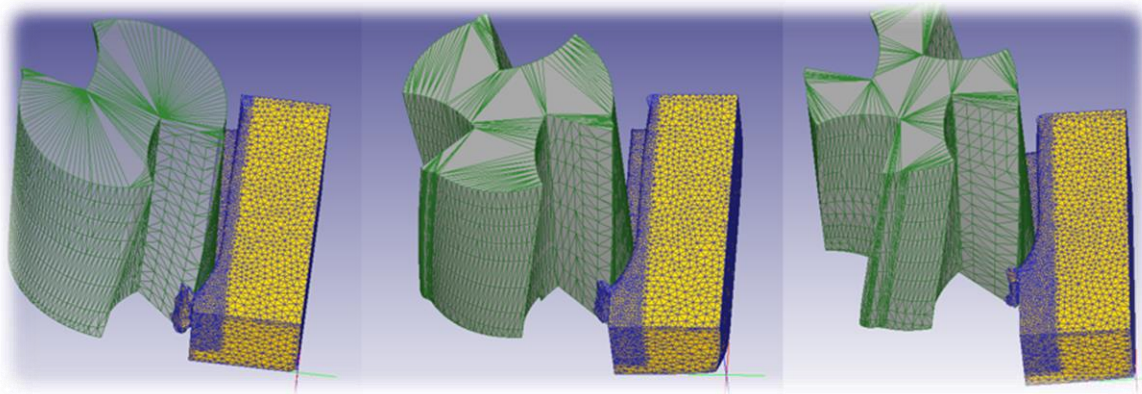




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η επίδραση του πλήθους των δοντιών κονδυλίου φραιζαρίσματος, στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες κατά την κατεργασία χάλυβα 1045.



Κωνσταντίνος Γαζέπης

A.E.M:2219

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Στέφανος Γεράρδης

ΚΟΖΑΝΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η επίδραση του πλήθους των δοντιών κονδυλίου φραιζαρίσματος, στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες κατά την κατεργασία χάλυβα 1045.

Κωνσταντίνος Γαζέπης

A.E.M:2219

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Στέφανος Γεράρδης

ΚΟΖΑΝΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην μελέτη της επίδρασης του πλήθους των δοντιών κονδυλίου φραιζαρίσματος κατά την κατεργασία χάλυβα AISI 1045 χωρίς την χρήση υγρού κοπής. Αρχικά παρατίθεται η θεωρία του φραιζαρίσματος και επεξηγούνται κάποιες βασικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία της εργασίας. Σχεδιάζονται τρία κοπτικά εργαλεία ίδιας διαμέτρου με διαφορετικό αριθμό δοντιών δύο, τρία και τέσσερα αντίστοιχα όπου στην συνέχεια με την βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM 3D) καταβάλλονται σε κατεργασία του δοκιμίου χάλυβα AISI 1045 υπό τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας. Ακολουθεί η διαδικασία εκτέλεσης της προσομοίωσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων και εικόνων. Τέλος, η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται συγκρίνοντας τις δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία στο κοπτικό και στο τεμάχιο, επίσης επεξηγούνται οι αξιοσημείωτες παρατηρήσεις και ο μηχανισμός λειτουργίας τους. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία παρέχει μια σφαιρική και λεπτομερή κατανόηση της επίδρασης του πλήθους των δοντιών σε κονδύλι φραιζαρίσματος κατά την κατεργασία χάλυβα AISI 1045, συνεισφέροντας στην προώθηση της επιστήμης και της τεχνολογίας σε αυτό τον τομέα.

Abstract

The present thesis aims to study the effect of the number of flutes on the milling cutter during the machining of AISI 1045 steel without the presence of cutting fluid. Initially, the theory of milling is presented, and some basic concepts that will be used throughout the work are explained. Three milling tools of the same diameter are designed with different numbers of flutes: two, three, and four, respectively. Subsequently, using finite element software (DEFORM 3D), simulations are performed on the machining of the AISI 1045 steel sample under the same machining conditions. The simulation process is described, and the results are presented in the form of diagrams and images. Finally, the thesis is concluded by comparing the forces and temperatures developed during machining on the cutter and the workpiece. Notable observations and their operating mechanisms are also explained. In this way, the thesis provides a comprehensive and detailed understanding of the effect of the number of flutes on the end mill during the machining of AISI 1045 steel, contributing to the advancement of science and technology in this field.

Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών από τον φοιτητή Κωνσταντίνο Γαζέπη, το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024 στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στην Κοζάνη. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον κύριο Στέφανο Γεράρδη επιβλέποντα της εργασίας και αξιόλογο καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, για την άριστη συνεργασία, την καθοδήγηση αλλά και για την υπομονή που επέδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής. Η συνεργασία μαζί του συνεπάγεται με απόκτηση νέων γνώσεων στον τομέα των κατεργασιών όπως επίσης και τη δημιουργία τρόπου σκέψης για την αντιμετώπιση των διαφόρων προβλημάτων. Ολοκληρώνεται ένας κύκλος σπουδών με την συγγραφή μιας διπλωματικής εργασίας, στον οποίο οφείλεις να ευχαριστήσεις όσους συνέβαλαν στην απόκτηση του πολυπόθητου για όλους δίπλωμα. Το ενδιαφέρον για νέες γνώσεις παραμένει αμείωτο και μετά την απόκτηση του διπλώματος. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια καθώς και στους φίλους μου που ήταν εκεί σε ότι και αν χρειάστηκα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
Σκοπός διπλωματικής	7
1. Εισαγωγή.....	8
2. Κατεργασίες κοπής.....	9
2.1 Γενικά	9
2.2 Κοπή	10
2.2.1 Χαρακτηριστικά κοπής.....	10
2.2.2 Κύριοι παράμετροι κατεργασίας.....	11
2.2.3 Δυνάμεις Κοπής	13
2.2.4 Θερμοκρασία και θερμότητα κατά την διαδικασία της κοπής	14
2.3 Φραιζάρισμα	16
2.3.1 Εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος.....	16
2.3.2 Ταξινόμηση εργαλειομηχανών και είδη φραιζαρίσματος	19
2.3.3 Κινηματική φραιζαρίσματος.....	23
2.3.4 Υγρά κοπής και οι εφαρμογές τους.....	24
2.3.5 Σχηματισμός αποβλίττου	26
2.4 Κοπτικά εργαλεία	30
2.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά	30
2.4.2 Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων (πλήθος δοντιών)	31
2.4.3 Υλικά κατασκευής κοπτικών.....	36
2.4.4 Κατασκευή κονδυλιών	41
2.4.5 Επικαλύψεις / Επενδύσεις κοπτικών	43
3. Μοντέλο προσομοίωσης.....	44
3.1 Περιγραφή των σταδίων προσομοίωσης.....	44
3.2 Λογισμικά.....	45
3.3 Σχεδιασμός κοπτικών SOLIDWORKS (CAD).....	45
3.4 Σχεδιασμός κατεργαζόμενου τεμαχίου SOLIDWORKS (CAD)	51
3.5 Υπολογισμός παραμέτρων κατεργασίας Microsoft Excel.....	54
4. Υπολογιστική μέθοδος προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων με χρήση DEFORM 3D.....	56
5. Αποτελέσματα	62

5.1 Κοπτικό δύο πτερυγίων	62
5.2 Κοπτικό τριών πτερυγίων.....	70
5.3 Κοπτικό τεσσάρων πτερυγίων.....	76
6. Συμπεράσματα	81
7. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	87
8. Βιβλιογραφία.....	88

Σκοπός διπλωματικής

Η μελέτη αυτή στοχεύει στην ενίσχυση των γνώσεων μας για την σωστή επιλογή αριθμού πτερυγίων κατά τον σχεδιασμό κονδυλίου φραιζαρίσματος και την καλύτερη κατανόηση της παραμέτρου αυτής . Η συνεχής μελέτη των κοπτικών εργαλείων στο φραιζάρισμα είναι διαδεδομένη για πολλούς λόγους. Καταρχάς, οι μηχανικοί και τεχνίτες στις μέρες μας, αντιμετωπίζουν μια ευρεία γκάμα υλικών και συνθηκών κατά το φραιζάρισμα, η επιλογή του σωστού εργαλείου μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα της κατεργασίας , του φινιρίσματος, την απόδοση της εργασίας και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Επίσης, η συνεχή εξέλιξη των υλικών και των τεχνολογιών κατασκευής απαιτεί τη διαρκή προσαρμογή και βελτίωση των κοπτικών εργαλείων προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση και ποιότητα κατά τη διαδικασία του φραιζαρίσματος. Επιπλέον, η ανάλυση και η βελτίωση των κοπτικών εργαλείων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής, αύξηση της παραγωγικότητας και βελτίωση της ασφάλειας στο εργασιακό περιβάλλον. Η συνεχής μελέτη και καινοτομία στον τομέα των κοπτικών εργαλείων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων τεχνολογιών και προϊόντων που θα προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και ανταγωνιστικότητα στον κλάδο της μηχανολογίας . Συνεπώς, η μελέτη και βελτίωση των κοπτικών εργαλείων κατά το φραιζάρισμα είναι απαραίτητη για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων και την προώθηση της επιστήμης και της τεχνολογίας στον τομέα της κατεργασίας υλικών. Η διερεύνηση της επίδρασης του πλήθους των δοντιών κονδυλίου φραιζαρίσματος στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες κατά την κατεργασία χάλυβα 1045 αποτελεί ένα περίπλοκο ερευνητικό ζήτημα με πολλαπλές πτυχές και εφαρμογές στη βιομηχανία και την επιστήμη των υλικών. Η κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού κατά τη διαδικασία κατεργασίας είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών και τεχνολογιών που θα οδηγήσουν σε βελτιωμένη ποιότητα, απόδοση και ανθεκτικότητα των κατασκευαστικών υλικών. Επιπλέον, η ανάλυση της επίδρασης του πλήθους των δοντιών κονδυλίου φραιζαρίσματος μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση των διεργασιών κατεργασίας. Επιπλέον, η συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας κατεργασίας χάλυβα απαιτεί συστηματική και λεπτομερή μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, με στόχο την παραγωγή υλικών που να πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις των σύγχρονων βιομηχανιών και εφαρμογών. Συνολικά, η μελέτη αυτή αποτελεί σημαντικό βήμα προς την κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων και την βελτίωση της απόδοσης των υλικών και γεωμετριών κατά την κατεργασία, προάγοντας την καινοτομία και την αειφορία στον τομέα της μηχανολογίας και της βιομηχανίας γενικότερα.

1. Εισαγωγή

Οι μηχανουργικές κατεργασίες εφαρμόζονται από την εποχή του 20.000 π.Χ. για την επιβίωση και την ενδυμασία του ανθρώπου. Κατά την πορεία του χρόνου, παρατηρείται σημαντική εξέλιξη στις μεθόδους και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μηχανουργικές διαδικασίες. Από τη λίθινη εποχή μέχρι την εποχή του χαλκού και την άνοδο των εργαλειομηχανών στον 21ο αιώνα, ο τομέας αυτός έχει σημειώσει συνεχή πρόοδο. Η τεχνολογία της κατεργασίας υπήρξε κινητήρια δύναμη της σύγχρονης οικονομίας από τη Βιομηχανική Επανάσταση (1770). Ειδικότερα, οι διαδικασίες διαμόρφωσης μετάλλων δημιούργησαν μηχανήματα και κατασκευές που επηρεάζουν σχεδόν κάθε πτυχή της ανθρώπινης ζωής μέχρι και σήμερα. Παρόλο που οι τεχνικές κατασκευής έχουν εξελιχθεί με τη πάροδο των χρόνων, πολλές διαδικασίες και σχεδιασμοί εργαλείων εξακολουθούν να βασίζονται στην εμπειρία και τη διαίσθηση. Υπάρχουν κυρίως δύο κατηγορίες κατασκευής στερεάς κατάστασης, οι κατεργασίες με πλαστική παραμόρφωση και οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Στην πρώτη, το τελικό προϊόν παράγεται με την πλαστική του παραμόρφωση από μια αρχική γεωμετρία σε μία τελική. Στην δεύτερη, οι διεργασίες κατεργασίας παράγουν το απαιτούμενο σχήμα με αφαίρεση επιλεγμένων περιοχών του τεμαχίου μέσω μιας διαδικασίας αφαίρεσης υλικού. Οι περισσότερες κατεργασίες επιτυγχάνονται με την καταπόνηση μιας τοπικής περιοχής του τεμαχίου με την σχετική κίνηση του εργαλείου και του τεμαχίου. Αν και η μηχανική ενέργεια είναι η συνήθης πηγή στις περισσότερες διεργασίες κατεργασίας, ορισμένες από τις νεότερες μεθόδους αφαίρεσης μετάλλων χρησιμοποιούν χημική, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.

2. Κατεργασίες κοπής

2.1 Γενικά

Οι μηχανουργικές κατεργασίες αποτελούν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών και διαδικασιών που εφαρμόζονται για τον μετασχηματισμό των υλικών με σκοπό τη δημιουργία επιθυμητών μορφών και χαρακτηριστικών. Αυτές οι κατεργασίες εφαρμόζονται σε μια ευρεία γκάμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών εφαρμογών, από την κατασκευή μικρών μηχανικών εξαρτημάτων έως την παραγωγή μεγάλων δομικών στοιχείων. Οι μηχανουργικές κατεργασίες περιλαμβάνουν διάφορες μεθόδους, όπως η κοπή, η διάτρηση, η σφυρηλασία, το φραιζάρισμα, η τórνευση, η λείανση, η κοπή με λέιζερ, και πολλές άλλες. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς και χρησιμοποιείται ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου.

Οι μηχανουργικές κατεργασίες είναι κρίσιμες για την κατασκευή ποικίλων προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων αυτοκινήτων, αεροπλάνων, πλοίων, μηχανημάτων, εξοπλισμού ηλεκτρικής και ηλεκτρονικής συσκευής, εξαρτημάτων ιατρικών συσκευών, και πολλών άλλων. Η εφαρμογή των σωστών μηχανουργικών κατεργασιών είναι κρίσιμη για την επίτευξη των απαιτούμενων προδιαγραφών ποιότητας, αντοχής και ακρίβειας στα τελικά προϊόντα. Επιπλέον, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών και η επικείμενη εισαγωγή νέων υλικών και διαδικασιών καθιστούν αυτό τον τομέα δυναμικό και αναπτυσσόμενο. Η διαδικασία της κατεργασίας με αφαίρεση υλικού χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή σχημάτων με υψηλή ανοχή διαστάσεων, καλό φινίρισμα επιφάνειας και συχνά με πολύπλοκη γεωμετρία. Η μηχανουργική κατεργασία με αφαίρεση υλικού είναι μια δευτερογενής κατεργασία, αφού συνήθως διεξάγεται σε ένα τεμάχιο που έχει παραχθεί από μια πρωτογενή διαδικασία κατεργασίας όπως θερμή έλαση, σφυρηλάτηση, χύτευση, κ.λπ. Περισσότερο από σχεδόν το ογδόντα τοις εκατό (80%) όλων των κατασκευασμένων εξαρτημάτων πρέπει να κατεργαστούν πριν ολοκληρωθούν.

Η σημασία των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού μπορεί να γίνει κατανοητή αν αναλογιστεί κανείς το συνολικό κόστος που συνδέεται με αυτή τη λειτουργία. Η σημαντικότητα της διαδικασίας κοπής μπορεί να εκτιμηθεί από την παρατήρηση ότι σχεδόν κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται στην κοινωνία, έχει μία ή περισσότερες κατεργασμένες επιφάνειες. Επομένως υπάρχουν διάφοροι λόγοι για την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης στην κοπή των υλικών.

- Μεγιστοποίηση διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων.
- Τα παραγόμενα προϊόντα είναι μεγαλύτερης διαστατικής ακρίβειας και καλύτερης τελικής επιφάνειας.
- Αύξηση του ρυθμού παραγωγής ενώ παράγεται μεγαλύτερος αριθμός και ποικιλία προϊόντων.
- Πράσινη αειφόρο ανάπτυξη με λιγότερα απόβλητα.

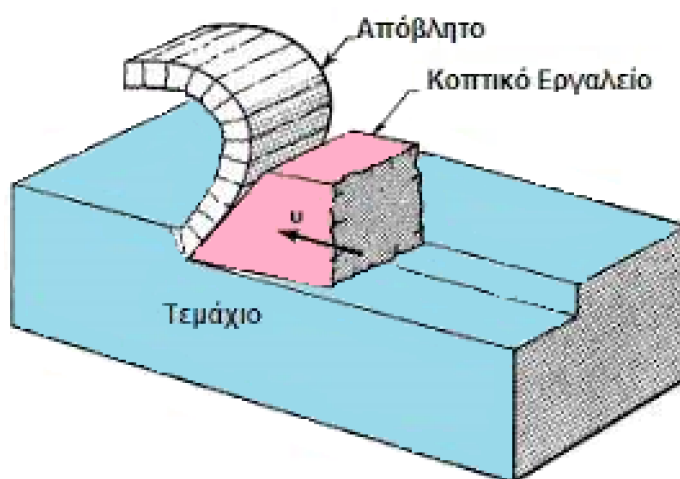
2.2 Κοπή

2.2.1 Χαρακτηριστικά κοπής

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή είναι:

- Κατεργαζόμενο Τεμάχιο
- Κοπτικό εργαλείο (σφήνα κοπής)
- Απόβλιττο (αφαιρούμενο υλικό)

Οι βασικοί συντελεστές παρουσιάζονται στην (εικόνα 1):



Εικόνα 1: Οι κυριότεροι παράγοντες της κοπής

Το κοπτικό εργαλείο κινείται σε προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα v , ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται το απόβλιττο που κινείται στην κεκλιμένη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου μετά από την πλαστική παραμόρφωσή του.

Με σφήνα ευθύγραμμης ακμής προσομοιάζεται το κοπτικό εργαλείο το οποίο κινείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο έτσι ώστε με κάθε πέρασμα να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πλάτους και πάχους με την αντίστοιχη μορφή αποβλίττου κάθε φορά.

Στο κοπτικό εργαλείο διακρίνουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως :

Επιφάνεια αποβλίττου: Είναι η κεκλιμένη επιφάνεια της σφήνας, στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο κατά την ώθηση του.

Επιφάνεια ελευθερίας : Είναι η επιφάνεια στο κάτω μέρος της σφήνας πάνω από την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου.

Κόψη: Είναι η τομή των δύο παραπάνω επιφανειών, έτσι σχηματίζεται η ακμή κοπής. Η κόψη μπορεί να έχει διαφορετική γεωμετρία κάθε φορά ανάλογα με το μέγεθος των γωνιών μεταξύ των επιφανειών του κοπτικού. Η επιλογή των γωνιών επηρεάζει σημαντικά την κοπή.

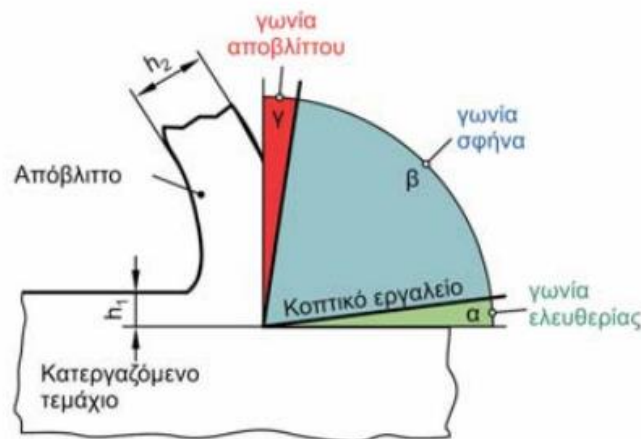
Γωνία ελευθερίας α : Σχηματίζεται από την κατεργασμένη επιφάνεια και την επιφάνεια ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου.

