 παρακάτω.



Σχήμα 3.17: Η νέα μορφή του αριστερού μέρους του περιβάλλοντος εργασίας

Στην επιλογή *1.Selection Data* υπάρχει η δυνατότητα με την εντολή **Change** πάνω δεξιά να γίνει αλλαγή επιπέδου. Στην συνέχεια εφόσον ο στόχος είναι η επιλογή υλικού, πατώντας το βελάκι δίπλα από το *Pick a selection template* επιλέγεται το **Edu Level 2: Materials** (σχήμα 3.18).

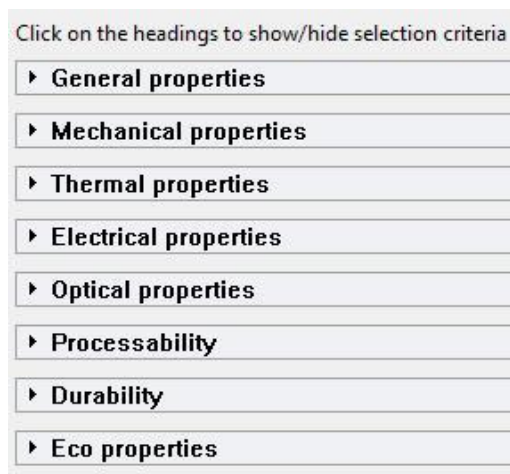


Σχήμα 3.18: Η επιλογή στο Pick a selection template

Εμφανίζονται έτσι τα στάδια που θα ακολουθηθούν για την επιλογή (*2.Selection Stages*), καθώς και τα αποτελέσματα (*3.Results*) που θα διεξαχθούν αφού γίνει η εισαγωγή των δεδομένων.

Σε αυτή την εφαρμογή της εύρεσης των αρχικών υλικών των οδοντωτών τροχών θα χρειαστεί να εισαχθούν στο λογισμικό μόνο κάποια δεδομένα σαν περιορισμοί και δεν θα δημιουργηθούν γραφήματα τα οποία θα χρειαστούν στην επιλογή νέων υλικών για τους τροχούς.

Για να εισαχθούν οι περιορισμοί κάτω από το *2.Selection Stages* επιλέγεται το εικονίδιο **Limit**  **Limit**. Με την εντολή αυτή δίνεται η δυνατότητα να εισαχθούν όλα τα αριθμητικά δεδομένα που μπορεί να περιέχει ένα πρόβλημα. Μόλις επιλεγεί εμφανίζονται κάποιες κατηγορίες των δεδομένων προς εισαγωγή (σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19: Κατηγορίες των δεδομένων προς εισαγωγή

Αρχικά επιλέγεται το **General properties** (γενικές ιδιότητες) και εισάγεται δίπλα στο *Density* στο κουτάκι *Minimum* η ελάχιστη τιμή της πυκνότητας 6868 kg/m^3 και στο *Maximum* η μέγιστη 7268 kg/m^3 όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.20 παρακάτω.

▼ General properties			
	Minimum	Maximum	
Density	6868	7268	kg/m ³

Σχήμα 3.20: Εισαγωγή της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής της πυκνότητας

Κατόπιν επιλέγεται το **Mechanical properties** (μηχανικές ιδιότητες) και εισάγεται δίπλα στο *Yield strength (elastic limit)* στο κουτάκι *Minimum* η ελάχιστη επιτρεπόμενη καμπτική τάση 102.26 MPa και δίπλα στο *Hardness – Vickers* η ελάχιστη τιμή της σκληρότητας στους οδόντες του τροχού 190 HV και η μέγιστη 220 HV όπως στο σχήμα 3.21.

▼ Mechanical properties			
	Minimum	Maximum	
Young's modulus			GPa
Shear modulus			GPa
Bulk modulus			GPa
Poisson's ratio			
Yield strength (elastic limit)	102.26		MPa
Tensile strength			MPa
Compressive strength			MPa
Elongation			%
Hardness - Vickers	190	220	HV

Σχήμα 3.21: Εισαγωγή της ελάχιστης τιμής της αντοχής σε κάμψη και των τιμών σκληρότητας

Τέλος, επιλέγεται το **Thermal properties** (θερμικές ιδιότητες) και εισάγεται δίπλα στο *Maximum service temperature* στο κουτάκι *Minimum* η ελάχιστη τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας 120°C . Δίπλα στο *Thermal conductor or insulator?* επιλέγεται το **Good conductor** για να δηλωθεί ότι το υλικό προς αναζήτηση πρέπει να είναι καλός θερμικός αγωγός. Η εισαγωγή των δεδομένων στις θερμικές ιδιότητες παρουσιάζεται στο σχήμα 3.22.

▼ Thermal properties		
	Minimum	Maximum
Melting point		°C
Glass temperature		°C
Maximum service temperature	120	°C
Minimum service temperature		°C
Thermal conductor or insulator?	☒ Good conductor ☐ Poor conductor ☐ Poor insulator ☐ Good insulator	

Σχήμα 3.22: Εισαγωγή της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας και ότι το υλικό πρέπει να είναι καλός θερμικός αγωγός

Αφού εισαχθούν όλα τα δεδομένα επιλέγεται πάνω το **Apply** για να γίνει εφαρμογή των δεδομένων που εισήχθησαν. Τα πιθανά υλικά προς επιλογή που τηρούν τους περιορισμούς που τέθηκαν φαίνονται αριστερά στο τρίτο στάδιο των αποτελεσμάτων (3. Results) και είναι δύο, ο όλκιμος χυτοσίδηρος (*Cast iron, ductile (nodular)*) και ο φαιός χυτοσίδηρος (*Cast iron, gray*) (σχήμα 3.23).

3. Results: 2 of 97 pass	
Show:	Pass all Stages
Rank by:	Alphabetical
Name	
☒ Cast iron, ductile (nodular)	
☒ Cast iron, gray	

Σχήμα 3.23: Τα πιθανά υλικά προς επιλογή που τηρούν τους περιορισμούς που τέθηκαν

3.3.1.2 Τελική επιλογή του υλικού

Από τον πίνακα 3.5 με τις επιτρεπόμενες καμπτικές τάσεις οδοντωτών τροχών για διάφορες σκληρότητες των δύο υλικών που βρέθηκαν από το λογισμικό, παρατηρείται ότι φαιός χυτοσίδηρος με τυπική ελάχιστη επιφανειακή σκληρότητα 201 HB (κατηγορία 40) έχει επιτρεπόμενη καμπτική τάση $S_{at} = 92 \text{ MPa} < 102.26 \text{ MPa}$ που είναι η επιθυμητή επιτρεπόμενη καμπτική τάση. Ακόμη, παρατηρείται ότι ο όλκιμος χυτοσίδηρος ελάχιστης σκληρότητας 179 HB (ποιότητα 80-55-06) έχει ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση $S_{at} = 155 \text{ MPa} > 102.26 \text{ MPa}$. Οπότε ο φαιός χυτοσίδηρος απορρίπτεται και το υλικό του κινητήριου τροχού είναι *όλκιμος*

χυτοσίδηρος ποιότητας 80-55-06. Επίσης, σύμφωνα με τον πίνακα το υλικό έχει υποστεί θερμική επεξεργασία (βαφή και επαναφορά).

Πίνακας 3.5: Επιτρεπόμενες καμπτικές τάσεις S_{at} οδοντωτών τροχών από φαιό και όλκιμο χυτοσίδηρο [3]

Υλικό	Κατηγορία υλικού	Θερμική επεξεργασία	Τυπική ελάχιστη επιφανειακή σκληρότητα	Επιτρεπόμενη καμπτική τάση S_{at} , MPa		
ASTM A48 φαιός χυτοσίδηρος	Κατηγορία 20	Κατά την χύτευση	----	35		
	Κατηγορία 30		174 HB	60		
	Κατηγορία 40		201 HB	92		
ASTM A536 όλκιμος χυτοσίδηρος	Ποιότητα 60-40-18	Ανόπτηση	140 HB	155	έως	232
	Ποιότητα 80-55-06	Βαφή και επαναφορά	179 HB	155	έως	232
	Ποιότητα 100-70-03		229 HB	190	έως	282
	Ποιότητα 120-90-02		269 HB	218	έως	310

3.3.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός

3.3.2.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών

Για την εύρεση του υλικού του κινούμενου οδοντωτού τροχού ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία, απλά αλλάζουν τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό.

Αφού επιλεγεί το **General properties** (γενικές ιδιότητες) εισάγεται δίπλα στο **Density** ελάχιστη τιμή της πυκνότητας 6715 kg/m^3 και μέγιστη 7115 kg/m^3 . Στην συνέχεια στο **Mechanical properties** (μηχανικές ιδιότητες) μπορεί να εισαχθεί είτε η τιμή της σκληρότητας στους οδόντες του τροχού 190 HV - 220 HV όπως στον κινητήριο τροχό και η ελάχιστη επιτρεπόμενη καμπτική τάση 74.82 MPa, είτε μόνο η μικρότερη σκληρότητα που μετρήθηκε στο σώμα του τροχού 80 HV – 90 HV, καθώς το υλικό είναι ίδιο απλά στους οδόντες έχει υποστεί μια θερμική επεξεργασία. Αν εισαχθεί η σκληρότητα του σώματος του τροχού δεν εισάγεται και τιμή για την επιτρεπόμενη καμπτική τάση, καθώς οι καμπτικές τάσεις ασκούνται στους οδόντες και όχι στο σώμα. Θα δοκιμαστούν και οι δύο εκδοχές. Τέλος, αφού επιλεγεί το **Thermal properties** (θερμικές ιδιότητες) εισάγεται η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 120°C και επιλέγεται το **Good conductor** για να δηλωθεί ότι το υλικό προς αναζήτηση πρέπει να είναι καλός θερμικός αγωγός όπως προηγουμένως. Μόλις ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων επιλέγεται το **Apply** και για την πρώτη

εκδοχή με την σκληρότητα των οδόντων τα πιθανά υλικά είναι ο όλκιμος χυτοσίδηρος (*Cast iron, ductile (nodular)*) και ο φαιός χυτοσίδηρος (*Cast iron, gray*), όπως και στον κινητήριο τροχό, ενώ με την δεύτερη μόνο ο φαιός χυτοσίδηρος (*Cast iron, gray*).

3.3.2.2 Τελική επιλογή του υλικού

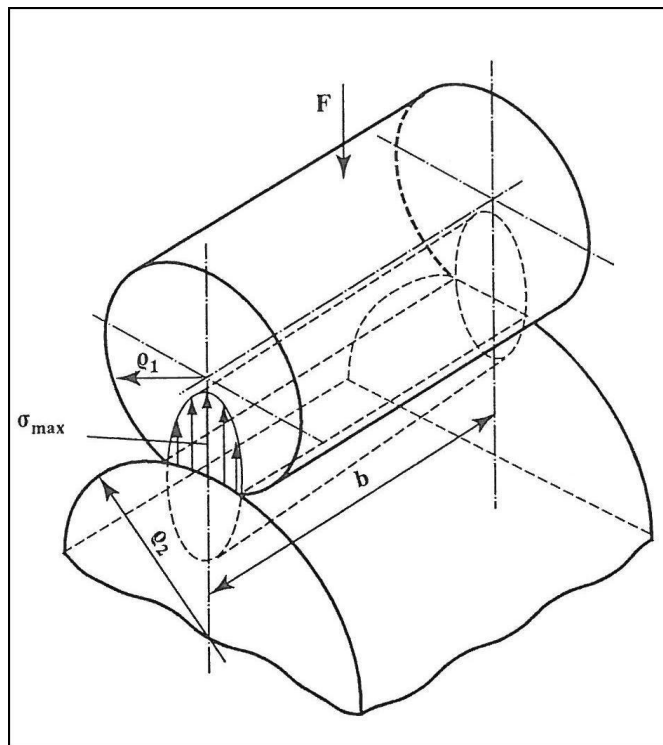
Από τον πίνακα 3.5 παρατηρείται ότι ο φαιός χυτοσίδηρος με τυπική ελάχιστη επιφανειακή σκληρότητα 201 HB (κατηγορία 40) έχει επιτρεπόμενη καμπτική τάση $S_{at} = 92 \text{ MPa} > 74.82 \text{ MPa}$ που είναι η επιθυμητή επιτρεπόμενη καμπτική τάση. Επομένως το υλικό του κινούμενου τροχού είναι *φαιός χυτοσίδηρος κατηγορίας 40* που σύμφωνα με τον πίνακα έχει υποστεί θερμική επεξεργασία (κατά την χύτευση). Επίσης, εφόσον η σκληρότητα των οδόντων διαφέρει από του σώματος του τροχού, οι οδόντες υπέστησαν επιφανειακή σκλήρυνση πιθανόν με περεταίρω θερμική επεξεργασία μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του τροχού.

3.4 Έλεγχος αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση

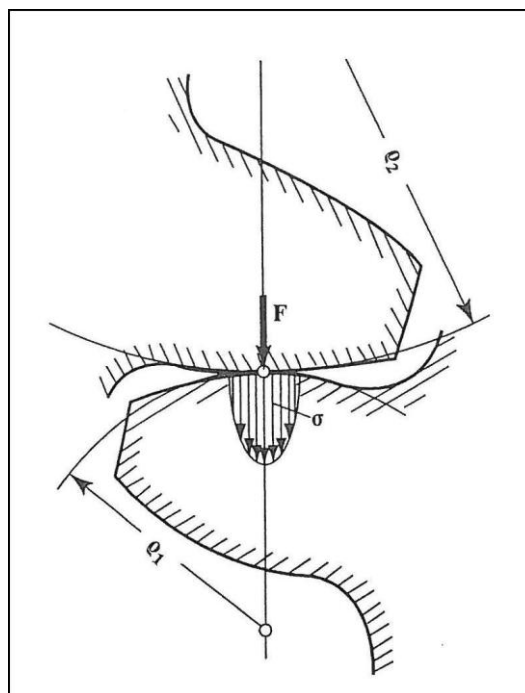
Αφού βρέθηκαν τα υλικά των οδοντωτών τροχών, θα ελεγχθεί η αντοχή των οδόντων τους με τα συγκεκριμένα υλικά σε επιφανειακή πίεση, ώστε να γίνει επαλήθευση ότι τα υλικά που βρέθηκαν είναι τα σωστά.

Ο υπολογισμός σε πίεση επιφανείας έχει σαν βάση τον τύπο του Hertz που αναφέρεται στην πίεση μεταξύ δύο ακίνητων κυλίνδρων. Αν δύο κύλινδροι με ακτίνες ρ_1 και ρ_2 και πλάτος b , φορτιστούν με μια κάθετη δύναμη F , στη ζώνη πίεσης θα εμφανιστεί μια ελλειπτική κατανομή των τάσεων (σχήμα 3.24).

Αν θεωρήσουμε τους συνεργαζόμενους οδόντες σαν δύο κυλίνδρους (σχήμα 3.25) και λάβουμε υπόψη και εδώ (όπως στον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη) διάφορους συντελεστές επιρροής, καταλήγουμε στην σχέση 3.2 που δίνει την πίεση επιφανείας στην δυσμενέστερη περιοχή όπου κυρίως εμφανίζονται τα «σκαψίματα» (pittings) στον οδόντα, δηλαδή στον κύκλο κύλισης. [2]



Σχήμα 3.24: Πίεση μεταξύ δύο κυλίνδρων [2]



Σχήμα 3.25: Πίεση μεταξύ δύο οδόντων [2]

$$\sigma_c = C_p \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d \cdot I} \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_s \cdot K_m \cdot C_f} \leq S_{c,επ} = \frac{S_{ac} \cdot Z_N \cdot C_H}{S_H \cdot K_T \cdot K_R} \quad (3.2)$$

- σ_c η προκαλούμενη επιφανειακή τάση
- C_p ο συντελεστής ελαστικότητας σε $\sqrt{\text{MPa}}$ του οποίου η τιμή υπολογίζεται

$$\text{από την σχέση } C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot [(1 - \nu_p^2) / E_p + (1 - \nu_g^2) / E_g]}}, \text{ όπου } E_p, E_g, \nu_p, \nu_g \text{ είναι}$$

τα μέτρα ελαστικότητας (Young's modulus) και οι λόγοι Poisson (Poisson's ratio) του κινητήριου και του κινούμενου τροχού αντιστοίχως. Θα βρεθούν μέσω του *CES Edupack 2008* επιλέγοντας με διπλό κλικ τα υλικά αριστερά στα αποτελέσματα (σχήμα 3.20). Μόλις επιλεγεί το υλικό εμφανίζεται μια περιγραφή του υλικού, οι ιδιότητες του και διάφορα άλλα στοιχεία. Στις μηχανικές τους ιδιότητες (Mechanical properties) βρίσκονται τα δεδομένα που θα χρειαστούν. Επειδή και για τα μέτρα ελαστικότητας αλλά και για τους λόγους Poisson δίνεται μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή θα επιλεγεί η μέση τιμή τους. Οπότε είναι:

$$E_p = \frac{E_{pmin} + E_{pmax}}{2} = \frac{165 + 180}{2} = 172.5 \text{ GPa} = 172.5 \cdot 10^3 \text{ MPa},$$

$$E_g = \frac{E_{gmin} + E_{gmax}}{2} = \frac{80 + 138}{2} = 109 \text{ GPa} = 109 \cdot 10^3 \text{ MPa και}$$

$$\nu_p = \nu_g = \frac{0.26 + 0.28}{2} = 0.27$$

Οπότε ο συντελεστής ελαστικότητας θα είναι:

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot [(1 - 0.27^2) / 172.5 \cdot 10^3 + (1 - 0.27^2) / 109 \cdot 10^3]}} \approx 151.44 \sqrt{\text{MPa}}$$

- $F_t \approx 226.63 \text{ N}$ η μεταφερόμενη εφαπτομενική δύναμη (υπολογίστηκε προηγουμένως στον υπολογισμό της καμπτικής τάσης).
- $b = 13 \text{ mm}$ το πλάτος επαφής των οδόντων όπου κατανέμεται το φορτίο.
- d η διάμετρος αρχικού κύκλου των τροχών σε mm. Για τον κινητήριο τροχό είναι $d_1 = 29.75 \text{ mm}$ και για τον κινούμενο $d_2 = 120.75 \text{ mm}$.
- I ο γεωμετρικός συντελεστής αντίστασης σε επιφανειακή φθορά ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Είναι } I = C_c \cdot C_x$$

$$\text{Με } C_c = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \alpha}{2} \cdot \frac{i}{i+1} = \frac{\cos 20 \cdot \sin 20}{2} \cdot \frac{4.06}{4.06+1} \approx 0.128 \text{ όπου } i \text{ η σχέση}$$

$$\text{μετάδοσης με } i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{69}{17} \approx 4.06$$

$$\text{και } C_x = \frac{(C_1 - C_3 + C_4) \cdot (C_2 + C_3 - C_4)}{C_1 \cdot C_2} \text{ με}$$

$$C_1 = \frac{z_1 \cdot \sin \alpha}{2} = \frac{17 \cdot \sin 20}{2} \approx 2.907$$

$$C_2 = \frac{z_1 \cdot i \cdot \sin \alpha}{2} = C_1 \cdot i = 2.907 \cdot 4.06 \approx 11.802$$

$$C_3 = \pi \cdot \cos \alpha = \pi \cdot \cos 20 \approx 2.952$$

$$C_4 = 0.5 \cdot \left[\sqrt{(z_1 + 2)^2 - (z_1 \cdot \cos \alpha)^2} - \sqrt{z_1 - (z_1 \cdot \cos \alpha)^2} \right] =$$

$$= 0.5 \cdot \left[\sqrt{(17 + 2)^2 - (17 \cdot \cos 20)^2} - \sqrt{17 - (17 \cdot \cos 20)^2} \right] \approx 2.235$$

$$\text{Αρά } C_x = \frac{(2.907 - 2.952 + 2.235) \cdot (11.802 + 2.952 - 2.235)}{2.907 \cdot 11.802} \approx 0.799$$

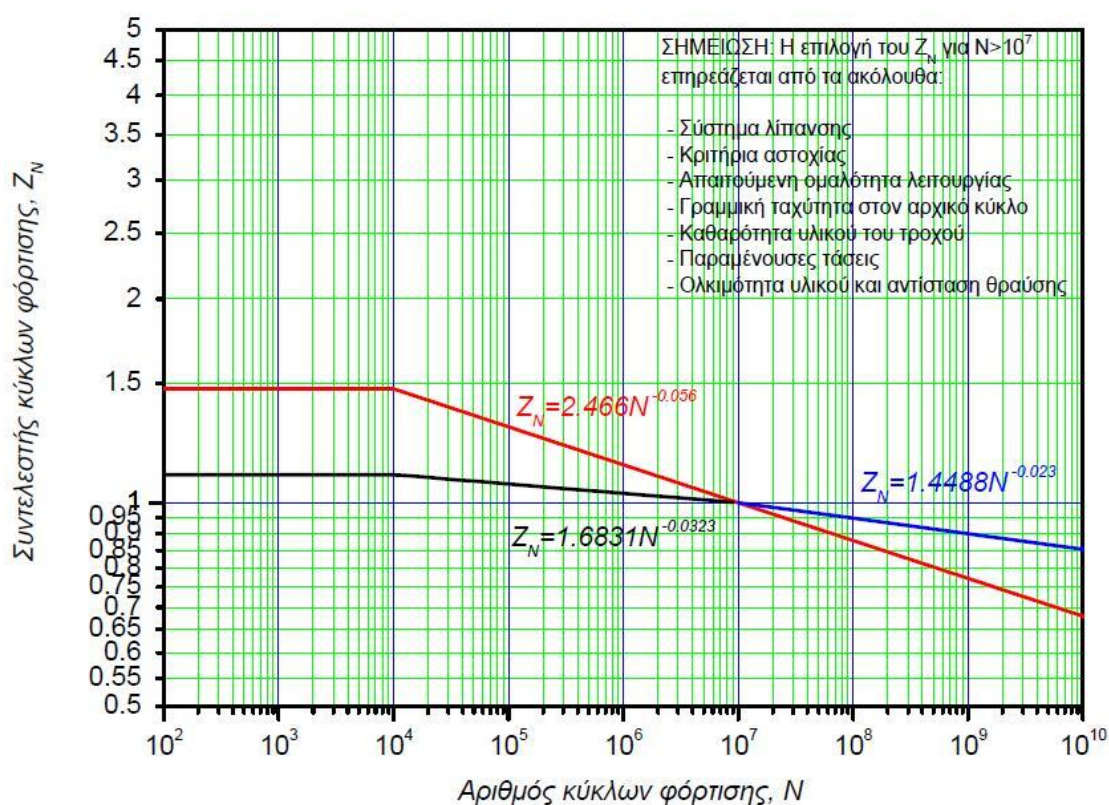
$$\text{και επομένως } I = 0.128 \cdot 0.799 \approx 0.102$$

- $K_o = 1.7$ ο συντελεστής υπερφόρτισης (υπολογίστηκε προηγουμένως στον υπολογισμό της καμπτικής τάσης).
- $K_o \approx 1.57$ ο δυναμικός συντελεστής (υπολογίστηκε προηγουμένως στον υπολογισμό της καμπτικής τάσης).
- $K_s = 1$ ο συντελεστής διόρθωσης μεγέθους (υπολογίστηκε προηγουμένως στον υπολογισμό της καμπτικής τάσης).
- $K_m \approx 1.1538$ ο συντελεστής διανομής φορτίου (υπολογίστηκε προηγουμένως στον υπολογισμό της καμπτικής τάσης).
- C_f ο συντελεστής επιφανειακών συνθηκών για αντίσταση σε φθορά. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την επιφανειακή κατεργασία των οδόντων τις παραμένουσες στον οδόντα τάσεις και από φαινόμενα πλαστικότητας που είναι παρόντα. Δεν έχει ακόμη τυποποιηθεί και προτείνεται για τις περισσότερες περιπτώσεις $C_f = 1$
- $S_{c,επ}$ η επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση.
- S_{ac} η επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση για τα υλικά των οδοντωτών τροχών από πίνακα 3.6. Για όλκιμο χυτοσίδηρο του κινητήριου τροχού είναι $S_{ac} = 648 \text{ MPa}$, ενώ για φαιό χυτοσίδηρο του κινούμενου $S_{ac} = 599 \text{ MPa}$.

Πίνακας 3.6: Επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση S_{ac} οδοντωτών τροχών από φαιό και όλκιμο χυτοσίδηρο [3]

Υλικό	Κατηγορία υλικού	Θερμική επεξεργασία	Τυπική ελάχιστη επιφανειακή σκληρότητα	Επιτρεπόμενη επιφανειακή τάση S_{ac} , MPa		
ASTM A48 φαιός χυτοσίδηρος	Κατηγορία 20	Κατά την χύτευση	----	352	έως	423
	Κατηγορία 30		174 HB	458	έως	528
	Κατηγορία 40		201 HB	528	έως	599
ASTM A536 όλκιμος χυτοσίδηρος	Ποιότητα 60-40-18	Ανόπτηση	140 HB	542	έως	648
	Ποιότητα 80-55-06	Βαφή και επαναφορά	179 HB	542	έως	648
	Ποιότητα 100-70-03		229 HB	648	έως	789
	Ποιότητα 120-90-02		269 HB	725	έως	887

- $Z_N = 1$ ο συντελεστής διάρκειας ζωής από σχήμα 3.26 για 10^7 κύκλους φόρτισης. [3]



Σχήμα 3.26: Συντελεστής κύκλων φόρτισης ή διάρκεια ζωής Z_N λόγω επιφανειακών τάσεων [3]

- C_H ο συντελεστής λόγου σκληρότητας για αντίσταση σε φθορά, ο οποίος έχει σκοπό να προσαρμόσει τις επιφανειακές τάσεις για υπολογισμούς με διαφορετικές σκληρότητες κινητήριου και κινούμενου τροχού.

Χρησιμοποιείται μόνο για τον κινούμενο οδοντωτό τροχό και για να υπολογιστεί πρέπει $1.2 \leq \frac{H_{BP}}{H_{BG}} \leq 1.7$, όπου H_{BP} και H_{BG} οι σκληρότητες Brinell

του κινητήριου και του κινούμενου τροχού αντιστοίχως, ενώ αν $\frac{H_{BP}}{H_{BG}} \leq 1.2$

είναι $C_H = 1$. Γενικά δεν πρέπει $\frac{H_{BP}}{H_{BG}} > 1.7$, καθώς μεγάλη διαφορά στις

σκληρότητες των δύο τροχών πρέπει να αποφεύγεται, λόγω πιθανής αστοχίας του κινούμενου με την μικρότερη σκληρότητα. [6] Εδώ είναι

$$\frac{H_{BP}}{H_{BG}} = \frac{202}{203} \approx 0.995 \leq 1.2 \text{ οπότε } C_H = 1.$$

- $S_H = 1$ ο συντελεστής ασφαλείας σε επιφανειακή φθορά κατ' επιλογή του σχεδιαστή.
- $K_T = 1$ ο συντελεστής θερμοκρασίας για θερμοκρασία λειτουργίας των τροχών $T \leq 120^\circ\text{C}$.
- $K_R = 1$ ο συντελεστής αξιοπιστίας από πίνακα 3.7 και αστοχία 1 σε 100 δηλαδή 99% αξιοπιστία. [3]

Πίνακας 3.7: Συντελεστής αξιοπιστίας K_R [3]

Απαίτηση	K_R
1 αστοχία σε 10000	1.22
1 αστοχία σε 1000	1.12
1 αστοχία σε 100	1.00
1 αστοχία σε 10	0.92
1 αστοχία σε 2	0.84

Επομένως η σχέση 3.2 για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό θα γίνει:

$$\sigma_c = 151.44 \sqrt{\frac{226.63}{13 \cdot 29.75 \cdot 0.102} \cdot 1.7 \cdot 1.57 \cdot 1 \cdot 1.1538 \cdot 1} \leq S_{c, \varepsilon\pi} = \frac{648 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1} \Leftrightarrow 636.38 \leq 648$$

και για τον κινούμενο:

$$\sigma_c = 151.44 \sqrt{\frac{226.63}{13 \cdot 120.75 \cdot 0.102} \cdot 1.7 \cdot 1.57 \cdot 1 \cdot 1.1538 \cdot 1} \leq S_{c, \varepsilon\pi} = \frac{599 \cdot 1 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1} \Leftrightarrow 316.17 \leq 599$$

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ισχύουν οι σχέσεις, οπότε οι οδοντωτοί τροχοί με τα συγκεκριμένα υλικά που βρέθηκαν είναι ασφαλείς.

3.5 Εφαρμογή του λογισμικού CES Edupack 2008 για την επιλογή νέων υλικών των οδοντωτών τροχών

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την επιλογή νέων υλικών για τους οδοντωτούς τροχούς μέσω του λογισμικού CES Edupack 2008.

3.5.1 Εισαγωγή περιορισμών στο λογισμικό και εύρεση πιθανών υλικών

Για την εύρεση νέων υλικών για τους οδοντωτούς τροχούς πρέπει αρχικά να εισαχθούν οι περιορισμοί για να βρεθούν τα πιθανά υλικά προς επιλογή που τηρούν τους περιορισμούς.