Γωνία σφήνας β : Σχηματίζεται από την επιφάνεια ελευθερίας και από την επιφάνεια αποβλίπτου.

Γωνία αποβλήτου γ : Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίπτου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του κοπτικού εργαλείου. Μπορεί οι τιμές της να είναι θετικές, αρνητικές ή μηδέν.

Επίσης ισχύει ότι:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$



Εικόνα 2 : βασικές έννοιες κοπής

2.2.2 Κύριοι παράμετροι κατεργασίας

Η ταχύτητα κοπής V (cutting velocity): Η περιστροφή της κεφαλής με τα κοπτικά πλακίδια, σε άξονα κάθετο στη διεύθυνση της πρόωσης, αποτελεί την βασική κίνηση της κοπής. Η ταχύτητα κοπής V ορίζεται ως το γινόμενο $V = \pi \cdot D \cdot N$, όπου D είναι η εξωτερική διάμετρος της κεφαλής και N είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Οι ταχύτητες κοπής συνήθως κυμαίνονται σε ένα εύρος της τάξης 0.1~4 m/s, με τις χαμηλότερες τιμές να εφαρμόζονται σε σκληρά υλικά που είναι δύσκολο να κατεργαστούν και τις υψηλότερες τιμές σε μη σιδηρούχα και εύκολα κατεργάσιμα υλικά όπως το αλουμίνιο. Μετράται σε m/min ή m/s και υποδηλώνει την επιφανειακή ταχύτητα με την οποία η κοπτική ακμή κατεργάζεται το τεμάχιο. Είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει το κοπτικό

εργαλείο και αποτελεί μέρος των δεδομένων κοπής που διασφαλίζει ότι η διεργασία διεξάγεται αποδοτικά και εντός των αποδεκτών προδιαγραφών για το υλικό του κοπτικού εργαλείου.

Η ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής N σε rpm (spindle speed): προσδιορίζει τον αριθμό των περιστροφών που πραγματοποιεί η κεφαλή σε κάθε λεπτό. Είναι μια παράμετρος που συνδέεται με το μηχάνημα καθαυτό και προσδιορίζεται από την προτεινόμενη ταχύτητα κοπής για μια διεργασία.

Η πρόωση ανά λεπτό f_m σε mm/min (feed per minute): είναι η πρόωση του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Εναλλακτικά χρησιμοποιείται και η **πρόωση ανά περιστροφή f_r (feed per revolution)**, η οποία μετράται σε mm/rev και είναι μια τιμή που χρησιμοποιείται ειδικά για υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με την πρόωση και συχνά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ικανότητας αποπεράτωσης ενός κοπτικού. Είναι μια βοηθητική τιμή που προσδιορίζει πόσο πολύ μετακινείται το κοπτικό εργαλείο κατά την περιστροφή. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η **πρόωση ανά δόντι f_z (feed per tooth)**, η οποία είναι μια τιμή στο φραιζάρισμα για τον υπολογισμό της πρόωσης του τραπεζιού. Υπολογίζεται από τις μέγιστες προτεινόμενες τιμές του πάχους των αποβλίττων. Συνήθως κυμαίνεται σε τιμές της τάξης 0.05~0.5 mm/tooth, όπου οι χαμηλότερες τιμές χρησιμοποιούνται σε περάσματα φινιρίσματος.

Γενικότερα ισχύουν οι εξής σχέσεις για τις προώσεις:

- $f_r = f_z * z$ όπου z είναι το πλήθος δοντιών του κοπτικού
- $f_m = f_z * z * N = f_r * N$ όπου N είναι η περιστροφική ταχύτητα της κεφαλής

Το αξονικό βάθος κοπής σε mm (Depth of cut): ορίζεται ως η απόσταση στην οποία τοποθετείται το κοπτικό εργαλείο παράλληλα με τον άξονα περιστροφής του.

Το ακτινικό βάθος κοπής σε mm (average chip thickness h_m): ορίζεται ως η απόσταση στην οποία τοποθετείται το κοπτικό εργαλείο μέσα στο τεμάχιο κάθετα ως προς τον άξονα περιστροφής του εργαλείου.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης αποβλίττου σε mm^3/s (removal rate): εκφράζει τον όγκο του υλικού που απομακρύνεται στην μονάδα του χρόνου και μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τις τιμές της πρόωσης, το βάθος και το πλάτος κοπής.

Ο χρόνος κοπής ή αλλιώς περίοδος του κοπτικού εργαλείου (machining time ή period of cutter engagement): που υπολογίζεται ως το μήκος κατεργασίας προς την πρόωση.

Η ειδική δύναμη (Specific cutting force): Η δύναμη που απαιτείται για την απομάκρυνση ενός αποβλίττου υλικού, διαστάσεων $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Σχετίζεται με το κατεργαζόμενο υλικό καθώς και με τον ρυθμό πρόωσης και την ταχύτητα κοπής.

2.2.3 Δυνάμεις Κοπής

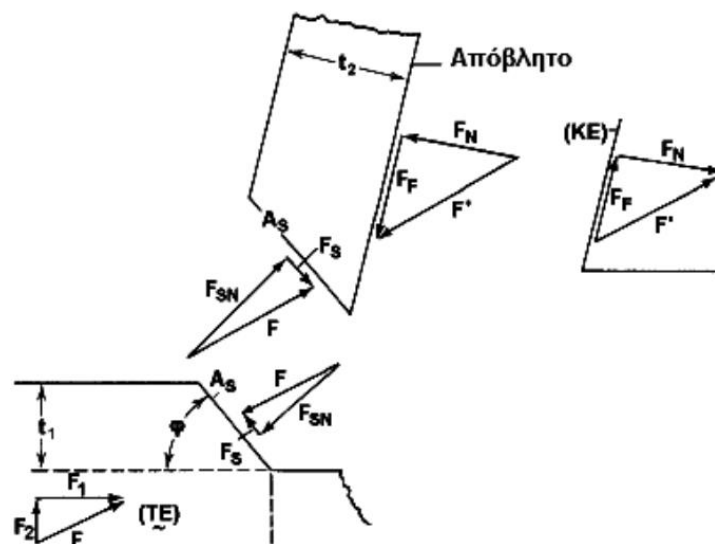
Το απόβλητο θεωρείται ένα σώμα ελεύθερο και στερεό που οριακά βρίσκεται σε ισορροπία και ταυτόχρονα σε αλληλεπίδραση με το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο. Οι δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό από το κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο είναι :

FS :η αντίσταση του υλικού του τεμαχίου σε διάτμηση.

FSN :η κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης (δηλ. κάθετη στην FS).

FF :η δύναμη τριβής στην επιφάνεια κοπτικού εργαλείου και αποβλίττου που αντιτίθεται στην κίνηση του αποβλίττου.

FN :η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής κοπτικού εργαλείου και αποβλίττου (δηλ. κάθετη στην FF). Στην επόμενη εικόνα φαίνονται παραστατικά οι δυνάμεις .



Εικόνα 3 : Δυνάμεις κοπής

Αν F είναι η συνισταμένη των FS και FSN και F' η συνισταμένη των FF και FN , θα πρέπει να ισχύει για την ισορροπία του αποβλίττου: $F=F'$

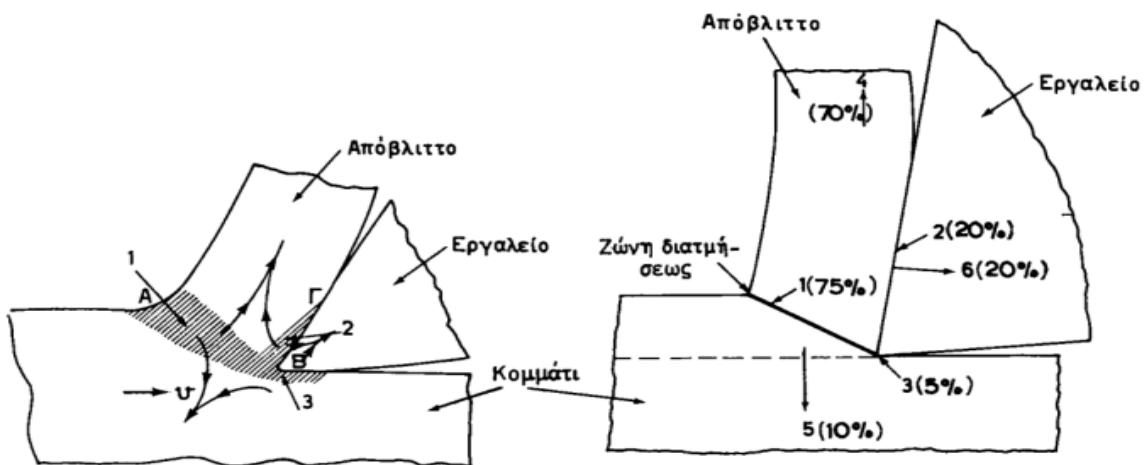
Η F' ονομάζεται δύναμη κοπής και αν μεταφερθεί στην ακμή του κοπτικού εργαλείου, μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα ζεύγη δυνάμεων:

- FS και FSN
- FF και FN
- F_1 (οριζόντια - κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής) και F_2 (κάθετη στην F_1 - δύναμη άπωσης)

Οι δυνάμεις κατά την τρισδιάστατη κοπή αναλύονται σε τρεις συνιστώσες με την ίδια λογική.

2.2.4 Θερμοκρασία και θερμότητα κατά την διαδικασία της κοπής

Η ολική ενέργεια που καταναλώνεται δαπανάται κυρίως σε δυο περιοχές για να πραγματοποιηθεί η κατεργασία ενός μεταλλικού τεμαχίου. Στη ζώνη διάτμησης (1) και στη ζώνη τριβής (2) Υπάρχει όμως ακόμα μια τρίτη ζώνη, όχι τόσο σημαντική όσο οι δυο προηγούμενες. Αυτή είναι η επιφάνεια (3), όπου εφάπτεται η ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου με το προς κατεργασία κομμάτι. Στη ζώνη αυτή καταναλώνεται ενέργεια τόσο για το σχηματισμό της κατεργασμένης επιφάνειας του κομματιού όσο, για την υπερνίκηση της τριβής που αναπτύσσεται στη ζώνη αυτή, περισσότερο όταν το εργαλείο έχει μεγάλη φθορά στην ελεύθερη επιφάνειά του. Διότι η μηχανική ενέργεια που διαθέτουμε κατά τη διαδικασία της κοπής μετατρέπεται σχεδόν πλήρως σε θερμότητα, καθώς χρησιμοποιείται τόσο για την πλαστική παραμόρφωση του υλικού στη ζώνη διάτμησης όσο και για την υπερνίκηση της τριβής στη ζώνη τριβής και στη ζώνη επαφής μεταξύ του εργαλείου και του κομματιού. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι οι τρεις περιοχές όπου δαπανάται ενέργεια κατά τη διάρκεια της κοπής λειτουργούν ως πηγές θερμότητας. Στο σχήμα δεξιά παρατηρούμε τον κατανομή της παραγόμενης θερμότητας σε προσεγγιστικά ποσοστά στις τρεις αυτές περιοχές, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτή η θερμότητα μεταφέρεται στα απόβλιττα, το εργαλείο και το κομμάτι. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας παράγεται στη ζώνη διάτμησης και κυμαίνεται περίπου από 65% έως 80%. Επιπλέον, περίπου το 75% της συνολικής θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής απορροφάται από τα απόβλιττα.



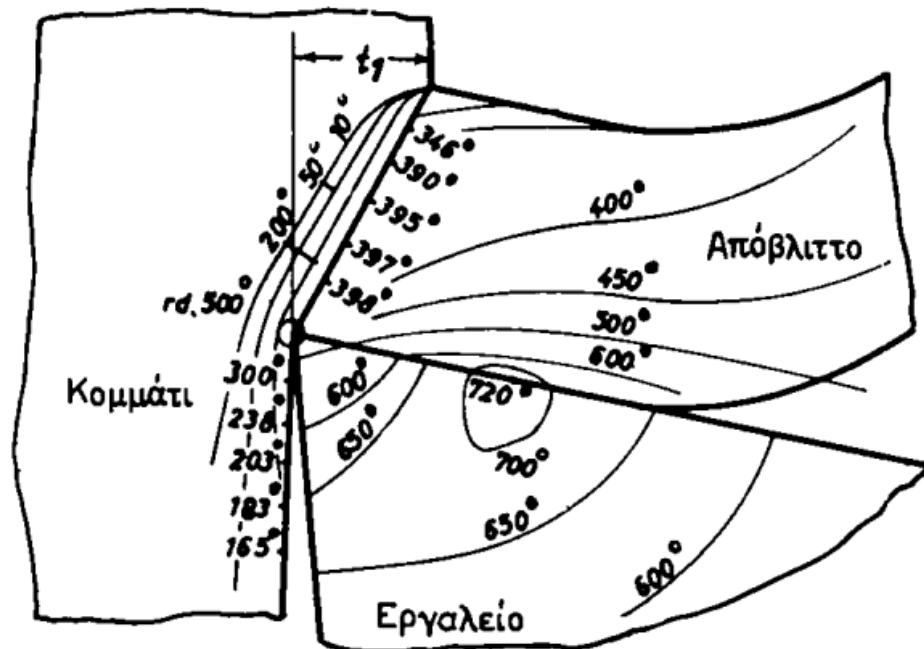
Εικόνα 4 : Θερμότητα κατά την κοπή

Λόγω της σημαντικής ποσότητας θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της κοπής των μετάλλων, αναπτύσσονται στις περιοχές 1, 2 και 3, όπως προαναφέρθηκε, αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με την κάθε κοπή που πραγματοποιείται. Οι αυξημένες αυτές θερμοκρασίες έχουν κυρίως δύο αποτελέσματα: α) την μείωση του ορίου διαρροής του μετάλλου, πράγμα που καθιστά την κοπή πιο αποτελεσματική, και β) τη φθορά του κοπτικού

εργαλείου, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν κυρίως οι θερμοκρασίες που εκδηλώνονται στη ζώνη τριβής, η οποία σχετίζεται σημαντικά με τη φθορά του εργαλείου. Η μέση θερμοκρασία σε αυτή τη ζώνη, όπως έχει πειραματικά και θεωρητικά αποδειχθεί, εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του υλικού που υποβάλλεται σε κοπή (ειδική θερμότητα, πυκνότητα, θερμική αγωγιμότητα, ειδική αντίσταση στην κοπή), η ταχύτητα κοπής και η θεωρητική διατομή του αποβλήτου. Ειδικότερα, η μέση θερμοκρασία αυξάνεται όσο αυξάνονται η ταχύτητα κοπής, η θεωρητική διατομή του αποβλήτου και η ειδική αντίσταση στην κοπή του υλικού που κόβεται, ενώ μειώνεται όσο μειώνονται η ειδική θερμότητα, η πυκνότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή των θερμοκρασιών στο απόβλιττο, στο εργαλείο και στο κομμάτι για την κατάσταση της κοπής ενός χάλυβα, όπως αυτή αναφέρεται στο παραπάνω κείμενο. Βασισμένοι σε αυτή την κατανομή των θερμοκρασιών, καθώς και σε αντίστοιχες μελέτες για άλλα πειράματα, μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής δύο σημαντικά συμπεράσματα:

Οι θερμοκρασίες είναι σημαντικά υψηλότερες στο εργαλείο σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στο απόβλιττο και, φυσικά, στο κομμάτι.

Συνήθως, οι μέγιστες θερμοκρασίες αναπτύσσονται στο μέσο περίπου του μήκους επαφής κοπτικού και αποβλήτου.



Εικόνα 5 : θερμοκρασίες κατά την κοπή

2.3 Φραιζάρισμα

Το φραιζάρισμα είναι μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού κατά την οποία η κοπή πραγματοποιείται με την χρήση περιστρεφόμενων κεφαλών με πολλαπλά κοπτικά πλακίδια ή με την χρήση ενός ενιαίου περιστρεφόμενου εργαλείου (κονδύλι) με πολλαπλές κοπτικές ακμές. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο στερεώνεται στη τράπεζα της μηχανής φραιζαρίσματος (φραιζομηχανή ή φραιζα) και η κεφαλή μετακινείται μέχρι τα κοπτικά πλακίδια να μπορούν να διεισδύσουν στο τεμάχιο και να αφαιρέσουν υλικό από την επιφάνειά του. Ανάλογα με το είδος της μηχανής φραιζαρίσματος που χρησιμοποιείται, το εργαλείο και/ή το κατεργαζόμενο τεμάχιο μπορούν να μετατοπιστούν κατά μήκος και να περιστραφούν γύρω από ένα πλήθος αξόνων που προκαθορίζουν και τον τύπο της μηχανής (3 αξόνων, 5 αξόνων κλπ.).

Κατά την διαδικασία του φραιζαρίσματος κάθε κοπτική ακμή ενός κοπτικού εργαλείου αφαιρεί τμήμα από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το οποίο αποβάλλεται με την μορφή αποβλίττου. Η βασική αρχή λειτουργίας μιας εργαλειομηχανής φραιζαρίσματος βασίζεται στο γεγονός ότι το κοπτικό εργαλείο μετακινείται ενάντια στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας σχετική κίνηση, πλήρως ελεγχόμενη, ανάμεσα στο τεμάχιο και την περιστρεφόμενη κεφαλή, με την κοπή να επιτυγχάνεται εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου μπροστά στο κοπτικό πλακίδιο.

Το φραιζάρισμα κατατάσσεται στις διακοπτόμενες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, δηλαδή αυτές όπου το κοπτικό και το τεμάχιο δεν έχουν συνεχή επαφή. Λόγω αυτής της διακοπτόμενης διαδικασίας κοπής, οι κοπτικές ακμές των εργαλείων υπόκεινται σε ένα κύκλο που περιλαμβάνει κρουστικές δυνάμεις και θερμικές καταπονήσεις σε κάθε περιστροφή. Επομένως η επιλογή του υλικού καθώς και η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αντέχουν σε αυτές τις συνθήκες .

Με την μηχανουργική κατεργασία του φραιζαρίσματος κατεργάζονται πληθώρα τεμαχίων από διάφορα υλικά όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος και συνθετικά υλικά , με επιφάνειες διαφόρων μορφών επίπεδες ή καμπύλες με εσοχές ή εξοχές ακόμα και οδοντωτοί τροχοί (γρανάζια). Στα τεμάχια αρχικά γίνεται εκχόνδριση και έπειτα φινίρισμα (αποπεράτωση), όταν απαιτείται πολύ καλή τελική επιφάνεια, σαν τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η τεχνική της λείανσης, όπου και αυτή κατατάσσεται στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού με την μόνη διαφορά ότι το κοπτικό εργαλείο (λείαντικός δίσκος) είναι μη καθορισμένης γεωμετρίας.

2.3.1 Εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος

Η πρώτη εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος στον κόσμο εφευρέθηκε από τον Eli Whitney γύρω στο 1818. Ήταν ικανή να πραγματοποιήσει τόσο χειρωνακτικές κατεργασίες όσο και μερικώς αυτοματοποιημένες. Ωστόσο με την αυξανόμενη εκβιομηχάνιση, οι εργαλειομηχανές

φραιζαρίσματος έγιναν πιο ισχυρές και απέκτησαν μεγαλύτερη ακρίβεια στις διάφορες κατεργασίες, με τις πρώτες εργαλειομηχανές μαζικής παραγωγής να εμφανίζονται γύρω στο 1900.

Τα πρώτα αυτοματοποιημένα κέντρα κατεργασίας τα οποία ήταν ικανά να πραγματοποιήσουν ολοκληρωμένα προγράμματα εμφανίστηκαν γύρω στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Αυτό σήμαινε πλέον ότι οι χειριστές των εργαλειομηχανών δεν χρειαζόταν να πραγματοποιούν κάθε βήμα της κατεργασίας χειρωνακτικά, γεγονός που μείωσε ραγδαία τους χρόνους κατεργασίας και πολλά από τα λάθη εξαιτίας του ανθρώπινου παράγοντα. Η άφιξη των μοντέρνων υπολογιστών και της βελτιωμένης τεχνολογίας στις κατεργασίες θα δώσει την δυνατότητα πλέον όλο και περισσότεροι άνθρωποι να μπορούν να πραγματοποιήσουν απλές κατεργασίες φραιζαρίσματος χωρίς να απαιτείται προηγούμενη εκπαίδευσή τους .

Οι εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους: τις κάθετες φραιζομηχανές, τις οριζόντιες φραιζομηχανές και τα κέντρα κατεργασίας. Αναλυτικότερα:

Οι κάθετες φραιζομηχανές (vertical milling machines): είναι πολύ διαδεδομένες στην βιομηχανία και στα εκπαιδευτικά ιδρύματα λόγω της ευκολίας εγκατάστασης και χρήσης τους. Διαθέτουν έναν κάθετα διατεταγμένο άξονα πάνω στον οποίο βρίσκεται το κοπτικό εργαλείο και μια οριζόντια τράπεζα, πάνω στην οποία συγκρατείται το τεμάχιο. Ο άξονας πάνω στον οποίο βρίσκεται το κοπτικό εργαλείο μπορεί να μετατοπιστεί στην κατακόρυφη διεύθυνση και να εκτελεί λειτουργίες όπως η διάτρηση και η κοπή .

Οι οριζόντιες φραιζομηχανές (horizontal milling machines): χρησιμοποιούνται κυρίως στην βαριά βιομηχανία. Διαθέτουν έναν οριζόντια διατεταγμένο άξονα και αυτός ο σχεδιασμός είναι ευνοϊκότερος για την πραγματοποίηση περιφερικού φρεζαρίσματος σε τεμάχια κυβικής γεωμετρίας.

Κέντρα κατεργασίας (CNC milling machines): Τα κέντρα κατεργασίας είναι φραιζομηχανές στις οποίες η πορεία κοπής ελέγχεται από αλφαριθμητικά δεδομένα και όχι από χειρωνακτικές ρυθμίσεις του χειριστή. Μπορούν να πραγματοποιήσουν όλες τις συνήθεις κατεργασίες καθώς και πολύ συνθετότερες στις οποίες απαιτείται ταυτόχρονος έλεγχος δύο ή τριών αξόνων ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη πορεία κοπής.

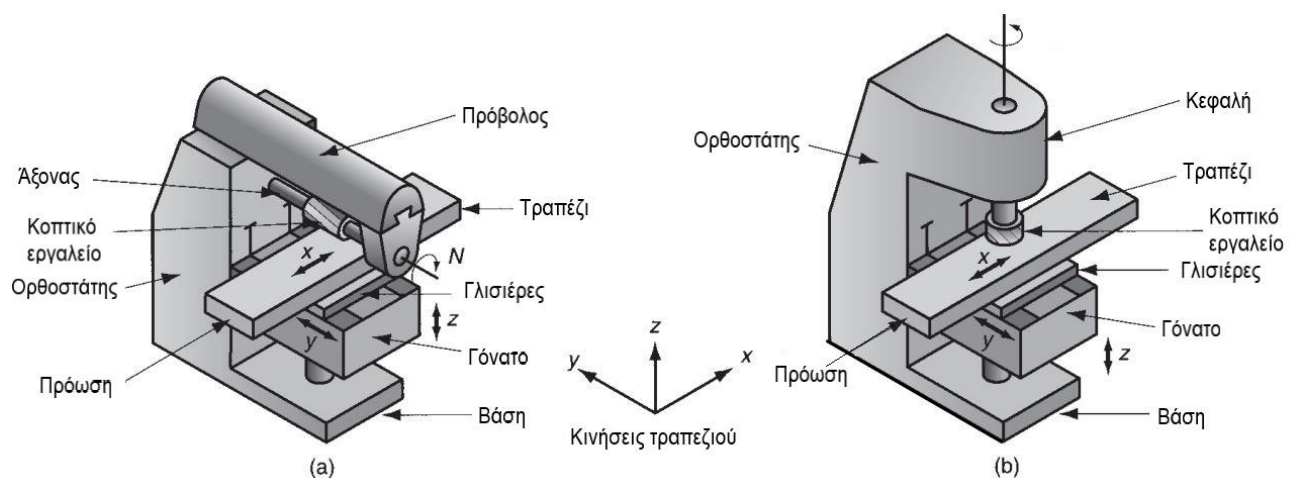
Η βασική δομή μιας φραιζομηχανής (περιγράφει καλύτερα τις οριζόντιες και τις κάθετες φραιζομηχανές) αποτελείται από την βάση, τον κορμό ή ορθοστάτη, την κύρια άτρακτο και τέλος το συγκρότημα του τραπέζιου.

Η βάση (base): είναι το τμήμα έδρασης και μεταφοράς κατ'επέκταση των φορτίων από την μηχανή στο έδαφος και φιλοξενεί πληθώρα άλλων μηχανισμών. Σε αυτήν συγκρατείται και ο κορμός ή ορθοστάτης, ο οποίος στηρίζεται σε ένα από τα άκρα της. Υπάρχει επίσης μια έδραση πάνω από την κύρια βάση, η οποία συνδέεται και με τον κορμό και χρησιμεύει ως το τραπέζι συγκράτησης. Πάνω στο τραπέζι συγκράτησης και με την βοήθεια διάφορων ιδιοσυσκευών πραγματοποιείται η συγκράτηση των τεμαχίων.

Ο κορμός ή ορθοστάτης (column): αποτελεί σημαντικό δομικό και λειτουργικό τμήμα της φραιζομηχανής καθώς σε αυτόν συνδέεται η βάση και στηρίζεται η κύρια άτρακτος και κατά συνέπεια η περιστρεφόμενη κεφαλή. Στο εσωτερικό του εντοπίζονται συνήθως τα κιβώτια ταχυτήτων που απαιτούνται για την κίνηση της περιστρεφόμενης κεφαλής και την κίνηση του συστήματος του τραπέζιού συγκράτησης του τεμαχίου.

Κύρια άτρακτος (spindle head): Η κύρια άτρακτος μιας φραιζομηχανής είναι το εξάρτημα αυτό στο άκρο της οποίας στερεώνεται η περιστρεφόμενη κεφαλή και επιτρέπει την περιστροφική κίνηση.

Συγκρότημα τραπέζιού (worktable): Η σωστή σύσφιξη και συγκράτηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την κατεργασία του. Το τεμάχιο θα πρέπει να στερεωθεί σταθερά στη τράπεζα της μηχανής και θα πρέπει να αντέχει στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία. Ο τύπος της συγκράτησης εξαρτάται τόσο από το είδος της τράπεζας όσο και από το είδος και την γεωμετρία του τεμαχίου που θα τοποθετηθεί. Το τεμάχιο μπορεί να σταθεροποιηθεί είτε συγκρατώντας το απευθείας στη τράπεζα με ειδικούς σφιγκτήρες είτε συγκρατώντας το κάνοντας χρήση μιας μέγγενης. Μια πιο σπάνια μέθοδος συγκράτησης του τεμαχίου είναι κάνοντας χρήση τράπεζας κενού. Η τράπεζα κενού είναι μια κομψή αλλά ακριβή εναλλακτική συγκράτησης που αποτελείται από μία διάτρητη τράπεζα και μια αντλία κενού που αναρροφά το τεμάχιο στη θέση του. Το μόνο που απαιτείται για να στερεωθεί το τεμάχιο είναι να τοποθετηθεί στη τράπεζα και να τεθεί σε λειτουργία η αντλία κενού. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως αυτή η τεχνική λειτουργεί μόνο με τεμάχια που έχουν μια επίπεδη κάτω πλευρά.



Εικόνα 6: Αριστερά οριζόντια φραιζομηχανή, δεξιά μια κάθετη φραιζομηχανή

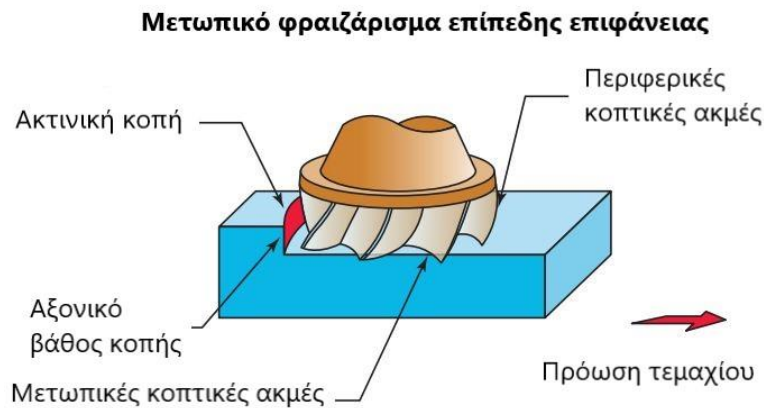


Εικόνα 7: Ένα σύγχρονο κέντρο κατεργασίας (CNC)

2.3.2 Ταξινόμηση εργαλειομηχανών και είδη φραιζαρίσματος

Οι διαδικασίες φραιζαρίσματος διαχωρίζονται σε τέσσερις κύριες οικογένειες ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το είδος του κοπτικού που χρησιμοποιείται και το πώς αυτό προωθείται σε σχέση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτές είναι:

Μετωπικό φραιζάρισμα (face milling ή profiling): Στο μετωπικό φραιζάρισμα ο άξονας περιστροφής της κεφαλής με τα κοπτικά εργαλεία διατηρείται συνεχώς κάθετος με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σε αυτή την περίπτωση η κοπή πραγματοποιείται από κοπτικές ακμές τόσο στην εξωτερική περιφέρεια της κεφαλής όσο και στο εμπρός πρόσωπό της. Οι κατεργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν κάνοντας χρήση μεγαλύτερων ταχυτήτων κοπής, ενώ το πάχος αποβλίττου έχει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με το περιφερικό φραιζάρισμα που θα αναλυθεί στην συνέχεια, γεγονός που συμβάλλει σε μειωμένη ειδική αντίσταση κατά την κοπή.



Εικόνα 8 : Απεικόνιση μετωπικού φραιζαρίσματος

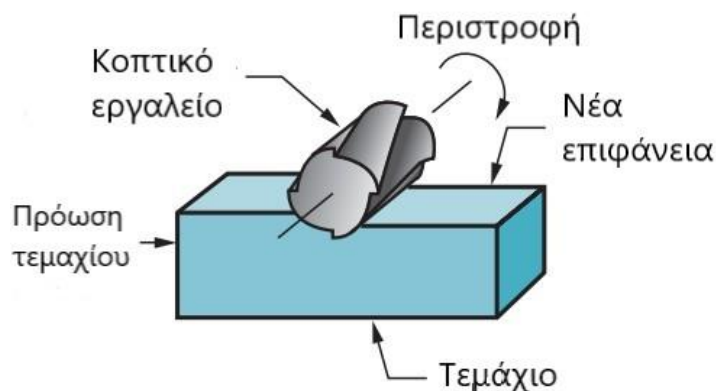
Το μετωπικό φραιζάρισμα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικούς τύπους κοπτικών εργαλείων:

Κοπτήρες μετωπικού φραιζαρίσματος (Face milling cutters): απομακρύνουν το περισσότερο υλικό ανά λεπτό και από τους τρεις τύπους που θα περιγράψουν. Χαρακτηρίζονται από γρήγορη αντικατάσταση στις περιστρεφόμενες κεφαλές και ευκολία ελέγχου της γεωμετρίας του κοπτήρα. Κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβες ταχείας κοπής (HSS) ή από καρβίδια.

Κονδυλοφόρα εργαλεία ή κονδύλια (End Milling Cutters ή End mills): Ορισμένα κονδυλοφόρα εργαλεία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μετωπικό φραιζάρισμα καθώς έχουν κοπτικές ακμές τόσο πλευρικά όσο και στην απόληξή τους. Επίσης, όταν η απόληξή τους έχει την κατάλληλη μορφή, ορισμένα κονδύλια μπορούν να διεισδύσουν απευθείας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, παρόμοια με την κατεργασία της διάτρησης. Τα κονδύλια με δύο ή με τέσσερις κοπτικές ακμές είναι τα συνηθέστερα. Κονδύλια με τρεις κοπτικές ακμές μπορούν επίσης να εντοπιστούν και χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατεργασία υλικών όπως το αλουμίνιο. Περιορισμένος αριθμός κονδυλοφόρων εργαλείων κατασκευάζονται από HSS κοβαλτίου, το οποίο είναι ελαφρώς σκληρότερο από τους κανονικούς χάλυβες HSS, ωστόσο είναι αισθητά ακριβότερα. Αυτό το επιπλέον κόστος για τα κονδύλια HSS κοβαλτίου τις περισσότερες φορές δεν δικαιολογείται εύκολα, εκτός από τις περιπτώσεις στις οποίες τα απλά καρβίδια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς οι κοπτικές τους ακμές σπάνε.

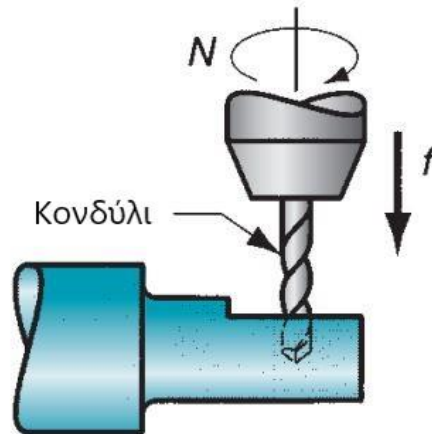
Ενιαία κοπτικά εργαλεία (Fly cutters): Πρόκειται για ένα ενιαίο κοπτικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται όταν μία πολύ μεγάλη επιφάνεια απαιτείται να είναι απόλυτα επίπεδη και να έχει ένα τέλειο φινίρισμα. Θεωρούνται φθηνά κοπτικά, ωστόσο έχουν πολύ αργό ρυθμό απομάκρυνσης υλικού.

Περιφερικό φραιζάρισμα (peripheral milling): Στο περιφερικό φραιζάρισμα ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου διατηρείται συνεχώς παράλληλος με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται από κοπτικές ακμές στην εξωτερική περιφέρεια της κεφαλής. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κοπτικό εργαλείο είναι τα κονδύλια.



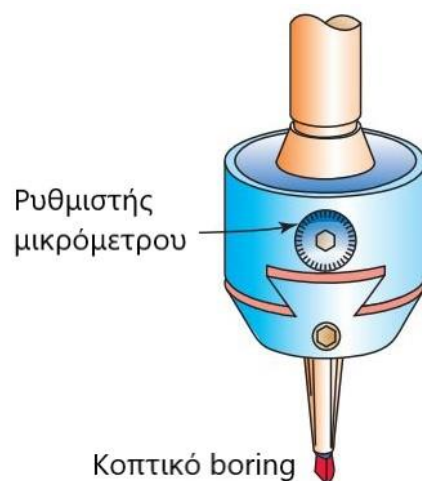
Εικόνα 9: Απεικόνιση περιφερικού φρεζαρίσματος

Διάτρηση (Drilling): Η δημιουργία οπών με διάτρηση στις εργαλειομηχανές φραιζαρίσματος πραγματοποιείται όταν η ανοχή θέσης της οπής είναι μικρότερη από την ανοχή ενός απλού δρόπανου. Και εδώ τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι τα κονδύλια.



Εικόνα 10 : Απεικόνιση διάτρησης

Διάνοιξη κυκλικής εσοχής (Boring): Πρόκειται για την δημιουργία οπών μεγάλης ακρίβειας χρησιμοποιώντας εξειδικευμένη ρυθμιζόμενη κεφαλή η οποία επιτρέπει την τοποθέτηση ενός εξωτερικού μικρομέτρου. Αρχικά πραγματοποιείται εκχόνδριση της βασικής οπής και στην συνέχεια πραγματοποιούνται περάσματα φινιρίσματος προωθώντας το εργαλείο εξωτερικά προς μεγαλύτερη διάμετρο.



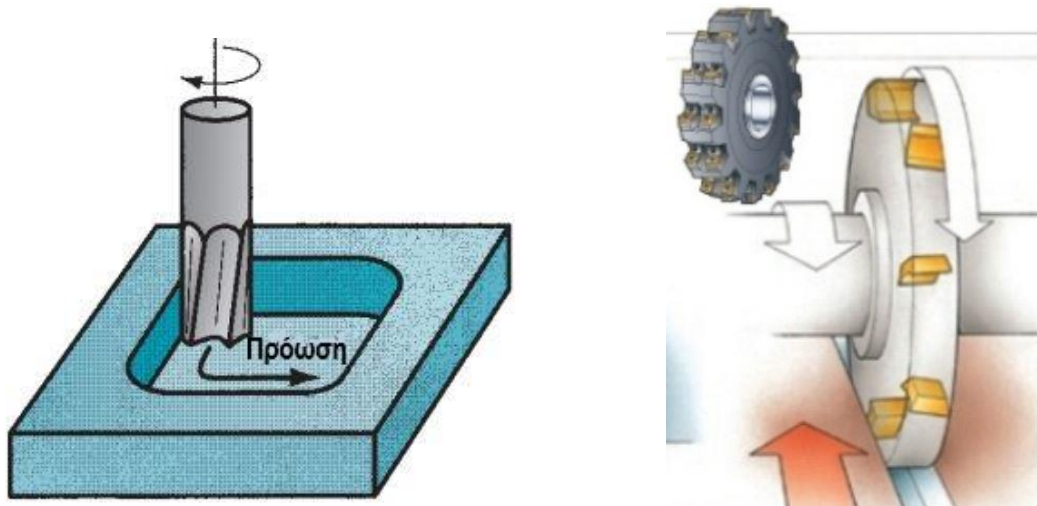
Εικόνα 11: Απεικόνιση μιας τυπικής ρυθμιζόμενης κεφαλής boring με ενσωματωμένο μικρόμετρο

Εκτός από τις τέσσερις αυτές βασικές κατηγορίες φραιζαρίσματος που αναφέρθηκαν, θα μπορούσε να γίνει διαφοροποίηση και σε άλλες επιμέρους κατηγορίες με βάση την μορφή της διαμόρφωσης που πρόκειται να πραγματοποιηθεί.

Οι βασικότερες από αυτές είναι:

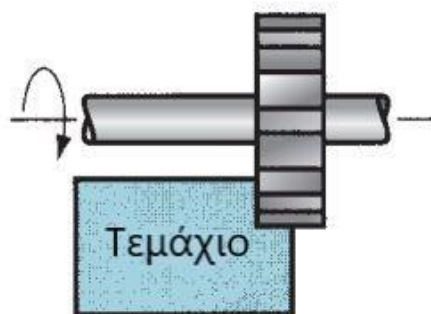
Το φραιζάρισμα εγκοπής ή αλλιώς φραιζάρισμα με κονδυλοφόρα εργαλεία (slotting milling):

Σε αυτή την περίπτωση το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερο από το πλάτος του τεμαχίου. Χρησιμοποιείται για την δημιουργία εγκοπών στο τεμάχιο. Πολύ λεπτές εγκοπές μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας πολύ λεπτά κοπτικά εργαλεία. Το τεμάχιο μπορεί ακόμα να κοπεί σε δύο κομμάτια πραγματοποιώντας μία πολύ λεπτή εγκοπή σε όλο το βάθος του τεμαχίου. Κόβοντας το τεμάχιο με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το λεγόμενο **φραιζάρισμα αποκοπής ή πριόνισμα**.