Για να εισαχθούν τα δεδομένα επιλέγεται όπως και προηγουμένως κάτω από το 2.Selection Stages το εικονίδιο **Limit**  **Limit**. Στο **Mechanical properties** (μηχανικές ιδιότητες) εισάγεται δίπλα στο *Yield strength (elastic limit)* στο κουτάκι *Minimum* η ελάχιστη επιτρεπόμενη καμπτική τάση, 102.26 MPa για τον κινητήριο τροχό και 74.82 MPa για τον κινούμενο, που είναι το μοναδικό διαφορετικό δεδομένο για τους δύο τροχούς. Δίπλα στο *Hardness – Vickers* εισάγεται 190 HV και 220 HV η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της σκληρότητας στους οδόντες των τροχών. Κατόπιν, στο **Thermal properties** (θερμικές ιδιότητες) εισάγεται δίπλα στο *Maximum service temperature* στο κουτάκι *Minimum* η ελάχιστη τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας 120 °C και δίπλα στο *Thermal conductor or insulator?* επιλέγεται το **Good conductor** για να δηλωθεί ότι τα υλικά προς αναζήτηση πρέπει να είναι καλοί θερμικοί αγωγοί. Μόλις ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων επιλέγεται το **Apply** και τα πιθανά υλικά που μπορούν να επιλεγούν και για τους δύο οδοντωτούς τροχούς είναι:

- ορείχαλκος (*Brass*)
- μπρούτζος (*Bronze*)
- όλκιμος χυτοσίδηρος (*Cast iron, ductile (nodular)*)
- φαιός χυτοσίδηρος (*Cast iron, gray*)
- χάλυβας υψηλού άνθρακα (*High carbon steel*)
- ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*)
- χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*)
- νικέλιο (*Nickel*)

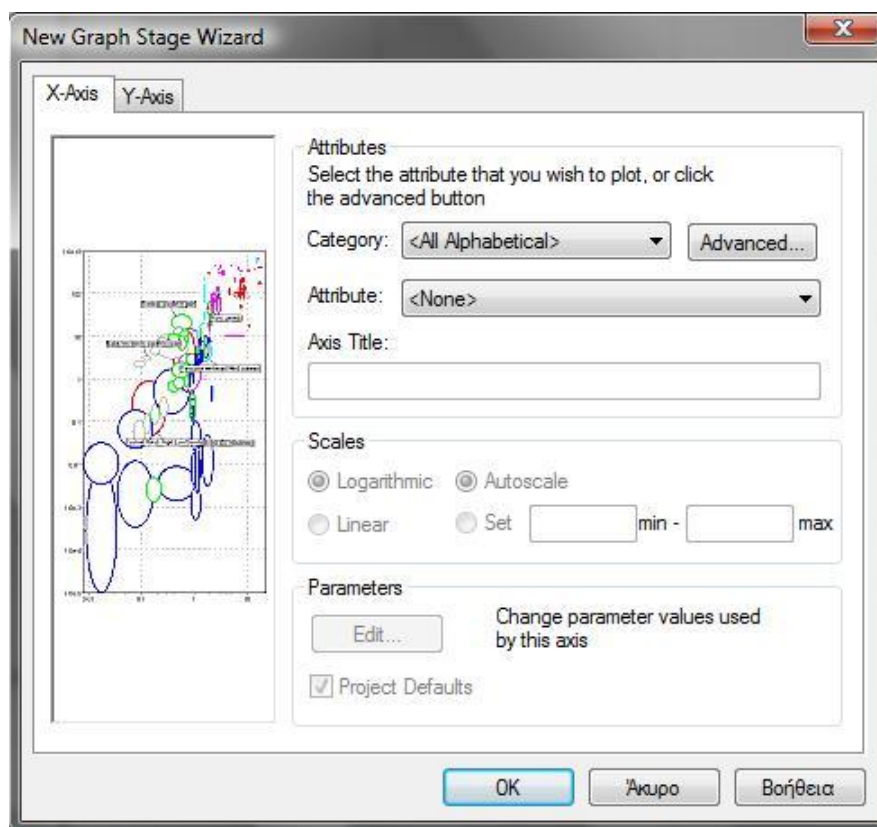
- υπερκράματα με βάση το νικέλιο (*Nickel – based superalloys*)

Ο όλκιμος και ο φαιός χυτοσίδηρος (*Cast iron, ductile (nodular), Cast iron, gray*) δεν θα ληφθούν υπόψη κατά την τελική επιλογή των υλικών, καθώς βρέθηκε σε προηγούμενη παράγραφο ότι είναι τα αρχικά υλικά των οδοντωτών τροχών.

3.5.2 Εισαγωγή κριτηρίων και τελική επιλογή των υλικών

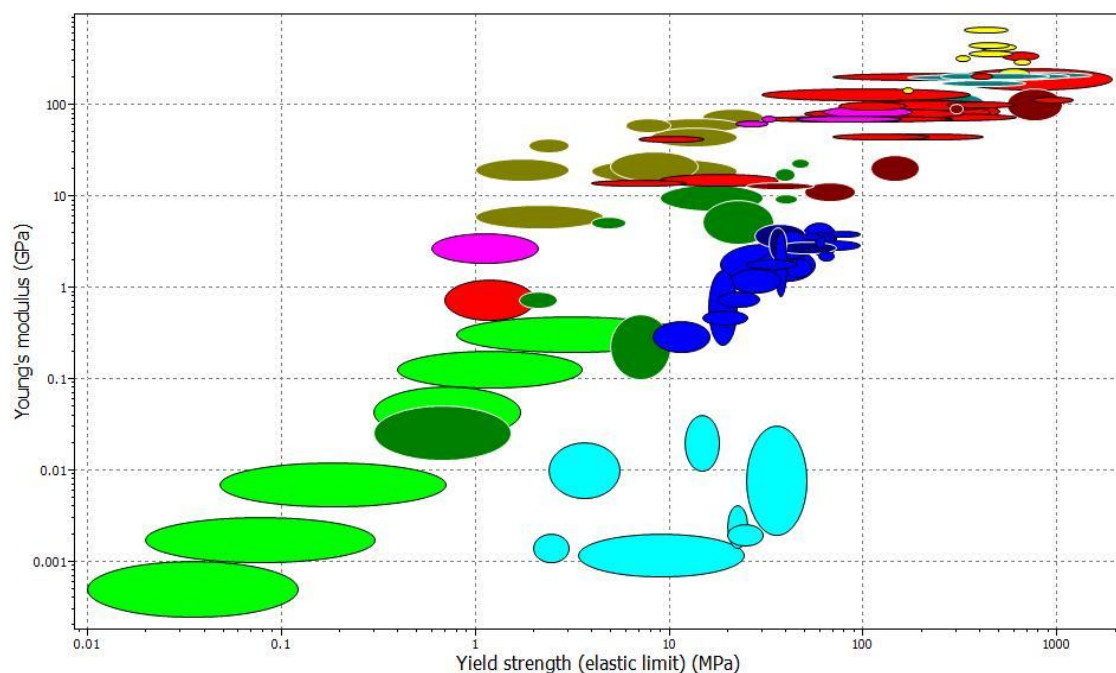
Εφόσον βρέθηκαν τα πιθανά υλικά προς επιλογή που πέρασαν το πρώτο στάδιο των περιορισμών, τώρα πρέπει να δημιουργηθούν κάποια διαγράμματα με τα κριτήρια προς επιλογή που περιγράφηκαν προηγουμένως, ώστε με βάση αυτά να γίνει η τελική επιλογή των υλικών.

Αρχικά θα δημιουργηθεί το διάγραμμα που θα συσχετίζει τον συντελεστή ελαστικότητας των υλικών με την αντοχή τους σε κάμψη (*Young's modulus – Yield strength*). Κάτω από το 2.Selection Stages επιλέγεται το εικονίδιο **Graph**  και εμφανίζεται το παράθυρο δημιουργίας των αξόνων του διαγράμματος (σχήμα 3.27).



Σχήμα 3.27: Παράθυρο δημιουργίας των αξόνων των διαγραμμάτων

Στον άξονα X εισάγεται η αντοχή σε κάμψη, επιλέγοντας πάνω την καρτέλα **X-Axis** και δίπλα στο *Attribute* το **Yield strength (elastic limit)**. Κατόπιν στον άξονα Y εισάγεται ο συντελεστής ελαστικότητας, επιλέγοντας την καρτέλα **Y-Axis** και το **Young's modulus** και για να δημιουργηθεί το διάγραμμα επιλέγεται το **OK**. Το διάγραμμα που προκύπτει (σχήμα 3.28) παρουσιάζει την κατανομή όλων των υλικών της βάσης δεδομένων του λογισμικού, ανάλογα με τις τιμές του συντελεστή ελαστικότητας και της επιτρεπόμενης καμπτικής τους τάσης.



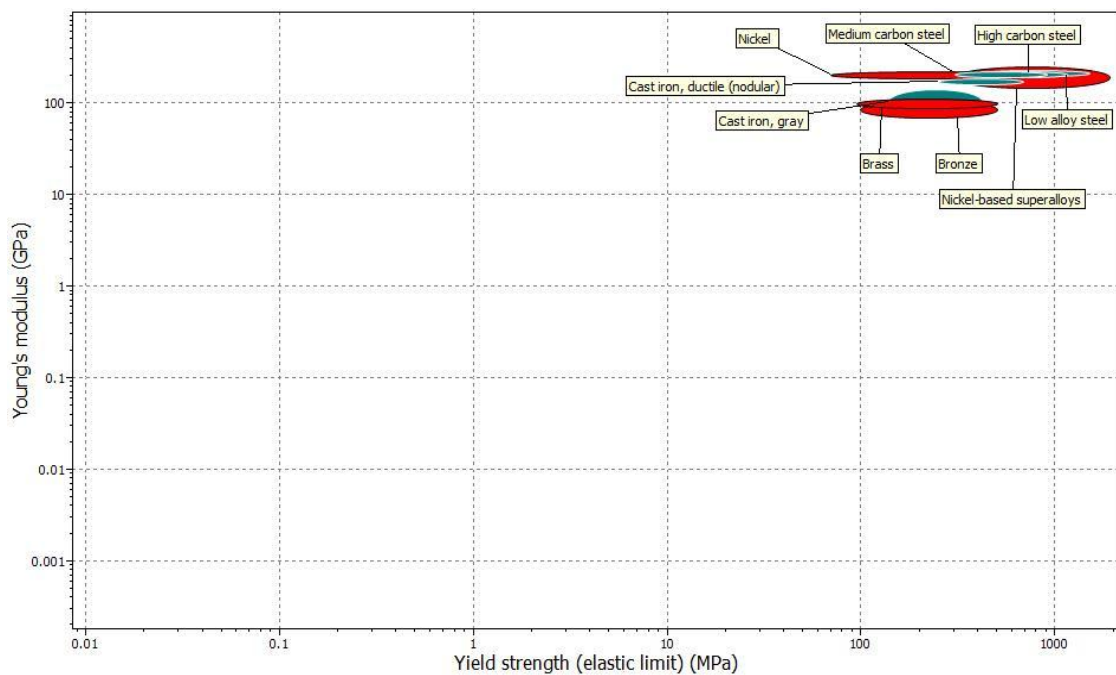
Σχήμα 3.28: Το διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή ελαστικότητας με την αντοχή σε κάμψη (*Young's modulus – Yield strength*) για όλα τα υλικά της βάσης δεδομένων

Για να παρουσιάζονται στο διάγραμμα μόνο τα υλικά που τηρούν τους περιορισμούς του πρώτου σταδίου, επιλέγεται από την εργαλειοθήκη στο πάνω μέρος των διαγραμμάτων το εικονίδιο **Result Intersection**  και κατόπιν το **Hide Failed Records**  δίπλα ακριβώς. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.29.

Όσο πιο πάνω στο διάγραμμα βρίσκεται το υλικό τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ελαστικότητας του, ενώ όσο πιο δεξιά βρίσκεται τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σε κάμψη. Οπότε πρέπει το υλικό που θα επιλεγεί να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πάνω δεξιά γωνία του διαγράμματος.

Εκτός από το διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή και μια ταξινόμηση των υλικών με βάση τα κριτήρια του διαγράμματος (συντελεστή ελαστικότητας και αντοχή σε κάμψη), όπου φαίνεται και η τιμή του κριτηρίου για το κάθε υλικό. Για να γίνει αυτό στα αποτελέσματα 3.Results δίπλα από το *Rank by* επιλέγεται το κριτήριο με το οποίο θα γίνει η ταξινόμηση και από κάτω τα υλικά

εμφανίζονται ταξινομημένα με αύξουσα σειρά ενώ δίπλα από κάθε υλικό φαίνεται και η τιμή του κριτηρίου.



Σχήμα 3.29: Το διάγραμμα συσχετισμού του συντελεστή ελαστικότητας με την αντοχή σε κάμψη για τα υλικά που τηρούν τους περιορισμούς του πρώτου σταδίου

Από το διάγραμμα αλλά και από την ταξινόμηση των υλικών με βάση τον συντελεστή ελαστικότητας (*Young's modulus*) (σχήμα 3.30) και την αντοχή τους σε κάμψη (*Yield strength*) (σχήμα 3.31), παρατηρείται ότι τα ισχυρότερα υλικά είναι ο ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*), ο χάλυβας υψηλού άνθρακα (*High carbon steel*) και ο χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*).

3. Results: 9 of 97 pass

Show:

Rank by:

Name	Young's modu...
Bronze	70 - 105
Cast iron, gray	80 - 138
Brass	90 - 110
Nickel-based superalloys	150 - 245
Cast iron, ductile (nodular)	165 - 180
Nickel	190 - 220
Medium carbon steel	200 - 216
High carbon steel	200 - 215
Low alloy steel	205 - 217

Σχήμα 3.30: Ταξινόμηση των υλικών με βάση τον συντελεστή ελαστικότητας (*Young's modulus*)

3. Results: 9 of 97 pass

Show: **Pass all Stages**

Rank by: **Stage 2: Yield strength (elastic limit) (MPa)**

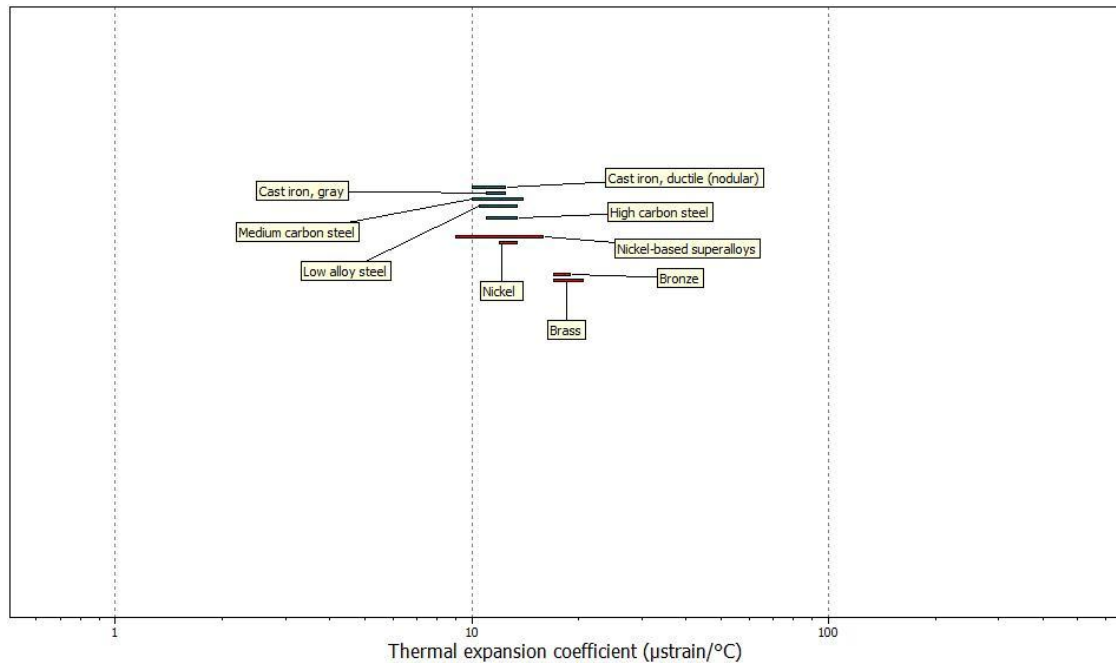
Name	Yield strength...
Nickel	70 - 900
Brass	95 - 500
Bronze	100 - 500
Cast iron, gray	140 - 420
Cast iron, ductile (nodular)	250 - 680
Nickel-based superalloys	300 - 1.9e3
Medium carbon steel	305 - 900
High carbon steel	400 - 1.16e3
Low alloy steel	400 - 1.5e3

Σχήμα 3.31: Ταξινόμηση των υλικών με βάση την αντοχή τους σε κάμψη (*Yield strength*)

Στην συνέχεια με την ίδια διαδικασία θα δημιουργηθούν και τα υπόλοιπα διαγράμματα, συντελεστή θερμικής διαστολής (*Thermal expansion coefficient*), αντοχής κόπωσης στους 10^7 κύκλους (*Fatigue strength at 10^7 cycles*), πυκνότητας (*Density*) και τιμής (*Price*).

Από το διάγραμμα του συντελεστή θερμικής διαστολής (*Thermal expansion coefficient*) (σχήμα 3.32) αλλά και από την ταξινόμηση των υλικών με βάση τον συντελεστή (σχήμα 3.33), παρατηρείται ότι τα υλικά με τον μικρότερο συντελεστή είναι τα υπερκράματα με βάση το νικέλιο (*Nickel – based superalloys*), ο χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*) και ο ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*). Ο όλκιμος χυτοσίδηρος (*Cast iron, ductile (nodular)*) όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως δεν λαμβάνεται υπόψη.

Από το διάγραμμα της αντοχής κόπωσης στους 10^7 κύκλους (*Fatigue strength at 10^7 cycles*) (σχήμα 3.34) αλλά και από την ταξινόμηση των υλικών με βάση την αντοχή τους (σχήμα 3.35), παρατηρείται ότι τα υλικά με την μεγαλύτερη αντοχή είναι ο χάλυβας υψηλού άνθρακα (*High carbon steel*), ο ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*) και ο χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*).



Σχήμα 3.32: Το διάγραμμα συντελεστή θερμικής διαστολής (*Thermal expansion coefficient*)

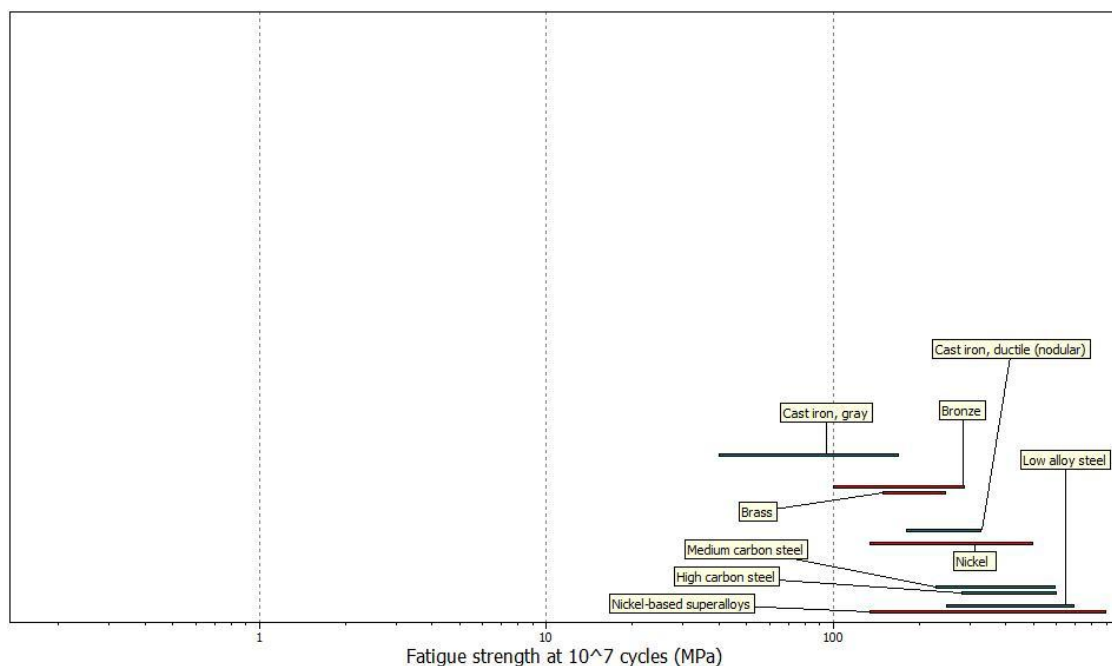
3. Results: 9 of 97 pass

Show: **Pass all Stages**

Rank by: **Stage 3: Thermal expansion coefficient (μstrain/°C)**

Name	Thermal expa...
Nickel-based superalloys	9 - 16
Cast iron, ductile (nodular)	10 - 12.5
Medium carbon steel	10 - 14
Low alloy steel	10.5 - 13.5
High carbon steel	11 - 13.5
Cast iron, gray	11 - 12.5
Nickel	12 - 13.5
Bronze	17 - 19
Brass	17 - 20.7

Σχήμα 3.33: Ταξινόμηση των υλικών με βάση τον συντελεστή θερμικής διαστολής (*Thermal expansion coefficient*)



Σχήμα 3.34: Το διάγραμμα αντοχής κόπωσης στους 10^7 κύκλους (*Fatigue strength at 10^7 cycles*)

3. Results: 9 of 97 pass

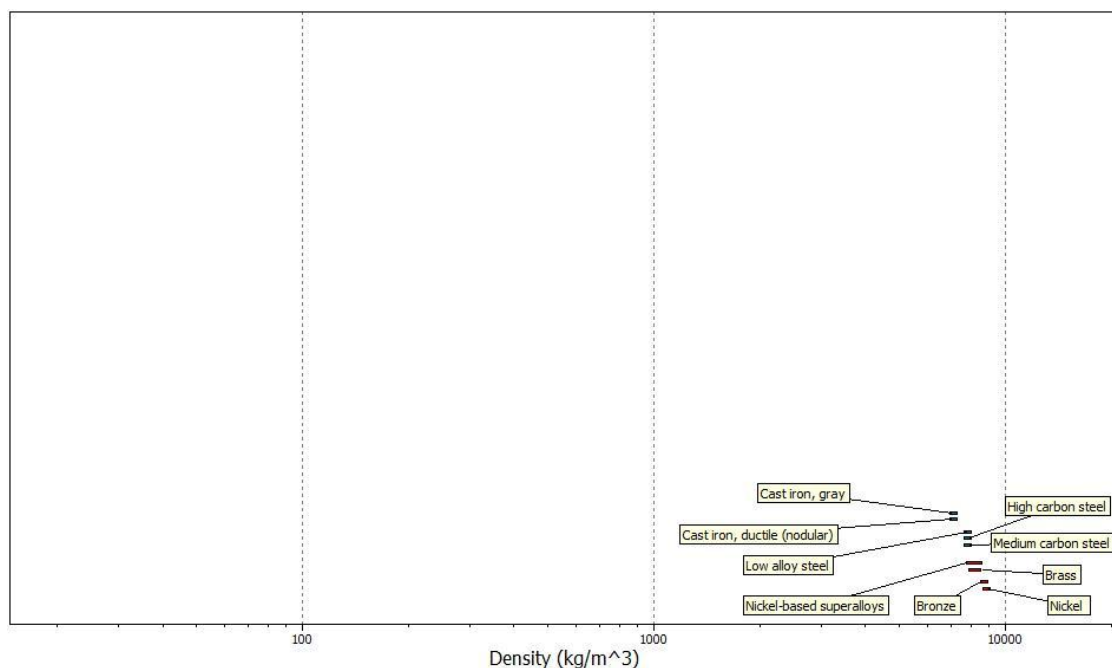
Show: **Pass all Stages**

Rank by: **Stage 4: Fatigue strength at 10^7 cycles (MPa)**

Name	Fatigue stren...
Cast iron, gray	40 - 170
Bronze	100 - 290
Nickel	135 - 500
Nickel-based superalloys	135 - 900
Brass	150 - 250
Cast iron, ductile (nodular)	180 - 330
Medium carbon steel	229 - 600
Low alloy steel	248 - 700
High carbon steel	281 - 606

Σχήμα 3.35: Ταξινόμηση των υλικών με βάση την αντοχή τους σε κόπωση στους 10^7 κύκλους (*Fatigue strength at 10^7 cycles*)

Από το διάγραμμα της πυκνότητας (*Density*) (σχήμα 3.36) αλλά και από την ταξινόμηση των υλικών με βάση την πυκνότητα τους (σχήμα 3.37), παρατηρείται ότι τα υλικά με την μικρότερη πυκνότητα είναι τα υπερκράματα με βάση το νικέλιο (*Nickel – based superalloys*), ο χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*), ο χάλυβας υψηλού άνθρακα (*High carbon steel*) και ο ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*).



Σχήμα 3.36: Το διάγραμμα της πυκνότητας (*Density*)

3. Results: 9 of 97 pass

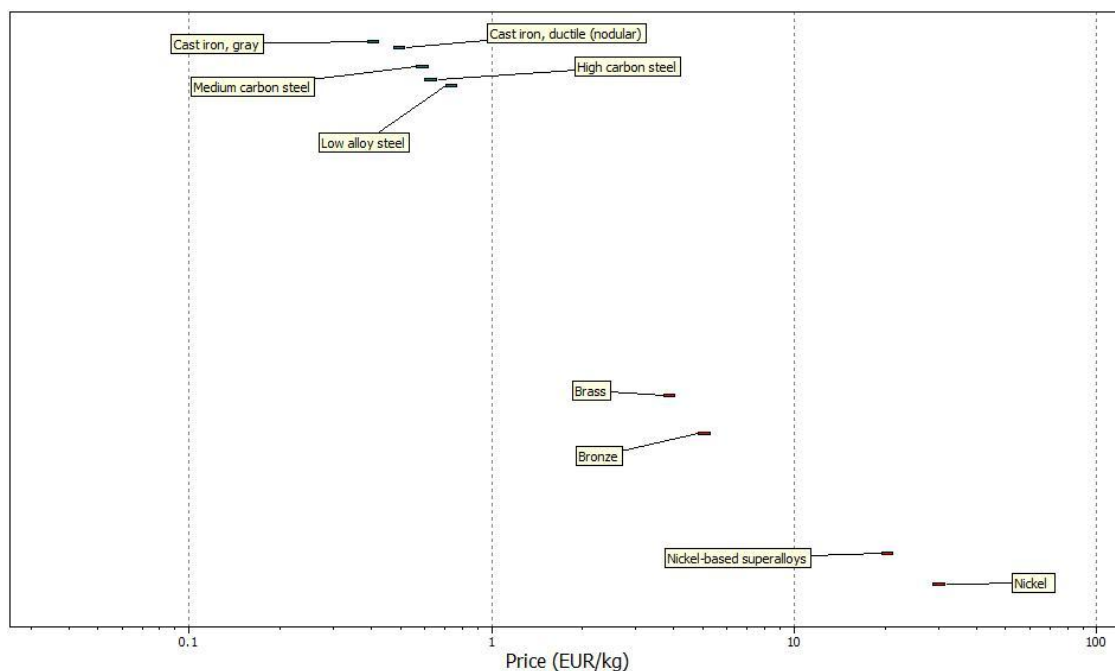
Show: Pass all Stages

Rank by: Stage 5: Density (kg/m³)

Name	Density (kg/m...
Cast iron, gray	7.05e3 - 7.25e3
Cast iron, ductile (nodular)	7.05e3 - 7.25e3
Nickel-based superalloys	7.75e3 - 8.65e3
Medium carbon steel	7.8e3 - 7.9e3
High carbon steel	7.8e3 - 7.9e3
Low alloy steel	7.8e3 - 7.9e3
Brass	7.9e3 - 8.55e3
Bronze	8.5e3 - 9e3
Nickel	8.83e3 - 8.95e3

Σχήμα 3.37: Ταξινόμηση των υλικών με βάση την πυκνότητα τους (*Density*)

Τέλος, από το διάγραμμα της τιμής των υλικών (*Price*) (σχήμα 3.38) αλλά και από την ταξινόμηση των υλικών με βάση την τιμή τους (σχήμα 3.39), παρατηρείται ότι τα υλικά με την μικρότερη τιμή είναι ο χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*), ο χάλυβας υψηλού άνθρακα (*High carbon steel*) και ο ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*).



Σχήμα 3.38: Το διάγραμμα της τιμής (*Price*)

3. Results: 9 of 97 pass

Show: **Pass all Stages**

Rank by: **Stage 6: Price (EUR/kg)**

Name	Price (EUR/kg)
Cast iron, gray	0.388 - 0.427
Cast iron, ductile (nodular)	0.474 - 0.522
Medium carbon steel	0.566 - 0.623
High carbon steel	0.603 - 0.663
Low alloy steel	0.704 - 0.774
Brass	3.7 - 4.07
Bronze	4.83 - 5.31
Nickel-based superalloys	19.4 - 21.4
Nickel	28.9 - 31.7

Σχήμα 3.39: Ταξινόμηση των υλικών με βάση την τιμή τους (*Price*)

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι τα καλύτερα υλικά για την εκ νέου κατασκευή των οδοντωτών τροχών είναι ο χάλυβας μετρίου άνθρακα (*Medium carbon steel*) και ο ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (*Low alloy steel*), καθώς σύμφωνα με όλα τα κριτήρια που τέθηκαν βρίσκονται στις καλύτερες επιλογές.

Βέβαια παρατηρείται ότι μία καλή επιλογή με πολλά πλεονεκτήματα είναι και ο όλκιμος χυτοσίδηρος (*Cast iron, ductile (nodular)*), από τον οποίο είναι ήδη κατασκευασμένος ο ένας οδοντωτός τροχός, αλλά και τα υπερκράματα με βάση το νικέλιο (*Nickel – based superalloys*), τα οποία δεν επιλέγονται διότι έχουν σημαντικό μειονέκτημα την υπερβολικά υψηλή τιμή.

3.5.3 Επιλογή συγκεκριμένων χαλύβων για τους οδοντωτούς τροχούς

Εφόσον ο χάλυβας μετρίου άνθρακα είναι από τις καλύτερες επιλογές για τα υλικά των τροχών θα επιλεγούν για την κατασκευή τους χάλυβες μετρίου άνθρακα γενικών κατασκευών.

Οι χάλυβες μετρίου άνθρακα σύμφωνα με το *CES Edupack 2008* στις πληροφορίες για το υλικό, περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό από 0.3% έως 0.7% κ.β. Οπότε από τον πίνακα 3.8 παρακάτω με όλους τους ανθρακούχους χάλυβες κατασκευών οι χάλυβες μετρίου άνθρακα που μπορούν να επιλεγούν είναι οι St 50-2, St 60-2 και St 70-2 με $C = 0.35\%$, $C = 0.45\%$ και $C = 0.60\%$ αντίστοιχα.

Η επιλογή θα γίνει χονδρικά ελέγχοντας οι επιτρεπόμενες καμπτικές τάσεις τους να είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά τον έλεγχο αντοχής των τροχών σε κάμψη και οι επιτρεπόμενες επιφανειακές τάσεις τους μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά των έλεγχο αντοχής των τροχών σε επιφανειακή πίεση με τα αρχικά τους υλικά (βέβαια με τα νέα υλικά οι προκαλούμενη επιφανειακή τάση θα είναι λίγο διαφορετική). Το υλικό που θα επιλεγεί δεν χρειάζεται να είναι πολύ ισχυρότερο απ' όσο χρειάζεται, καθώς επίσης το υλικό του κινητήριου τροχού πρέπει να είναι ισχυρότερο από του κινούμενου, διότι λόγω μεγαλύτερου αριθμού στροφών (περισσότερες εμπλοκές) καταπονείται περισσότερο. Ίδιο υλικό και για τους δύο τροχούς σε τροχούς χωρίς σκλήρυνση, θα πρέπει κατά το δυνατόν να αποφεύγεται λόγω αυξημένου κινδύνου αστοχίας του κινητήριου. [2]

Με τα παραπάνω κριτήρια επιλέγεται για τον κινητήριο τροχό χάλυβας St 70-2 με αριθμό 1.0070 και για τον κινούμενο St 50-2 με αριθμό 1.0050. Στην συνέχεια θα γίνει έλεγχος επιφανειακής αντοχής των τροχών με τα υλικά που επιλέχτηκαν, για επαλήθευση ότι οι επιλογές των υλικών είναι οι σωστές.

Πίνακας 3.8: Χάλυβες κατασκευών [12][13]

Βαθμός χάλυβα		Ανθρακας C%	Επιτρεπόμενες τάσεις, Mpa		Σκληρότητα
Κωδικός	Αριθμός		Καμπτική	Επιφανειακή	
ST 33	1.0035	0,1	185	490	131 HB
ST 37-2,-3	1.0037/1.0116	0,1	235	420	131 HB
R St 37-2	1.0038	0,15	235	450	146 HB
St 44-2,-3	1.0044/1.0144	0,22	275	510	156 HB
St 52-3	1.0570	0,18	355	620	190 HB
St 50-2	1.0050	0,35	295	600	183 HB
St 60-2	1.0060	0,45	335	700	207 HB
St 70-2	1.0070	0,6	365	850	241 HB

3.6 Έλεγχος αντοχής των οδόντων των τροχών σε επιφανειακή πίεση με τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν

Αφού βρέθηκαν νέα υλικά για τους οδοντωτούς τροχούς, θα ελεγχθεί η αντοχή των οδόντων τους με τα συγκεκριμένα υλικά σε επιφανειακή πίεση, ώστε να γίνει επαλήθευση ότι οι επιλογές των υλικών είναι οι σωστές.

Τα δεδομένα που θα χρειαστούν για να ελεγχθεί η αντοχή των οδόντων σε επιφανειακή πίεση είναι τα εξής:

- $C_p = 192 \sqrt{\text{MPa}}$ ο συντελεστής ελαστικότητας από τον πίνακα 3.9 για πινιόν και κινούμενο τροχό από χάλυβα.

Πίνακας 3.9: Συντελεστής ελαστικότητας C_p , $\sqrt{\text{MPa}}$ [3]

Υλικό του pinion	Μέτρο ελαστικότητας του pinion, E_p (MPa)	Υλικό του κινούμενου οδοντωτού τροχού, E_p , MPa				
		Χάλυβας	Μαλακός σίδηρος	Χυτοσίδηρος	Αλουμίνιο-μπρούντζος	Μπρούντζος-κασσίτερος
		Μέτρο ελαστικότητας του κινούμενου οδοντωτού τροχού, E_p (MPa)				
		210000	170000	150000	120000	110000
Χάλυβας	210000	192	181	175	163	159
Μαλακός σίδηρος	170000	181	172	167	157	153
Χυτοσίδηρος	150000	175	167	162	153	149
Αλουμίνιο-μπρούντζος	120000	163	157	153	145	142
Μπρούντζος-κασσίτερος	110000	159	153	149	142	139

- $F_t \approx 226.63 \text{ N}$
- $b = 13 \text{ mm}$
- $d = 29.75 \text{ mm}$ για τον κινητήριο και $d = 120.75 \text{ mm}$ για τον κινούμενο
- $I \approx 0.102$ (υπολογίστηκε προηγουμένως)
- $K_o = 1.7$
- $K_v \approx 1.57$
- $K_s = 1$
- $K_m \approx 1.1538$
- $C_f = 1$

- $S_{ac} = 850 \text{ MPa}$ για χάλυβα St 70-2 του κινητήριου τροχού και $S_{ac} = 600 \text{ MPa}$ για χάλυβα St 50-2 του κινούμενου
- $Z_N = 1$ (υπολογίστηκε προηγουμένως)
- Εφόσον είναι $1.2 \leq \frac{H_{BP}}{H_{BG}} \leq 1.7$ ο συντελεστής λόγου σκληρότητας για αντίσταση σε φθορά C_H υπολογίζεται από την σχέση $C_H = 1 + A' \cdot (i - 1)$ όπου $A' = 8.98 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{H_{BP}}{H_{BG}} - 8.29 \cdot 10^{-3} = 8.98 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{241}{183} - 8.29 \cdot 10^{-3} \approx 3.54 \cdot 10^{-3}$ και άρα $C_H = 1 + 3.54 \cdot 10^{-3} \cdot (4.06 - 1) \approx 1.01$
- $S_H = 1$
- $K_T = 1$
- $K_R = 1$ (υπολογίστηκε προηγουμένως)

Επομένως η σχέση 3.2 για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό θα γίνει:

$$\sigma_c = 192 \sqrt{\frac{226.63}{13 \cdot 29.75 \cdot 0.102} \cdot 1.7 \cdot 1.57 \cdot 1 \cdot 1.1538 \cdot 1} \leq S_{c, \varepsilon\pi} = \frac{850 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1} \Leftrightarrow 807.58 \leq 850$$

και για τον κινούμενο:

$$\sigma_c = 192 \sqrt{\frac{226.63}{13 \cdot 120.75 \cdot 0.102} \cdot 1.7 \cdot 1.57 \cdot 1 \cdot 1.1538 \cdot 1} \leq S_{c, \varepsilon\pi} = \frac{600 \cdot 1 \cdot 1.01}{1 \cdot 1 \cdot 1} \Leftrightarrow 400.85 \leq 606$$

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ισχύουν οι σχέσεις, οπότε οι οδοντωτοί τροχοί είναι ασφαλείς και άρα έγιναν σωστές επιλογές των υλικών.

3.7 Σύγκριση μεταξύ αρχικών και νέων υλικών των οδοντωτών τροχών

Στην παράγραφο αυτή εφόσον είναι γνωστά τα αρχικά υλικά των οδοντωτών τροχών και βρέθηκαν νέα, θα γίνει μια περιγραφή των υλικών και κατόπιν μια σύγκριση μεταξύ των αρχικών και των νέων.

3.7.1 Χυτοσίδηροι

Οι χυτοσίδηροι είναι κράματα Fe – C – Si, η σύσταση των οποίων σε άνθρακα και πυρίτιο καθώς και οι ταχύτητες απόψυξης, καθορίζουν τη μικροδομή και τις ιδιότητες τους. Οι χυτοσίδηροι του εμπορίου περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 2 –

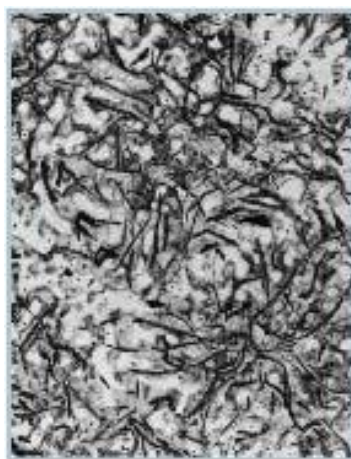
4.5%. Ο άνθρακας στους χυτοσιδήρους έχει πολύ συχνά την μορφή του γραφίτη, του οποίου ο σχηματισμός ευνοείται από την παρουσία πυριτίου σε ποσοστά μεγαλύτερα του 0.7%, καθώς και από χαμηλές ταχύτητες απόψυξης. Οι χυτοσίδηροι κατατάσσονται σε:

- λευκούς
- φαιούς ή γκριζούς
- μαλακτούς
- όλκιμους ή χυτοσιδήρους σφαιροειδούς γραφίτη
- ισχυρά κραματωμένους

Στην συνέχεια θα περιγραφούν οι δύο κατηγορίες χυτοσιδήρων των αρχικών υλικών των τροχών, οι φαιοί και οι όλκιμοι.

3.7.1.1 Φαιός ή γκριζος χυτοσίδηρος

Ο φαιός ή γκριζος χυτοσίδηρος ονομάζονται έτσι, διότι η επιφάνεια του έχει γκριζο χρώμα, λόγω της παρουσίας του γραφίτη. Έχει ψαθυρή συμπεριφορά, εμφανίζει όμως καλύτερη κατεργασιμότητα με εργαλεία κοπής από το λευκό χυτοσίδηρο, χωρίς ωστόσο να καθίστανται δυνατές και οι κατεργασίες διαμόρφωσης του. Η καλύτερη κατεργασιμότητα του οφείλεται στην παρουσία των μαλακών φάσεων του γραφίτη και του περλίτη (σχήμα 3.40).



Σχήμα 3.40: Τυπική μικροδομή φαιού χυτοσιδήρου (x50) [14]

Οι μηχανικές του ιδιότητες είναι κατώτερες από αυτές του χάλυβα. Έχει μικρό όριο θραύσης και χαμηλή αντοχή σε κρούση. Η προσθήκη Cr, Ni και Mo βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες. [4] Βέβαια στην περίπτωση του κινούμενου οδοντωτού τροχού που χρησιμοποιήθηκε, για να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες και να

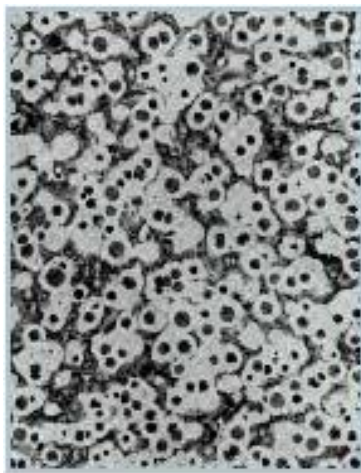
αυξηθεί η αντοχή του, οι οδόντες του τροχού υπέστησαν επιφανειακή σκλήρυνση πιθανόν με θερμική επεξεργασία.

Ωστόσο, παρουσιάζει υψηλή ικανότητα απόσβεσης δονήσεων, υψηλή αντοχή σε φθορά από τριβή, σε θερμική κόπωση και καλή θερμική αγωγιμότητα. Επίσης, σε σχέση με τον χάλυβα έχει μικρότερη πυκνότητα αλλά και χαμηλότερη τιμή. Το σημείο τήξης του είναι χαμηλότερο από του χάλυβα και σε ρευστή κατάσταση παρουσιάζει καλή εύρεια, ενώ κατά την στερεοποίηση παρατηρείται μικρή συστολή λόγω της διόγκωσης του γραφίτη, γεγονός που επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας.

Οι φαιοί χυτοσίδηροι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αγωγών ύδατος, κυλίνδρων και εμβόλων, οδοντωτών τροχών, εδράνων εργαλειομηχανών, κ.λπ.

3.7.1.2 Όλκιμος χυτοσίδηρος ή χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη

Ο όλκιμος χυτοσίδηρος προέρχεται από τον φαιό, εάν πριν τη χύτευση του προστεθεί στο τήγμα 0.1% Mg ή Ce, υπό την μορφή κράματος Mg – Ni ή Mg – Fe – Si. Η μορφολογία του γραφίτη του όλκιμου είναι εντελώς διαφορετική από αυτή του γραφίτη του φαιού χυτοσιδήρου. Πρόκειται για συμπαγή γραφίτη, σφαιροειδούς μορφής, η οποία βελτιώνει την ολκιμότητα και αυξάνει την δυσθραυστότητα του (σχήμα 3.41).



Σχήμα 3.41: Τυπική μικροδομή όλκιμου χυτοσιδήρου (x50) [14]

Ο χυτοσίδηρος αυτός έχει μηχανικές ιδιότητες συγκρίσιμες με εκείνες του χάλυβα. Έχει υψηλή μηχανική αντοχή, καλή δυσθραυστότητα και εμβαιότητα, εξαιρετική κατεργασιμότητα, ενώ η αντοχή του σε τριβή είναι υψηλότερη από του

χάλυβα. [4] Επίσης, όπως και ο φαιός, παρουσιάζει καλή θερμική αγωγιμότητα και σε σχέση με τον χάλυβα έχει μικρότερη πυκνότητα αλλά και χαμηλότερη τιμή.

Οι όλκιμοι χυτοσίδηροι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κυλίνδρων κινητήρων, αγωγών, αντλιών, οδοντωτών τροχών και μηχανικών εξαρτημάτων τα οποία υφίστανται κρούσεις ή εναλλασσόμενες καταπονήσεις.

3.7.2 Χάλυβες

Οι χάλυβες όπως είναι γνωστό, συνιστούν κράματα Fe – C, με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1.5% κ.β. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν ενίοτε σε μικρές ποσότητες και ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Κοινούς οι ανθρακούχους χάλυβες
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες

Οι κραματωμένοι χάλυβες, ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών στοιχείων διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους
- Μέτρια κραματωμένους
- Ισχυρά κραματωμένους

Ως προς τον προορισμό τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες διαμόρφωσης
- Χυτοχάλυβες

Ως προς τις χρήσεις τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες κατασκευών (υποευτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χάλυβες Ni – Cr – Mo, χρωμιούχοι, χρωμιομολυβδαινιούχοι, χρωμιοβαναδιούχοι, μαγγανιοπυριτιούχοι, χάλυβες μαρτενγήρανσης ή maraging, αυτόματοι, διφασικοί φερριτομαρτενσιτικοί dual – phase, κ.λπ.)
- Εργαλειοχάλυβες (χάλυβες αντοχής σε φθορά από τριβή, καλής δυσθραυστότητας, καλής εμβαιπτότητας, αντοχής σε επαναφορά)
- Ανοξείδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (μαλακοί μαγνήτες, μόνιμοι μαγνήτες, μη μαγνητικοί χάλυβες)

3.7.2.1 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες καλούνται τα κράματα Fe – C, τα οποία εκτός από τις συνηθείς ακαθαρσίες (έως 0.04%P και 0.05%S), δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης εκτός από μικρά ποσοστά σε Mn.

Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχομένου άνθρακα, οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Υποευτηκτοειδείς, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο από 0.80% κ.β. Όσοι περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό από 0.16% έως 0.30% κ.β., ονομάζονται *μαλακοί χάλυβες*, από 0.30% έως 0.70% *χάλυβες μετρίου άνθρακα* και τέλος, για ποσοστά μεγαλύτερα από 0.70% ονομάζονται *χάλυβες υψηλού άνθρακα*.
- Ευτηκτοειδείς, που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.80% κ.β.
- Υπερευτηκτοειδείς, με ποσοστό από 0.80 – 2.00% κ.β.

Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, ή μηχανική αντοχή των χαλύβων αυξάνεται, ενώ η ολκιμότητα τους ελαττώνεται. Επίσης, η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά και καθιστά τον χάλυβα δύσκολα συγκολλησιμο. [4]

Όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα διαγράμματα που προέκυψαν από το λογισμικό, οι χάλυβες μετρίου άνθρακα που επιλέχτηκαν για την εκ νέου κατασκευή των οδοντωτών τροχών έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, με υψηλό συντελεστή ελαστικότητας και πολύ υψηλή αντοχή σε κάμψη, επιφανειακή πίεση αλλά και κόπωση, αρκετά υψηλότερες από των χυτοσιδήρων, ειδικά από του φαιού. Όσο αναφορά τις σκληρότητες, του χάλυβα St 70-2 είναι μεγαλύτερη από των χυτοσιδήρων, ενώ του St 50-2 λίγο μικρότερη. Τα μειονεκτήματα των χαλύβων σε σχέση με τους χυτοσιδήρους είναι η μεγαλύτερη πυκνότητα, η υψηλότερη τιμή και ο λίγο μεγαλύτερος συντελεστής θερμικής διαστολής τους, του οποίου η διαφορά είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Η πυκνότητα των χαλύβων μετρίου άνθρακα που επιλέχτηκαν για την εκ νέου κατασκευή των οδοντωτών τροχών είναι σύμφωνα με το CES Edupack 2008 από 7800 kg/m³ έως 7900 kg/m³. Επομένως, επιλέγοντας την μέση τιμή, η πυκνότητα των υλικών των τροχών θα είναι κατά προσέγγιση 7850 kg/m³ και άρα η μάζα τους θα είναι:

$$m_1' = V_1 \cdot d = 7.7814 \cdot 10^{-6} \cdot 7850 \approx 61 \cdot 10^{-3} \text{ kg ή } 61 \text{ g του κινητήριου τροχού και}$$
$$m_2' = V_2 \cdot d = 7.6066 \cdot 10^{-5} \cdot 7850 \approx 597 \cdot 10^{-3} \text{ kg ή } 597 \text{ g του κινούμενου.}$$

Παρατηρείται ότι οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι από ανθρακούχους χάλυβες θα ζυγίζουν περισσότερο από τους αρχικούς από χυτοσίδηρο, με την μάζα του κινητήριου να αυξάνεται κατά 6 g (10.9%), ενώ του κινούμενου κατά 71 g (13.5%).

Στον συγκριτικό πίνακα 3.10 παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των αρχικών και των νέων υλικών των δύο οδοντωτών τροχών, όπου διακρίνονται οι διαφορές τους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι τιμές για τους συντελεστές ελαστικότητας και θερμικής διαστολής, της αντοχής κόπωσης στους 10^7 κύκλους, την τιμή και την πυκνότητα των χαλύβων, είναι οι μέσες τιμές των δεδομένων από το λογισμικό *CES Edupack 2008*.

Πίνακας 3.10: Αρχικά και νέα υλικά οδοντωτών τροχών

ΥΛΙΚΑ	ΑΡΧΙΚΑ		ΝΕΑ	
	ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΙ		ΧΑΛΥΒΕΣ ΜΕΤΡΙΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	
	ΦΑΙΟΣ	ΟΛΚΙΜΟΣ	St 50-2 (1.0050)	St 70-2 (1.0070)
ΣΥΝΤΕΛ. ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ, Gpa	109	172,5	208	
ΕΠΙΤΡΕΠ. ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ, Mpa	92	232	295	365
ΕΠΙΤΡΕΠ. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ, Mpa	599	648	600	850
ΣΥΝΤΕΛ. ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ, $\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$	11,75	11,25	12	
ΑΝΤΟΧΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΤΟΥΣ 10^7 ΚΥΚΛΟΥΣ, Mpa	105	255	414,5	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ, kg/m^3	6915	7068	7850	
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ, HB	203	202	183	241
ΤΙΜΗ, €/kg	0,408	0,498	0,595	

3.8 Σύνοψη - συμπεράσματα

Στο παρών κεφάλαιο, αρχικά βρέθηκαν τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι οδοντωτοί τροχοί μέσω του λογισμικού *CES Edupack 2008*, στο οποίο εισήχθησαν κάποια δεδομένα και περιορισμοί. Κατόπιν μέσω του ίδιου λογισμικού βρέθηκαν νέα υλικά για τους τροχούς και στο τέλος έγινε μια σύγκριση μεταξύ των υλικών.

Κατά την εύρεση των υλικών μέσω του λογισμικού *CES Edupack 2008*, παρατηρήθηκε το πόσο χρήσιμο είναι ένα τέτοιο λογισμικό για την ανάπτυξη ενός προϊόντος σε μια επιχείρηση, αλλά και πόσο διευκολύνει έναν μηχανικό κατά την διαδικασία του μηχανολογικού σχεδιασμού. Στην σημερινή εποχή, με τόσα διαφορετικά υλικά ικανά να καλύψουν οποιαδήποτε σχεδιαστική ανάγκη και εντυπωσιακά πολλές, διαθέσιμες επιλογές του υλικού για την κατασκευή ενός αντικειμένου, το λογισμικό αυτό βοηθάει το μηχανικό να κάνει την βέλτιστη επιλογή, για βέλτιστη ποιότητα του σχεδιαζόμενου προϊόντος.

Κατά την σύγκριση μεταξύ αρχικών και νέων υλικών των οδοντωτών τροχών, παρατηρήθηκε ότι οι ανθρακούχοι χάλυβες που επιλέχθηκαν για την εκ νέου κατασκευή των τροχών, έχουν κάποιες διαφορές σε σχέση με τα αρχικά υλικά, τους χυτοσιδήρους, κυρίως στις μηχανικές ιδιότητες και την πυκνότητα. Οι ανθρακούχοι χάλυβες σαν ισχυρότερα και ποιοτικότερα υλικά με μεγαλύτερη αντοχή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους χυτοσιδήρους, ιδιαίτερα από τον φαιό, πιθανόν να αυξήσουν την διάρκεια ζωής των τροχών. Από την άλλη όμως, έχουν και μεγαλύτερη πυκνότητα και άρα οι νέοι τροχοί θα έχουν μεγαλύτερη μάζα από τους αρχικούς, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγαλύτερες απώλειες ισχύος, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, λόγω αδράνειας. Βέβαια, καθώς τα ποσοστά αύξησης των μαζών δεν είναι μεγάλα ($<15\%$), για την συγκεκριμένη εφαρμογή οι επιπλέον αυτές μάζες μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Έτσι οι χάλυβες, σαν υλικά των οδοντωτών τροχών υπερτερούν των χυτοσιδήρων, έχοντας σαν σημαντικό προτέρημα την υψηλότερη τους αντοχή. Με την ανάλυση κόστους, στην συνέχεια, της κατασκευής των τροχών από τα αρχικά και τα νέα υλικά, θα προκύψουν συμπεράσματα για το αν τελικά είναι και από οικονομική σκοπιά συμφέρουσα, η χρήση αυτών των υλικών.

3.9 Βιβλιογραφία

- [1] Michael F. Ashby, 2005, “Materials Selection in Mechanical Design”, Third edition.
- [2] Ιωάννης Κ. Στεργίου, Κωνσταντίνος Ι. Στεργίου, 2002, «Στοιχεία Μηχανών II: Μετάδοση κίνησης», Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα.
- [3] Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, 2009, «Στοιχεία Μηχανών: Στοιχεία μεταφοράς ισχύος, Τόμος Β», Εκδόσεις Τζιόλα.
- [4] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, 2007, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [5] Michael F. Ashby, Hugh Shercliff & David Cebon, 2007, “Materials, Engineering, Science, Processing and Design”.
- [6] Peter Childs, 2003, “Mechanical Design”, Elsevier Science & Technology.

URLs:

- [7]http://www.springerimages.com/Images/Engineering/1-10.1007_s10999-007-9024-4-1
- [8][http://en.wikipedia.org/wiki/Yield_\(engineering\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering))
- [9]http://www.vrecossis.gr/datafiles/files/Bibliothiki/HARDNESS_ARTICLE.pdf
- [10]<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/5%20THERMIKES%20KATERGASIESw.pdf>
- [11]http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_limit
- [12]http://www.dirostahl.com/dirostahl/useranhaenge/stahlsorten/product_programm_gb_s2.pdf
- [13]<http://www.mesteel.com/info/german.htm>
- [14]http://thdick.co.uk/index.php/process/the_metallurgy_of_cast_iron

Κεφάλαιο 4

Κατασκευή οδοντωτών τροχών και ανάλυση κόστους

Περιεχόμενα

4.1 Εισαγωγή.....	157
4.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών.....	157
4.2.1 Μέθοδοι κοπής οδοντωτών τροχών.....	158
4.2.1.1 Κοπή σε φρέζα με χρήση εργαλείου μορφής (Gear milling).....	158
4.2.1.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (Rack generation).....	158
4.2.1.3 Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (Gear shaper).....	159
4.2.1.4 Κοπή με εργαλείο τύπου Hob (Hobbing).....	160
4.2.1.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching).....	161
4.2.1.6 Χύτευση τροχών υπό πίεση (Die casting).....	161
4.2.1.7 Έλαση – διέλαση οδοντωτών τροχών (Extruding).....	162
4.2.1.8 Κονεομεταλλουργία (Sintering).....	163
4.2.1.9 Εκβολή πλαστικού (Injection molding).....	163
4.2.2 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών.....	164
4.2.2.1 Λείανση (Grinding - Honing).....	164
4.2.2.2 Lapping.....	165
4.2.2.3 Απόξεση (Shaving).....	166
4.3 Περιγραφή της κατασκευής των νέων οδοντωτών τροχών με γραναζοκόπτη τύπου <i>Hob</i>	166
4.4 Ανάλυση κόστους κατασκευής των οδοντωτών τροχών.....	171
4.4.1 Μεθοδολογία εκτίμησης κόστους κατασκευής.....	172
4.4.1.1 Ανάπτυξη του μοντέλου.....	173
4.4.1.2 Βασικό κόστος κατεργασίας (Pc).....	174

4.4.1.3 Συντελεστής σχετικού κόστους (Rc).....	177
4.4.1.3.1 Καταλληλότητα του υλικού για την κατεργασία (Cmp).....	179
4.4.1.3.2 Πολυπλοκότητα σχήματος (Cc).....	179
4.4.1.3.3 Συντελεστής τομής (Cs).....	182
4.4.1.3.4 Συντελεστές ανοχής (Ct) και φινιρίσματος επιφάνειας (Cf).....	183
4.4.1.4 Κόστος υλικού (Mc).....	186
4.4.2 Πραγματικό κόστος κατασκευής.....	187
4.4.2.1 Κόστος κατεργασίας.....	188
4.4.2.1.1 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εργαλειομηχανών.....	188
4.4.2.1.2 Μισθός εργατών.....	189
4.4.2.2 Κόστος υλικού.....	189
4.4.3 Τελικοί συγκριτικοί πίνακες.....	190
4.4.3.1 Κινητήριος οδοντωτός τροχός.....	191
4.4.3.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός.....	192
4.5 Σύνοψη – συμπεράσματα.....	193
4.6 Βιβλιογραφία.....	195

4.1 Εισαγωγή

Κατά την διαδικασία κατασκευής ενός προϊόντος, εφόσον βρεθεί το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί, πρέπει να βρεθεί και η κατάλληλη μέθοδος με την οποία θα κατεργαστεί το υλικό για να πάρει την τελική του μορφή. Η μέθοδος κατασκευής, ή αλλιώς κατεργασίας, που θα επιλεγεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες τεχνικούς αλλά και οικονομικούς. Όσο αναφορά τους τεχνικούς παράγοντες, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι κατάλληλη για την σωστή επεξεργασία του συγκεκριμένου υλικού και την κατασκευή του τελικού προϊόντος ή προϊόντων σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί για την ποιότητα. Πολύ σημαντικός παράγοντας στην επιλογή της κατάλληλης κατεργασίας αποτελεί και η όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής του προϊόντος, το οποίο αποτελείται από το κόστος του υλικού αλλά και το κόστος της κατεργασίας του.