Εικόνα 12: Αριστερά απεικονίζεται ένα φραιζάρισμα εγκοπής και δεξιά ένα φραιζάρισμα αποκοπής

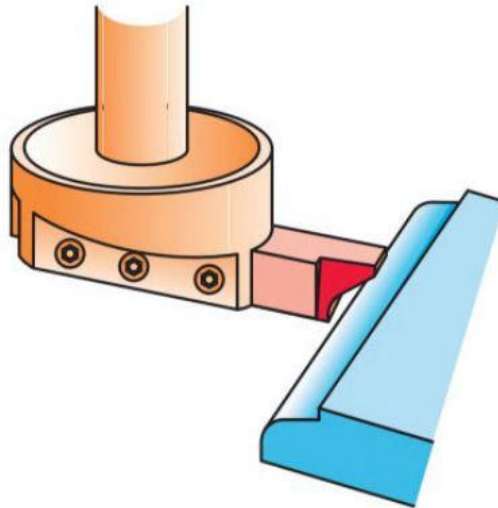
Πλάγιο φραιζάρισμα (side milling): Το κοπτικό εργαλείο επιτρέπει το φραιζάρισμα στα πλάγια του τεμαχίου. Παραλλαγή αυτού είναι και το **αμφίρροπο πλάγιο φραιζάρισμα (straddle milling)** με την διαφορά ότι η κατεργασία συμβαίνει ταυτόχρονα και στις δύο πλάγιες πλευρές του τεμαχίου.



Εικόνα 13: Απεικόνιση πλάγιου φραιζαρίσματος

Φραιζάρισμα μορφής (profile milling): Σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου αποκτά την μορφή που του αποτυπώνεται από το εργαλείο μορφής.

Σε όλες τις μηχανές φραιζαρίσματος το εσωτερικό ή εξωτερικό ακτινικό κόψιμο για παράδειγμα (στρογγύλεμα ακμών) πραγματοποιείται κάνοντας χρήση κοπτικών εργαλείων που έχουν αντίστοιχη διαμόρφωση.



Εικόνα 14: Απεικόνιση μιας από τις συνηθέστερες κατεργασίες φραιζαρίσματος μορφής

2.3.3 Κινηματική φραιζαρίσματος

Κατά το περιφερικό φραιζάρισμα το κατεργαζόμενο τεμάχιο μπορεί να προωθείται με φορά είτε ίδια (ομόρροπο φραιζάρισμα) είτε αντίθετη με τη φορά περιστροφής του κοπτικού εργαλείου (αντίρροπο φραιζάρισμα) και αυτό επηρεάζει την μορφολογία της εκκίνησης και του τέλους της κοπής.

Στο ομόρροπο φραιζάρισμα, η φορά της πρόωσης του τεμαχίου είναι ίδια με την φορά περιστροφής της κεφαλής με τα κοπτικά εργαλεία. Το πάχος του αποβλίττου θα αρχίσει σταδιακά να μειώνεται από την έναρξη της κοπής έως ότου γίνει μηδενικό στο τέλος αυτής. Το κοπτικό ξεκινάει την κοπή αφαιρώντας αρχικά το μέγιστο πάχος αποβλίττου. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το φαινόμενο του "καψίματος" (burnishing effect), όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες λόγω τριβής, χωρίς παράλληλα ύπαρξη πλαστικής παραμόρφωσης. Το μεγάλο πάχος αποβλίττου είναι πλεονεκτικό και οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται τείνουν να ωθούν το τεμάχιο προς το κοπτικό, διατηρώντας το κοπτικό στην κοπή.

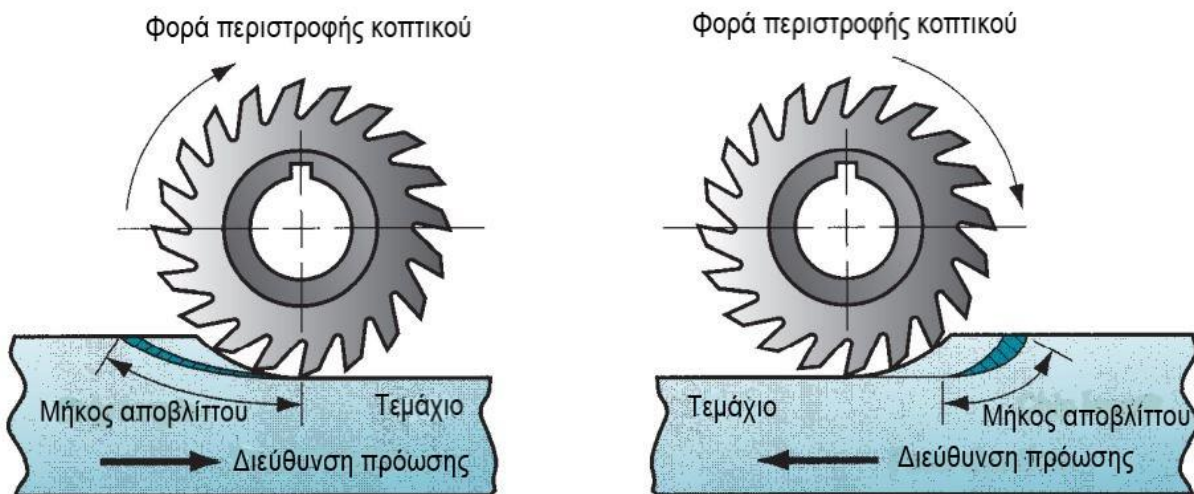
Στο αντίρροπο φραιζάρισμα η φορά της πρόωσης του τεμαχίου είναι αντίθετη με την φορά περιστροφής της κεφαλής. Το πάχος του αποβλίττου ξεκινά από μηδενικό στην εκκίνηση της κοπής και αυξάνεται βαθμιαία μέχρι το τέλος της κοπής. Με αυτόν τον τρόπο όμως αναπτύσσονται έντονες δυνάμεις κοπής που τείνουν να απωθούν το κοπτικό από το τεμάχιο. Έτσι το κοπτικό θα πρέπει να

εξαναγκαστεί προς κοπή, δημιουργώντας όμως το φαινόμενο του "καψίματος", με συχνή επακόλουθη συνέπεια την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και την τελική επιφάνεια να έχει υποστεί σκλήρυνση. Επιπρόσθετα οι δυνάμεις που αναπτύσσονται τείνουν να σηκώσουν το τεμάχιο από το τραπέζι συγκράτησής του.

Κατά το φραιζάρισμα, συχνά τα απόβλιττα επικάθονται ή ακόμα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και δυνάμεων, συγκολλούνται στην κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου (σχηματισμός ψευδόκοψης) και παραμένουν εκεί μέχρι την αρχή του επόμενου κύκλου κοπής. Στο αντίρροπο φραιζάρισμα το απόβλιττο μπορεί εύκολα να παγιδευτεί ανάμεσα στο κοπτικό και το τεμάχιο, κατάσταση η οποία μπορεί να οδηγήσει στη θραύση του κοπτικού. Στο ομόρροπο φραιζάρισμα ένα αντίστοιχο απόβλιττο θα μπορούσε να κοπεί στα δύο και να μην βλάψει την κοπτική ακμή.

Για αυτούς τους λόγους το ομόρροπο φραιζάρισμα προτιμάται όπου το είδος της κατεργασίας, η τοποθέτηση και το τεμάχιο το επιτρέπουν. Ωστόσο το ομόρροπο φραιζάρισμα θέτει ορισμένες απαιτήσεις από τη διαδικασία, καθώς οι δυνάμεις που αναπτύσσονται τείνουν να συμπαρασύρουν το κοπτικό εργαλείο, ενώ ταυτόχρονα συγκρατούν το τεμάχιο προς τα κάτω.

Αυτό απαιτεί από τη φραιζομηχανή, να μπορεί ανά πάσα στιγμή να κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις στη πρόωση του τραπεζιού ώστε να αντισταθμίζει αυτές τις μετατοπίσεις. Ακόμη, όταν το κοπτικό εργαλείο διεισδύει στο τεμάχιο, η πρόωση αυξάνεται ακούσια, γεγονός το οποίο μερικές φορές μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικό πάχος αποβλίττου και θραύση της κοπτικής ακμής. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να προτιμάται το αντίρροπο φραιζάρισμα.



Εικόνα 15: Αριστερά παρουσιάζεται το αντίρροπο φραιζάρισμα και δεξιά το ομόρροπο

2.3.4 Υγρά κοπής και οι εφαρμογές τους

Κατά τη διαδικασία της κοπής μετάλλων, δημιουργείται μεγάλη ποσότητα θερμότητας λόγω της έντονης τριβής που συμβαίνει. Δυστυχώς, ο περιβάλλοντας αέρας δεν είναι αποτελεσματικό ως

ψυκτικό μέσο λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του. Ενώ μπορεί να είναι αρκετός για ελαφριές εργασίες, σε πιο απαιτητικές εργασίες που προκαλούν υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ο αέρας αποδεικνύεται ανεπαρκής.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιούνται ψυκτικά υγρά, τα οποία έχουν την ικανότητα να μειώνουν τη θερμοκρασία γρήγορα και αποτελεσματικά. Τα ψυκτικά αυτά υγρά προσφέρουν επιπρόσθετα πλεονεκτήματα, όπως τη μείωση της τριβής μεταξύ του εργαλείου και του υλικού που κόβεται, καθώς και την επέκταση της διάρκειας ζωής του εργαλείου.

Τα ψυκτικά υγρά είναι το κύριο είδος ψυκτικών μέσων που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές. Ωστόσο, υπάρχουν και ψυκτικά μέσα σε αέρια και σε στερεή μορφή, ανάλογα με τις προδιαγραφές της κάθε εργασίας. Μερικά παραδείγματα ψυκτικών είναι τα παρακάτω:

Νερό: έχει πολύ καλή ικανότητα διασποράς και είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Ωστόσο μπορεί να δημιουργήσει σκουριά σε μηχανικά μέρη και δεν έχει καλή δράση ως λιπαντικό.

Νερό με λάδι : Μια μικρή ποσότητα λαδιού αναμιγνύεται με την κατάλληλη ποσότητα νερού ώστε να δημιουργηθεί ένα γαλάκτωμα με ικανοποιητική ψυκτική ικανότητα αλλά και λίπανση. Αυτό είναι ένα ημι-συνθετικό ψυκτικό και χρησιμοποιείται στις κατεργασίες σε μεγάλο βαθμό.

Λάδι: Το λάδι κοπής βασίζεται σε ορυκτέλαιο σε συνδυασμό με ποσότητα φυτικών ελαίων. **Χημικά υγρά:** Είναι ενώσεις με βάση το νερό σε συνδυασμό με οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Στερεά και ημιστερεά λιπαντικά. Αυτά τα λιπαντικά έχουν την μορφή πάστας, χρησιμοποιούνται κυρίως σε χειρωνακτικές κατεργασίες και εφαρμόζονται είτε στο τεμάχιο, είτε στο κοπτικό εργαλείο.

Αέρας: Ο συμπιεσμένος αέρας περνάει μέσα από σωλήνες και απελευθερώνεται μέσω ενός ακροφυσίου στην περιοχή της κατεργασίας. Ο αέρας με την μεγάλη ταχύτητα που έχει απομακρύνει τα γρέζια και καθαρίζει την περιοχή της κατεργασίας. Ο συμπιεσμένος αέρας είναι πιο αποτελεσματικός από τον απλό αέρα του περιβάλλοντος αλλά κάποιες φορές για βέλτιστο αποτέλεσμα προστίθενται υγρά και ο συνδυασμός τους απελευθερώνεται σε μια μορφή ομίχλης.

Ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί φραιζάρισμα με απουσία του υγρού κοπής.

Εξαιτίας των επιπτώσεων που τα υγρά κοπής έχουν στο περιβάλλον, στην υγεία των εργαζομένων και στην οικονομία, έχει αρχίσει μια διαδικασία για τη μείωσή τους, αν όχι την εξάλειψή τους. Παρόλο που η εκτεταμένη χρήση υγρών κοπής μπορεί να διευκολύνει την εργασία με θετικά αποτελέσματα, η μαζική χρήση εκατομμυρίων λίτρων χημικών ετησίως αποτελεί κίνδυνο τόσο για την υγεία των εργαζομένων στον κατασκευαστικό τομέα όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος. Γι' αυτόν τον λόγο, η δημιουργία μιας ισορροπημένης παραγωγής που είναι ταυτόχρονα καθαρή και αποδοτική, έχει γίνει εξαιρετικά σημαντική.

2.3.5 Σχηματισμός αποβλίττου

Το είδος του αποβλίττου που σχηματίζεται κατά την κοπή επηρεάζει σημαντικότερα τόσο την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας όσο και οολόκληρη την κατεργασία. Το είδος του αποβλίττου που σχηματίζεται εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως :

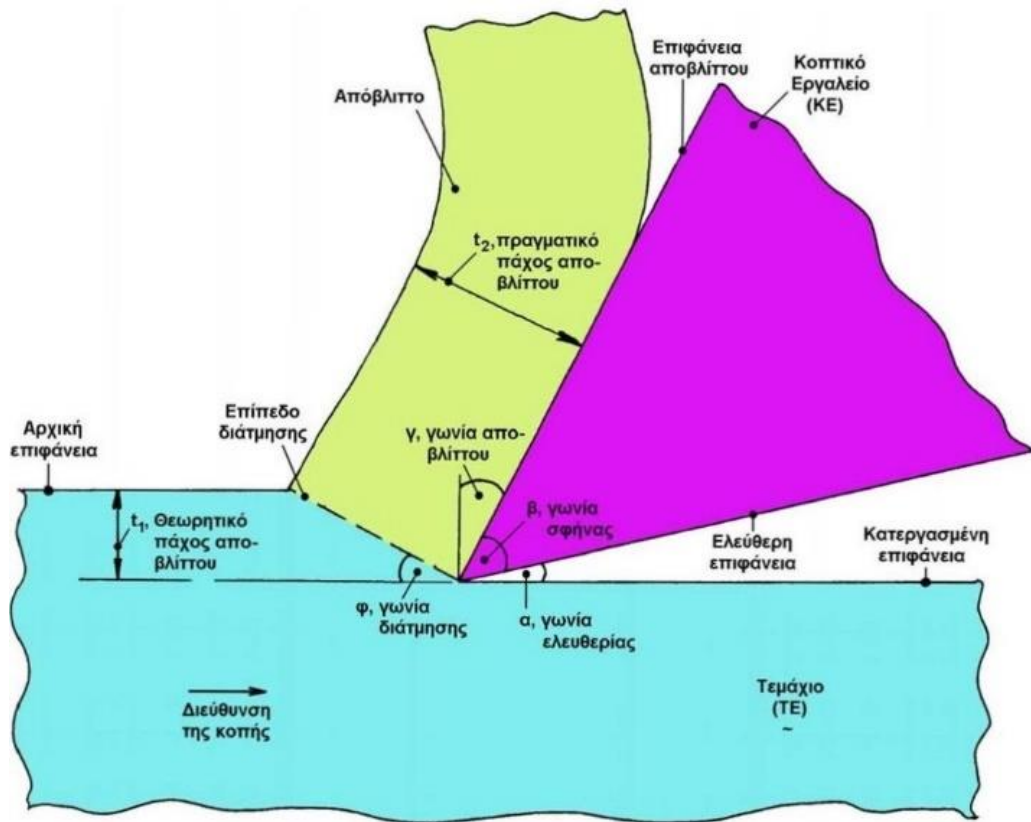
- Ταχύτητα κοπής
- Το βαθμό φθοράς του κοπτικού εργαλείου
- Το υλικού κατασκευής του κομματιού, ψαθυρό ή όλκιμο
- Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου
- Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής

Τα χαρακτηριστικά του αποβλίττου :

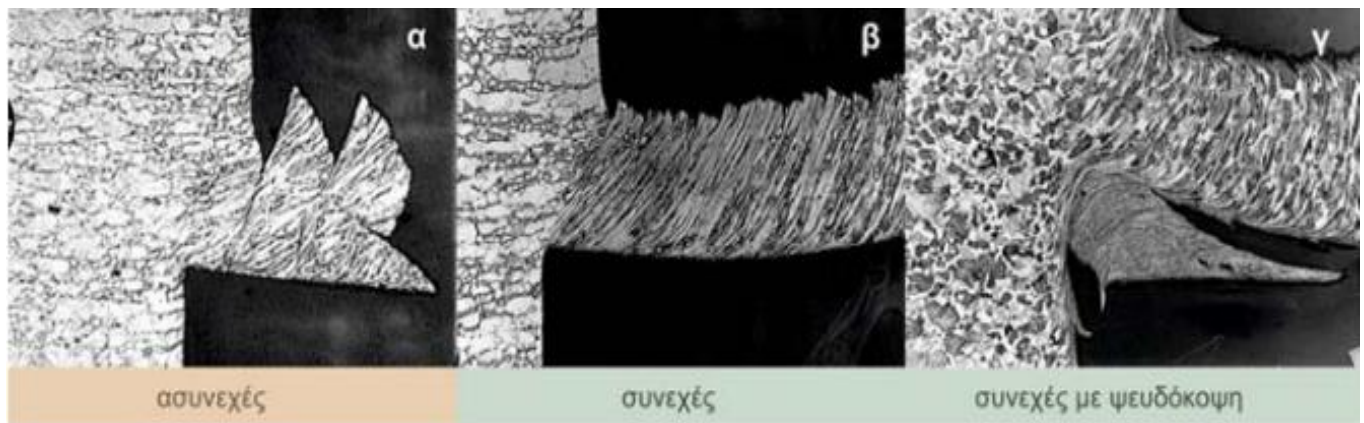
- Πραγματική διατομή αποβλίττου $A_2 = b \cdot t_2$.
- Πλάτος αποβλίττου, b .
- Θεωρητικό πάχος αποβλίττου, t_1 : Είναι το αναιρούμενο πάχος υλικού.
- Πραγματικό πάχος αποβλίττου, t_2 : Είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλιττο μετά την κοπή.
- Θεωρητική διατομή αποβλίττου, $A_1 = b \cdot t_1$.
- Τα απόβλιττα ποικίλουν σε μορφή και μέγεθος ανάλογα με την κατεργασία, μπορεί να είναι μακριά και ευθύγραμμα, σπειροειδή ή και μικρά κομμάτια. Βέβαια διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, ασυνεχές απόβλιττο , συνεχές και συνεχές με ψευδόκοψη.

Τα τρία διαφορετικά είδη αποβλίττων, Σύμφωνα με την κατάταξη του Ernst είναι :

Ασυνεχές απόβλιττο: Σχηματίζεται από μικρά τμήματα που είναι στερεά ή χαλαρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Συνήθως δημιουργείται κατά την κοπή ψαθυρών μετάλλων όπως ο χυτοσίδηρος και ο ορείχαλκος. Ωστόσο είναι δυνατός ο σχηματισμός του και κατά την κοπή μετάλλων και κραμάτων τους. Το απόβλιττο αυτό δεν έχει συνοχή και θραύεται ευκολά. Οι συνθήκες που οδηγούν σε τέτοιου είδους απόβλιττο αφορούν το υλικό κατασκευής που περιέχει ξένες προσμίξεις ή ασυνέχειες, κοπή με πολύ υψηλές ή χαμηλές ταχύτητες, μεγάλο βάθος κοπής με μικρή γωνία αποβλίττου, μικρή στιβαρότητα της εργαλειομηχανής και απουσία υγρών κοπής. Λόγω του ασυνεχούς χαρακτήρα του αποβλίττου οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται δεν είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Συνεπώς, είναι δυνατόν να προκληθούν κραδασμοί στην εργαλειομηχανή που επηρεάζουν δυσμενώς τόσο την ποιότητα της επιφάνειας όσο και την ακρίβεια των τελικών διαστάσεων του παραγομένου τεμαχίου.