Εφόσον βρέθηκαν νέα υλικά για τους οδοντωτούς τροχούς, κατασκευάστηκαν εκ νέου με τα συγκεκριμένα υλικά. Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά θα παρουσιαστούν οι συνήθεις μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών και κατόπιν θα περιγραφεί η κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών. Στην συνέχεια, θα αναλυθεί το κόστος κατασκευής τους με τα αρχικά και τα νέα υλικά, με δύο διαφορετικές μεθόδους κατασκευής, καθώς και για δύο διαφορετικές ετήσιες παραγόμενες ποσότητες, με ένα συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης του κόστους κατασκευής ενός εξαρτήματος. Τέλος, θα υπολογιστεί το πραγματικό κόστος κατασκευής των νέων τροχών και θα γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των κοστών που θα προκύψουν με το μοντέλο, ώστε να προσδιοριστεί η πιο συμφέρουσα κατασκευή, καθώς και μεταξύ του πραγματικού κόστους και του εκτιμώμενου, για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

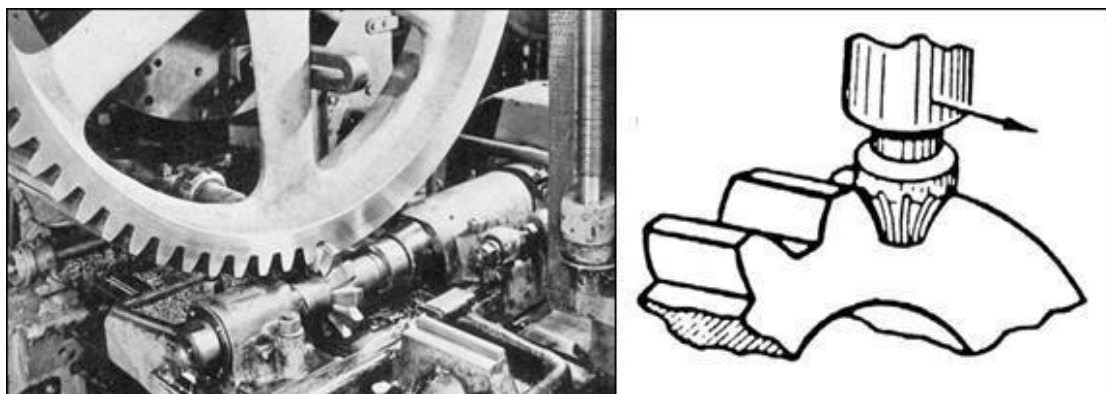
4.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών

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

4.2.1 Μέθοδοι κοπής οδοντωτών τροχών

4.2.1.1 Κοπή σε φρέζα με χρήση εργαλείου μορφής (Gear milling)

Κατά την συγκεκριμένη κοπή είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός κοπτικού εργαλείου το οποίο να είναι ικανό να αφαιρέσει από ένα κύλινδρο το διάκενο ανάμεσα σε δύο οδόντες του τροχού. Καθώς περιστρέφεται και κόβει υλικό από την περιφέρεια του κυλίνδρου, μετακινείται ταυτόχρονα αξονικά σε όλο το πλάτος του. Αφού ένα διάκενο έχει κοπεί, ο τροχός περιστρέφεται στην κατάλληλη θέση και κόβεται το επόμενο διάκενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να έχουν κοπεί όλα τα διάκενα του τροχού. Μια τέτοια κοπή φαίνεται στο σχήμα 4.1 όπως επίσης και οι δύο δυνατές διαμορφώσεις του εργαλείου κοπής.



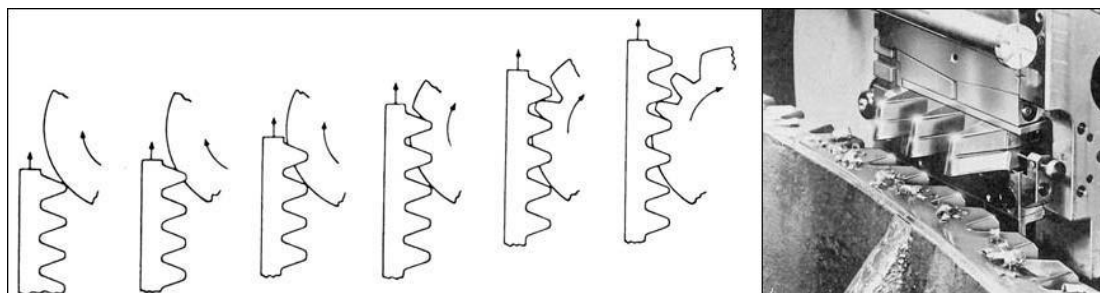
Σχήμα 4.1: Κοπές με εργαλείο μορφής σε φρέζα [1]

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

4.2.1.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (Rack generation)

Το υλικό κατασκευής του οδοντωτού κανόνα είναι βαμμένος χάλυβας και στις ακμές του έχουν δοθεί ιδιότητες κοπτικού εργαλείου. Ο κανόνας παλινδρομεί σε κατεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του τροχού. Μετά από κάθε αφαίρεση υλικού, ο τροχός περιστρέφεται λίγο και συγχρόνως δίνεται στον κανόνα μια ταχύτητα. Το υλικό μεταξύ των οδόντων του τροχού αφαιρείται και παράγονται κατατομές

οδόντων εξειλιγμένης. Επειδή ο κανόνας είναι ένας οδοντωτός τροχός με άπειρη ακτίνα, μπορεί να συνεργασθεί με όλους τους τροχούς μιας οικογένειας τροχών. Μόνο ένας κανόνας απαιτείται για κάθε module ο οποίος κατασκευάζει οδοντωτούς τροχούς οποιουδήποτε αριθμού οδόντων. Η μορφή του οδοντωτού κανόνα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.



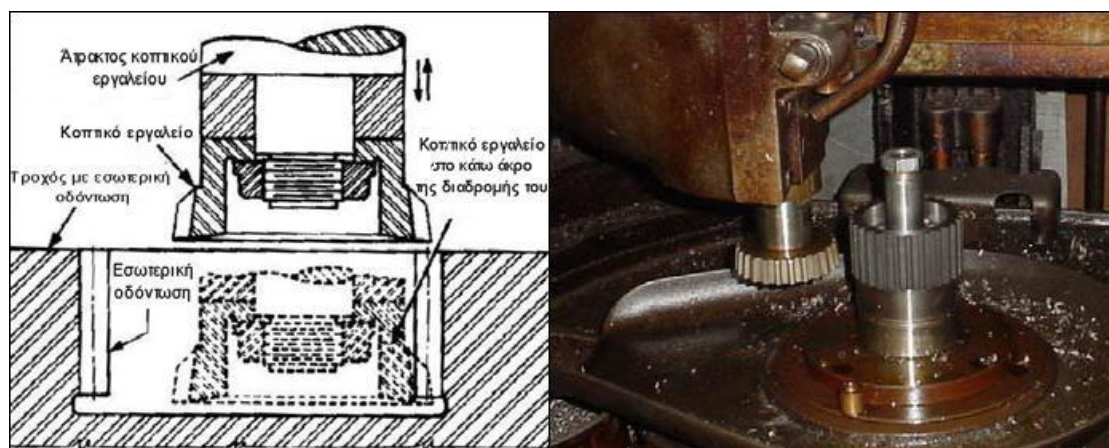
Σχήμα 4.2: Κοπές με οδοντωτό κανόνα [2]

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

4.2.1.3 Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (Gear shaper)

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

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως πρόκειται για μια πραγματική διαδικασία γένεσης αφού δεν απαιτείται επανατοποθέτηση του εργαλείου κατά την διαδικασία κοπής. Επιπλέον η μέθοδος μας επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών οδοντώσεων όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3 αριστερά. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως κάθε διάκενο κόβεται από συγκεκριμένο οδόντα του εργαλείου και επομένως εάν κάποιο από αυτά έχει ελάττωμα, αυτό μεταφέρεται αυτούσιο στην κατατομή του υπό κοπή τροχού.



Σχήμα 4.3: Κοπή εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης με τη μέθοδο Fellows [2]

4.2.1.4 Κοπή με εργαλείο τύπου Hob (Hobbing)

Ο κοπτήρας Hob έχει τη μορφή είτε επάλληλων κανόνων προσδεμένων στην εξωτερική περιφέρεια κυλίνδρου είτε τη μορφή ατέρμονα κοχλία αποτελούμενου από κοπτικούς οδόντες (σχήμα 4.4). Η συγχρονισμένη ταυτόχρονη περιστροφή κοπτήρα και υπό γένεση τροχού αφαιρεί του υλικό του διακένου ανάμεσα στους οδόντες όπως και με τον οδοντωτό κανόνα. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ο κοπτήρας μετατοπίζεται σταδιακά προς τη διεύθυνση του άξονα του τροχού και καθ' όλο το πλάτος του τροχού με αποτέλεσμα την κοπή δοντιών πλήρους πλάτους.

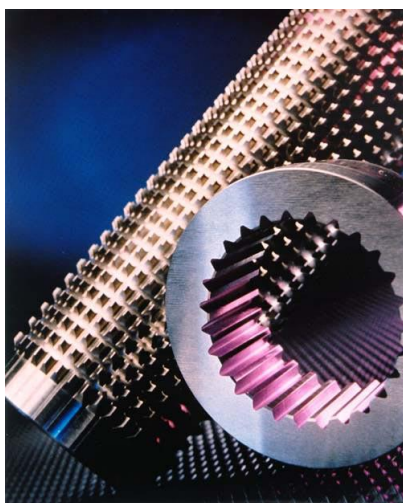
Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται επανατοποθέτηση κοπτικού εργαλείου, όπως γίνεται με τον κανόνα. Επίσης, επειδή κάθε διάκενο οδόντων δημιουργείται από πολλούς οδόντες του Hob, η επίδραση τυχόν υπάρχοντος σφάλματος σε ένα οδόντα του κοπτικού επί της κατατομής των παραγόμενων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



Σχήμα 4.4: Κοπτήρες Hob και διαδικασία κοπής [2]

4.2.1.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching)

Σε αυτή τη μέθοδο ένα ειδικό γλύφανο με κοπτήρες εν σειρά που έχουν το σχήμα του διακένου ανάμεσα στους οδόντες, σύρεται επί της επιφάνειας του υπό δημιουργία τροχού (σχήμα 4.5). Η μέθοδος αυτή συνήθως χρησιμοποιείται στη δημιουργία εσωτερικών οδοντώσεων όπου όλοι οι οδόντες υφίστανται ταυτόχρονη κατεργασία. Επόμενο είναι η συγκεκριμένη μέθοδος να εξασφαλίζει μεγάλη ταχύτητα κατεργασίας και άρα τη δυνατότητα για μαζική παραγωγή.

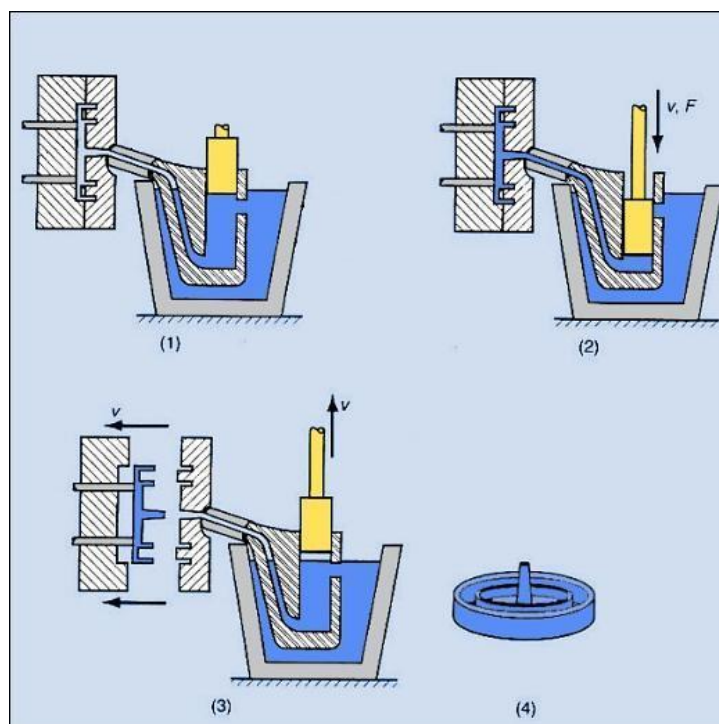


Σχήμα 4.5: Γλύφανο Broaching και κατεργασμένος τροχός [4]

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

4.2.1.6 Χύτευση τροχών υπό πίεση (Die casting)

Οι οδοντωτοί τροχοί χυτεύονται υπό πίεση σε κατάλληλα διαμορφωμένες μήτρες (σχήμα 4.6). Όπως ισχύει για όλες τις χυτεύσεις, οι μεταβολές του οδοντωτού τροχού λόγω συστολών και η ακρίβεια κατασκευής του καλουπιού επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος η οποία προκύπτει σχετικά χαμηλή. Για τη βελτίωση της ποιότητας απαιτούνται διεργασίες αποπεράτωσης όπως αυτές που παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια την αύξηση του κόστους παραγωγής και αποτελεί το λόγο που η μέθοδος προτιμάται για την παραγωγή μεγάλου αριθμού οδοντωτών τροχών σχετικώς χαμηλής ποιότητας.

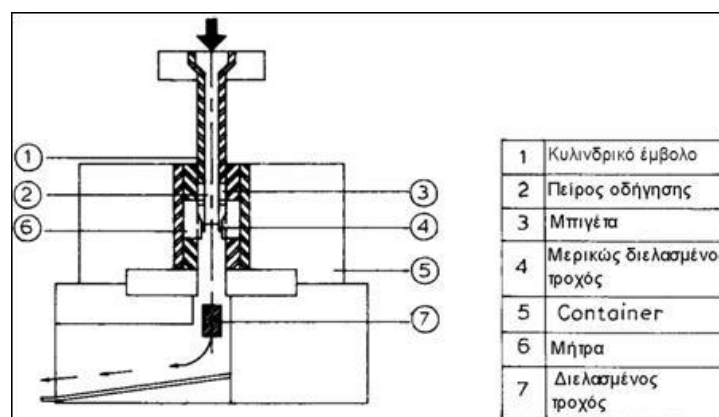


Σχήμα 4.6: Χύτευση υπό πίεση (Die casting) [5]

4.2.1.7 Έλαση – διέλαση οδοντωτών τροχών (Extruding)

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

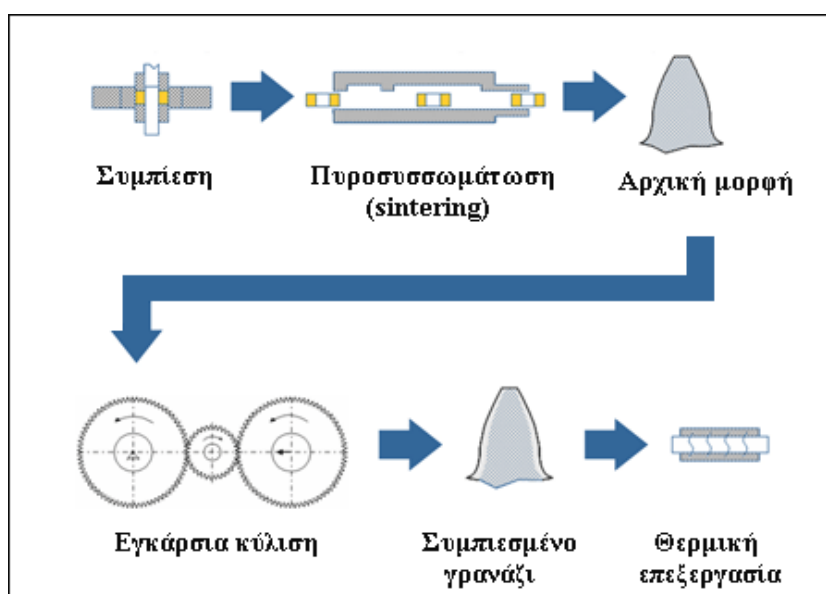
Κατά τη διέλαση το θερμό μέταλλο ωθείται με χρήση πρέσας να διέλθει από την μήτρα η οποία του προσδίδει το σχήμα του οδοντωτού τροχού (σχήμα 4.7). Αυτού του είδους οι τροχοί επιτυγχάνουν μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος ενδείκνυται για την κοπή τροχών με πολύ μικρές διαστάσεις.



Σχήμα 4.7: Διέλαση οδοντωτών τροχών [2]

4.2.1.8 Κονεομεταλλουργία (Sintering)

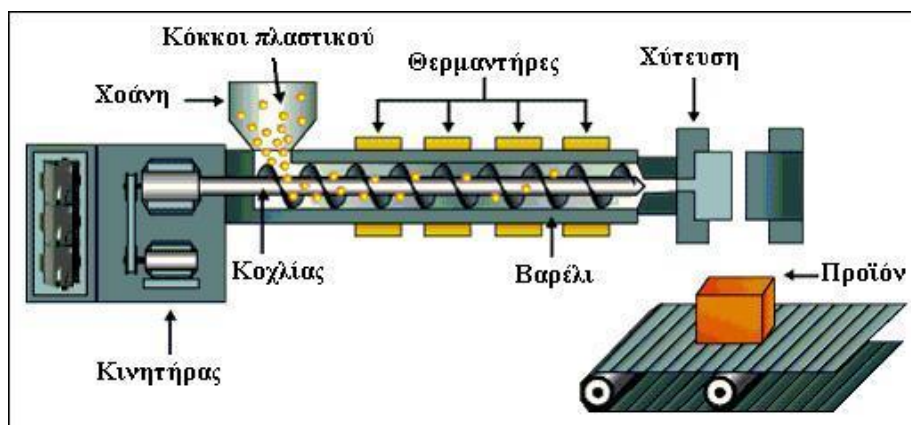
Σε αυτή την περίπτωση μεταλλική πούδρα τοποθετείται σε κατάλληλο καλούπι που έχει το σχήμα του οδοντωτού τροχού και συμπιέζεται από πρέσα. Κατόπιν, το πεπιεσμένο τεμάχιο οδηγείται σε κλίβανο όπου θερμαινόμενο αποκτά την επιθυμητή αντοχή. Στην συνέχεια μπορεί να ακολουθήσει επιπλέον επεξεργασία για την βελτίωση της ακρίβειας των διαστάσεων και την τραχύτητα της επιφάνειας, ή για την επιφανειακή σκλήρυνση των οδόντων με κάποια θερμική επεξεργασία (σχήμα 4.8). Η ακρίβεια της κατασκευής είναι καλή αλλά το υψηλό κόστος των εγκατεστημένων μηχανών δεν επιτρέπει παραγωγή μικρής κλίμακας.



Σχήμα 4.8: Κατασκευή οδοντωτού τροχού με κονεομεταλλουργία [6]

4.2.1.9 Εκβολή πλαστικού (Injection molding)

Θερμό πλαστικό εγχύεται υπό πίεση σε καλούπια κατασκευασμένα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση συστολής – διαστολής του υλικού (σχήμα 4.9). Επειδή τα πλαστικά έχουν πολύ μεγαλύτερο θερμικό συντελεστή από του χάλυβα, είναι προφανές πως πρέπει να έχουν προβλεφθεί μεγάλες χάρες κατατομών για την ομαλή συνεργασία των τροχών τόσο στη μέγιστη όσο και την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας. [2] Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ποιοτική αποδιδόμενη επιφάνεια που δεν χρειάζεται διαδικασία αποπεράτωσης.



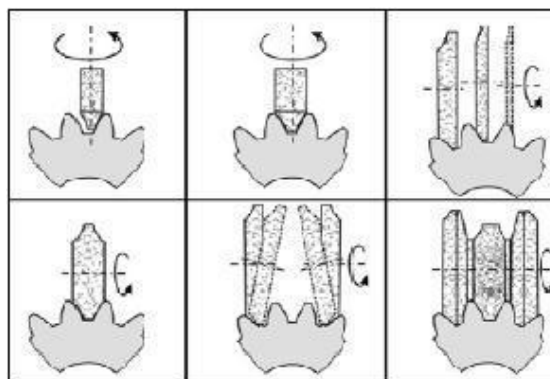
Σχήμα 4.9: Εκβολή πλαστικού [7]

4.2.2 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών

4.2.2.1 Λείανση (Grinding - Honing)

Η λείανση είναι διαδικασία που προσομοιάζει την κλασσική συνώνυμη κατεργασία με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί ειδικά εργαλεία που προορίζονται για την κατεργασία οδοντωτών τροχών (σχήμα 4.10). Η διαδικασία του grinding εκτελείται μετά τη σκλήρυνση του τροχού με χρήση ειδικών λειαντικών τροχών οι οποίοι περιστρέφονται εντός του διακένου των οδόντων λειαινώντας τις κατατομές. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ο άξονας περιστροφής του λειαντικού τροχού εκτελεί και μια επαναλαμβανόμενη γωνιακή κίνηση πάνω σε επίπεδο παράλληλο προς τον άξονα του τεμαχίου. Οι δίσκοι αποτελούνται από λειαντικούς κόκκους και συνδετικό υλικό. Συχνά έχουν τη μορφή οδοντωτού τροχού ή ατέρμονα κοχλία οπότε έχουμε και συνεργασία εργαλείου τεμαχίου και μιλάμε για συνεχή λείανση. Στην περίπτωση των απλών δίσκων η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε τμήμα της κατατομής και θεωρείται ασυνεχής. Η ανοχή για περαιτέρω κατεργασία που απομένει είναι της τάξης των 10-15 μm . [3]

Επόμενο στάδιο της παραπάνω κατεργασίας και υπεύθυνο για την απόδοση ακόμη καλύτερων επιφανειών είναι το honing (σχήμα 4.11) το οποίο γίνεται αποκλειστικά με συνεργαζόμενους τροχούς και με τον ίδιο τρόπο με μόνη διαφορά την κατεύθυνση της κατεργασίας η οποία είναι διαφορετική.



Σχήμα 4.10: Εργαλεία λείανσης [3]



Σχήμα 4.11: Λείανση με την μέθοδο honing [8]

4.2.2.2 Lapping

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

4.2.2.3 Απόξεση (Shaving)

Είναι η διαδικασία αφαίρεσης τριχοειδών υπολειμμάτων μετάλλου από τις επιφάνειες της κατατομής και λαμβάνει χώρα πριν τη σκλήρυνση του τροχού. Το κοπτικό εργαλείο (σχήμα 4.12) έχει τη μορφή οδοντωτού τροχού οι κατατομές του οποίου διαθέτουν εγκοπές που λειτουργούν σαν αιχμές κοπτικού εργαλείου και οι οποίες ουσιαστικά “ξύνουν” την επιφάνεια των κατατομών. [3]



Σχήμα 4.12: Εργαλείο shaving [9]

4.3 Περιγραφή της κατασκευής των νέων οδοντωτών τροχών με γραναζοκόπτη τύπου Hob

Για να κατασκευαστούν οι οδοντωτοί τροχοί, αρχικά κόπηκαν με πριονοκορδέλα κατά προσέγγιση οι αρχικοί κύλινδροι από κυλινδρικές μπάρες των συγκεκριμένων χαλύβων που επιλέχτηκαν (σχήματα 4.13, 4.14), οι οποίοι στην συνέχεια θα κατεργαστούν για να πάρουν τις τελικές μορφές των τροχών.

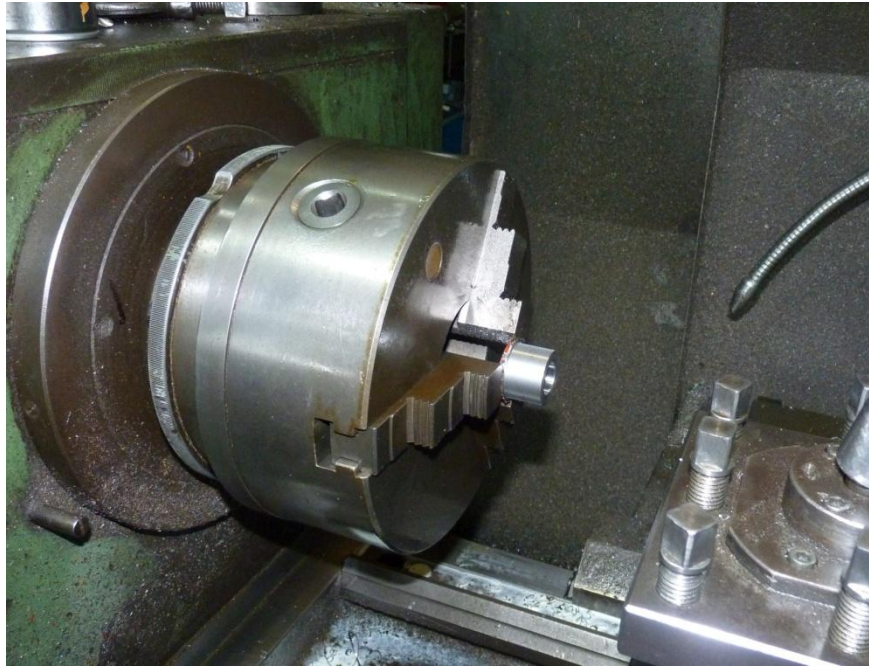


Σχήμα 4.13: Κοπή αρχικών κυλίνδρων με πριονοκορδέλα



Σχήμα 4.14: Αρχικοί κύλινδροι

Στην συνέχεια οι κύλινδροι πήραν τις τελικές τους διαστάσεις, ανοίχτηκαν οι κεντρικές οπές και δημιουργήθηκαν όλα τα χαρακτηριστικά των τροχών με χειροκίνητη τόννευση (σχήματα 4.15, 4.16).



Σχήμα 4.15: Τόρνευση κινητήριου οδοντωτού τροχού



Σχήμα 4.16: Τόρνευση κινούμενου οδοντωτού τροχού

Αφού ολοκληρώθηκε η τόρνευση των κυλίνδρων, το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία των οδόντων με γραναζοκόπη τύπου Hob. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυτή, καθώς ήταν η μόνη που διέθετε το συγκεκριμένο μηχανουργείο. Για να τοποθετηθούν όμως οι κύλινδροι πάνω στον γραναζοκόπη περάστηκαν πρώτα πάνω σε άξονες (σχήμα 4.17). Για να ταιριάξει ακριβώς ο κύλινδρος του κινητήριου τροχού πάνω στον άξονα, χρειάστηκε ο άξονας να τονρευτεί ώστε να μειωθεί η διάμετρος

του, καθώς δεν βρέθηκε άξονας με διάμετρο όσο της οπής του, όπως με τον κύλινδρο του κινούμενου τροχού.

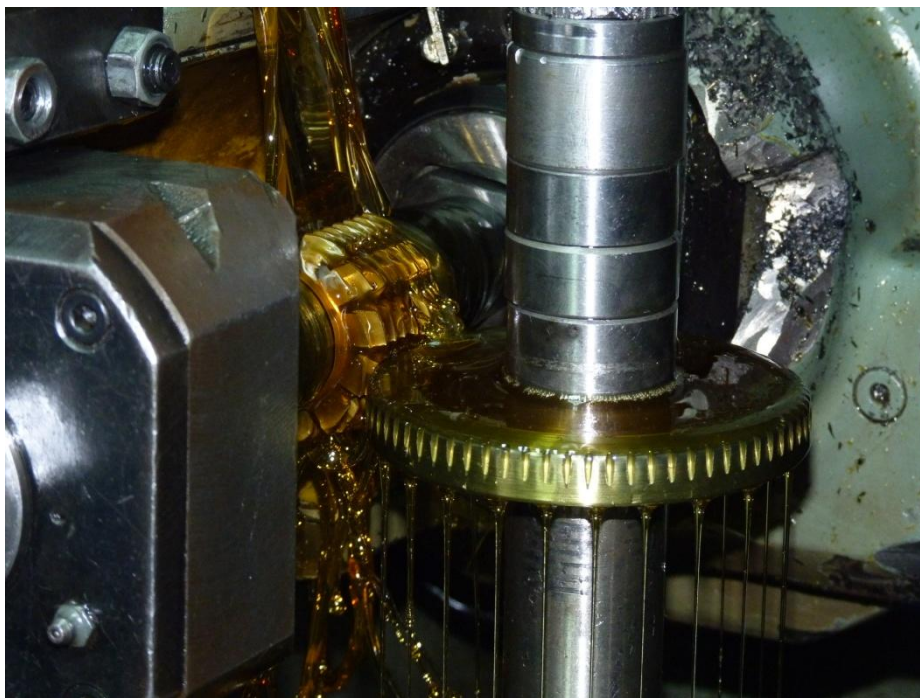


Σχήμα 4.17: Οι κύλινδροι περασμένοι σε άξονες για να τοποθετηθούν στον γραναζοκόπτη

Κατόπιν, οι κύλινδροι μαζί με τους άξονες τους τοποθετήθηκαν πάνω στον γραναζοκόπτη τύπου Hob και κόπηκαν οι οδόντες τους (σχήματα 4.18, 4.19).

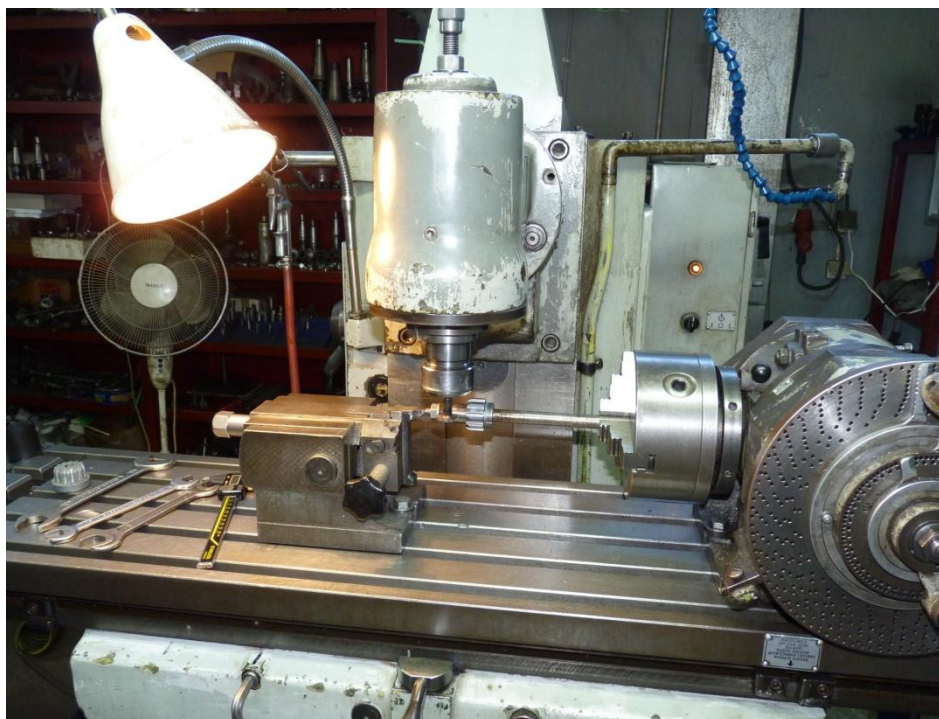


Σχήμα 4.18: Κοπή οδόντων κινητήριου τροχού με γραναζοκόπτη τύπου Hob



Σχήμα 4.19: Κοπή οδόντων κινούμενου τροχού με γραναζοκόπη τύπου Hob

Μετά την κοπή των οδόντων η κατασκευή του κινητήριου τροχού ολοκληρώθηκε. Για την ολοκλήρωση του κινούμενου χρειάστηκε να δημιουργηθούν οι περιμετρικές οπές στο σώμα του τροχού με την χρήση φρέζας (σχήμα 4.20). Οι τελικοί οδοντωτοί τροχοί παρουσιάζονται στα σχήματα 4.21, 4.22.



Σχήμα 4.20: Φρέζα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των οπών του κινούμενου τροχού



Σχήμα 4.21: Τελικός κινητήριος τροχός



Σχήμα 4.22: Τελικός κινούμενος τροχός

4.4 Ανάλυση κόστους κατασκευής των οδοντωτών τροχών

Για οικονομικό έλεγχο και επιτυχημένο μάρκετινγκ είναι αναγκαίο να υπάρχουν στόχοι κόστους σε ολόκληρη την διαδικασία εισαγωγής ενός νέου προϊόντος. Το κόστος του προϊόντος είναι σχεδόν πάντα ένα κύριο στοιχείο στην

λήψη αποφάσεων στην κατασκευαστική βιομηχανία. Το κύριο πρόβλημα στην εισαγωγή ενός προϊόντος, είναι η παροχή αξιόπιστων πληροφοριών κόστους στα πρώιμα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, για την σύγκριση εναλλακτικών σχεδίων και τον καθορισμό των διαφόρων τρόπων με τους οποίους ένα προϊόν μπορεί να κατασκευαστεί.

Η εκτίμηση του κόστους είναι αναγκαία για να καθορίσει την βιωσιμότητα των νέων προϊόντων και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος τους. Οι παλαιές πρακτικές αποτίμησης κόστους που χρησιμοποιούσαν διάφορες εταιρίες όμως, φάνηκαν να είναι ελλιπείς. Επίσης, ένα σημαντικό στοιχείο που εκδηλώθηκε από πολλούς εργάτες, είναι η κρισιμότητα της απόρριψης αντισυμβατικών σχεδίων νωρίς, καθώς είναι συνήθως απίθανο να μειωθούν τα παραγωγικά κόστη εφόσον η παραγωγή έχει ξεκινήσει, κυρίως εξαιτίας του υψηλού κόστους αλλαγής του κύκλου ζωής του προϊόντος σε αυτό το στάδιο.

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει ανάλυση του κόστους κατασκευής των οδοντωτών τροχών με τα αρχικά και τα νέα υλικά, με δύο διαφορετικές μεθόδους κατασκευής, καθώς και για δύο διαφορετικές ετήσιες παραγόμενες ποσότητες, με ένα συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης του κόστους κατασκευής ενός εξαρτήματος, που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Στην συνέχεια θα υπολογιστεί το πραγματικό κόστος κατασκευής των νέων τροχών και θα γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των κατασκευαστικών κοστών που θα προκύψουν με το μοντέλο, ώστε να προσδιοριστεί η πιο συμφέρουσα κατασκευή, καθώς και μία σύγκριση του πραγματικού κόστους, με το εκτιμώμενο, για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

4.4.1 Μεθοδολογία εκτίμησης κόστους της κατασκευής

Για να παραχθεί ένα πρακτικό και ευρέως εφαρμόσιμο εργαλείο για σχεδιαστές, ικανό να παρέχει ανατροφοδότηση στις τεχνολογικές και οικονομικές συνέπειες των αποφάσεων για τον σχεδιασμό ενός εξαρτήματος, θεωρήθηκε χρήσιμο να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που θα είναι ευρέως εφαρμόσιμο με έναν αριθμό διαφορετικών κατασκευαστικών κατεργασιών. Επίσης, το μοντέλο σχεδιάστηκε έτσι ώστε κατάλληλες κατασκευαστικές κατεργασίες και απαιτήσεις εξοπλισμού να μπορούν να προσδιοριστούν νωρίς στην διαδικασία εισαγωγής ενός προϊόντος. Αναγνωρίζοντας το πρόβλημα, ότι η σχέση μεταξύ ενός σχεδίου, τις κατασκευαστικής του επιτευξιμότητας και του κόστους, δεν είναι εύκολο να διατυπωθεί επιστημονικά με ακρίβεια, το μοντέλο έχει προκύψει από τη δουλειά μηχανικών σε εταιρίες που χρησιμοποιούν τέτοια μοντέλα και σε εκείνες που ειδικεύονται σε συγκεκριμένες κατασκευαστικές τεχνικές.

4.4.1.1 Ανάπτυξη του μοντέλου

Το μοντέλο βασίζεται στον όγκο του υλικού και σε παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασία του. Το κόστος κατεργασίας καθορίζεται χρησιμοποιώντας ένα βασικό κόστος κατεργασίας (το κόστος παραγωγής ενός ιδανικού σχεδίου για αυτή την κατεργασία) και συντελεστές κόστους εξαρτώμενους από το σχέδιο (οι οποίοι καθιστούν δυνατή την σύγκριση οποιουδήποτε σχεδίου του εξαρτήματος με το ιδανικό). Τα κόστη των υλικών υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τον μετασχηματισμό του υλικού για την δημιουργία της τελικής του μορφής.

Έτσι ένα μοντέλο για τα κατασκευαστικά κόστη για μία κατεργασία, M_i , μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$M_i = V \cdot C_{mt} + R_c \cdot P_c \quad (4.1)$$

όπου V είναι ο όγκος του υλικού που απαιτείται για να παραχθεί το εξάρτημα, C_{mt} το κόστος του υλικού ανά μονάδα όγκου στην απαιτούμενη μορφή, P_c το βασικό κόστος κατεργασίας για ένα ιδανικό σχέδιο εξαρτήματος με μία συγκεκριμένη κατεργασία και R_c είναι ο συντελεστής σχετικού κόστους που αντιστοιχεί σε ένα σχέδιο εξαρτήματος (λαμβάνει υπόψη την πολυπλοκότητα του σχήματος, την καταλληλότητα του υλικού για κατεργασία, διαστάσεις τομής, ανοχές και το φινίρισμα της επιφάνειας).

Η αρχική υπόθεση μπορεί να επεκταθεί για να επιτρέψει και δευτερεύουσα κατεργασία και έτσι το μοντέλο μπορεί να πάρει την γενική μορφή:

$$M_i = V \cdot C_{mt} + (R_{c1} \cdot P_{c1} + R_{c2} \cdot P_{c2} + \dots + R_{cn} \cdot P_{cn})$$

$$M_i = V \cdot C_{mt} + \sum_{i=1}^n (R_{ci} \cdot P_{ci}) \quad (4.2)$$

όπου n είναι ο αριθμός των διεργασιών που απαιτούνται για να επιτευχθεί το τελικό εξάρτημα.

Για να χρησιμοποιηθεί στην πράξη μια τέτοια διατύπωση είναι αναγκαίο να καθοριστούν οι σχέσεις που καθιστούν δυνατό τον προσδιορισμό των ποσοτήτων P_c και R_c για συνδυασμούς διαδικασιών σχεδιασμού. Στην πράξη, έχει βρεθεί ότι η σχέση (4.1) είναι η μορφή που προτιμάται από την βιομηχανία. Αυτό βασίζεται στην ανάγκη να δουλέψει στα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, με ελλιπή δεδομένα για το εξάρτημα και χωρίς να χρειάζεται με λεπτομέρεια η αλληλουχία των κατασκευαστικών διεργασιών. Η μεθοδολογία έχει συμπεριλάβει τις απαιτήσεις για δευτερεύουσες κατεργασίες στον συντελεστή σχετικού κόστους. Περισσότερα γι' αυτό θα αναφερθούν στην παράγραφο 4.4.1.3.

4.4.1.2 Βασικό κόστος κατεργασίας (P_c)

Για την εκτίμηση του βασικού κόστους κατεργασίας ενός ιδανικού σχεδίου για μία συγκεκριμένη κατεργασία, είναι αρχικά αναγκαίο να καθοριστούν οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν:

- Κόστη εξοπλισμού συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης
- Λειτουργικά κόστη (εργατικό δυναμικό, αριθμός βαρδιών που δούλεψαν, επιτήρηση, γενικά έξοδα, κ.λπ.)
- Χρόνους κατεργασίας
- Κόστη εργαλείων
- Απαίτηση για το εξάρτημα

Οι παραπάνω μεταβλητές λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του P_c χρησιμοποιώντας την απλή εξίσωση:

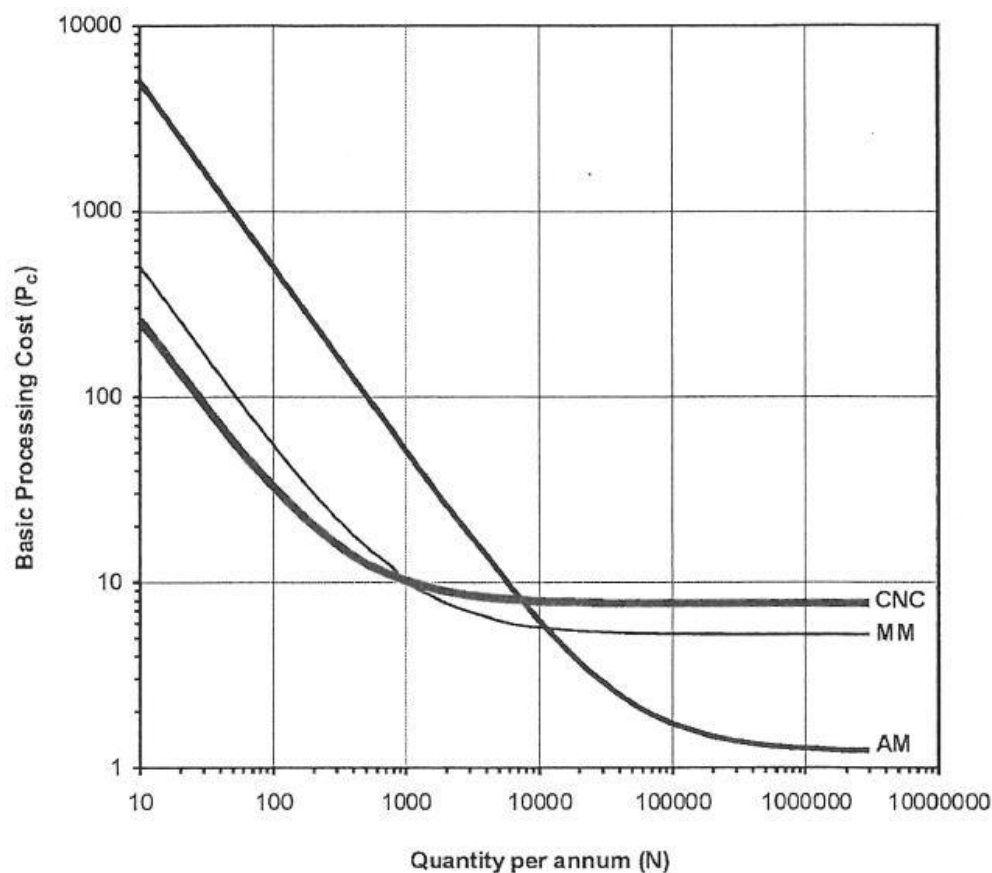
$$P_c = \alpha \cdot T + \beta / N \quad (4.3)$$

όπου α είναι το κόστος προετοιμασίας και λειτουργίας μιας συγκεκριμένης κατεργασίας, συμπεριλαμβανομένων της εγκατάστασης, του εργατικού δυναμικού, της επιτήρησης και των γενικών εξόδων, ανά δευτερόλεπτο, β το συνολικό κόστος των εργαλείων της συγκεκριμένης κατεργασίας για ένα ιδανικό σχέδιο, T ο χρόνος κατεργασίας ενός ιδανικού σχεδίου του εξαρτήματος σε δευτερόλεπτα με την συγκεκριμένη κατεργασία και N η συνολική ποσότητα που θα παραχθεί ετησίως.

Οι τιμές για το α και β βασίζονται στην εμπειρία εταιριών που ειδικεύονται στην παραγωγή εξαρτημάτων σε συγκεκριμένες τεχνολογικές περιοχές. Χρησιμοποιώντας αυτές τις συγκεκριμένες τιμές κατεργασιών στην σχέση (4.3), είναι εφικτό να παραχθούν καμπύλες σχετικού κόστους για οποιαδήποτε κατεργασία.

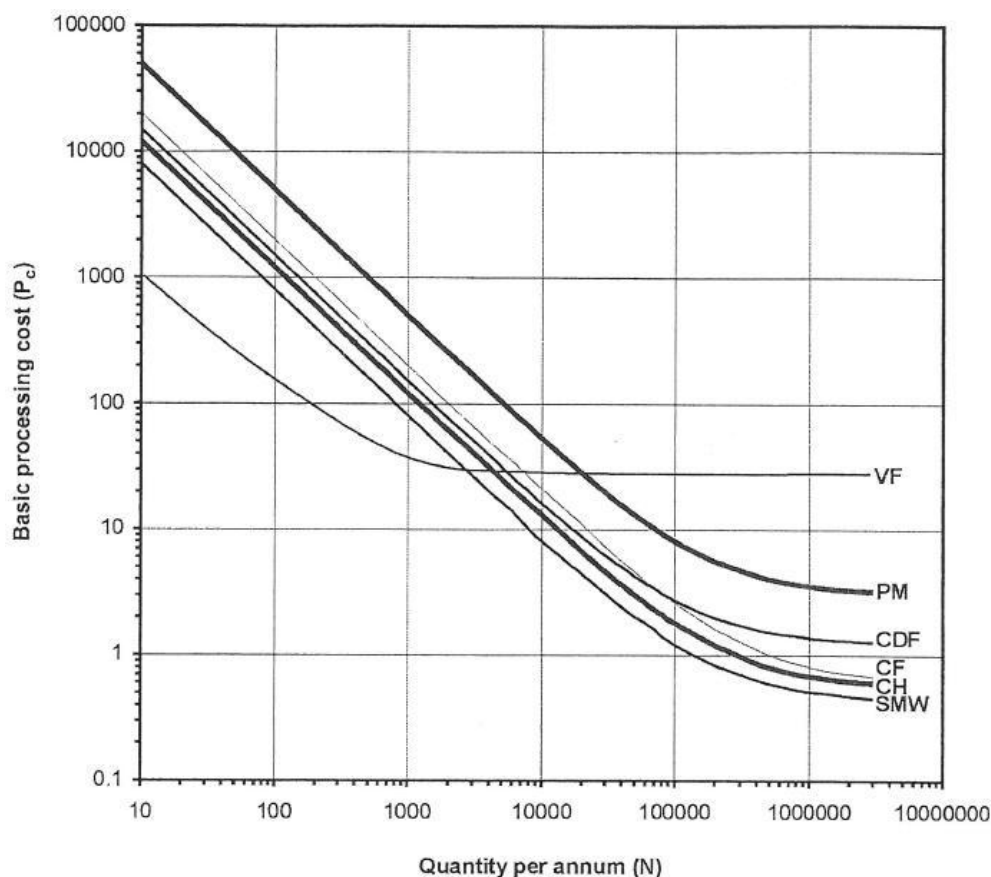
Δεδομένα για το P_c σε σχέση με την ετήσια παραγόμενη ποσότητα, N , παρουσιάζονται στα σχήματα 4.23 για μηχανικές κατεργασίες και 4.24 για κατεργασίες διαμόρφωσης. Τα ποσά είναι σε πένες στερλίνας (£) για το έτος 2002. Από το 2002 μέχρι σήμερα ο συνολικός πληθωρισμός στην Μεγάλη Βρετανία είναι 30% [10] και θεωρώντας μια γενική αύξηση των τιμών κατά 10%, για να ανταποκρίνονται τα ποσά των διαγραμμάτων στο έτος 2012 θα αυξηθούν κατά 40%.

Οι δύο κατεργασίες που θα χρησιμοποιηθούν είναι η *χειροκίνητη μηχανική κατεργασία*, για τις χειροκίνητες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών και στο σχήμα 4.23 είναι η καμπύλη MM (Manual Machining) και η *κονεομεταλλουργία*, σαν μια άλλη συνήθης μέθοδο κατασκευής οδοντωτών τροχών ακριβείας, που στο σχήμα 4.24 είναι η καμπύλη PM (Powder Metallurgy).



Σχήμα 4.23: Βασικό κόστος κατεργασίας (P_c) σε σχέση με την ετήσια παραγόμενη ποσότητα (N) για μηχανικές κατεργασίες [4]

Παρόλο που τα δεδομένα που παρουσιάζονται στα σχήματα επαρκούν για τις περισσότερες περιπτώσεις, η μεθοδολογία δημιουργήθηκε με στόχο οι χρήστες να μπορούν να αναπτύσσουν τα δικά τους δεδομένα για την κατεργασία που επιθυμούν να μελετήσουν. Αυτή η προσέγγιση έχει για μία επιχείρηση το πλεονέκτημα της σιγουριάς για τα παραγόμενα αποτελέσματα, καθώς τα δεδομένα είναι δικά της δημιουργία. Οι τιμές του P_c αναπαριστούν τα ελάχιστα πιθανά κόστη που σχετίζονται με μία συγκεκριμένη κατασκευαστική κατεργασία για μία συγκεκριμένη ετήσια παραγόμενη ποσότητα. Με τον τρόπο αυτό, παρουσιάζεται το μικρότερο πιθανό κόστος για ένα εξάρτημα που σχετίζεται με μία συγκεκριμένη κατεργασία, θεωρώντας το σχέδιο του ιδανικό για την κατεργασία, την εργασία που απαιτείται μιας βάρδιας και την διάρκεια της απόσβεσης της επένδυσης δύο χρόνια.



Σχήμα 4.24: Βασικό κόστος κατεργασίας (P_c) σε σχέση με την ετήσια παραγόμενη ποσότητα (N) για κατεργασίες διαμόρφωσης [4]

Η εκτίμηση του κόστους κατασκευής των οδοντωτών τροχών θα γίνει για ετήσια παραγόμενη ποσότητα $N = 20$ τεμάχια, καθώς είναι η κατά προσέγγιση ετήσια παραγόμενη ποσότητα παρόμοιου μεγέθους και πολυπλοκότητας οδοντωτών τροχών στο μηχανουργείο που κατασκευάστηκαν οι τροχοί, με τις συγκεκριμένες εργαλειομηχανές, ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση με το πραγματικό κόστος κατασκευής. Επίσης, η κοστολόγηση θα γίνει και για $N = 1000$ τεμάχια, καθώς είναι μια ποσότητα εφικτή να παραχθεί με τις συγκεκριμένες εργαλειομηχανές του μηχανουργείου και θα μπορεί να γίνει μια ενδιαφέρουσα σύγκριση με το κόστος για την πραγματική ετήσια παραγόμενη ποσότητα.

Για την κατεργασία MM παρατηρείται από το σχήμα 4.23 ότι αν η ετήσια παραγόμενη ποσότητα είναι $N = 20$ τεμάχια, το βασικό κόστος κατεργασίας του εξαρτήματος είναι $P_c \approx 240 p + 240 \cdot 40\% = 336 p = 4.16 \text{ €}$ [11], ενώ για ποσότητα $N = 1000$ τεμάχια το κόστος γίνεται $P_c \approx 10 p + 10 \cdot 40\% = 14 p = 0.17 \text{ €}$. Όσον αφορά την κατεργασία PM, για ετήσια ποσότητα $N = 20$ τεμάχια το βασικό κόστος κατεργασίας παρατηρείται από το σχήμα 4.24 ότι είναι $P_c \approx 25000 p + 25000 \cdot 40\% = 35000 p = 433.22 \text{ €}$, ενώ για ποσότητα $N = 1000$ τεμάχια το κόστος γίνεται $P_c \approx 500 p + 500 \cdot 40\% = 700 p = 8.66 \text{ €}$.

Η διαφορά αυτή στο κόστος σύμφωνα με την ποσότητα των τεμαχίων, παρατηρείται λόγω της μείωσης κάποιων κοστών που περιλαμβάνονται στο βασικό κόστος κατεργασίας (όπως π.χ. τα κόστη εξοπλισμού), με τον επιμερισμό τους στο κάθε τεμάχιο. Βέβαια από κάποια ποσότητα και άνω ($N = 100000$ τεμάχια για την κατεργασία MM και $N = 3000000$ τεμάχια για την PM) το κόστος δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω και παραμένει σταθερό. Επίσης, παρατηρείται ότι η κατεργασία PM δεν συμφέρει σε σχέση με την MM για μικρές ετήσιες παραγωγές, παρά μόνο για παραγωγές μεγαλύτερες των 200000 τεμαχίων, όπου το κόστος της αρχίζει να γίνεται μικρότερο από το ελάχιστο δυνατό της MM.

Έχοντας καθορίσει το P_c , είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν οι παράγοντες που εξαρτώνται από το σχέδιο. Οι μεταβλητές, πολυπλοκότητα σχήματος, ανοχές, κ.λπ. τροποποιούν την σχέση μεταξύ των καμπυλών. Ο συντελεστής σχετικού κόστους R_c στην σχέση (4.1) είναι ένας τρόπος με τον οποίο αυτές οι μεταβλητές μπορούν να εκφραστούν.

4.4.1.3 Συντελεστής σχετικού κόστους (R_c)

Αυτός ο συντελεστής θα προσδιορίσει πόσο ακριβή θα είναι η παραγωγή ενός εξαρτήματος με πιο απαιτητικά χαρακτηριστικά από του «ιδανικού σχεδίου». Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τον συντελεστή σχετικού κόστους, R_c , είναι τα εξής:

$$R_c = \phi(C_{mp}, C_c, C_s, C_t, C_f)$$

όπου C_{mp} είναι το σχετικό κόστος που σχετίζεται με την καταλληλότητα του υλικού για την συγκεκριμένη κατεργασία, C_c το σχετικό κόστος που σχετίζεται με παραγόμενα εξαρτήματα διαφορετικής γεωμετρικής πολυπλοκότητας, C_s με παράγοντες μεγέθους και την δυνατότητα δημιουργίας συγκεκριμένης τομής/πάχους στο εξάρτημα και C_t, C_f με την εξασφάλιση καθορισμένης ανοχής και φινιρίσματος επιφάνειας αντίστοιχα.

Η ανάλυση της επιρροής των παραπάνω ποσοτήτων και συζητήσεις με ειδικούς οδήγησαν στην ιδέα ότι αυτές θα μπορούσαν να συνδυαστούν ως εξής:

$$R_c = C_{mp}^a \cdot C_c^b \cdot C_s^c \cdot C_t^d \cdot C_f^e \quad (4.4)$$

όπου a, b, c, d και e είναι σταθμικοί δείκτες. Βέβαια, για την συγκεκριμένη εφαρμογή μπορούν να θεωρηθούν ίσοι με την μονάδα. Επομένως, η σχέση (4.4) για τον συντελεστή σχετικού κόστους μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

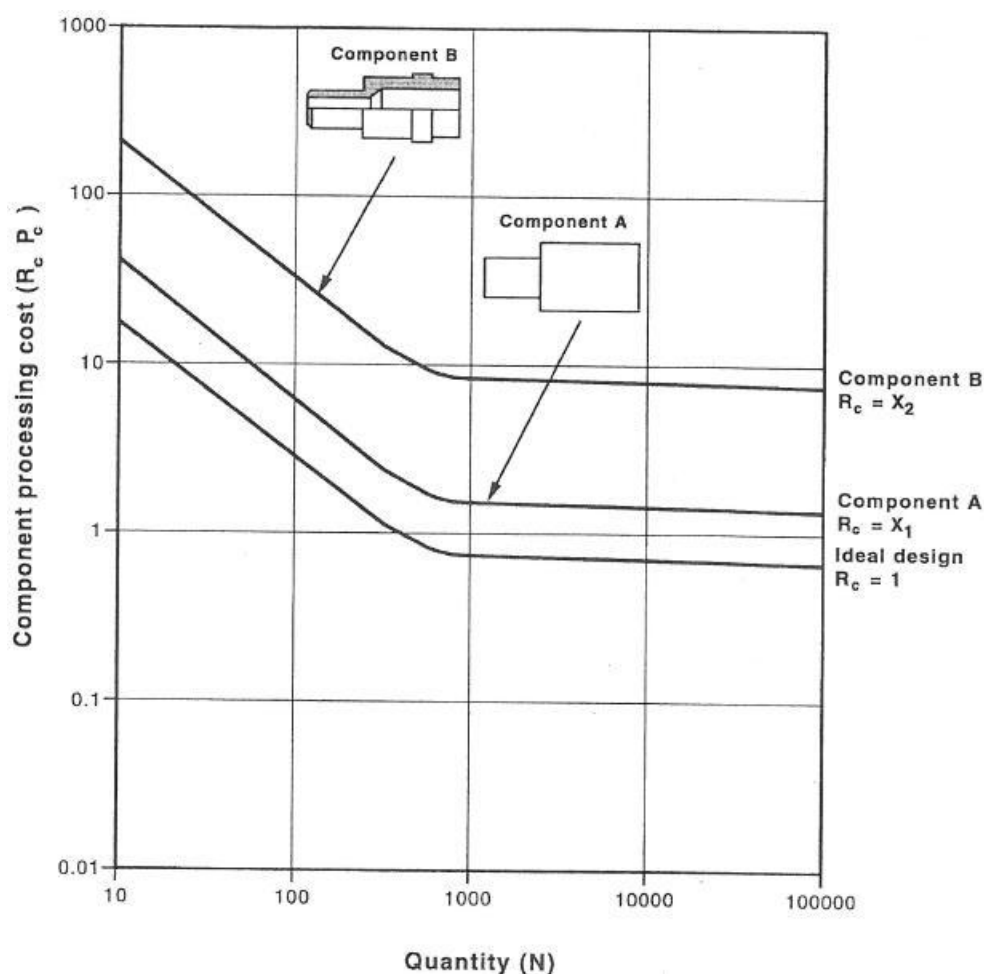
$$R_c = C_{mp} \cdot C_c \cdot C_s \cdot C_{ft} \quad (4.5)$$

όπου C_{ft} είναι το μεγαλύτερο από τα C_f και C_t , αλλά όχι και τα δύο.

Αυτό βελτιώθηκε με βάση ότι όταν παραχθεί ένα λεπτό φινίρισμα επιφάνειας, μπορούν ταυτόχρονα να επιτευχθούν και λεπτές ανοχές. Έτσι θα ήταν κάπως αμφίβολο να συνδυαστούν και οι δύο συντελεστές σχετικού κόστους.

Η γνώση μηχανικής έδειξε ότι η σχέση (4.5) ήταν ο πιο κατάλληλος συνδυασμός συντελεστών στο παρών στάδιο ανάπτυξης. Η μέθοδος σύγκρισης και συγκέντρωσης των κοστών έδειξε να είναι ανάλογη με εκείνες τις μεθοδολογίες που δημιουργήθηκαν από ειδικούς στον τομέα μηχανικής/υπολογισμού κόστους. Για το ιδανικό σχέδιο, κάθε ένας από αυτούς τους συντελεστές ισούται με την μονάδα, αλλά καθώς το σχέδιο του εξαρτήματος αρχίζει να διαφέρει από αυτό, ένας ή περισσότεροι από τους συντελεστές ίσως αυξηθούν και έτσι θα αλλάξει το κατασκευαστικό κόστος, M_i , στην σχέση (4.1).

Το σχήμα 4.25 παρουσιάζει πώς οι καμπύλες κοστών για το P_c διαφοροποιούνται από το προτεινόμενο μοντέλο, καθώς ένα σχέδιο εξαρτήματος διαφοροποιείται από το ιδανικό για την συγκεκριμένη κατεργασία. Καθώς το σχέδιο γίνεται πιο δύσκολο να κατεργαστεί, εξαιτίας για παράδειγμα του είδους του υλικού ή γεωμετρικών χαρακτηριστικών, η καμπύλη κόστους του μετατοπίζεται στον άξονα κόστους προς τα πάνω, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα κατά την αλλαγή από το Σχέδιο A (Component A) στο B.



Σχήμα 4.25: Καμπύλες σχετικού κατασκευαστικού κόστους σε σχέση με την ποσότητα [4]

Οι συντελεστές σχετικού κόστους C_{mp} , C_c , C_s , C_t και C_f θα περιγραφούν αναλυτικότερα παρακάτω.