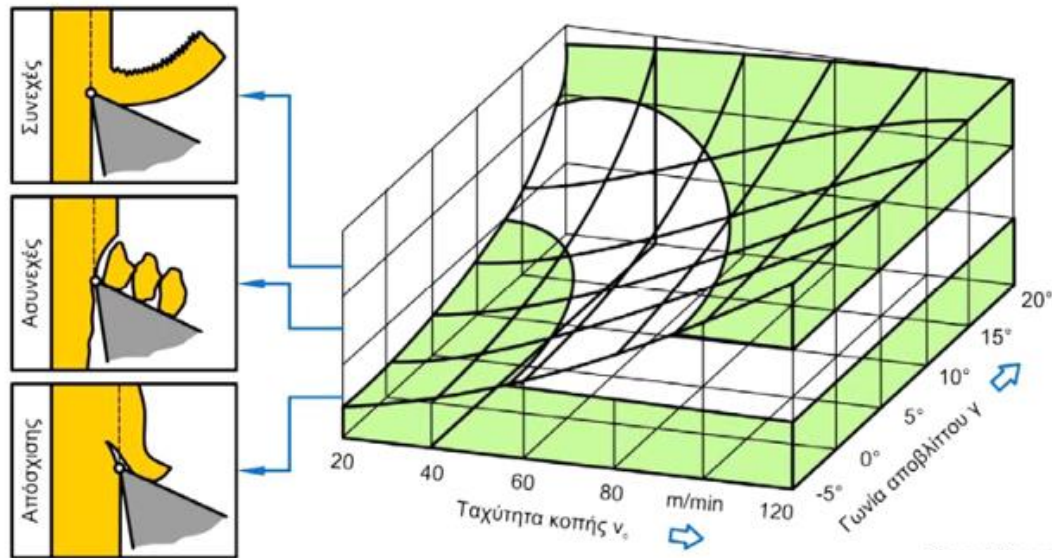
Εικόνα 16 : θεμελιώδης έννοιες αποβλίττου



Εικόνα 17 : Βασικές κατηγορίες αποβλίττου

Συνεχές απόβλιττο : Η δημιουργία του συγκεκριμένου είδους αποβλίττου είναι επιθυμητή διότι δημιουργεί επιφάνειες καλής ποιότητας. Σχετίζεται με σωστές δυνάμεις κοπής, καταναλισκόμενης ισχύος και αυξάνει την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Ωστόσο παρόλα τα θετικά του, δημιουργεί πρόβλημα στην κοπή, κυρίως σε ταχείες αυτόματες εργαλειομηχανές (CNC). Αυτό συμβαίνει επειδή το απόβλιττο αυτοσυστρεφόμενο περιελίσσεται γύρω από το κοπτικό εργαλείο με αποτέλεσμα να εμποδίζει την ροή του υπολοίπου αποβλίττου και την καταστροφή της τελικής

επιφάνειας λόγω τριβής, γι' αυτό απαιτείται διακοπή λειτουργίας της εργαλειομηχανής για καθαρισμό από τα απόβλιττα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία κατάλληλα διαμορφωμένα που προκαλούν την θραύση του συνεχούς αποβλίττου και έτσι καθίσταται δυνατή η απρόσκοπτη λειτουργία της μηχανής. Ευνοϊκές συνθήκες για την δημιουργία συνεχούς αποβλίττου είναι η μεγάλη ταχύτητα κοπής, μικρή πρόωση και μεγάλη γωνιά αποβλίττου.

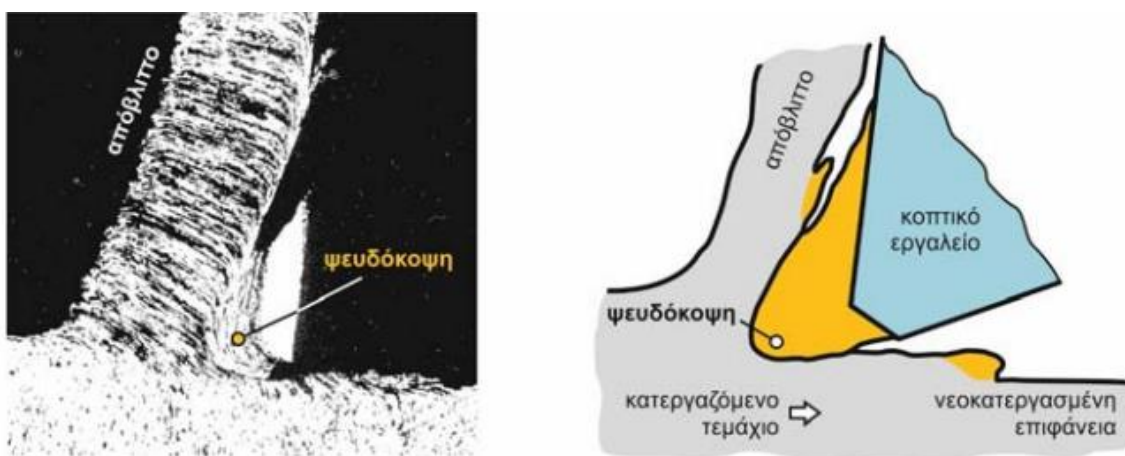


Εικόνα 18 : Επίδραση ταχύτητας και γωνίας αποβλίττου

Η ταχύτητα κοπής επηρεάζει σημαντικά την δημιουργία αποβλίττου, μεταβάλλοντας την γωνία διάτμησης και επιδρώντας στο όριο διαρροής του υλικού μέσω της ταχύτητας παραμόρφωσης. Ακόμα, η γωνία αποβλίττου επηρεάζει σημαντικά την μορφή του διότι προδιαγράφει την πορεία που θα ακολουθήσει κατά το σχηματισμό του και είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ελάχιστη πλαστική παραμόρφωση που πρέπει να υποστεί το δοκίμιο. Με την αύξηση την γωνίας αποβλίττου μειώνεται η απαιτούμενη πλαστική παραμόρφωση και σαν αποτέλεσμα οι συνθήκες σχηματισμού του αποβλίττου είναι πιο ομαλές. Όπως φαίνεται και στην εικόνα όσο η ταχύτητα κοπής και η γωνία αποβλίττου αυξάνονται τόσο το αποβλιττο τείνει να έχει την συνεχή επιθυμητή μορφή.

Συνεχές απόβλιττο με ψευδόκοψης: Η ψευδόκοψη δημιουργείται κατά την κοπή από επαναλαμβανόμενα λεπτά στρώματα στην ακμή του κοπτικού και πρόκειται για ένα σφηνοειδές ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του δοκιμίου. Η ψευδόκοψη διατηρείται προσκολλημένη στην επιφάνεια του αποβλίττου και στην κοπτική ακμή με αποτέλεσμα να αυξάνεται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Η κοπή συνεχίζεται κανονικά και όταν φτάσει σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος αναλόγως των συνθηκών, τα ρινίσματα που βρίσκονται στην κορυφή της, όντας τα πιο ασταθή αποκολλώνται και παρασύρονται είτε στο απόβλιττο που ρέει είτε στην νέα επιφάνεια του τεμαχίου. Καθώς εξελίσσεται η κατεργασία, τμήματα της ψευδόκοψης μένουν

στην νεοσχηματισμένη επιφάνεια πράγμα που είναι επιβαρυντικό για την ποιότητα της επιφάνειας αυτής. Όταν ευνοείται η δημιουργία συγκολλητών μικροδεσμών μεταξύ του αποβλίττου και της επιφάνειας αποβλίττου του εργαλείου, τότε οι συνθήκες είναι τέτοιες που βοηθούν στην ανάπτυξη της ψευδόκοψης. Στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης, οι ορθές τάσεις στην περιοχή τριβής εργαλείου-αποβλίττου έχουν μεγάλες τιμές και ταυτόχρονα μεγάλη τιμή έχει και ο συντελεστής τριβής. Η νεοσχηματισμένη επιφάνεια του αποβλίττου, δημιουργεί μικροδεσμούς με το κοπτικό εργαλείο και καθώς το απόβλιττο κινείται, η απελευθέρωση αυτών των μικροδεσμών μεταφέρει το υλικό από το μαλακό απόβλιττο προς το σκληρότερο κοπτικό εργαλείο. Η παρουσία ψευδόκοψης πέρα από την αρνητική επιρροή που έχει στην κατεργασμένη επιφάνεια επηρεάζει και το κοπτικό εργαλείο είτε αρνητικά είτε θετικά, αναλόγως των συνθηκών. Συνήθως η ψευδόκοψη προστατεύει το κοπτικό εργαλείο διότι αναλαμβάνει εκείνη να κόβει το υπό κατεργασία τεμάχιο και όχι η κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου. Βέβαια, υπάρχει και η περίπτωση η ψευδόκοψη να φθείρει το εργαλείο στην επιφάνεια αποβλίττου του με το μηχανισμό της απόξεσης. Συμπερασματικά η παρουσία της ψευδόκοψης δεν είναι επιθυμητή και έχει αρνητικά αποτελέσματα όπως αύξηση της γωνίας αποβλίττου αφού ο κοπή πλέον γίνεται με την ψευδόκοψη αντί για την ακμή του εργαλείου, μείωση της επιφάνειας επαφής μεταξύ εργαλείου αποβλίττου, μείωση της ποιότητας της νεοκατεργασμένης επιφάνειας, διαφοροποίηση των προβλεπόμενων ανοχών διαστάσεων και της μορφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου, αύξηση της φθοράς κοπτικού εργαλείου λόγω της απόξεσης, αυξημένες ταλαντώσεις και τέλος επηρεάζονται αρνητικά οι μηχανικές και φυσικές ιδιοτήτων της νεοσχηματισμένη επιφάνειας. Κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας μπορούν να ελέγξουν την δημιουργία ή όχι, της ψευδόκοψης, αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής, χρήση εργαλείου με μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου, μείωση της πρόωσης και χρήση κατάλληλου υγρού κοπής.



Εικόνα 19 : Κοπή με ψευδόκοψη

2.4 Κοπτικά εργαλεία

2.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Το υλικό και η γεωμετρία του κοπτικού είναι δύο σημαντικές πτυχές στη δημιουργία εργαλείων κοπής. Στις μέρες μας, τα εργαλεία κοπής είναι κατασκευασμένα από ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως διαμάντι, κυβικό βοριονίτη, σκληρομέταλλα, ανθρακούχους χάλυβες και ταχυχάλυβες. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι διάφορα υλικά έχουν μοναδικές ιδιότητες και ότι κάθε τύπος υλικού έχει διαφορετική ιδανική εφαρμογή. Οι ακόλουθες ιδιότητες πρέπει να υπάρχουν σε ένα εργαλείο κοπής:

Σκληρότητα: Το υλικό το οποίο αποτελείται το κοπτικό εργαλείο πρέπει να είναι σκληρότερο από το υλικό του τεμαχίου. Η μεγάλη σκληρότητα του κοπτικού το ευνοεί να εισχωρήσει στο τεμάχιο, πολλές φορές όμως τα σκληρά εργαλεία είναι και εύθραυστα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψιν ειδικά αν δέχεται και κρουστικά φορτία. Η φθορά του κοπτικού συνδέεται επίσης με παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής.

Θερμή σκληρότητα: Όταν το υλικό του κοπτικού διατηρεί σκληρότητα και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Όταν το εργαλείο χρησιμοποιείται σε υψηλές ταχύτητες κοπής η λειτουργία αυτή είναι πολύ χρήσιμη και ενισχύει την παραγωγικότητα .

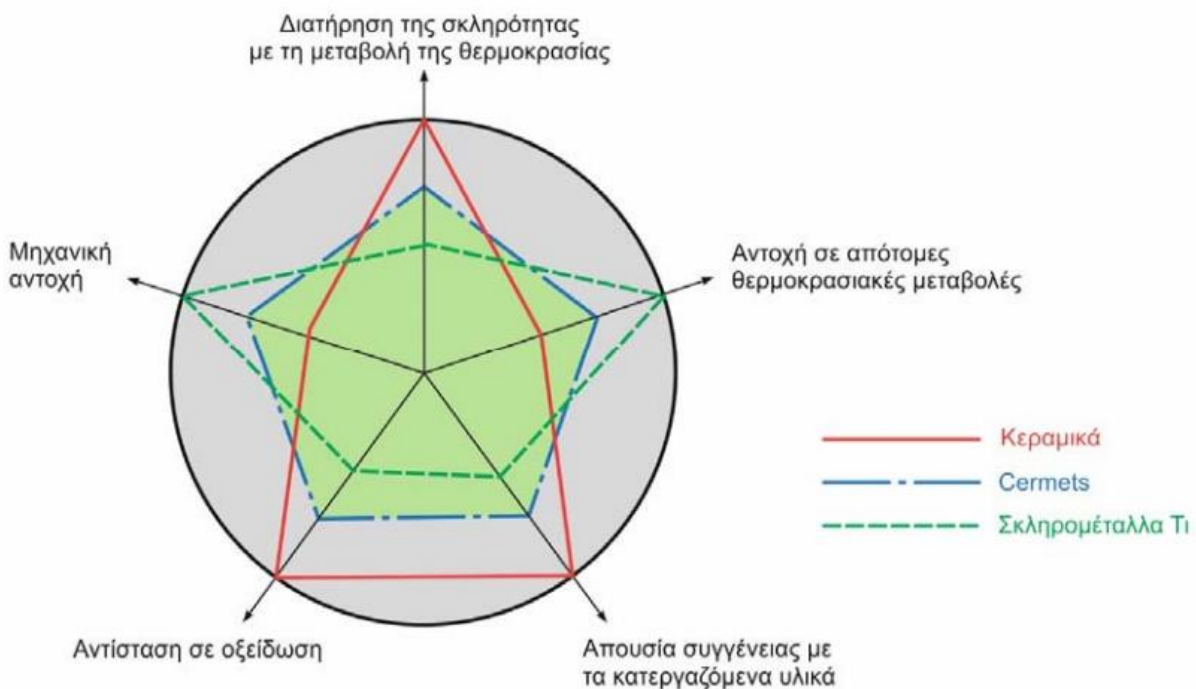
Αντοχή: Υπάρχει επαρκής αντοχή στην κόπωση και να διατηρεί την σκληρότητα του κατά την έναρξη της κοπής ή όταν αντιμετωπίζει σφάλματα στο υλικό εργασίας, καθώς και για να αντιμετωπίζει διακυμάνσεις δύναμης. Απαιτείται αντοχή έτσι ώστε το εργαλείο να μην θραύεται, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια διακοπόμενων εργασιών κοπής (κυρίως στο φραιζάρισμα).

Αντίσταση στη φθορά: Οι διεπιφάνειες εργαλείου-τεμαχίου και εργαλείου-αποβλίττου εκτίθενται σε συνθήκες, οι οποίες προκαλούν φθορά λόγω προσκόλλησης ή απόξεσης. Η μείωση της φθοράς είναι ο σημαντικότερος παράγοντας της διάρκειας ζωής, προτού χρειαστεί η αντικατάσταση του εργαλείου.

Χαμηλή τριβή: Η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίττου πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη ροή αποβλίττου και μειώνεται ο ρυθμός φθοράς του κοπτικού εργαλείου.

Θερμικά χαρακτηριστικά: Το κοπτικό εργαλείο πρέπει να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα για να μπορεί να διοχετεύει την θερμότητα που παράγεται στην ζώνη διάτμησης στο περιβάλλον και να μην αυξάνεται η θερμοκρασία του αλλοιώνοντας τα χαρακτηριστικά του κοπτικού. Διαφορετικά αύξανε η θερμοκρασία του και μειώνεται η διάρκεια ζωής του. Αντιθέτως το κοπτικό πρέπει να έχει πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ώστε να μην προλαβαίνει να θερμανθεί και η απόρριψη της θερμότητας να γίνεται με την απομάκρυνση των αποβλίττων.

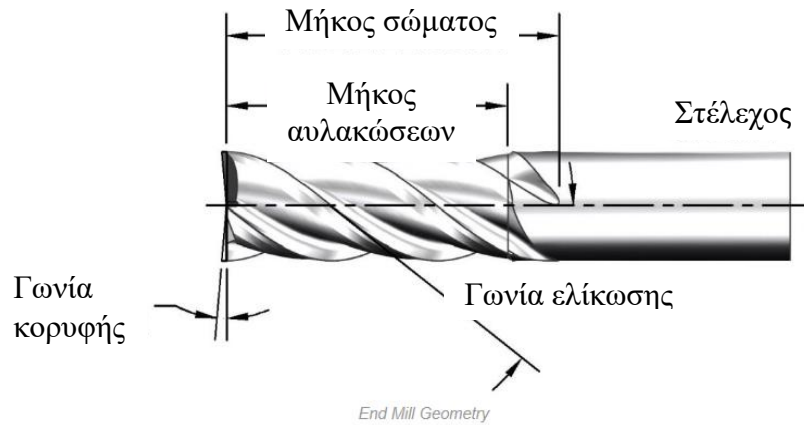
Χημική σύσταση : Το υλικό το οποίο είναι κατασκευασμένο το κοπτικό εργαλείο πρέπει να είναι χημικά σταθερό και μα μην επηρεάζεται από το υλικό του τεμαχίου και το υγρό κοπής . Έχει σημειωθεί ότι η σκληρότητα ενός μεταλλικού υλικού μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και ανάλογα με το υλικό η μείωση αυτή είναι πιο ομαλή ή πιο απότομη. Η ποικιλία υλικών σε κάθε κατηγορία οφείλεται στις διαφορετικές συνθέσεις και διαθέσιμες επεξεργασίες, προκαλώντας αλληλοεπικάλυψη κατηγοριών. Ωστόσο, οι αντικρουόμενες απαιτήσεις των κοπτικών εργαλείων συχνά δεν επιτρέπουν την ύπαρξη ενός υλικού που να καλύπτει όλες τις ανάγκες. Έτσι, έχει αναπτυχθεί μεγάλη ποικιλία υλικών για τα κοπτικά εργαλεία.



Εικόνα 20 : Ιδιότητες που πρέπει να έχει το ιδανικό κοπτικό εργαλείο

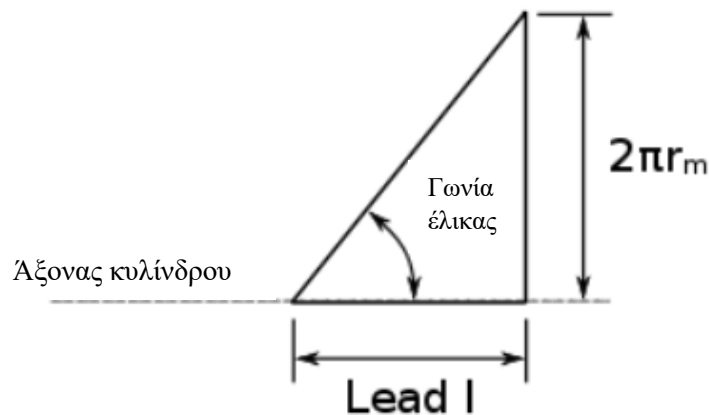
2.4.2 Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων (πλήθος δοντιών)

Τα κονδύλια στα οποία αναφέρεται η παρούσα μελέτη, αποτελούνται από τα εξής βασικά μέρη. Την γωνία κορυφής, την γωνία ελίκωσης, τον αριθμό των ακμών κοπής, το στέλεχος, το μήκος σώματος και το μήκος αυλακώσεων.