4.4.1.3.1 Καταλληλότητα του υλικού για την κατεργασία (C_{mp})

Στον πίνακα 4.1 τα δεδομένα για τον συντελεστή C_{mp} υποδηλώνουν την καταλληλότητα χρήσης διαφόρων υλικών με διαφορετικές κατεργασίες. Είναι εμφανές ότι κάποιοι συνδυασμοί είναι ακατάλληλοι και θεωρούνται τεχνολογικά και οικονομικά εφικτοί μόνο αυτοί που υπάρχουν τιμές στα κουτάκια τους.

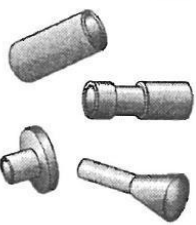
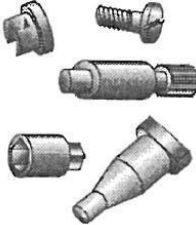
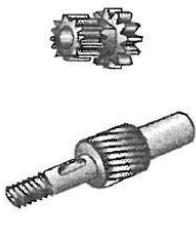
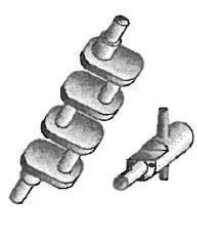
Πίνακας 4.1: Δεδομένα σχετικού κόστους καταλληλότητας του υλικού για την κατεργασία (C_{mp}) [4]

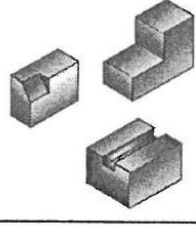
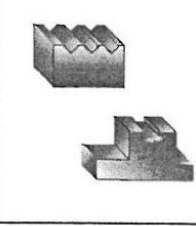
Material	AM	CCEM	CDF	CEP	CF	CH	CM2.5	CM5	CMC	CNC	CPM	GDC	HCEM	IC	IM	MM	PDC	PM	SM	SC	SMW	VF
Cast Iron	1.2						1	1	1	1.2				1		1.2		1.6	1	1		
Low Carbon Steel	1.4	1.3	1		1.3	1.3	1	1	1.2	1.4				1.3	1	1.4		1.2	1.2	1.2	1.2	
Alloy Steel	2.5	2	2		2	2	1	1	1.3	2.5				2	1	2.5		1.1	1.3	1.3	1.5	
Stainless Steel	4	2	2		2	2	1	1	1.5	4				2	1	4		1.1	1.5	1.5	1.5	
Copper Alloy	1.1	1.1	1		1	1			1	1.1				1	1	1.1	3	1	1	1	1	
Aluminium Alloy	1	1.1	1		1	1			1	1		1.5	1.1	1		1	1.5	1	1	1	1	
Zinc Alloy	1.1	1	1		1	1			1	1.1		1.2	1	1		1.1	1.2	1	1	1	1	
Thermoplastic	1.1			1						1.1	1.2				1	1.1						1
Thermoset	1.2			1.2						1.2	1					1	1.2					
Elastomer	1.1			1.5						1.1	1.5				1.5	1.1						

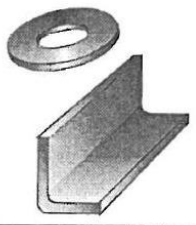
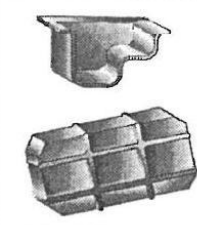
Από την πίνακα παρατηρείται ότι αν οι αρχικοί οδοντωτοί τροχοί από χυτοσιδήρους (Cast Iron) κατεργάστηκαν με MM ο συντελεστής είναι $C_{mp} = 1.2$, ενώ αν κατεργάστηκαν με PM είναι $C_{mp} = 1.6$. Όσον αφορά τους νέους οδοντωτούς τροχούς, εφόσον δεν υπάρχει χάλυβας μετρίου άνθρακα θεωρείται ότι κατασκευάστηκαν από χάλυβα χαμηλού άνθρακα (Low Carbon Steel) και παρατηρείται ότι για κατεργασία με MM είναι $C_{mp} = 1.4$, ενώ με PM είναι $C_{mp} = 1.2$.

4.4.1.3.2 Πολυπλοκότητα σχήματος (C_c)

Το σχήμα 4.26 παρουσιάζει μία μέθοδο για τον καθορισμό του τύπου σχήματος που χρησιμοποιείται, ώστε να προσδιοριστεί το C_c . Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες σχημάτων: στερεό από περιστροφή (A), πρισματικό στερεό (B) και επίπεδα ή λεπτής τομής εξαρτήματα (C). Αυτές οι τρεις βασικές κατηγορίες σχήματος μπορούν να υποδιαιρεθούν σε πέντε είδη πολυπλοκότητας όπως παρουσιάζονται στο σχήμα. Στην διαδικασία ταξινόμησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τελική μορφή του εξαρτήματος και να χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στους πίνακες. Επίσης, εάν το εξάρτημα εμπίπτει σε πάνω από μία κατηγορία, επιλέγεται πάντα αυτή που δίνει την υψηλότερη τιμή για το C_c . Ο προσδιορισμός της πολυπλοκότητας του σχήματος είναι πολύ σημαντικός, καθώς λάθος εκτίμηση της γεωμετρίας μπορεί να επηρεάσει αρκετά το τελικό κόστος του εξαρτήματος, M_i .

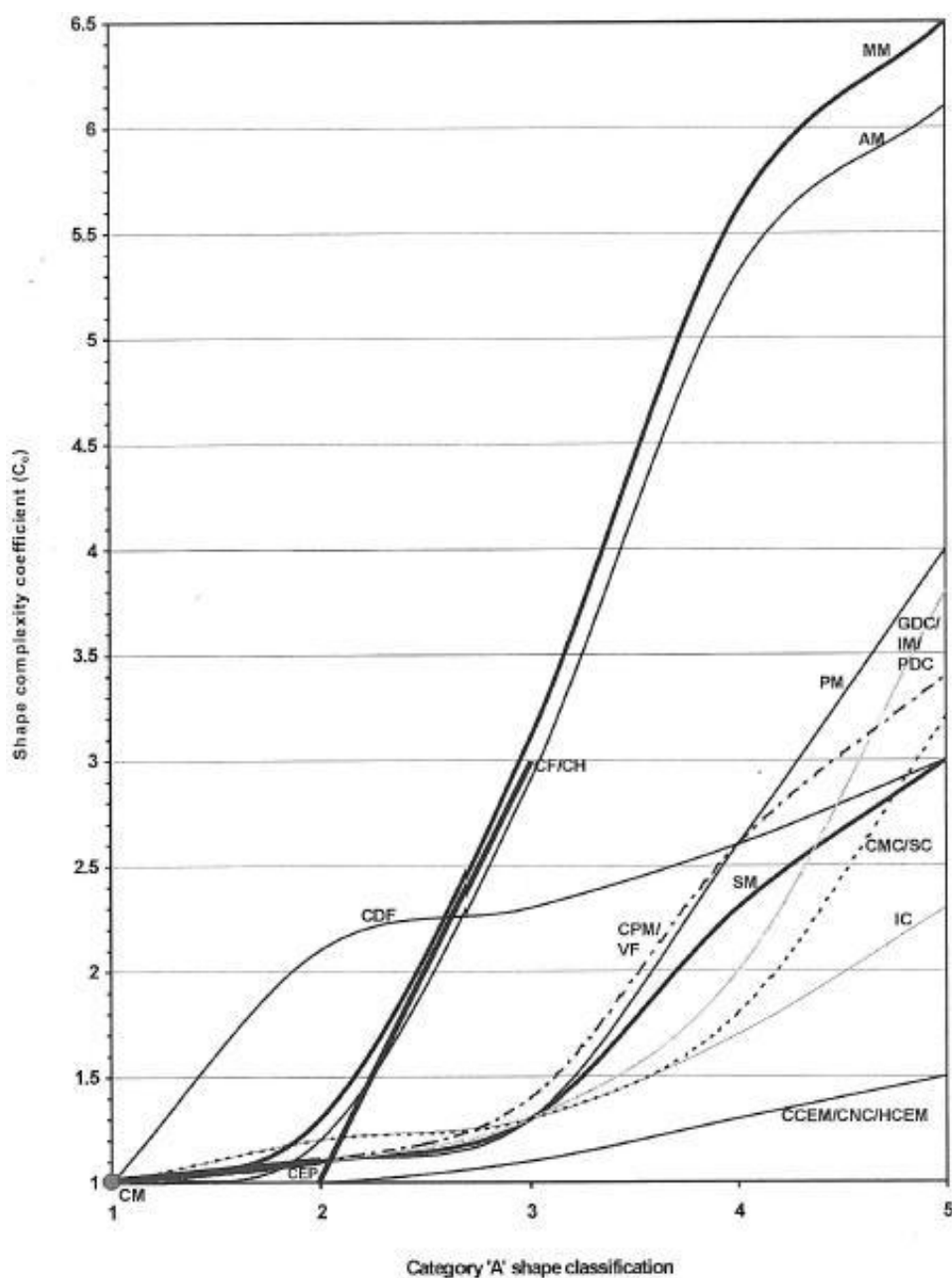
A  Part Envelope is Largely a Solid of Revolution				
Single/Primary Axis		Secondary Axes: Straight line features parallel and/or perpendicular to primary axis		Complex Forms
Basic rotational features only	Regular secondary/repetitive features	Internal	Internal and/or external features	Irregular and/or complex forms
A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
				
Category Includes: Rotationally symmetrical/grooves, undercuts, steps, chamfers, tapers and holes along primary axis/centre line.	Internal/external threads, knurling and simple contours through flats/splines/keyways on/around the primary axis/centre line.	Holes/threads/counterbores and other internal features not on the primary axis.	Projections, complex features, blind flats, splines, keyways on secondary axes.	Complex contoured surfaces, and/or series of features which are not represented in previous categories.

B  Part Envelope is Largely a Rectangular or Cubic Prism				
Single Axis/Plane		Multiple Axes		Complex Forms
Basic features only	Regular secondary/repetitive features	Orthogonal/straight line based features	Simple curved features on a single plane	Irregular and/or contoured forms
B 1	B 2	B 3	B 4	B 5
				
Category Includes: Through steps, chamfers and grooves/channels/slots and holes/threads on a single axis.	Regular through features, T-slots and racks/plain gear sections etc. Repetitive holes/threads/counter bores on a single plane.	Regular orthogonal/straight line based pockets and/or projections on one or more axis. Angled holes/threads/counter bores.	Curves on internal and/or external surfaces.	Complex 3-D contoured surfaces/geometries which cannot be assigned to previous categories.

C  Flat Or Thin Wall Section Components				
Single Axis	Secondary/Repetitive Regular Features		Regular Forms	Complex Forms
Basic features only	Uniform section/wall thickness	Non-uniform section/wall thickness	Cup, cone and box-type parts	Non-uniform and/or contoured forms
C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
				
Category Includes: Blanks, washers, simple bends, forms and through features on or parallel to primary axis.	Plain cogs/gears, multiple or continuous bends and forms.	Component section changes not made up of multiple bends or forms. Steps, tapers and blind features.	Components may involve changes in section thickness.	Complex or irregular features or series of features which are not represented in previous categories.

Σχήμα 4.26: Κατηγορίες σχήματος για τον προσδιορισμό του C_c [4]

Σύμφωνα με το σχήμα 4.26 ο κινητήριος οδοντωτός τροχός ανήκει στην κατηγορία σχήματος 'A2' ενώ ο κινούμενος στην 'A3' και οι τιμές των C_c για τις δύο συγκεκριμένες κατεργασίες θα βρεθούν από το σχήμα 4.27 παρακάτω.

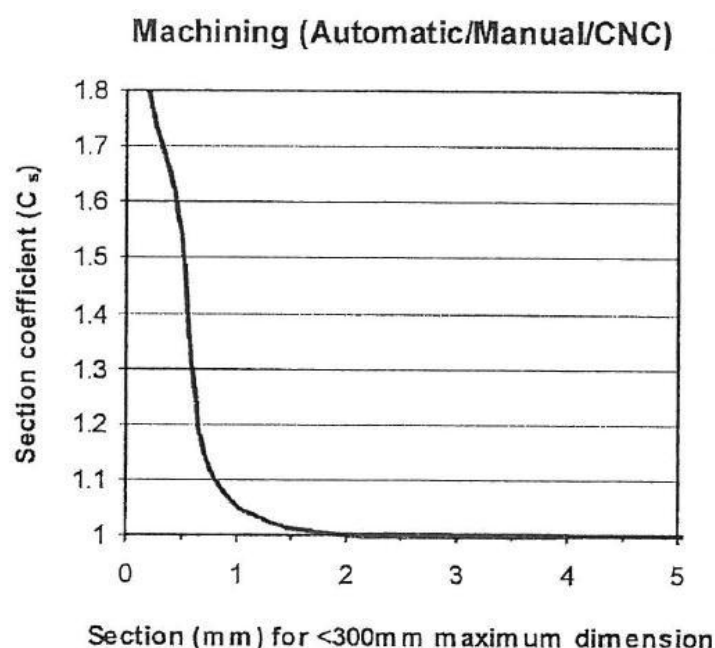


Σχήμα 4.27: Προσδιορισμός του συντελεστή πολυπλοκότητας σχήματος (C_c) για την κατηγορία σχήματος 'A' [4]

Από το σχήμα 4.27 για την κατηγορία A2 παρατηρείται ότι για την κατεργασία MM η τιμή του συντελεστή είναι $C_c \approx 1.3$, ενώ για την κατεργασία PM είναι $C_c \approx 1.1$. Για την κατηγορία A3 για την κατεργασία MM είναι $C_c \approx 3.1$, ενώ για την PM είναι $C_c \approx 1.3$.

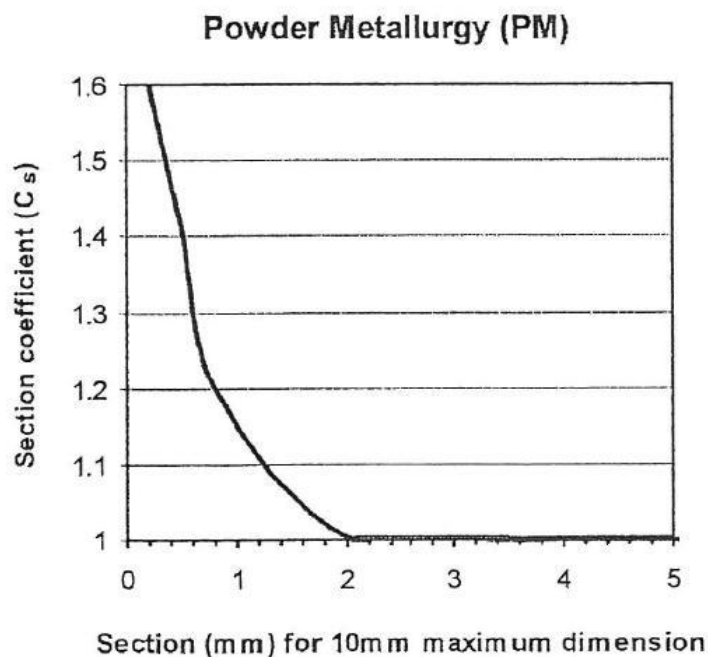
4.4.1.3.3 Συντελεστής τομής (C_s)

Τα σχήματα 4.28, 4.29 παρουσιάζουν τις συνέπειες σχετικού κόστους από την παραγωγή συγκεκριμένου πάχους τομής για την κατεργασία MM και PM αντίστοιχα. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι το συγκεκριμένο μικρότερο πάχος τομής του εξαρτήματος, καθώς και η μέγιστη διάσταση όπου ενεργεί η τομή. Η χρήση μιας κατεργασίας με τομή εκτός των ορίων μεγέθους της, μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα επιπλέον κόστος.



Σχήμα 4.28: Προσδιορισμός του συντελεστή τομής (C_s) για μηχανικές κατεργασίες [4]

Για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό από το μηχανολογικό σχέδιο του παρατηρείται ότι το μικρότερο πάχος τομής του είναι 0.87 mm και η μέγιστη διάσταση όπου ενεργεί η τομή είναι 20 mm, επομένως για την κατεργασία MM από το σχήμα 4.28 είναι $C_s \approx 1.1$, ενώ για την PM από το σχήμα 4.29 είναι $C_s = 1$. Για τον κινούμενο τροχό το μικρότερο πάχος τομής του είναι 1.47 mm και η μέγιστη διάσταση όπου ενεργεί η τομή είναι 13 mm, επομένως για την κατεργασία MM είναι $C_s \approx 1.02$ και για την PM είναι $C_s = 1$.



Σχήμα 4.29: Προσδιορισμός του συντελεστή τομής (C_s) για κονεομεταλλουργία [4]

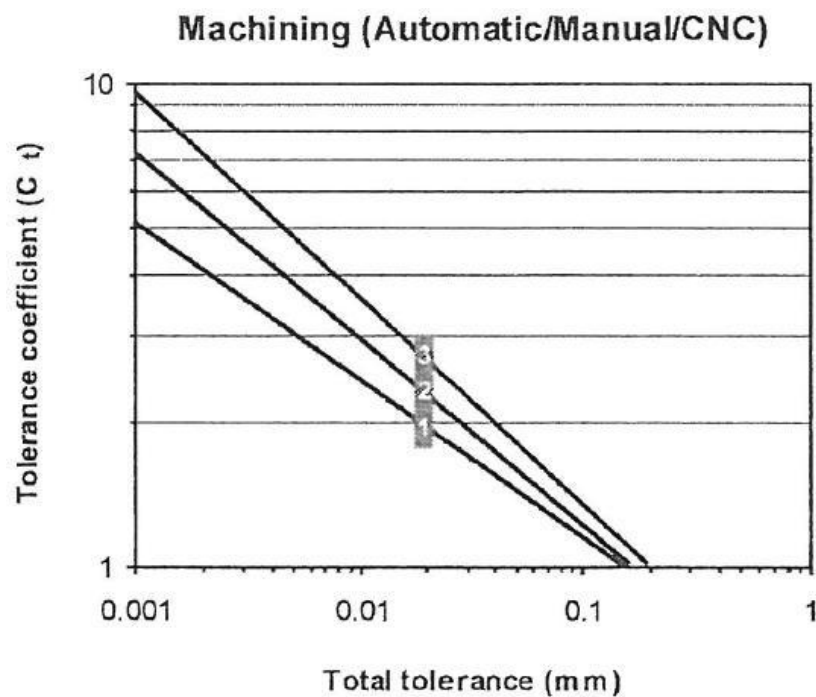
4.4.1.3.4 Συντελεστές ανοχής (C_t) και φινιρίσματος επιφάνειας (C_f)

Δεδομένα για τους συντελεστές ανοχής (C_t) και φινιρίσματος της επιφάνειας (C_f) παρουσιάζονται στα σχήματα 4.30, 4.31 και 4.32, 4.33 αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί δηλώνουν τις συνέπειες της επίτευξης συγκεκριμένης ανοχής και φινιρίσματος επιφάνειας, στο σχετικό κόστος του εξαρτήματος, για μια συγκεκριμένη κατεργασία.

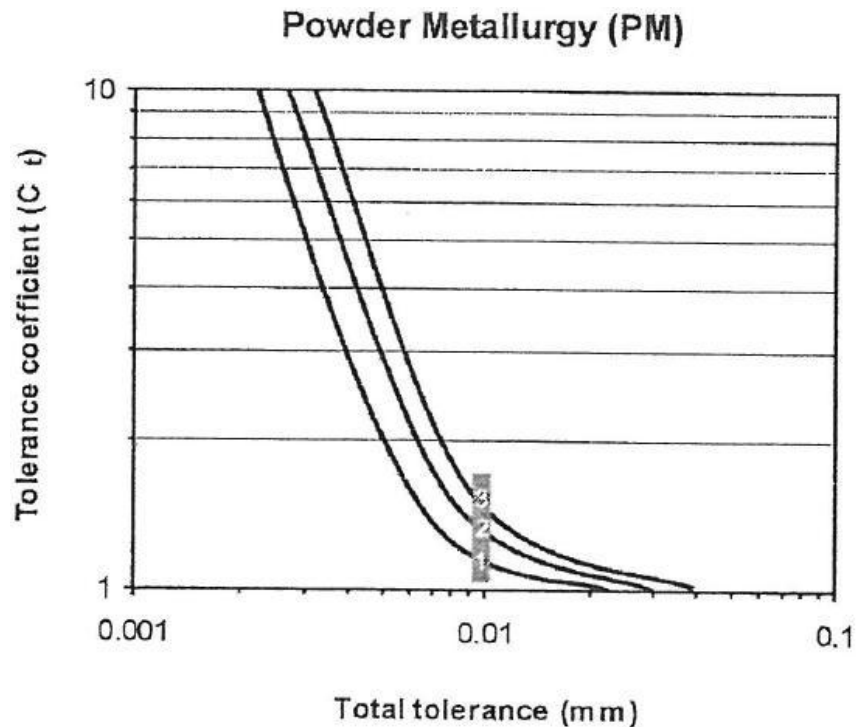
Για την εύρεση των συντελεστών, χρησιμοποιείται μόνο η μικρότερη τιμή ανοχής και τραχύτητας της επιφάνειας του τελικού εξαρτήματος. Επίσης, στα διαγράμματα επιλέγεται μία από τις τρεις καμπύλες, σύμφωνα με τα επίπεδα πάνω στο εξάρτημα (1, 2 ή 3+) που βρίσκεται η κρίσιμη ανοχή ή τραχύτητα. Εάν η τιμή της ανοχής ή τραχύτητας βρίσκεται αριστερά της παχιάς γκρι γραμμής των διαγραμμάτων, για να επιτευχθεί αυτή η τιμή απαιτείται περαιτέρω κατεργασία με κάποια μέθοδο αποπεράτωσης (lapping, honing, grinding κ.λπ.). Βέβαια, πιθανή περαιτέρω κατεργασία λαμβάνεται ήδη υπόψη με τους συγκεκριμένους συντελεστές. Τέλος, $C_{ft} = C_t$ ή C_f , οποιοσδήποτε δίνει την υψηλότερη τιμή.

Για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό από τα μηχανολογικό σχέδιο του παρατηρείται ότι η μικρότερη ανοχή είναι 0.075 mm και βρίσκεται σε 1 επίπεδο, επομένως για την κατεργασία MM από το σχήμα 4.30 επιλέγοντας την καμπύλη 1 ο συντελεστής ανοχής είναι $C_t \approx 1.2$ και για την PM από το σχήμα 4.31 είναι $C_t = 1$. Για τον κινούμενο τροχό η μικρότερη ανοχή είναι 0.06 mm και βρίσκεται σε 2 επίπεδα,

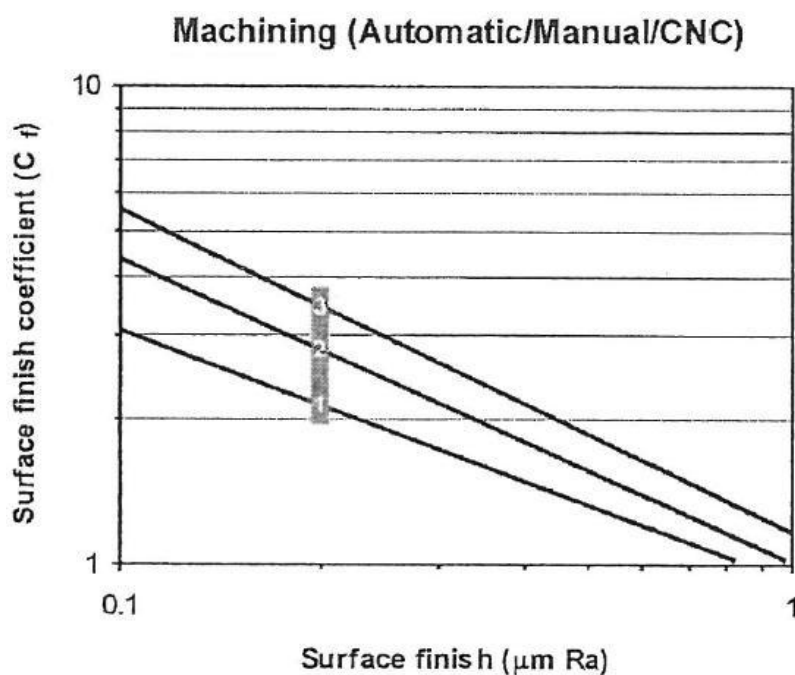
επομένως για την κατεργασία MM επιλέγοντας την καμπύλη 2 είναι $C_t \approx 1.4$ και για την PM είναι $C_t = 1$.



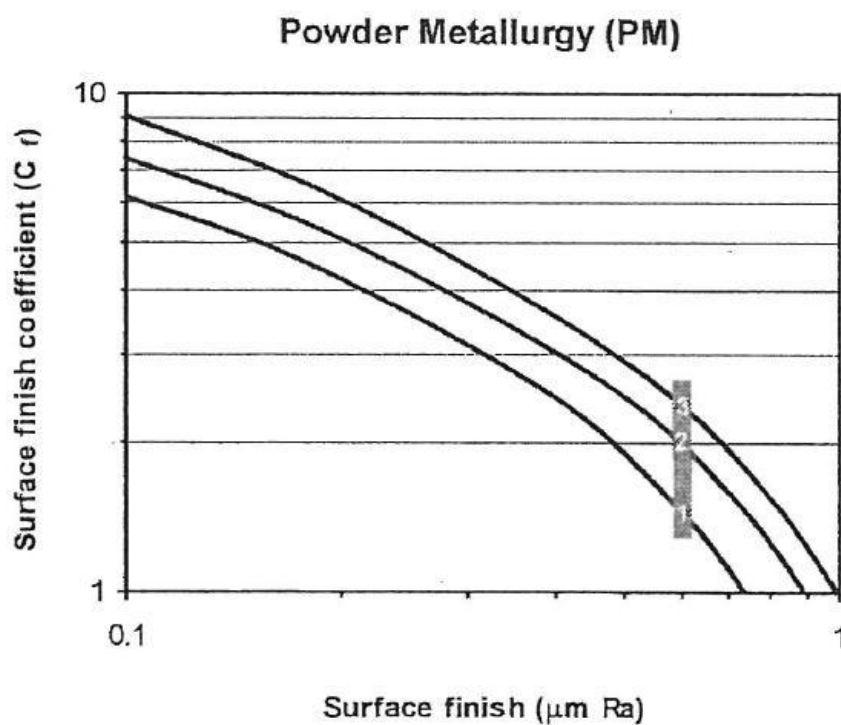
Σχήμα 4.30: Προσδιορισμός του συντελεστή ανοχής (C_t) για μηχανικές κατεργασίες [4]



Σχήμα 4.31: Προσδιορισμός του συντελεστή ανοχής (C_t) για κονεομεταλλουργία [4]



Σχήμα 4.32: Προσδιορισμός του συντελεστή φινιρίσματος επιφάνειας (C_f) για μηχανικές κατεργασίες [4]



Σχήμα 4.33: Προσδιορισμός του συντελεστή φινιρίσματος επιφάνειας (C_f) για κονεομεταλλουργία [4]

Η μικρότερη τραχύτητα επιφάνειας των οδοντωτών τροχών είναι των επιφανειών των οδόντων τους που έρχονται σε επαφή, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Σύμφωνα με τα

μηχανολογικά σχέδια, η επιφάνεια αυτή στον κινητήριο τροχό έχει μέση τραχύτητα $Ra = 2 \mu\text{m}$ και στον κινούμενο $Ra = 2.2 \mu\text{m}$. Οπότε σύμφωνα με τα σχήματα 4.32, 4.33 συντελεστής φινιρίσματος επιφάνειας και για τις δύο κατεργασίες αλλά και για τους δύο τροχούς είναι $C_f = 1$.

Επίσης, παρατηρείται ότι εφόσον στα διαγράμματα του συντελεστή ανοχής αλλά και του συντελεστή φινιρίσματος επιφάνειας, οι τιμές ανοχών και τραχυτήτων και για τους δύο τροχούς βρίσκονται δεξιά της παχιάς γκρι γραμμής, για την επίτευξη τους δεν απαιτείται περαιτέρω κατεργασία με κάποια μέθοδο αποπεράτωσης.

4.4.1.4 Κόστος υλικού (M_c)

Το κόστος υλικού, M_c , καθορίστηκε στην εξίσωση (4.1) ως ο όγκος του ακατέργαστου υλικού που απαιτείται για την κατασκευή του εξαρτήματος επί το κόστος υλικού στην απαιτούμενη μορφή ανά μονάδα όγκου, C_{mt} :

$$M_c = V \cdot C_{mt} \quad (4.6)$$

Τα κόστη των υλικών δόθηκαν από το μηχανουργείο που κατασκεύασε τους νέους οδοντωτούς τροχούς ανά μονάδα μάζας, για τον φαιό χυτοσίδηρο 1.8 €/kg, τον όλκιμο 2 €/kg και για τους χάλυβες μετρίου άνθρακα 2.2 €/kg. Οπότε γνωρίζοντας τις πυκνότητες των υλικών, τα κόστη ανά μονάδα όγκου θα είναι $C_{mt} \approx 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ €/mm}^3$ και $C_{mt} \approx 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ €/mm}^3$ για τον φαιό και τον όλκιμο χυτοσίδηρο αντίστοιχα και $C_{mt} \approx 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ €/mm}^3$ για τους χάλυβες μετρίου άνθρακα.

Ο όγκος, V , στην εξίσωση (4.6) πρέπει να σε κυβικά χιλιοστά (mm^3) και μπορεί να υπολογιστεί με έναν από τους δύο τρόπους:

1. Χρησιμοποιώντας τον συνολικό όγκο. Εάν ο συνολικός όγκος του υλικού που απαιτείται για την παραγωγή του εξαρτήματος είναι γνωστός (ο όγκος συμπεριλαμβανόμενων των αποβλήτων από την κατεργασία), τότε αυτή η τιμή χρησιμοποιείται για το V και δεν λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής αποβλήτων, W_c .
2. Χρησιμοποιώντας τον τελικό όγκο του εξαρτήματος. Εάν δεν είναι γνωστή η ποσότητα των αποβλήτων υλικού από την κατεργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τελικός όγκος του εξαρτήματος. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται ο συντελεστής αποβλήτων, W_c , ο οποίος λαμβάνει υπόψη τα απόβλητα υλικού που παράγονται από μία συγκεκριμένη κατεργασία. Το V σε αυτή την μέθοδο διατυπώνεται ως εξής:

$$V = V_f \cdot W_c \quad (4.7)$$

όπου V_f είναι ο τελικός όγκος του εξαρτήματος.

Ο συντελεστής αποβλήτων, W_c , μπορεί να βρεθεί από τον πίνακα 4.2 για διάφορες κατεργασίες και κατηγορίες σχημάτων του σχήματος 4.16. Παρόλο που στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές από τον πίνακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με

αυτοπεποίθηση, η εκτίμηση του αρχικού όγκου του κομματιού πριν την κατεργασία είναι η μέθοδος που προτιμάται (μέθοδος 1 παραπάνω). Σε πολλές εφαρμογές δεν απαιτείται υπολογισμός του όγκου με μεγάλη ακρίβεια και ένας κατά προσέγγιση υπολογισμός μπορεί να είναι ικανοποιητικός ιδιαίτερα για σύγκριση σχεδίων. Επίσης, μπορεί να βοηθήσει εάν ένα σχέδιο χωρίζεται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, που επιτρέπουν τον γρήγορο υπολογισμό του όγκου.

Πίνακας 4.2: Συντελεστής αποβλήτων (W_c) για διάφορες κατεργασίες σύμφωνα με την κατηγορία σχήματος [4]

Process Shape Classification	AM	CCEM	CDF	CEP	CF	CH	CMC	CNC	CPM	GDC	HCEM	IC	IM	MM	PDC	PM	SM	SC	SMW	VF
A1	1.6	1	1.1	1	1	1	1.1	1.6	1	1	1	1	1.1	1.6	1	1	1	1.1		1
A2	2	1	1.1	1.1	1	1	1.1	2	1.1	1.1	1	1	1.1	2	1.1	1	1.1	1.1		1.1
A3	2.5	1.5	1.2		1	1	1.2	2.5	1.1	1.1	1.5	1.1	1.1	2.5	1.1	1	1.1	1.2		1.1
A4	3	2	1.2				1.3	3	1.2	1.2	2	1.1	1.1	3	1.2	1	1.2	1.3		1.2
A5	4	3	1.3				1.4	4	1.3	1.3	3	1.2	1.2	4	1.3	1.2	1.3	1.4		1.3
B1	1.7	1	1.1	1	1	1	1.1	1.7	1	1	1	1	1.1	1.7	1	1	1	1.1		1
B2	2.2	1	1.1	1.1	1	1	1.1	2.2	1.1	1.1	1	1	1.1	2.2	1.1	1	1.1	1.1		1.1
B3	2.8	1.5	1.2		1	1	1.2	2.8	1.1	1.1	1.5	1.1	1.1	2.8	1.1	1	1.1	1.2		1.1
B4	4	2	1.2				1.3	4	1.1	1.2	2	1.1	1.1	4	1.2	1	1.2	1.3		1.1
B5	6	3	1.3				1.4	6	1.2	1.3	3	1.2	1.2	6	1.3	1.2	1.3	1.4		1.2
C1	1.8	1	1.1	1	1	1	1.1	1.8	1	1	1	1	1.1	1.8	1.1	1	1.1	1.1	1.2	1
C2	2.4	1	1.1	1.1	1	1	1.2	2.4	1.1	1.1	1	1	1.1	2.4	1.1	1	1.1	1.2	1.2	1.1
C3	4	2	1.1		1	1	1.3	4	1.1	1.1	2	1.1	1.1	4	1.1	1	1.1	1.3	1.4	1.1
C4	6	3	1.2				1.4	6	1.1	1.2	3	1.1	1.2	6	1.2	1	1.2	1.4	1.5	1.1
C5	8	4	1.3				1.6	8	1.2	1.3	4	1.2	1.3	8	1.3	1.2	1.3	1.6	1.6	1.2

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι για την κατηγορία A2 του κινητήριου τροχού και την κατεργασία MM ο συντελεστής αποβλήτων είναι $W_c = 2$, ενώ για την κατεργασία PM είναι $W_c = 1$. Για την κατηγορία A3 του κινούμενου και την κατεργασία MM είναι $W_c = 2.5$, ενώ για την PM είναι $W_c = 1$. Επίσης, οι όγκοι των οδοντωτών τροχών έχουν βρεθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και είναι $V_f = 7781.4 \text{ mm}^3$ του κινητήριου και $V_f = 76066 \text{ mm}^3$ του κινούμενου. [4]

4.4.2 Πραγματικό κόστος κατασκευής

Εφόσον έγινε μια εκτίμηση τους κόστους κατασκευής των οδοντωτών τροχών με βάση το παραπάνω μοντέλο, θα υπολογιστεί και το πραγματικό κόστος κατασκευής των τροχών, ώστε να γίνει σύγκριση των δύο κοστών και να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Για τον υπολογισμό του πραγματικού κόστους λήφθηκε υπόψη το κόστος κατεργασίας και το κόστος των υλικών.

Το κόστος κατεργασίας αποτελείται από τα εξής κόστη:

- Την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις εργαλειομηχανές
- Τον μισθό των εργατών

Βέβαια, περιλαμβάνει και άλλα επιμέρους κόστη, όπως την φθορά των κοπτικών εργαλείων, την συντήρηση των εργαλειομηχανών, τα λιπαντικά (σαπουνέλαια) που χρειάστηκαν κατά την κατεργασία κ.λπ., τα οποία δεν ήταν δυνατό να υπολογιστούν.

4.4.2.1 Κόστος κατεργασίας

4.4.2.1.1 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εργαλειομηχανών

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε κιλοβατώρες (kWh) από τις εργαλειομηχανές, αρχικά μετρήθηκε ο χρόνος κατεργασίας των τροχών με την συγκεκριμένη εργαλειομηχανή και κατόπιν πολλαπλασιάστηκε με την ισχύ της ($kWh = kW \cdot h$). Αφού έγινε αυτό για όλες τις εργαλειομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν, προστέθηκαν οι καταναλώσεις για την εύρεση της συνολικής.

Για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό ο χρόνος κατεργασίας στην πριονοκορδέλα μετρήθηκε 5 min $\approx$ 0.08 h, στον τόρνο 40 min $\approx$ 0.67 h (30 min η κατεργασία του κυλίνδρου και 10 min του άξονα που χρειάστηκε για την τοποθέτηση του κυλίνδρου στον γριναζοκόπη) και στον γριναζοκόπη 46 min = 0.77 h. Η ισχύς της πριονοκορδέλας ήταν 5.6 kW, του τόρνου 10 kW και του γριναζοκόπη 6 kW. Επομένως, η κατανάλωση της πριονοκορδέλας ήταν $0.08 \cdot 5.6 \approx 0.45$ kWh, του τόρνου $0.67 \cdot 10 = 6.7$ kWh και του γριναζοκόπη $0.77 \cdot 6 = 4.62$ kWh. Άρα η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε για την κατασκευή του κινητήριου τροχού ήταν $0.45 + 6.7 + 4.62 = 11.77$ kWh.

Για τον κινούμενο οδοντωτό τροχό ο χρόνος κατεργασίας στην πριονοκορδέλα μετρήθηκε 10 min $\approx$ 0.17 h, στον τόρνο 81 min $\approx$ 1.35 h, στον γριναζοκόπη 116 min $\approx$ 1.94 h και στην φρέζα 35 min $\approx$ 0.58 h. Η ισχύς της πριονοκορδέλας ήταν 5.6 kW, του τόρνου 10 kW, του γριναζοκόπη 6 kW (ίδιες εργαλειομηχανές και για τους δύο τροχούς) και της φρέζας 7.1 kW. Επομένως, η κατανάλωση της πριονοκορδέλας ήταν $0.17 \cdot 5.6 \approx 0.95$ kWh, του τόρνου $1.35 \cdot 10 = 13.5$ kWh, του γριναζοκόπη $1.94 \cdot 6 = 11.64$ kWh και της φρέζας $0.58 \cdot 7.1 = 4.12$ kWh. Άρα η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε για την κατασκευή του κινούμενου τροχού ήταν $0.95 + 13.5 + 11.64 + 4.12 = 30.21$ kWh.

Σύμφωνα με το γενικό βιομηχανικό τιμολόγιο της Δ.Ε.Η. για το έτος 2012, η χρέωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0.0711 €/kWh [12], οπότε το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τον κινητήριο τροχό θα είναι $0.0711 \cdot 11.77 = 0.84$ € και για τον κινούμενο $0.0711 \cdot 30.21 = 2.15$ €.

4.4.2.1.2 Μισθός εργατών

Για την κατασκευή των τροχών χρειάστηκαν τέσσερις εργάτες, οι χειριστές των τεσσάρων εργαλειομηχανών.

Για τον κινητήριο οδοντωτό τροχό ο εργάτης που έκοψε τον αρχικό κύλινδρο εργάστηκε 10 min, από τα οποία τα 5 min επέβλεπε την κατεργασία και 5 min έκανε εργασίες τοποθέτησης του αρχικής κυλινδρικής μπάρας στην εργαλειομηχανή. Ο χειριστής του τόρνου εργάστηκε 45 min, από τα οποία τα 40 min επέβλεπε την κατεργασία (30 min η κατεργασία του κυλίνδρου και 10 min του άξονα που χρειάστηκε για την τοποθέτηση του κυλίνδρου στον γραναζοκόπτη) και 5 min έκανε άλλες εργασίες πάνω στην εργαλειομηχανή, όπως προετοιμασία και ρύθμιση της, αλλαγή των κοπτικών εργαλείων, αφαίρεση των αποβλήτων κ.λπ. Τέλος, ο χειριστής του γραναζοκόπτη εργάστηκε 64 min, από τα οποία τα 46 min επέβλεπε την κατεργασία και 18 min έκανε εργασίες προετοιμασίας και ρύθμισης της εργαλειομηχανής και τοποθέτησης του κυλίνδρου προς κατεργασία. Επομένως, ο συνολικός χρόνος εργασίας που απαιτήθηκε για την κατασκευή του κινητήριου τροχού ήταν $10 + 45 + 64 = 119 \text{ min} \approx 1.99 \text{ h}$.

Για τον κινούμενο οδοντωτό τροχό ο εργάτης που έκοψε τον αρχικό κύλινδρο εργάστηκε 15 min, από τα οποία τα 10 min επέβλεπε την κατεργασία και 5 min έκανε εργασίες τοποθέτησης του αρχικής κυλινδρικής μπάρας στην εργαλειομηχανή. Ο χειριστής του τόρνου εργάστηκε 91 min, από τα οποία τα 81 min επέβλεπε την κατεργασία και 10 min έκανε άλλες εργασίες πάνω στην εργαλειομηχανή. Ο χειριστής του γραναζοκόπτη εργάστηκε 149 min, από τα οποία τα 116 min επέβλεπε την κατεργασία και 33 min έκανε εργασίες προετοιμασίας και ρύθμισης της εργαλειομηχανής και τοποθέτησης του κυλίνδρου προς κατεργασία.. Τέλος, ο χειριστής της φρέζας εργάστηκε 45 min, από τα οποία τα 35 min επέβλεπε την κατεργασία και 10 min έκανε εργασίες ρύθμισης και αλλαγής κοπτικών εργαλείων στην εργαλειομηχανή. Επομένως, ο συνολικός χρόνος εργασίας που απαιτήθηκε για την κατασκευή του κινούμενου τροχού ήταν $15 + 91 + 149 + 45 = 300 \text{ min} \approx 5 \text{ h}$.

Εφόσον το μέσο κατώτατο ωρομίσθιο εργατοτεχνιτών αυτή την στιγμή στην Ελλάδα είναι περίπου 4.66 € [13] ο συνολικός μισθός που καταβλήθηκε στους εργάτες για την κατασκευή του κινητήριου τροχού ήταν $4.66 \cdot 1.99 = 9.27 \text{ €}$ και για του κινούμενου $4.66 \cdot 5 = 23.3 \text{ €}$.

4.4.2.2 Κόστος υλικού

Για την εύρεση του κόστους των υλικών χρησιμοποιήθηκαν οι μάζες των αρχικών κυλίνδρων που χρειάστηκαν για την κατασκευή των οδοντωτών τροχών

(σχήμα 4.14). Η μάζα του κυλίνδρου του κινητήριου τροχού ήταν 0.249 kg και του κινητήριου 2.344 kg. Επομένως, γνωρίζοντας ότι τιμή του χάλυβα μετρίου άνθρακα ανά μονάδα μάζας είναι 2.2 €/kg, το κόστος υλικού του κινητήριου τροχού θα είναι $2.2 \cdot 0.249 \approx 0.55$ € και του κινούμενου $2.2 \cdot 2.344 \approx 5.16$ €.

4.4.3 Τελικοί συγκριτικοί πίνακες

Εφόσον βρέθηκαν όλες οι μεταβλητές και οι συντελεστές, υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού *Microsoft Excel* τα επιμέρους και τα τελικά κόστη κατασκευής των οδοντωτών τροχών, τα οποία παρουσιάζονται σε συγκριτικούς πίνακες παρακάτω, αρχικά για τον κινητήριο και κατόπιν για τον κινούμενο τροχό.

4.4.3.1 Κινητήριο οδοντωτός τροχός

Πίνακας 4.3: Κόστος κατασκευής κινητήριου οδοντωτού τροχού

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΚΙΝΗΤΗΡΙΟΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ							
ΥΛΙΚΑ	ΟΛΚΙΜΟΣ ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ				ΧΑΛΥΒΑΣ ΜΕΤΡΙΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ			
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	MM		PM		MM		PM	
ΕΤΗΣΙΑ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	20	1000	20	1000	20	1000	20	1000
ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ								
Pc	4,16 €	0,17 €	433,22 €	8,66 €	4,16 €	0,17 €	433,22 €	8,66 €
Cmp	1,2	1,2	1,6	1,6	1,4	1,4	1,2	1,2
Cc	1,3	1,3	1,1	1,1	1,3	1,3	1,1	1,1
Cs	1,1	1,1	1	1	1,1	1,1	1	1
Ct	1,2	1,2	1	1	1,2	1,2	1	1
Cf	1	1	1	1	1	1	1	1
Cft	1,2	1,2	1	1	1,2	1,2	1	1
Rc	2,06	2,06	1,76	1,76	2,40	2,40	1,32	1,32
ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	8,57 €	0,35 €	762,47 €	15,24 €	9,99 €	0,41 €	571,85 €	11,43 €
Vf, mm ³	7781,4	7781,4	7781,4	7781,4	7781,4	7781,4	7781,4	7781,4
Wc	2	2	1	1	2	2	1	1
Cmt, €/mm ³	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,7E-05	1,7E-05	1,7E-05	1,7E-05
ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	0,22 €	0,22 €	0,11 €	0,11 €	0,26 €	0,26 €	0,13 €	0,13 €
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	8,78 €	0,57 €	762,58 €	15,35 €	10,26 €	0,67 €	571,98 €	11,56 €
ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ	175,68 €	567,94 €	15.251,52 €	15.350,54 €	205,17 €	672,98 €	11.439,65 €	11.563,48 €
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ								
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	0,84 €							
ΜΙΣΘΟΣ ΕΡΓΑΤΩΝ	9,27 €							
ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ					10,11 €			
ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ					0,55 €			
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ					10,66 €			
ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ					213,20 €			

4.4.3.2 Κινούμενος οδοντωτός τροχός

Πίνακας 4.4: Κόστος κατασκευής κινούμενου οδοντωτού τροχού

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΤΡΟΧΟΣ							
ΥΛΙΚΑ	ΦΑΙΟΣ ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΣ				ΧΑΛΥΒΑΣ ΜΕΤΡΙΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ			
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	MM		PM		MM		PM	
ΕΤΗΣΙΑ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	20	1000	20	1000	20	1000	20	1000
ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ								
Pc	4,16 €	0,17 €	433,22 €	8,66 €	4,16 €	0,17 €	433,22 €	8,66 €
Cmp	1,2	1,2	1,6	1,6	1,4	1,4	1,2	1,2
Cc	3,1	3,1	1,3	1,3	3,1	3,1	1,3	1,3
Cs	1,02	1,02	1	1	1,02	1,02	1	1
Ct	1,4	1,4	1	1	1,4	1,4	1	1
Cf	1	1	1	1	1	1	1	1
Cft	1,4	1,4	1	1	1,4	1,4	1	1
Rc	5,31	5,31	2,08	2,08	6,20	6,20	1,56	1,56
ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	22,10 €	0,90 €	901,10 €	18,01 €	25,78 €	1,05 €	675,82 €	13,51 €
Vf, mm ³	76066	76066	76066	76066	76066	76066	76066	76066
Wc	2,5	2,5	1	1	2,5	2,5	1	1
Cmt, €/mm ³	1,3E-05	1,3E-05	1,3E-05	1,3E-05	1,7E-05	1,7E-05	1,7E-05	1,7E-05
ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	2,47 €	2,47 €	0,99 €	0,99 €	3,23 €	3,23 €	1,29 €	1,29 €
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	24,57 €	3,38 €	902,09 €	19,00 €	29,01 €	4,29 €	677,12 €	14,80 €
ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ	491,41 €	3.375,21 €	18.041,73 €	19.001,66 €	580,29 €	4.286,38 €	13.542,33 €	14.802,72 €
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ								
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	2,15 €							
ΜΙΣΘΟΣ ΕΡΓΑΤΩΝ	23,30 €							
ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	25,45 €							
ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	5,16 €							
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	30,61 €							
ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ	612,20 €							

Από τα παραπάνω διαγράμματα αρχικά όσο αναφορά το εκτιμώμενο κόστος τεμαχίου με βάση το μοντέλο, παρατηρείται ότι το υψηλότερο και για τους δύο τροχούς είναι για 20 τεμάχια με την κατεργασία PM και υλικό τον χυτοσίδηρο (762.58 € του κινητήριου και 902.09 € του κινούμενου), ενώ το μικρότερο για 1000 τεμάχια με την κατεργασία MM και υλικό πάλι τον χυτοσίδηρο (0.57 € του κινητήριου και 3.38 € του κινούμενου).

Για το κόστος κατεργασίας είναι προφανές ότι το κόστος είναι μικρότερο όταν η ετήσια ποσότητα είναι μεγαλύτερη. Επίσης, παρατηρείται ότι η κατεργασία PM είναι ασύμφορη για μικρές ετήσιες παραγωγές, καθώς το κόστος της είναι πολύ

υψηλότερο σε σχέση με κόστος της MM, ενώ σε μεγάλες παραγωγές 1000 τεμαχίων αρχίζει να το προσεγγίζει. Εντυπωσιακό είναι ότι το κόστος κατασκευής 1000 τεμαχίων με την PM, είναι πολύ κοντά στο κόστος κατασκευής 20 τεμαχίων. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η κατεργασία MM είναι καταλληλότερη για τους χυτοσιδήρους και γι' αυτό το κόστος κατεργασίας είναι μικρότερο από τον χαλύβων, ενώ η PM είναι καταλληλότερη για τους χάλυβες και το κόστος της είναι μικρότερο από τον χυτοσιδήρων.

Για το κόστος του υλικού παρατηρείται ότι το κόστος των χαλύβων είναι υψηλότερο από τον χυτοσιδήρων και επίσης ότι το κόστος υλικού για την κατεργασία MM είναι μεγαλύτερο από την κατεργασία PM, καθώς στην MM είναι μεγαλύτερη η ποσότητα αποβλήτων.

Όσο αναφορά το πραγματικό κόστος κατασκευής, παρατηρείται ότι και στους δύο τροχούς τα κόστη κατεργασίας και υλικού, άρα και το συνολικό κόστος τεμαχίου, βρίσκονται πολύ κοντά στα εκτιμώμενα για ετήσια ποσότητα 20 τεμαχίων με την κατεργασία MM και υλικό των χάλυβα. Η απόκλιση του εκτιμώμενου κόστους είναι της τάξεως του 3.8% του πραγματικού για τον κινητήριο και του 5.2% για τον κινούμενο. Επομένως, το μοντέλο εκτίμησης κόστους της κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε, μπορεί να θεωρηθεί πολύ αξιόπιστο για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

4.5 Σύνοψη - συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάστηκαν οι συνήθειες μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών και κατόπιν περιγράφηκε η κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών. Στην συνέχεια, αναλύθηκε το κόστος κατασκευής τους με μια συγκεκριμένη μεθοδολογία εκτίμησης κόστους κατασκευής, με τα αρχικά και τα νέα υλικά, με δύο διαφορετικές μεθόδους κατασκευής, καθώς και για δύο διαφορετικές ετήσιες παραγόμενες ποσότητες. Τέλος, υπολογίστηκε το πραγματικό κόστος κατασκευής των νέων τροχών και έγιναν συγκρίσεις μεταξύ των κοστών που προέκυψαν με το μοντέλο, καθώς και μεταξύ του πραγματικού κόστους και του εκτιμώμενου.

Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι οι μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών είναι πολλοί και μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε απαίτηση του σχεδιαστή. Στην συνέχεια, η παρουσία στο μηχανουργείο κατά την κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών, ήταν μια καλή ευκαιρία κατανόησης της λειτουργίας κάποιων βασικών εργαλειομηχανών, καθώς και των σταδίων κατασκευής ενός μηχανολογικού εξαρτήματος από το πρώτη ύλη μέχρι το τελικό εξάρτημα.

Κατόπιν, κατά την κοστολόγηση των τροχών προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με το κατά πόσο επηρεάζει το υλικό, η μέθοδος κατασκευής, και η ετήσια παραγωγή του εξαρτήματος το τελικό κόστος. Παρατηρήθηκε, ότι η κατασκευή των οδοντωτών τροχών με συμβατικές χειροκίνητες εργαλειομηχανές, είναι οικονομικότερη για μικρές ετήσιες παραγωγές σε σχέση με την κονεομεταλλουργία, που συμφέρει μόνο για πολύ μεγάλες παραγωγές όπου τότε το κόστος μειώνεται κατά πολύ. Ένα σημαντικό επίσης συμπέρασμα που προέκυψε, είναι ότι το υλικό και η μέθοδος κατεργασίας του αλληλοεξαρτώνται και η επιλογή τους πρέπει να γίνεται παράλληλα, καθώς ο συνδυασμός τους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το κόστος κατασκευής. Ο χυτοσίδηρος εκτός του ότι είναι φθηνότερο υλικό, παρατηρήθηκε ότι είναι οικονομικότερη και η κατεργασία του με συμβατικές χειροκίνητες εργαλειομηχανές σε σχέση με τον χάλυβα, ο οποίος κατεργάζεται οικονομικότερα με κονεομεταλλουργία. Βέβαια σε παραγωγές λίγων τεμαχίων, το συνολικό κόστος της παραγωγής με χάλυβες, δεν είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος με χυτοσιδήρους. Σε μεγάλες παραγωγές όμως, η διαφορά στο κόστος μεγαλώνει αρκετά. Τέλος, εφόσον το πραγματικό κόστος κατασκευής το τροχών ήταν πολύ κοντά στο εκτιμώμενο, το συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης του κόστους αποδείχθηκε μια γρήγορη και πολύ αξιόπιστη λύση για μια αρχική, κατά προσέγγιση κοστολόγηση ενός εξαρτήματος πριν την έναρξη της παραγωγής του.

4.6 Βιβλιογραφία

- [1] Aaron D. Deutschman, Walter J. Michels, Charles E. Wilson, 1997, “Machine Design Theory and Practice”, Macmillan Publishing Co., New York.
- [2] Θ. Ν. Κωστόπουλος, 2005, «Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών», Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα.
- [3] B. Karpuschewski, H. J. Knoche, M. Hipke, 2008, “Gear finishing by abrasive processes”, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57.
- [4] K. G. Swift, J. D. Booker, 2003, “Process Selection, From Design to Manufacture”, Butterworth – Heinemann.

URLs:

- [4]http://www.broachmasters.com/production_broaching.html
- [5]<http://www.ejsong.com/mdme/memmods/MEM30007A/processing/processing.html>
- [6]<http://www.gkn.com/sintermetals/capabilities/surface-densified-pm/process/Pages/default.aspx>
- [7]<http://www.ni.com/white-paper/3130/en>
- [8]<http://tricobm.com/en/productsinfo.aspx?c=2&sc=33&p=137>
- [9]<http://www.infinmachinetools.in/gearcutting.html>
- [10]<http://www.thisismoney.co.uk/money/bills/article-1633409/Historic-inflation-calculator-value-money-changed-1900.html>
- [11]http://coinmill.com/EUR_GBX.html
- [12]<http://www.dei.gr>
- [13]<http://www.alfavita.gr/artro.php?id=58923>

Συμπεράσματα και προτάσεις

Παρακάτω παρατίθενται τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και νέες ιδέες για την εξέλιξη του παρόντος θέματος, οι οποίες προήλθαν από τη γνώση που αποκομίστηκε κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εργασίας. Οι ιδέες αυτές παρουσιάζονται ως προτάσεις.

Συμπεράσματα

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία μηχανών για τη μετάδοση κίνησης, καλύπτοντας με τα διάφορα είδη τους οποιαδήποτε απαίτηση κατά τον σχεδιασμό μιας μηχανολογικής κατασκευής. Κατά την ανάλυση των χαρακτηριστικών τους μεγεθών και διαστάσεων, φάνηκε επίσης το πόσο πολύπλοκα μηχανολογικά εξαρτήματα είναι.

Ο σχεδιασμός των τροχών με τη χρήση του λογισμικού *Pro/ENGINEER Wildfire 4* ήταν μια καλή ευκαιρία εκμάθησης ενός πανίσχυρου λογισμικού που χρησιμοποιείται σε διάφορες επιχειρήσεις και βιομηχανίες σε ολόκληρο τον κόσμο. Εντυπωσιακό είναι πως με τη σύγχρονη τεχνολογία, μπορούν σε μικρό χρονικό διάστημα να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων μεγάλης πολυπλοκότητας, όπως οι οδοντωτοί τροχοί και σχεδόν αμέσως να δημιουργηθούν τα μηχανολογικά τους σχέδια.

Δύο σημαντικά δεδομένα για το εξάρτημα που παρουσιάζονται στα σχέδια των τροχών είναι οι ανοχές διαστάσεων και η τραχύτητα επιφάνειας. Οι ανοχές παρέχουν πληροφορίες για την ακρίβεια της κατασκευής, ενώ η επιφανειακή

τραχύτητα είναι ένας δείκτης ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας. Η τραχύτητα συνεργαζόμενων επιφανειών πρέπει να αναγράφεται στα μηχανολογικά σχέδια, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εξαρτημάτων ή στοιχείων μηχανών που απαιτείται αυξημένη ποιότητα και μειωμένες τριβές.

Κατά την εύρεση των υλικών μέσω του λογισμικού *CES Edupack 2008*, παρατηρήθηκε το πόσο χρήσιμο είναι ένα τέτοιο λογισμικό για την ανάπτυξη ενός προϊόντος σε μια επιχείρηση, αλλά και πόσο διευκολύνει έναν μηχανικό κατά την διαδικασία του μηχανολογικού σχεδιασμού. Στην σημερινή εποχή, με τόσα διαφορετικά υλικά ικανά να καλύψουν οποιαδήποτε σχεδιαστική ανάγκη και εντυπωσιακά πολλές, διαθέσιμες επιλογές του υλικού για την κατασκευή ενός αντικειμένου, το λογισμικό αυτό βοηθάει το μηχανικό να κάνει την βέλτιστη επιλογή, για βέλτιστη ποιότητα του σχεδιαζόμενου προϊόντος.