Εικόνα 21: Βασικά μέρη κονδυλίου

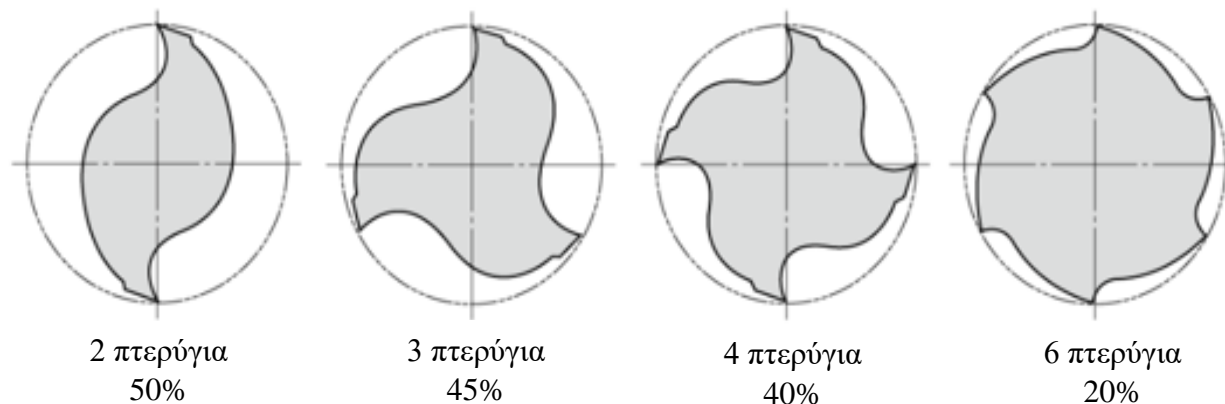
Η γωνία ελίκωσης .Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ακμή κοπής του εργαλείου με τον κάθετο άξονα στο κέντρο του. Είναι μία από τις κυριότερες παραμέτρους ενός εργαλείου κοπής και προσαρμόζεται ανάλογα με το υλικό που επεξεργάζεται. Οι μεγάλες γωνίες ελίκωσης χρησιμοποιούνται για μαλακά μέταλλα, ενώ οι χαμηλές είναι πιο κατάλληλες για σκληρότερα υλικά.



Εικόνα 22 : Παράμετροι έλικας και γωνία ελίκωσης.

Ο αριθμός των "δοντιών", ή πτερυγίων κοπής (flutes) ενός εργαλείου. Τα πιο διαδεδομένα στο εμπόριο είναι τα κονδύλια με δύο ή τέσσερις ακμές κοπής. Στο εμπόριο υπάρχουν κονδύλια κάθε ένα από αυτά με τη δικιά του χρήση στον χώρο της βιομηχανίας με μία, τρεις, έως και οκτώ ακμές κοπής. Όσα περισσότερα τα "**δόντια**", μπορεί να αυξηθεί και η πρόωση, αλλά υπάρχει μικρότερος χώρος για τα απόβλιττα. Όπως παρατηρούμε στην επόμενη εικόνα όσο αυξάνεται το πλήθος των δοντιών μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος για την απομάκρυνση του αποβλίττου κατά την περιστροφή

του κοπτικού. Επίσης από το πλήθος των δοντιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και η στιβαρότητα του εργαλείου.



Εικόνα 23: Σύγκριση της διατομής του κοπτικού και της επιφάνειας αποβλίττου .










































Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κοπτικών με διαφορετικό αριθμό δοντιών :

Πλήθος δοντιών	2	3	4	6
Πλεονεκτήματα	Μεγάλα απόβλιττα Χαμηλή αντίσταση κοπής	Εξίσου μεγάλα απόβλιττα Κατάλληλο για βύθιση	Υψηλή ακαμψία	Υψηλή ακαμψία Αντοχή αικμής
Μειονεκτήματα	Χαμηλή ακαμψία	Δυσκολία μέτρησης διαμέτρου	Μικρό απόβλιττο	Μικρό απόβλιττο

Ανάλογα με την χρήση στην οποία προορίζεται το κοπτικό πρέπει να επιλεγθεί και η κατάλληλη γεωμετρία καθώς και το πλήθος των δοντιών. Ο πίνακας που ακολουθεί αναφέρεται ενδεικτικά στην επιλογή αριθμού δοντιών των κονδυλιών για διαφορετικά είδη φραιζαρίσματος.

Είδος της ακμής κοπής, ή "μύτης" (nose) του κοπτικού. Υπάρχουν επίσης πολλά είδη που είναι τα πιο κοινά στη βιομηχανία. Οι οκτώ υποκατηγορίες είναι τα Ball, Bull nose, Taper ball, Taper end, Cone, General, Cylindrical και Rounded κονδύλια. Ανάλογα με το είδος της κατεργασίας όπου θα εκτελέσουμε άλλη μια παράμετρος σωστής επιλογής κοπτικού είναι το είδος ακμής κοπής. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλά τυποποιημένα είδη, όμως στην βιομηχανία πολλές φορές σχεδιάζονται

και κατασκευάζονται κοπτικά κατά περίπτωση ανάλογα με την εκάστοτε κατεργασία που θα εκτελέσουν. Η επιλογή αυτή έχει να κάνει με το υλικό κατεργασίας, το βάθος κοπής, την πρόωση, την τελική επιφάνεια, το προφίλ της τελικής επιφάνειας (συνήθως είναι ο κυριότερος λόγος επιλογής), την χρήση ή όχι ψυκτικού υγρού, το υλικό κατασκευής του κοπτικού, τον χώρο προσέγγισης του κοπτικού στην περιοχή όπου θα κατεργαστεί και πολλά άλλα. Στην εικόνα 25 παρουσιάζονται μερικές από τις υπάρχουσες άκρες κοπής.

End Mills						
						
	fine finishing	finishing	roughing	slot milling	plunging	contour milling
end mill Z = 1 						
end mill Z = 2 						
end mill Z = 3 						
end mill Z = 4-5 				 Varimil™ only		
multi-flute cutter Z = 6-8 						

Τα "Cylindrical" εργαλεία δεν έχουν καμία ιδιομορφία στην άκρη τους, παραμένοντας παράλληλα με τον οριζόντιο άξονα. Τα "Rounded" εργαλεία είναι παρόμοια με τα "Ball" στην άκρη τους, αλλά η ακτίνα του κύκλου είναι αυστηρά μεγαλύτερη από αυτή του εργαλείου. Τα "General" εργαλεία είναι μια ειδική κατηγορία με πολύπλοκη γεωμετρία στην άκρη κοπής τους, συνδυάζοντας χαρακτηριστικά από τις κατηγορίες "Bull Nose" και "Cone". Στην κατηγορία "Cone", η άκρη κοπής έχει τη μορφή ενός κώνου με βάση τις δύο γωνίες που σχηματίζονται με τους κάθετους και οριζόντιους άξονες του εργαλείου. Στην υποκατηγορία "Taper Ball" και "Taper End", τα εργαλεία έχουν μια κλίση στην άκρη τους, με μια συγκεκριμένη γωνία. Στην υποκατηγορία "Bull Nose" (ή "Torus"), η άκρη κοπής δεν είναι τέλεια κυλινδρική, αλλά έχει κυκλικό σχήμα με δεδομένη ακτίνα.

Τέλος, η υποκατηγορία "Ball" χαρακτηρίζεται από μια κυκλική άκρη κοπής με την ίδια ακτίνα όπως το εργαλείο (εικόνα 24): Αριθμός δοντιών των κονδυλίων και η σωστή χρήση τους.

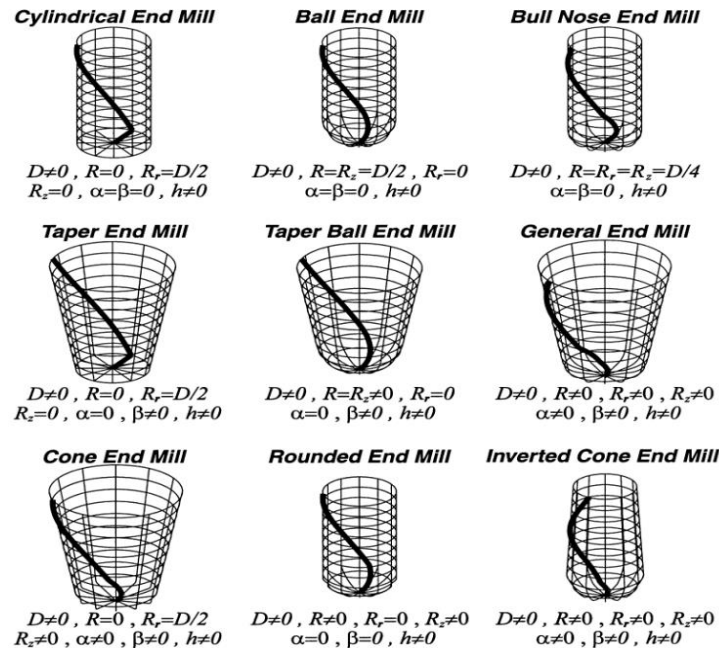


Εικόνα 25: Είδη κονδυλίων

Η ακριβής απεικόνιση της τομής ενός κονδυλίου αποτελεί σημαντική πρόκληση για πολλούς ερευνητές, καθώς κάθε ένας παρουσιάζει διαφορετικά μοντέλα και σπάνια επιτυγχάνεται η ακριβής απεικόνιση. Η διαφοροποίηση των τομών των εργαλείων και η χρήση ψευδοτρισιδιάστατων απεικονίσεων συχνά οδηγούν σε απλοποιημένα μοντέλα που δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως την πολυπλοκότητα των πραγματικών εργαλείων. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μεγάλη διαφορά στα μοντέλα μεταξύ των ερευνητών, ακόμα και όταν μελετούν το ίδιο αντικείμενο.

Οι ερευνητές αντιμετωπίζουν πρόβλημα στην απεικόνιση της άκρης του εργαλείου, με λίγους να μπορούν να την αναπαραστήσουν ακριβώς, συνήθως μέσω προσομοίωσης του θερμικού επεξεργαστή. Πολλοί επιλέγουν να δημιουργήσουν ένα κονδύλι με κυλινδρική άκρη για να αποφύγουν την πολυπλοκότητα των άλλων τύπων. Η μέθοδος της προσομοίωσης του "Cylindrical" επιφέρει θετικά αποτελέσματα, αλλά είναι πολύπλοκη, με πολλές παράμετρους που αφορούν το μέγεθος και το σχήμα των δίσκων του θερμικού επεξεργαστή, την απόστασή τους και τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει καθένας από αυτούς αφαιρώντας υλικό από το μοντέλο που επεξεργάζονται.

Οι S. Engin και Y. Altintas ανέπτυξαν μαθηματικούς τύπους που ευρέως χρησιμοποιούνται στη μέθοδο που τα προγράμματα CAD-CAM χρησιμοποιούν για να αναγνωρίσουν τη μορφή του εργαλείου στην προσομοίωση κατεργασίας ενός μοντέλου. Αρχικά, παρουσίασαν τη γεωμετρική μορφή της άκρης κοπής των διαφόρων τύπων κονδυλίων και αναφέρθηκαν στις παραμέτρους που επηρεάζουν τη μορφή τους, όπως η διάμετρος του εργαλείου. Επιπλέον, διακρίνουν το κονδύλι σε διάφορες ζώνες, όπου οι τύποι αλλάζουν λόγω της γεωμετρίας, επιτρέποντας την προσαρμογή των τύπων στις διαφορετικές περιοχές του εργαλείου.



Εικόνα 26 : Αποτελέσματα της έρευνας των Engin και Altintas .

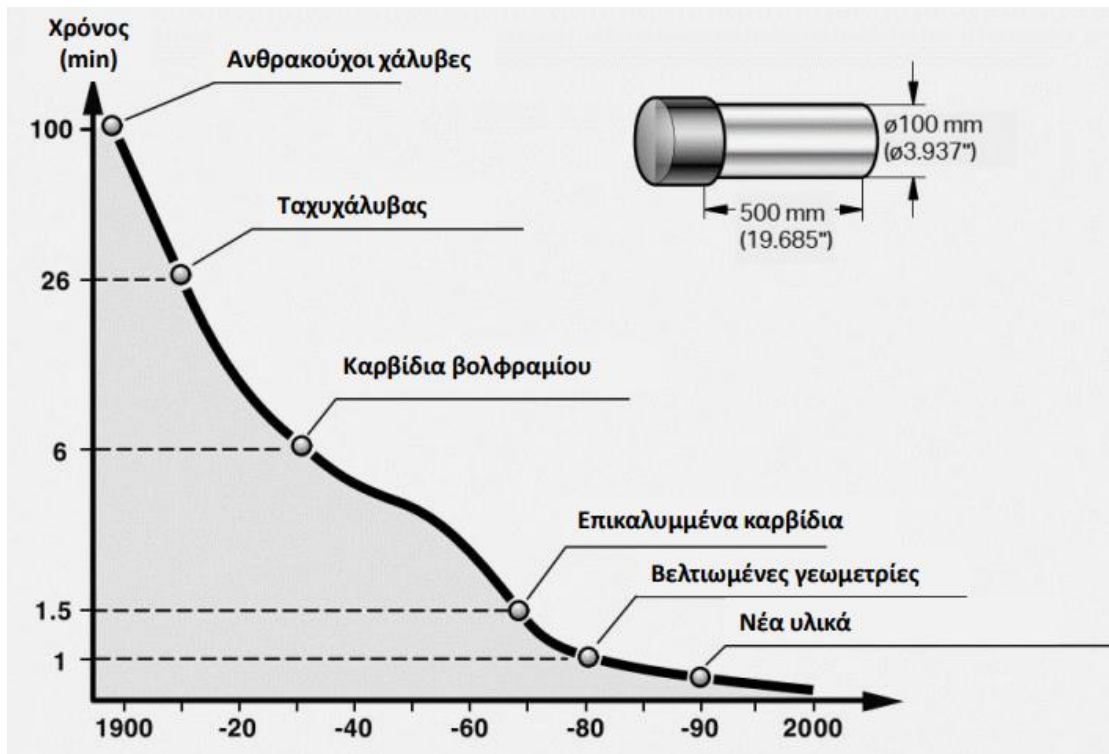
2.4.3 Υλικά κατασκευής κοπτικών

Κατά τη διάρκεια της αναγέννησης, η χρήση μετάλλων, όπως ο χαλκός και τα ασάλινα κράματα, σηματοδότησε μια νέα επανάσταση στον τομέα της μηχανουργίας. Αυτά τα υλικά επέτρεψαν την κατασκευή εργαλείων που ήταν όχι μόνο ανθεκτικά αλλά και εξαιρετικά ακριβή στη λειτουργία τους.

Κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης, παρατηρήθηκε ακόμα μεγαλύτερη εξέλιξη στη χρήση των υλικών. Ειδικά το ασάλι έγινε κεντρικό υλικό στη μηχανουργία λόγω της αντοχής, της σκληρότητας και της ευκαμψίας του. Αυτό επέτρεψε τη δημιουργία πολύ ανθεκτικών και ακριβών εργαλείων που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, από την κατεργασία μετάλλων ως την κατασκευή ακριβών μηχανημάτων.

Σήμερα, με την πρόοδο στον τομέα των νανοτεχνολογιών και τη χρήση προηγμένων υλικών, η μηχανουργία συνεχίζει να εξελίσσεται. Αυτό έχει οδηγήσει στη δημιουργία εργαλείων που προσφέρουν ανώτερη απόδοση και ακρίβεια.

Αυτή η εξέλιξη επηρεάζει μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, από τη βιομηχανία μέχρι την ιατρική και την αεροναυπηγική, βοηθώντας στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ακρίβειας σε όλους αυτούς τους τομείς.



Εικόνα 27 : Η εξέλιξη των υλικών κοπτικών εργαλείων

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κοπτικών εργαλείων έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που τα καθιστούν κατάλληλα για αυτήν τη χρήση. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

Σκληρότητα: Η σκληρότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να αντέχει τη διάτρηση, την τριβή και την αποκοπή. Στα κοπτικά εργαλεία, η σκληρότητα είναι κρίσιμη, καθώς εξασφαλίζει ότι το εργαλείο θα διατηρήσει την αιχμηρή του κατάσταση και δεν θα φθείρεται εύκολα κατά τη χρήση. Υλικά όπως τα καρβίδια του βολφραμίου έχουν υψηλή σκληρότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για κοπτικά εργαλεία.

Αντοχή στη φθορά: Η αντοχή στη φθορά είναι η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται στην φθορά που προκαλείται από την επαφή με άλλα υλικά κατά τη χρήση. Υλικά με υψηλή αντοχή στη φθορά, όπως τα κράματα στερεού καρβιδίου, μπορούν να διατηρήσουν την αιχμηρή τους μορφή για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Αντοχή: Η αντοχή είναι η ικανότητα ενός υλικού να αντέχει στις επιβαρύνσεις και τις πιέσεις κατά τη χρήση. Στα κοπτικά εργαλεία, η αντοχή είναι κρίσιμη για να αντέξουν τις δυνάμεις που

ασκούνται κατά την κοπή. Υλικά με υψηλή αντοχή, όπως το ατσάλι, είναι κατάλληλα για αυτόν τον σκοπό.

Συντελεστής τριβής: Ο συντελεστής τριβής αντιπροσωπεύει την αντίσταση στην κίνηση που προκύπτει όταν τα υλικά έρχονται σε επαφή. Χαμηλοί συντελεστές τριβής επιτρέπουν στα κοπτικά εργαλεία να λειτουργούν αποδοτικά και να μην θερμαίνονται υπερβολικά κατά τη χρήση.

Αντιδιαβρωτικές ιδιότητες: Η αντιδιαβρωτική ικανότητα είναι σημαντική, ειδικά αν τα κοπτικά εργαλεία χρησιμοποιούνται σε υγρές ή υγρές συνθήκες. Υλικά με καλές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες μπορούν να διατηρήσουν την αντοχή τους και να αντιστέκονται στη διάβρωση από υγρά και χημικά.

Θερμική σταθερότητα: Σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες, η θερμική σταθερότητα των υλικών είναι σημαντική. Τα κοπτικά εργαλεία πρέπει να διατηρούν την αντοχή και τη σκληρότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς να αποδυναμώνονται.

Στιβαρή δομή: Η δομή του υλικού πρέπει να είναι στιβαρή και ανθεκτική για να αντέξει τις δυνάμεις και τις πιέσεις που ασκούνται κατά τη χρήση. Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη στιβαρότητα της δομής του.

Επιλέγοντας τα κατάλληλα υλικά με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, εξασφαλίζεται ότι τα κοπτικά εργαλεία θα είναι αποτελεσματικά, ανθεκτικά και ασφαλή για τη χρήση τους. Κάποια από τα υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων είναι:

Εργαλειοχάλυβες ή Ανθρακούχοιχάλυβες : Αρχικά, οι χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.6 έως 1.5% χρησιμοποιούνταν κυρίως για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων. Οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα, με τους πιο ανθρακούχους χάλυβες να είναι πιο σκληροί και ανθεκτικοί, αλλά ευαίσθητοι σε κρούσεις. Ωστόσο, χάνουν γρήγορα τη σκληρότητά τους σε μέτριες θερμοκρασίες, γεγονός που καθιστά τη χρήση τους σε υψηλές ταχύτητες κοπής και μεγάλα βάθη κοπής αναποτελεσματική και ακριβή. Επιπλέον, μόλις θερμανθούν πάνω από τη θερμοκρασία των 200°C, χάνουν τη σκληρότητά τους, καθιστώντας περιορισμένη τη χρήση τους σε μηχανουργικές κατεργασίες σήμερα. Συνολικά, η επεξεργασία με ανθρακούχους χάλυβες έχει χαμηλή παραγωγικότητα και υψηλό κόστος λόγω των παραπάνω περιορισμών.

Ταχυχάλυβες: Συνολικά, η προσθήκη διαφόρων στοιχείων επηρεάζει τις ιδιότητες των ταχυχάλυβων ως εξής:

Μολυβδαίνιο : Η προσθήκη μολυβδαίνιου οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της εμβαιότητας και της σκληρότητας, αυξάνοντας την αντοχή σε επαναφορά και την αντοχή σε φθορά-τριβή.

Βολφράμιο : Η προσθήκη βολφραμίου ενισχύει την τάση σχηματισμού σκληρών καρβιδίων, βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες και την αντίσταση στη φθορά-τριβή.

Βανάδιο : Η προσθήκη μικρής ποσότητας βαναδίου, σε συνδυασμό με αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα, αυξάνει το βαθμό βαφής και την αντίσταση στη φθορά, ενώ προκαλεί μέγιστη αύξηση της σκληρότητας μετά από επαναφορά.