Κατά την σύγκριση μεταξύ αρχικών και νέων υλικών των οδοντωτών τροχών, παρατηρήθηκε ότι οι ανθρακούχοι χάλυβες που επιλέχθηκαν για την εκ νέου κατασκευή των τροχών, έχουν κάποιες διαφορές σε σχέση με τα αρχικά υλικά, τους χυτοσιδήρους, κυρίως στις μηχανικές ιδιότητες και την πυκνότητα. Οι ανθρακούχοι χάλυβες σαν ισχυρότερα και ποιοτικότερα υλικά με μεγαλύτερη αντοχή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους χυτοσιδήρους, ιδιαίτερα από τον φαιό, πιθανόν να αυξήσουν την διάρκεια ζωής των τροχών. Από την άλλη όμως, έχουν και μεγαλύτερη πυκνότητα και άρα οι νέοι τροχοί θα έχουν μεγαλύτερη μάζα από τους αρχικούς, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγαλύτερες απώλειες ισχύος, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, λόγω αδράνειας. Βέβαια, καθώς τα ποσοστά αύξησης των μαζών δεν είναι μεγάλα (<15%), για την συγκεκριμένη εφαρμογή οι επιπλέον αυτές μάζες μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Έτσι οι χάλυβες, σαν υλικά των οδοντωτών τροχών υπερτερούν των χυτοσιδήρων, έχοντας σαν σημαντικό προτέρημα την υψηλότερη τους αντοχή.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρατηρήθηκε ότι οι μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών είναι πολλοί και μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε απαίτηση του σχεδιαστή. Στην συνέχεια, η παρουσία στο μηχανουργείο κατά την κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών, ήταν μια καλή ευκαιρία κατανόησης της λειτουργίας κάποιων βασικών εργαλειομηχανών, καθώς και των σταδίων κατασκευής ενός μηχανολογικού εξαρτήματος από το πρώτο ύλη μέχρι το τελικό εξάρτημα.

Κατόπιν, κατά την κοστολόγηση των τροχών προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με το κατά πόσο επηρεάζει το υλικό, η μέθοδος κατασκευής, και η ετήσια παραγωγή του εξαρτήματος το τελικό κόστος. Παρατηρήθηκε, ότι η κατασκευή των οδοντωτών τροχών με συμβατικές χειροκίνητες εργαλειομηχανές, είναι οικονομικότερη για μικρές ετήσιες παραγωγές σε σχέση με την κονεομεταλλουργία, που συμφέρει μόνο για πολύ μεγάλες παραγωγές όπου τότε το κόστος μειώνεται κατά πολύ. Ένα σημαντικό επίσης συμπέρασμα που προέκυψε, είναι ότι το υλικό και η

μέθοδος κατεργασίας του αλληλοεξαρτώνται και η επιλογή τους πρέπει να γίνεται παράλληλα, καθώς ο συνδυασμός τους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το κόστος κατασκευής. Ο χυτοσίδηρος εκτός του ότι είναι φθηνότερο υλικό, παρατηρήθηκε ότι είναι οικονομικότερη και η κατεργασία του με συμβατικές χειροκίνητες εργαλειομηχανές σε σχέση με τον χάλυβα, ο οποίος κατεργάζεται οικονομικότερα με κονεομεταλλουργία. Τέλος, εφόσον το πραγματικό κόστος κατασκευής το τροχών ήταν πολύ κοντά στο εκτιμώμενο, το συγκεκριμένο μοντέλο εκτίμησης του κόστους αποδείχθηκε μια γρήγορη και πολύ αξιόπιστη λύση για μια αρχική, κατά προσέγγιση κοστολόγηση ενός εξαρτήματος πριν την έναρξη της παραγωγής του.

Συνεπώς σύμφωνα με τα παραπάνω, από τεχνική σκοπιά, οι χάλυβες σαν υλικά κατασκευής των οδοντωτών τροχών υπερτερούν των χυτοσιδήρων, καθώς πιθανόν να αυξήσουν την διάρκεια ζωής τους. Από την άλλη όμως, κατά την ανάλυση κόστους κατασκευής, παρατηρήθηκε ότι το κόστος κατασκευής των τροχών από χάλυβες με συμβατικές χειροκίνητες εργαλειομηχανές, είναι υψηλότερο από το κόστος με χυτοσιδήρους, καθώς τα κόστη κατεργασίας αλλά και υλικού είναι μικρότερα. Σε παραγωγές λίγων τεμαχίων οι χάλυβες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς το συνολικό κόστος της παραγωγής δεν είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος με χυτοσιδήρους. Σε μεγάλες παραγωγές όμως, η διαφορά στο κόστος μεγαλώνει αρκετά, καθιστώντας την επιλογή τους οικονομικά ασύμφορη.

Προτάσεις

Κατά την εκπόνηση της εργασίας, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων για τον έλεγχο της αντοχής των οδοντωτών τροχών με τα αρχικά και τα νέα υλικά που επιλέχθηκαν. Η μελέτη αντοχής σε κάμψη και επιφανειακή πίεση θα μπορούσε να γίνει με την βοήθεια του H/Y, χρησιμοποιώντας ειδικό λογισμικό (CAE). Επίσης, μια μελλοντική εργασία θα μπορούσε να μελετήσει και να συγκρίνει την αντοχή των αρχικών αλλά και των νέων τροχών και με διάφορες πειραματικές μεθόδους εκτός από θεωρητικές. Αφού κατασκευαστεί ένας ειδικός μηχανισμός καταπόνσεων των οδοντωτών τροχών, κατά την λειτουργία και καταπόνηση των τροχών θα παίρνονται μετρήσεις για διάφορες παραμέτρους (θερμοκρασία, δονήσεις, κ.λπ.). Κατόπιν θα γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δύο ζεύγη τροχών από διαφορετικά υλικά.

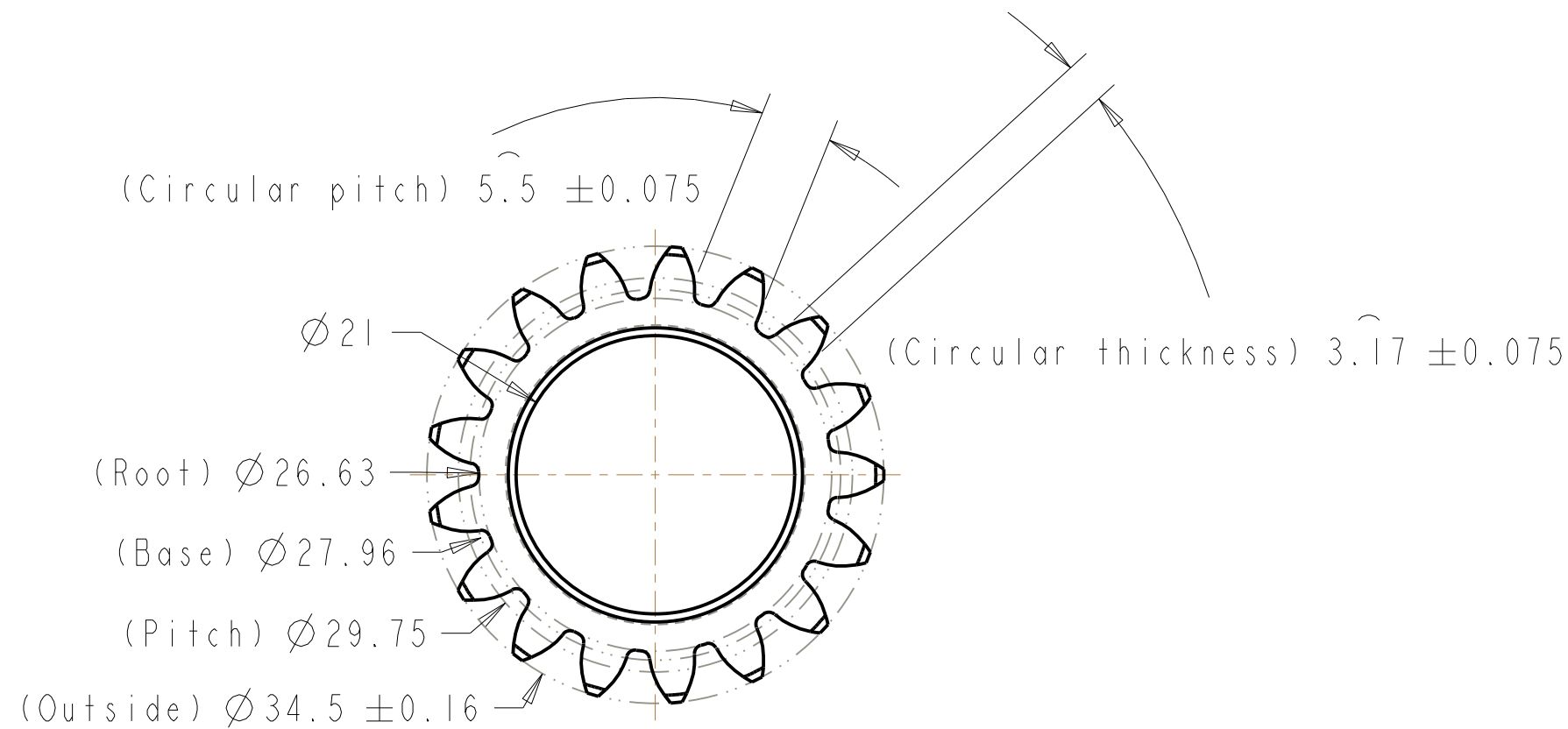
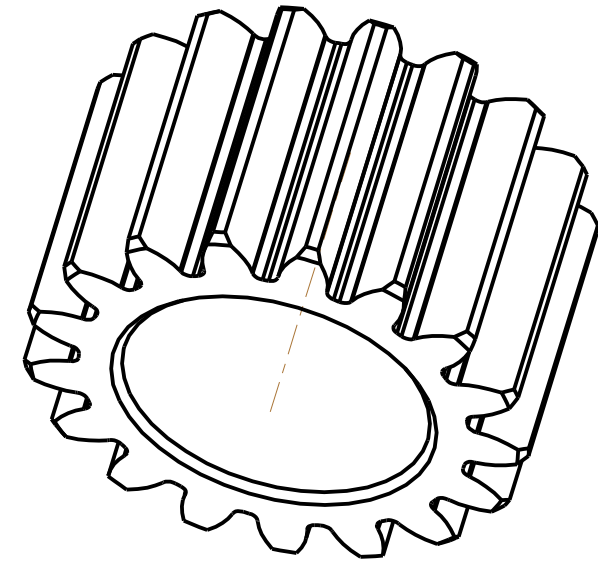
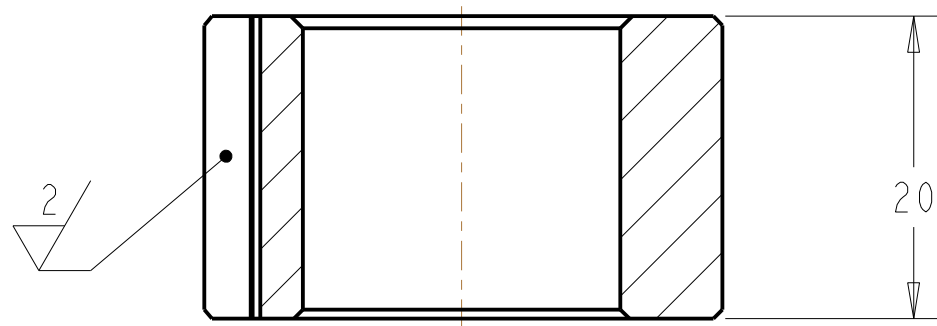
Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσθήκη στην παρούσα διπλωματική, θα ήταν η κατασκευή των νέων οδοντωτών τροχών με εργαλειομηχανές CNC και η δημιουργία του κώδικα που θα χρησιμοποιούνταν στις εργαλειομηχανές με την χρήση λογισμικού (CAM), εισάγοντας σαν δεδομένα τις τρισδιάστατες απεικονίσεις των τροχών που δημιουργήθηκαν. Στην δημιουργία του κώδικα αλλά και στην εφαρμογή

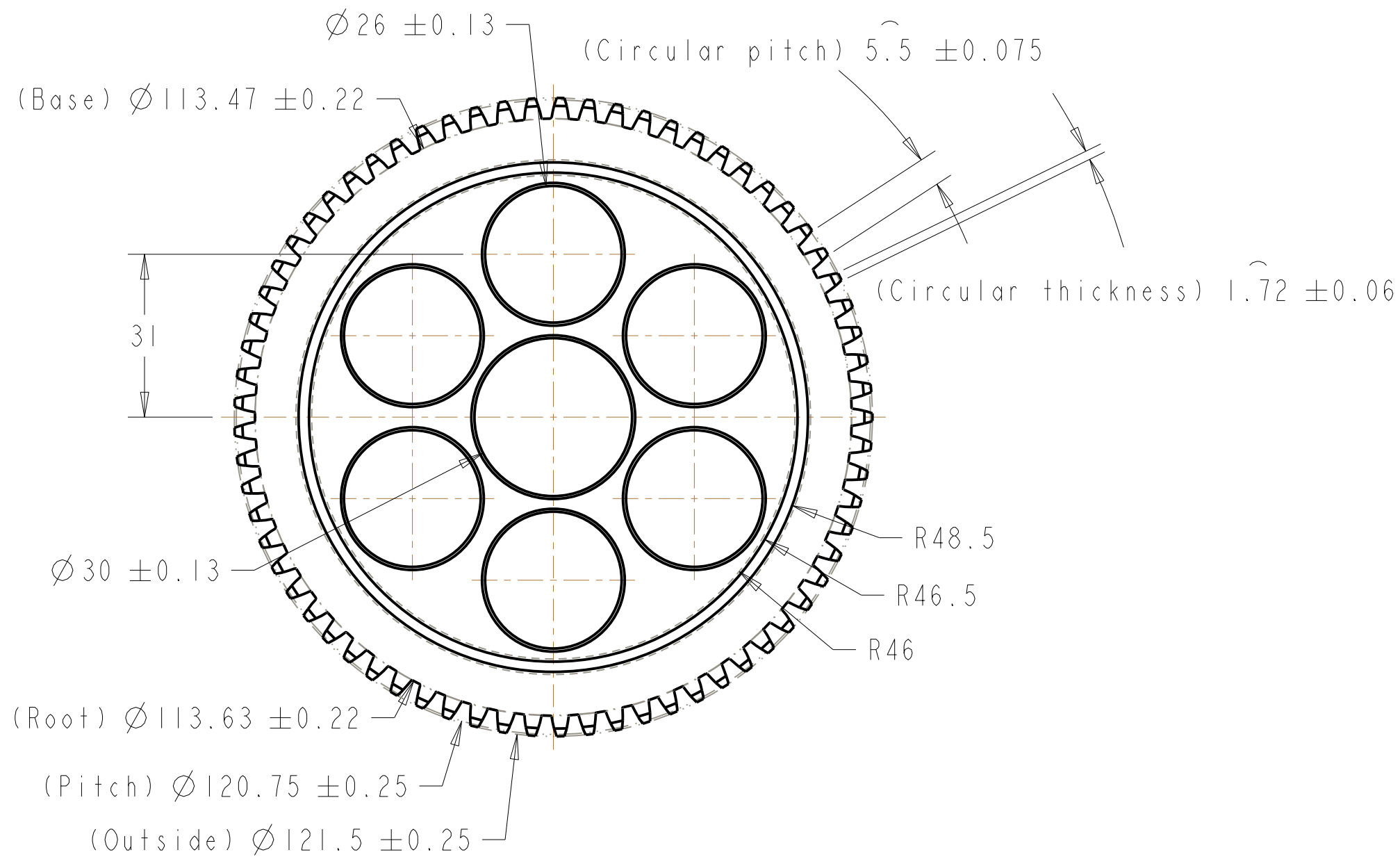
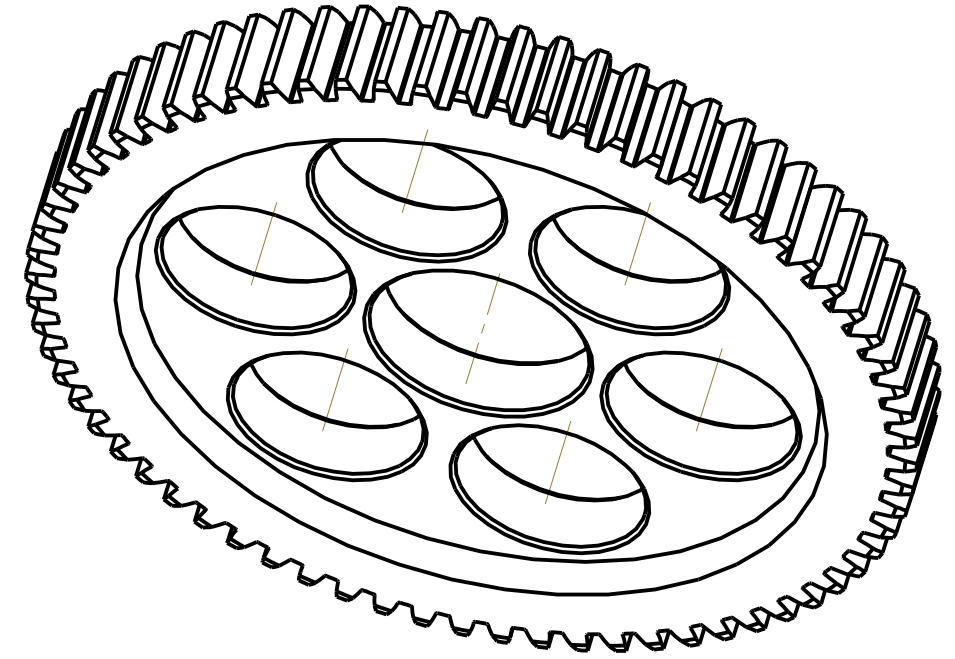
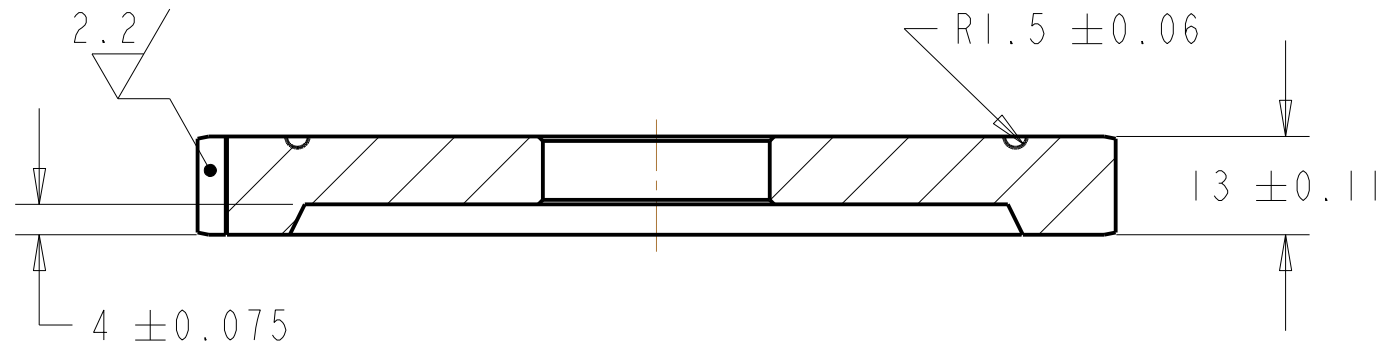
πεπερασμένων στοιχείων για τον έλεγχο αντοχής των τροχών, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό *Pro/ENGINEER Wildfire 4*, καθώς όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση για 3D CAD/CAM/CAE.

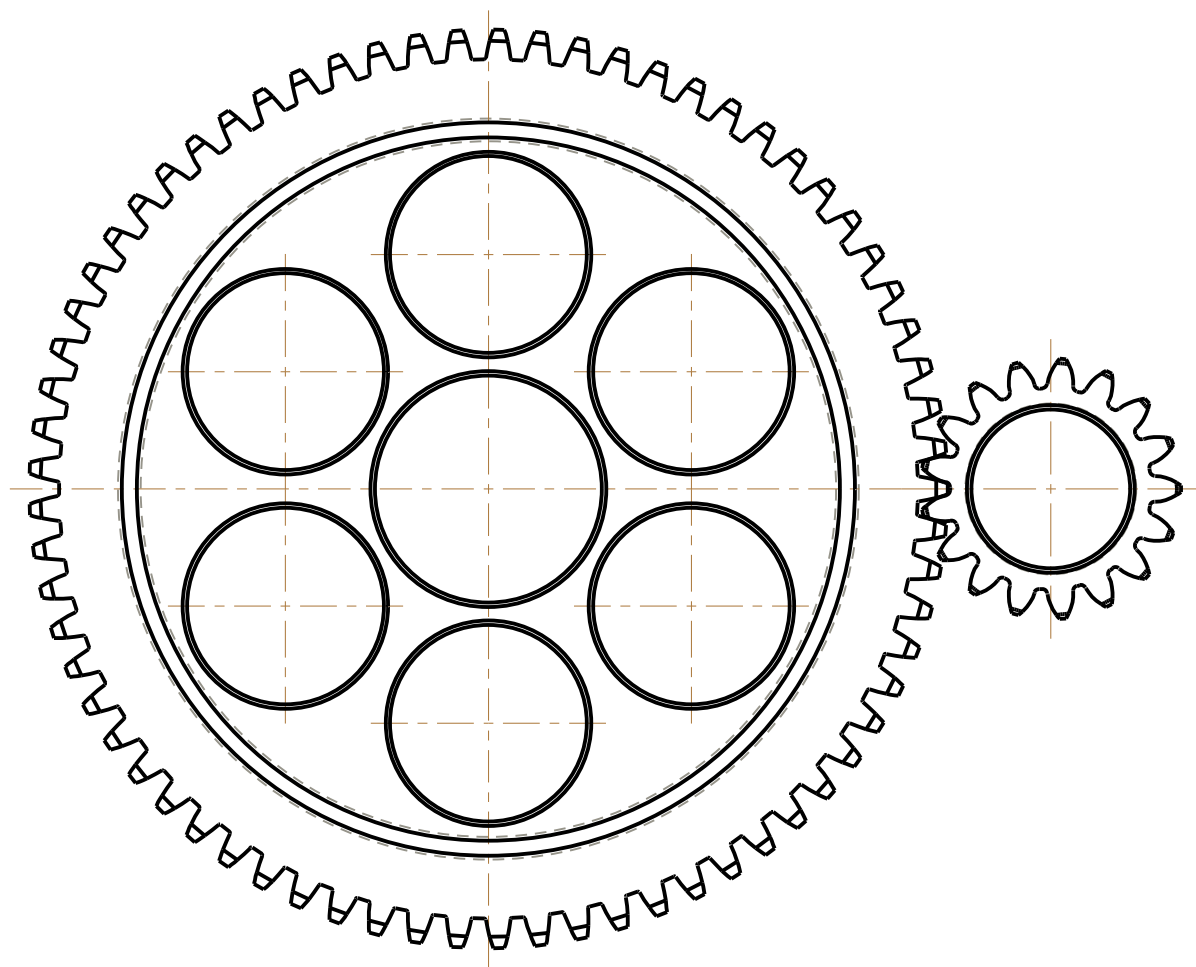
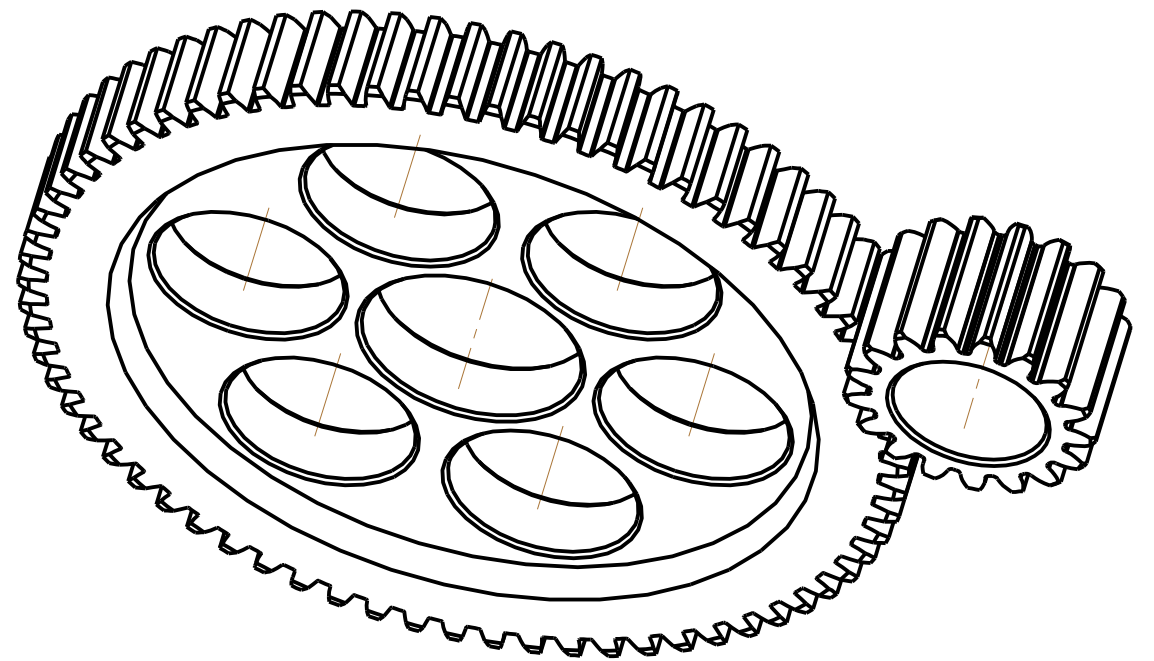
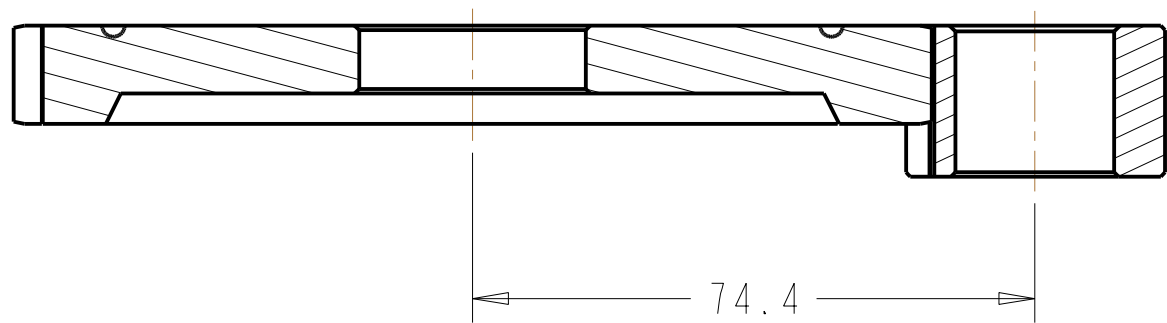
Όσο αναφορά την οικονομική ανάλυση, εάν οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονταν με αυτοματοποιημένες μεθόδους κατεργασίας (CNC εργαλειομηχανές), θα είχε ενδιαφέρον η ανάλυση κόστους κατασκευής τους και η σύγκριση του με το κόστος για κατασκευή με χειροκίνητες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, το λογισμικό *CES Edupack 2008* που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των αρχικών υλικών και την επιλογή νέων, δίνει και την δυνατότητα επιλογής της μεθόδου με την οποία θα κατεργαστεί το συγκεκριμένο υλικό. Ενδιαφέρον, λοιπόν παρουσιάζει η πραγματοποίηση μιας μελλοντικής εργασίας, όπου θα επιλέγεται η κατεργασία με βάση το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί.

Παράρτημα Ι







ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Όνοματεπώνυμο: Καρκάνης Μανούσος
Ημερομηνία γέννησης: 28/6/1989
Διεύθυνση κατοικίας: Κυπρίων Αγονιστών 22,
Δάσος Χαϊδαρίου, 124 62, Αθήνα
Τηλέφωνα επικοινωνίας: 210 5320449 &
6986961384
E-mail: manos_karkanis@hotmail.com



ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

2007-2012 Πτυχίο Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης,
Πολυτεχνική Σχολή
2004-2007 3ο Λύκειο Χαϊδαρίου, Δάσος Χαϊδαρίου

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

7/2010 - 11/2010 Άμισθη πρακτική άσκηση στην Ελληνική
Αεροπορική Βιομηχανία Α.Ε. (Ε.Α.Β.) στην
Διεύθυνση Εργοστασίου Κινητήρων, Τομέα
Συντήρησης Α/Κ & παρελκόμενων. Επίσης στο
εργοστάσιο κατασκευής αεροπορικών
εξαρτημάτων, στις CNC εργαλειομηχανές.

ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ - ΣΥΝΕΔΡΙΑ

24/6/2009-27/6/2009 Παρακολούθηση του 5ου εθνικού και διεθνούς
συνεδρίου της Ελληνικής Εταιρίας Συστημικών
Μελετών (ΕΕΣΜ), σε συνδιοργάνωση με το
τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του
Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης που
πραγματοποιήθηκε στην Ξάνθη, με θέμα "From
Systemic Thinking to Systems Design and
Systems Practice".
7/9/2012-8/9/2012 Παρακολούθηση του Επιστημονικού Διήμερου
«Κτίριο & Ενέργεια» που πραγματοποιήθηκε
στην Ξάνθη, και συνδιοργανώθηκε από το Τ.Ε.Ε.
Ανατολικής Μακεδονίας και το Τ.Ε.Ε. Θράκης.

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Αγγλικά Άριστο επίπεδο, πτυχία: Certificate of Proficiency
in English, University of Michigan, EDI Level 3
Certificate in ESOL International.

ΑΛΛΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

Γνώση και χρήση Η/Υ. Άριστη γνώση MS Office (Word, Excel, PowerPoint, Access, Project), εφαρμογών Internet, άριστη γνώση προγραμμάτων AutoCAD, Pro/Engineer, SolidWorks, CES Edupack (λογισμικό επιλογής υλικού και κατεργασίας για την κατασκευή προϊόντος), Top solid, COMSOL Multiphysics, CNC simulator, Matlab.

ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

Μουσική, κινηματογράφος, ταξίδια, επιστήμες