Κοβάλτιο : Η προσθήκη κοβαλτίου μειώνει την εμβαπτότητα, ενισχύοντας τη σκλήρυνση με το σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων. Επιπλέον, οι χάλυβες με περίπου 5% κοβάλτιο παρουσιάζουν καλές κοπτικές ικανότητες και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Μαγγάνιο : Δε δημιουργεί καρβίδια, αλλά βελτιώνει την αντοχή σε επαναφορά.

Η διαδικασία βαφής των εργαλείων είναι πολύπλοκη και απαιτεί εξειδικευμένη εμπειρία. Η θερμοκρασία βαφής κυμαίνεται στα 1200-1300°C, και ακριβείς τιμές είναι ζωτικής σημασίας, καθώς αποκλίσεις της τάξης των 20-30°C μπορεί να οδηγήσουν σε αντίθετα αποτελέσματα, όπως τη μείωση της σκληρότητας του εργαλείου. Η διαδικασία βαφής συνήθως πραγματοποιείται σε λάδι ή ειδικά λουτρά αλάτων, ακολουθούμενη από ήρεμη απόψυξη σε ρεύμα αέρα για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα και σκληρότητα του εργαλείου. Μια μέθοδος για την κατασκευή εργαλείων είναι η σύντηξη του μίγματος. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο μη ομοιογενής σχηματισμός των καρβιδίων κατά τη φάση της στερεοποίησης, που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση του κοπτικού εργαλείου. Μια άλλη μέθοδος για την κατασκευή εργαλείων είναι η κονιομεταλλουργία και η πυροσυσσωμάτωση. Αυτή η μέθοδος οδηγεί σε πιο ομοιογενή δομή του ταχυχάλυβα και των αντίστοιχων κοπτικών εργαλείων, επιτρέποντας εύκολοτερο τροχισμό τους. Επιπλέον, είναι λιγότερο ευαίσθητα στη θερμική επεξεργασία και έχουν υψηλότερη κοπτική ικανότητα. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος παραγωγής.

Σκληρομέταλλα. Η δημιουργία και η χρήση των σκληρομετάλλων σηματοδότησε σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία της κοπής μετάλλων. Τα σκληρομέταλλα δεν αποτελούν κράματα μετάλλων, αλλά αντίθετα, αποτελούνται από μίγμα καρβιδίων (WC, TiC, TaC) που ενώνονται με συνδετικό υλικό κοβαλτίου (Co). Η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει κονιομεταλλουργία, όπου τα υλικά μετατρέπονται σε σκόνη, αναμειγνύονται, συμπιέζονται και θερμαίνονται σε υψηλή θερμοκρασία.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα μόρια συγκολλούνται, στερεοποιούνται και δημιουργούν τα σκληρομέταλλα. Τα χαρακτηριστικά των σκληρομετάλλων περιλαμβάνουν:

Διατήρηση της σκληρότητάς τους σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 900°C - 1000°C), επιτρέποντας τη χρήση τους σε υψηλές ταχύτητες κοπής.

Δυνατότητα επεξεργασίας βαμμένου χάλυβα με σχετικά χαμηλές ταχύτητες κοπής, πράγμα που δεν είναι δυνατό με ταχυχάλυβα.

Υψηλή θερμική αγωγιμότητα, αφαιρώντας εύκολα τη θερμότητα κατά την κοπή και προστατεύοντας την κόψη από υπερθέρμανση.

Δυνατότητα εργασίας χωρίς υγρά κοπής (ξηρά κοπή), αλλά αν χρησιμοποιηθεί υγρό, πρέπει να είναι συνεχές και άφθονο για να αποφευχθούν οι θερμικές μεταβολές.

Ευαίσθησία σε κραδασμούς και απότομες μεταβολές φορτίου, απαιτώντας προσοχή κατά τη χρήση. Απαιτείται προσεκτική και χρονοβόρα τρόχιση, συνήθως από εξειδικευμένο προσωπικό σε κατασκευής εργαλείων.

Κεραμικά: Συνήθως, τα κεραμικά εργαλεία περιλαμβάνουν κυρίως σκληρή φάση, όπως το Al_2O_3 σε μορφή ιδιαίτερα λεπτόκοκκων σωματιδίων, με προσθήκες όπως το TiC για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους. Επίσης ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία τα βορίδια και τα cermet, τα οποία συνήθως περιέχουν περίπου 70% Al_2O_3 και 30% TiC . Το μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι η αντοχή τους στη φθορά, η υψηλή σκληρότητα και η χημική τους αδράνεια σε σχέση με τα υλικά κατεργάσιμων τεμαχίων.

Ωστόσο, ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι η πολύ μικρή αντοχή και η δυσθραυστότητά τους, κάτι που τα καθιστά επιρρεπή σε καταστροφική θραύση. Συνήθως διατίθενται σε μορφή πλακιδίων και χρησιμοποιούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες μη διακοπόμενης κοπής χωρίς υγρά κοπής για να αποφευχθεί το θερμικό σοκ. Για να αποφευχθούν αποκολλήσεις και αποφλοιώσεις, χρησιμοποιούνται αρνητικές γωνίες αποβλήτου, καθώς και εργαλειομηχανές υψηλής στιβαρότητας και ακρίβειας.

Ακόμα, τα SiN και Sialons χρησιμοποιούνται επιτυχώς για την κοπή χυτοσιδήρου και αεροπορικών κραμάτων. Επίσης, να σημειωθεί ότι τα κεραμικά εργαλεία είναι ακριβότερα από τα σκληρομετάλλα και φθείρονται γρηγορότερα σε χαμηλές ταχύτητες κοπής.

Το CBN (Κυβικός Βοριο-Νιτρίτης) αποτελεί ένα ακόμα υλικό, το οποίο είναι το σκληρότερο μετά το διαμάντι. Αποτελείται από υπόστρωμα καρβιδίου για αντοχή σε δυναμικές φορτίσεις και επίστρωμα πολυκρυσταλλικού CBN για αντοχή στη φθορά και σκληρότητα. Είναι χημικά αδρανές ως προς τον σίδηρο και το νικέλιο σε υψηλές θερμοκρασίες, αντίθετα με το διαμάντι, και επίσης έχει αντοχή στην οξείδωση. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κοπή σκληρυνόμενων σιδηρούχων κραμάτων και υψηλής θερμοκρασίας κραμάτων.

Τέλος, το διαμάντι διακρίνεται για την υψηλότερη σκληρότητα, την αντοχή στη φθορά και τον χαμηλό συντελεστή τριβής και θερμικής διαστολής. Χρησιμοποιείται σε κατεργασίες αποπεράτωσης για την επίτευξη εξαιρετικής ποιότητας επιφάνειας και ακρίβειας. Το υλικό αυτό εφαρμόζεται σχεδόν σε κάθε ταχύτητα κοπής, αλλά υπό συνθήκες που ταιριάζουν στην ψαθυρότητα του. Σε μονοκρυσταλλικό υλικό, ο προσανατολισμός του κρυστάλλου παίζει σημαντικό ρόλο, ενώ σε πολυκρυσταλλικό συνθετικό διαμάντι, η τυχαιότητα στην κατανομή διευθύνσεων εμποδίζει τη διάδοση ρωγμών και μικροαποκολλήσεις. Το συνθετικό διαμάντι χρησιμοποιείται κυρίως για μη

σιδηρούχα κράματα, όπως τυπικά κράματα Al-Si, WC, κεραμικά, πορσελάνη, ενισχυμένα με υαλονήματα πλαστικά και άλλα.

2.4.4 Κατασκευή κονδυλιών

Η κατασκευή κονδυλιών απαιτεί πολλά στάδια επεξεργασίας προτού φτάσουν στην τελική τους μορφή. Αυτό το άρθρο θα εξετάσει αναλυτικά την τεχνική πλευρά της διαδικασίας, τη μηχανική επεξεργασία μέχρι και τη διαμόρφωση, προσφέροντας μια εισαγωγή στην πολύπλοκη διαδικασία κατασκευής των κονδυλιών.

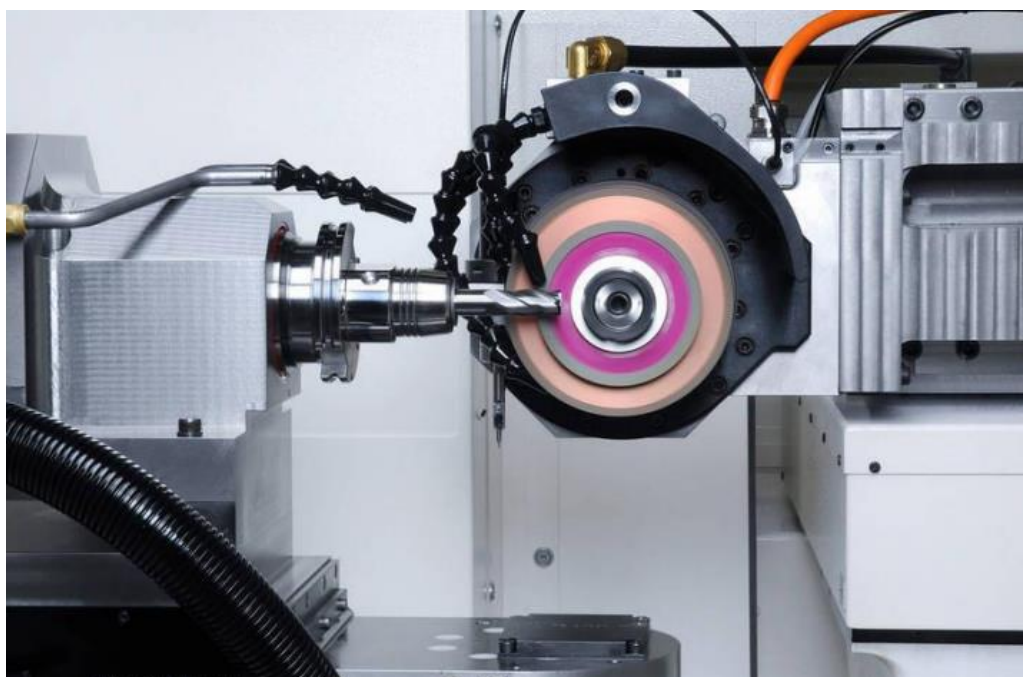


Εικόνα 28: Αυτόματος CNC Grinder της εταιρίας Helitronic

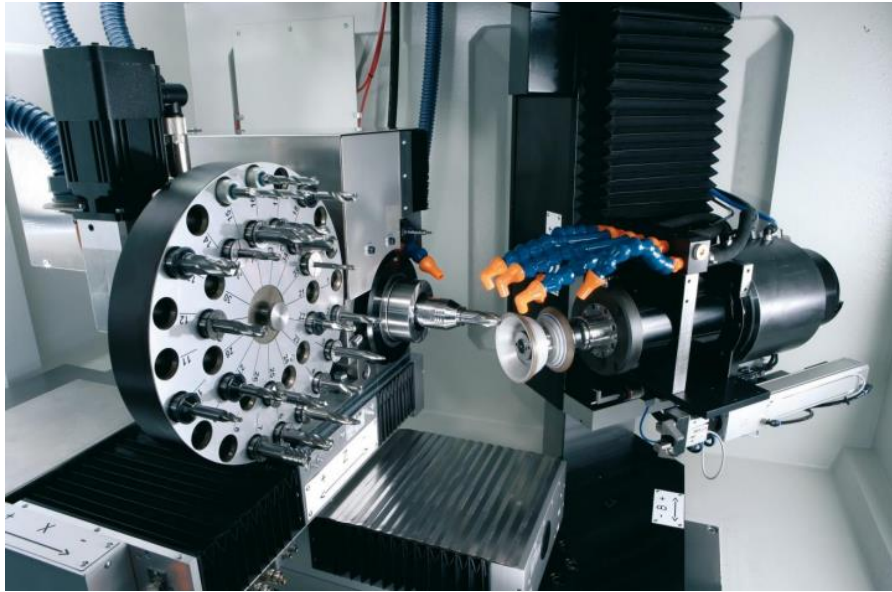
Καταρχάς, το υλικό υποβάλλεται σε μηχανική επεξεργασία με ειδικά εργαλεία κοπής για τη δημιουργία του αρχικού κυλινδρικού τεμαχίου των κονδυλιών. Στη συνέχεια τα κονδύλια διαμορφώνονται με τη μέθοδο της τρόχισης (grinding). Είναι μέχρι και τις μέρες μας ο βέλτιστος τρόπος παραγωγής. Το κυλινδρικό κράμα του μετάλλου επεξεργάζεται από ειδικούς τροχούς, που δημιουργούν την τελική μορφή του. Αρχικά διαμορφώνονται οι ελικοειδείς αυλακώσεις περιμετρικά και στην συνέχεια δημιουργούνται μετωπικά οι αιχμές κοπής. Αυτή η διαδικασία γίνεται αυτοματοποιημένα σε μηχανήματα όπως το παρακάτω (Εικόνα 28).



Εικόνα 29 : Φόρτωση του προς επεξεργασία μετάλλου



Εικόνα 30 : Δημιουργία ελίκωσης



Εικόνα 31 : Δημιουργία ακμής κοπής

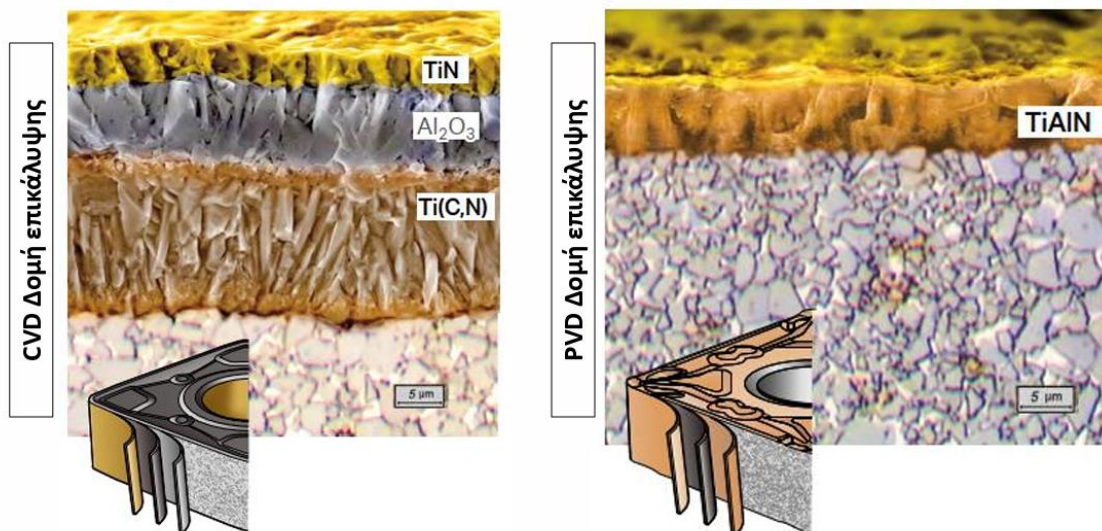
2.4.5 Επικαλύψεις / Επενδύσεις κοπτικών

Οι επικαλύψεις στα κοπτικά πλακίδια αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας της μεταλλουργίας και της μηχανικής επεξεργασίας υλικών. Πρόκειται για λεπτές στρώσεις πάχους (1-10 μm) υλικού που εφαρμόζονται στην επιφάνεια των κοπτικών και έχουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους. Οι επικαλύψεις προσδίδουν στα κοπτικά πλακίδια ανθεκτικότητα και σκληρότητα. Επίσης, μειώνουν τον συντελεστή τριβής μεταξύ του πλακιδίου και του υλικού που κατεργάζεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία λειτουργίας που συμβάλει στην φθορά του πλακιδίου. Επιπλέον, οι επικαλύψεις βελτιώνουν την λειτουργία των κοπτικών πλακιδίων, επιτρέποντάς τους να εργάζονται με μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής με διαστατική ακρίβεια. Από αυτήν την περιγραφή, κατανοούμε ότι οι επικαλύψεις στα κοπτικά πλακίδια δεν είναι απλώς πρόσθετες στρώσεις υλικού, αλλά αντιπροσωπεύουν ένα ουσιαστικό συστατικό που επηρεάζει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των εργαλείων κοπής στην μεταλλουργία και τη μηχανική επεξεργασία υλικών. Οι λεπτές σκληρές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν επιφανειακά την απόδοση και την αντοχή ενός ευρέος φάσματος μηχανολογικών εξαρτημάτων και προϊόντων. Αυτές οι επικαλύψεις, παράγονται με χρήση υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμού και διαφόρων τεχνικών όπως η Φυσική ή Χημική Εναπόθεση Ατμών (PVD, CVD), η τεχνολογία μεταφοράς πλάσματος με Laser (PLD), και ο Θερμικός Ψεκασμός (thermal spraying). Αυτές οι επικαλύψεις παρέχουν μεγάλη αντοχή στη φθορά, χαμηλό συντελεστή τριβής και αντίσταση σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, καθιστώντας τις ιδανικές λύσεις για τη βελτίωση της απόδοσης και ποιότητας επιφανειών εξαρτημάτων. Το πάχος αυτών των επικαλύψεων κυμαίνεται συνήθως από μερικά έως μερικές δεκάτιες μικρομέτρων (1-10

μm), με την εξαίρεση εκείνων που παράγονται με θερμικό ψεκασμό, τα οποία μπορεί να έχουν μεγαλύτερο πάχος.

Ενδεικτική αναφορά στα κύρια υλικά επικάλυψης κοπτικών εργαλείων:

Το Νιτρίδιο του Τιτανίου (TiN) είναι μια επικάλυψη που χρησιμοποιείται ευρέως για να αυξήσει τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων. Το Ανθρακονιτρίδιο του Τιτανίου (TiCN) προσφέρει βελτιωμένη αντοχή στη φθορά λόγω απόξεσης και τριβής, ειδικά για δύσκολα κατεργαζόμενα υλικά όπως ο χυτοσίδηρος, τα κράματα αλουμινίου, οι εργαλειοχάλυβες, τα κράματα τιτανίου και το inconel. Το Νιτρίδιο Τιτανίου Αλουμινίου (TiAlN ή AlTiN) προσφέρει επιπλέον σκληρότητα και αντίσταση στη θερμότητα, κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται αυτή η αντοχή, ενώ το Νιτρίδιο του Χρωμίου (CrN) χρησιμοποιείται για υψηλά μηχανικά φορτία κατά τις μηχανουργικές εργασίες. Τέλος, το Νιτρίδιο του Ζιρκονίου (ZrN) χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου το Νιτρίδιο του Τιτανίου δεν είναι αποτελεσματικό.



Εικόνα 32 : Ενδεικτική μορφή επικαλύψεων κοπτικών

3. Μοντέλο προσομοίωσης

3.1 Περιγραφή των σταδίων προσομοίωσης

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας οδηγεί στην ανάγκη για την επίλυση όλο και πιο περίπλοκων ζητημάτων που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα αλλά και την βιομηχανία. Στην παρούσα εργασία για την μελέτη της επίδρασης του πλήθους των δοντιών, στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες στο τεμάχιο και στο κοπτικό εργαλείο κατά το φραιζάρισμα χάλυβα 1045 ακολουθήθηκε μια σειρά ενεργειών για την διεκπεραίωση της αρχικής ιδέας. Συνοπτικά τα στάδια που απαιτούνται και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, περιλαμβάνουν:

- Τη δημιουργία τριών 3D στέρεων μοντέλων κοπτικών (κονδύλι), τα οποία θα διατηρούν ίδια τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά ανεξάρτητα με το πλήθος των δοντιών τους. Τα τρία κοπτικά θα έχουν διάμετρο 4mm και το πλήθος των δοντιών τους θα κυμαίνεται από 2 έως τα 4. Το υλικό τους θα είναι καρβίδιο του βολφραμίου με χημικό τύπο WC. Το μόριό του είναι διατομικό. Είναι ανόργανη ένωση. Είναι τρεις φορές πιο σκληρό από ότι ο χάλυβας και πυκνότερο από ότι ο χάλυβας και το τιτάνιο.
- Τη δημιουργία 3D τεμαχίου κατεργασίας με σκοπό να είναι ακριβώς ίδιο και στις τρεις προσ. Το υλικό του θα είναι χάλυβα 1045 μια κατηγορία χαλύβων με περιεκτικότητα άνθρακα 0,12 έως 2%. Το AISI 1045 είναι χάλυβας μεσαίου άνθρακα σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε περιοχές που απαιτούν μεγαλύτερη αντοχή και σκληρότητα.
- Επιλογή συνθηκών κατεργασίας οι οποίες θα παραμείνουν και αυτές ίδιες στα τρία μοντέλα προσομοίωσης.
- Τρισδιάστατη προσομοίωση των μοντέλων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

3.2 Λογισμικά

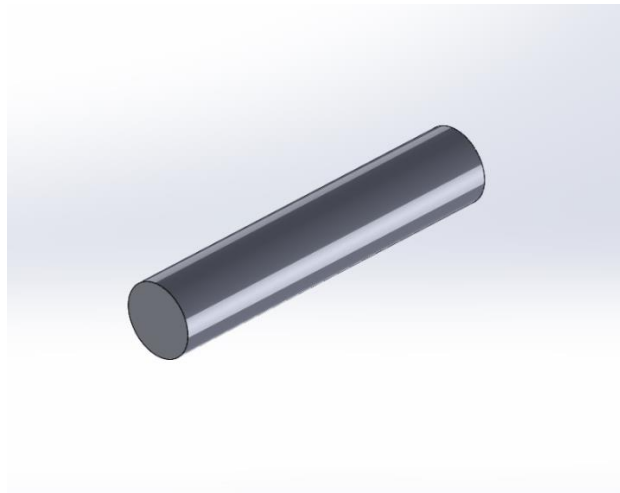
Με την βοήθεια λογισμικών σχεδίασης, μοντελοποίησης και προσομοίωσης πειραμάτων μπορούν να βρεθούν λύσεις πολύ γρήγορα με την χρήση λιγότερων πόρων. Για την εξέλιξη της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SOLIDWORKS της DASSAULT SYSTEMES για την CAD σχεδίαση των κοπτικών εργαλείων. Στην συνέχεια με την βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων DEFORM-3D της Scientific Forming Technologies Corporation εκτελέστηκε η τρισδιάστατη προσομοίωση. Ακόμα με την χρήση του Microsoft Excel δημιουργήθηκε ένας πίνακας υπολογισμού των παραμέτρων και τελικά εξήχθησαν τα απαραίτητα αποτελέσματα και έγινε οπτικοποίηση σε μορφή γραφημάτων.

3.3 Σχεδιασμός κοπτικών SOLIDWORKS (CAD)

Το SOLIDWORKS πρόκειται για ένα από τα καλύτερα λογισμικά CAD και CAE που χρησιμοποιείται από πολλές εταιρίες και μηχανικούς παγκοσμίως. Προσφέρει την δυνατότητα δισδιάστατης και τρισδιάστατης σχεδίασης με υψηλή ποιότητα και πολλές δυνατότητες προς τους χρήστες. Ακόμα, επιτρέπει την δημιουργία ηλεκτρολογικών σχεδίων, render και πεπερασμένων μοντέλων. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την τρισδιάστατη σχεδίαση τριών κοπτικών εργαλείων και του τεμαχίου κατεργασίας. Η γεωμετρία του κονδυλίου είναι περίπλοκη ως προς την σχεδίαση της. Η δυσκολία του έγκειται στις πολλές κοπτικές ακμές που μπορεί να έχει, αλλά και στην ακρίβεια που απαιτείτε κατά τον σχεδιασμό των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό των κοπτικών καθώς και τα τρία κοπτικά πρέπει να έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά εκτός τον αριθμό των πτερυγίων οπού θα αλλάζει σε κάθε κοπτικό χωρίς να επηρεάζει τις υπόλοιπες

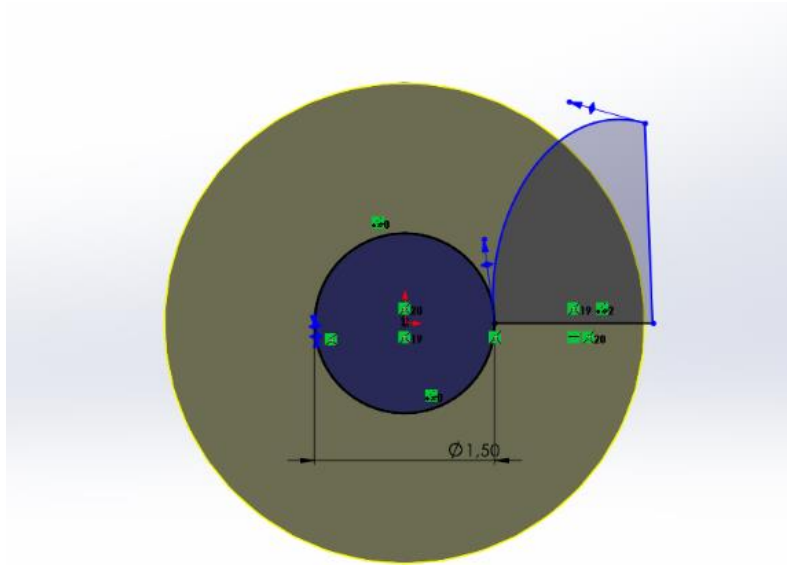
παραμέτρους. Μεταξύ άλλων, η γωνία αποβλίττου, η γωνία ελίκωσης κα. Όλα τα μεγέθη και κυρίως οι μοίρες των γωνιών πρέπει να είναι πολύ προσεκτικά σχεδιασμένες μιας και επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της κατεργασίας. Επιπλέον, όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή για την έκβαση του βέλτιστου αποτελέσματος. Η διαδικασία σχεδίασης τους ήταν η εξής:

Αρχικά δημιουργείται ένας κύλινδρος με διάμετρο 4 mm και μήκος 20 mm. Ο κύλινδρος σχηματίζεται σχεδιάζοντας έναν κύκλο με την εντολή Circle από την καρτέλα Sketch και στην συνέχεια κάνοντας Extrude τον κύκλο από την καρτέλα Features στο επιθυμητό μήκος. Αυτό μας δίνει την βάση για τον σχεδιασμό των κοπτικών και την γενική μορφολογία τους. Για τον σχεδιασμό κοπτικών και γενικά τρισδιάστατων μοντέλων υπάρχουν πολλοί τρόποι σχεδίασης οι οποίοι οδηγούν στο ίδιο τελικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζεται μία από όλες τις μεθόδους σχεδίασης κοπτικού.



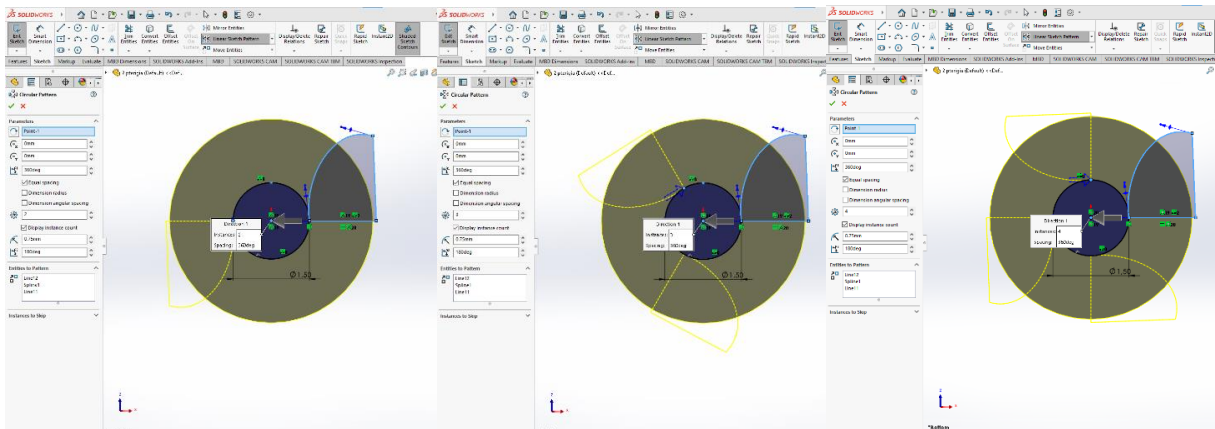
Εικόνα 33: Αρχικός κύλινδρος κοπτικού

Στην συνέχεια σχεδιάζονται οι αυλακώσεις, στην κυκλική επιφάνεια του κυλίνδρου δημιουργείται ένα νέο sketch το οποίο θα αντιπροσωπεύει την διατομή της αυλάκωσης. Ο εσωτερικός κύκλος διαμέτρου 1,5 mm θα αποτελέσει ένα τμήμα, ομόκεντρο στο σύνολο του κοπτικού, στο οποίο δεν θα αφαιρεθεί καθόλου υλικό για την στιβαρότητα του κοπτικού. Το σχήμα δεξιά αποτελεί την διατομή της αυλάκωσης. Στα περισσότερα κοπτικά του εμπορίου η διατομή της αυλάκωσης διαφέρει κατά πολύ με αυτή του κοπτικού που σχεδιάζεται. Στα κοπτικά του εμπορίου δεν υπάρχουν ευθύγραμμα τμήματα πάρα μόνο καμπύλες για την καλύτερη ροή του αποβλίττου. Ο κυριότερος λόγος την συγκεκριμένης γεωμετρίας αφορά την αντιγραφή της αυλάκωσης περιμετρικά ώστε να δημιουργηθεί ο απαιτούμενος αριθμός ίδιων πτερύγιων κάθε φορά. Σε διαφορετική περίπτωση τα πτερύγια θα διαφοροποιούνταν ανάλογα με το πλήθος τους.



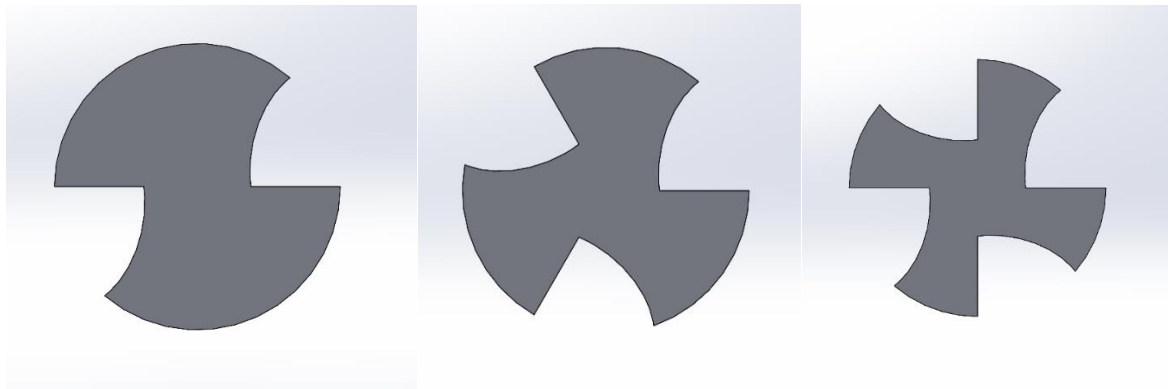
Εικόνα 34 : sketch διατομής αυλάκωσης

Έπειτα με την εντολή circular pattern επιλέγεται ως «κέντρο περιστροφής» το κέντρο του εσωτερικού κύκλου με σκοπό να αντιγραφεί το sketch διατομής της αυλάκωσης. Η εντολή αυτή θα εξασφαλίσει την ομοιότητα της κάθε αυλάκωσης στα κοπτικά και την ίση απόσταση τοποθέτησης τους περιμετρικά του κύκλου. Στην επιλογή number of instances επιλεγώ κάθε φορά τον αριθμό των αυλακώσεων που χρειαζόμαστε ώστε το υλικό που θα απομείνει μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακώσεων να αποτελεί το περύγιο του κοπτικού και τελικά τον αριθμό πτερυγίων που χρειάζεται.



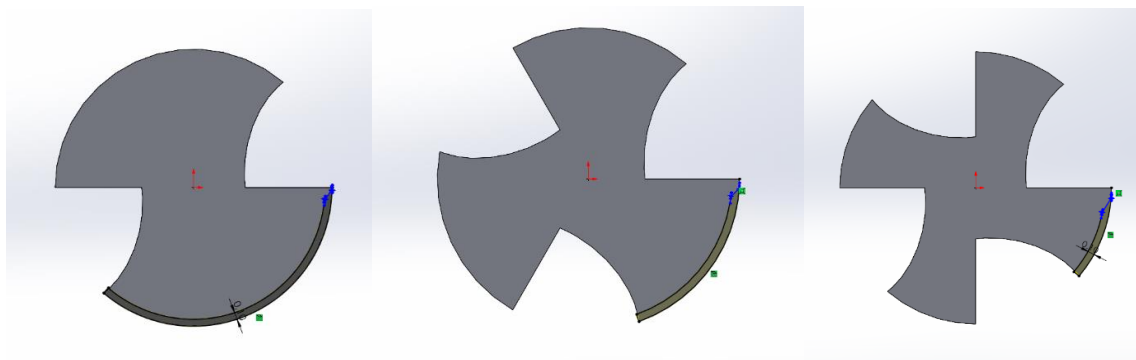
Εικόνα 35 : αντιγραφή sketch αυλάκωσης περιμετρικά

Στην συνέχεια με την εντολη extruded cut από την καρτέλα features φτιάχνω το αρχικό προφίλ των κοπτικών.



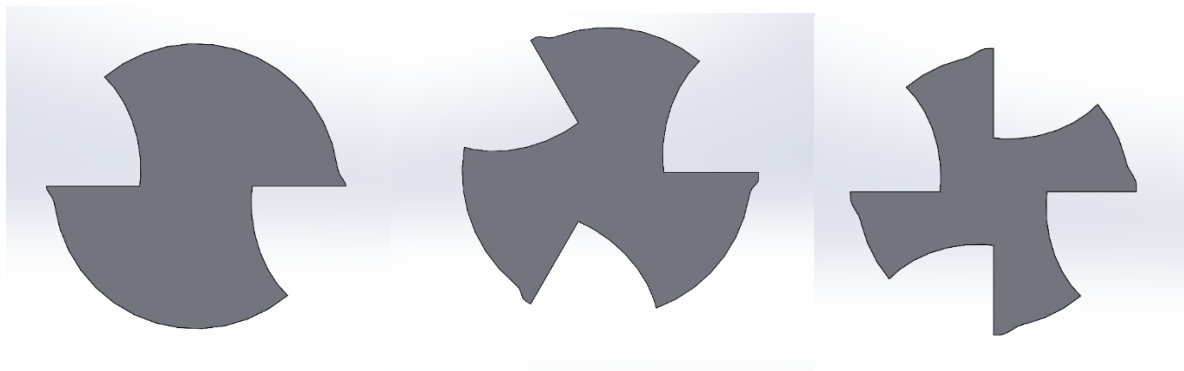
Εικόνα 36 : Διατομή κοπτικών

Το επόμενο βήμα σχεδιασμού των κοπτικών συμβάλει στη σωστή λειτουργία του και ελαχιστοποίηση των τριβών κατά την κατεργασία. Αφαιρείται ένα μικρό τμήμα από το κάθε πτερύγιο περιμετρικά όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



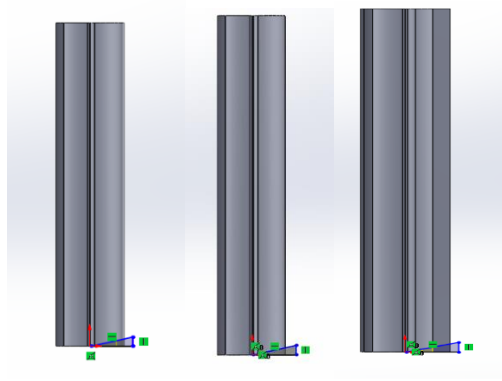
Εικόνα 37: sketch για διαμόρφωση κοπτικής ακμής

Με την εντολή circular pattern συνεχίζεται και στα υπόλοιπα πτερύγια.



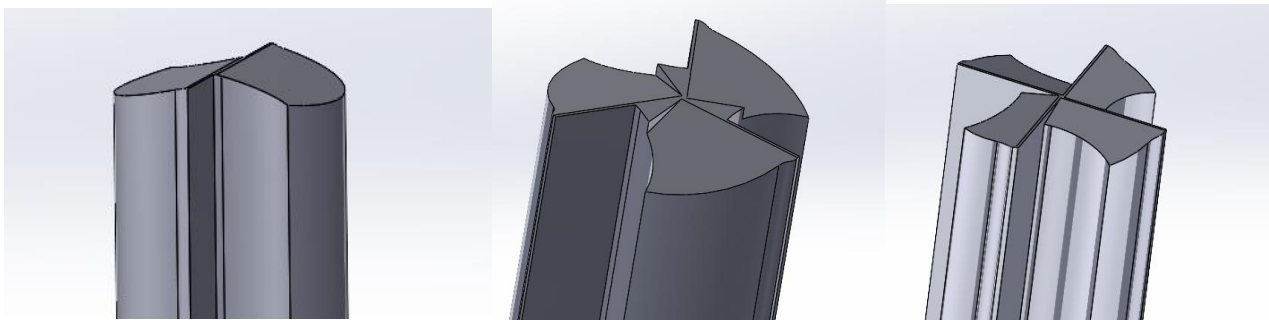
Εικόνα 38 : Διατομή κοπτικών

Για την διαμόρφωση του μπροστινού άκρου δημιουργείται ένα sketch σε επίπεδο κάθετο κατά τον διαμήκη άξονα του κοπτικού. Το τμήμα αυτό θα αφαιρεθεί από κάθε πτερύγιο ξεχωριστά ώστε να δημιουργηθεί η γωνιά ελευθέριας.

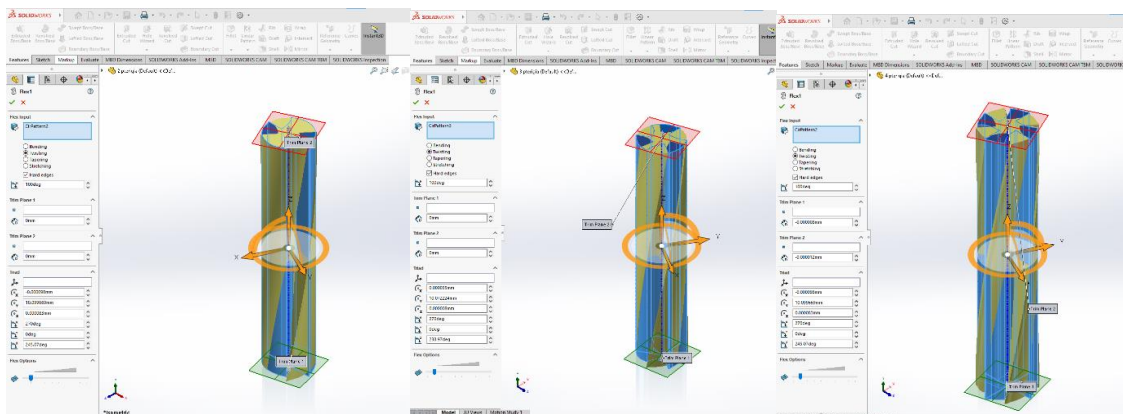


Εικόνα 39 : sketch για διαμόρφωση άκρου

Κατόπιν, με την εντολή extruded cut και circular pattern διαμορφώνονται τα άκρα των κοπτικών . Στην παρούσα διπλωματική δεν δίνεται μεγάλη σημασία στις γωνίες κοπής, ελίκωσης κλπ. Διότι εξετάζουμε την σημασία του πλήθους των πτερυγίων.



Εικόνα 40 : Τελική μορφή άκρων

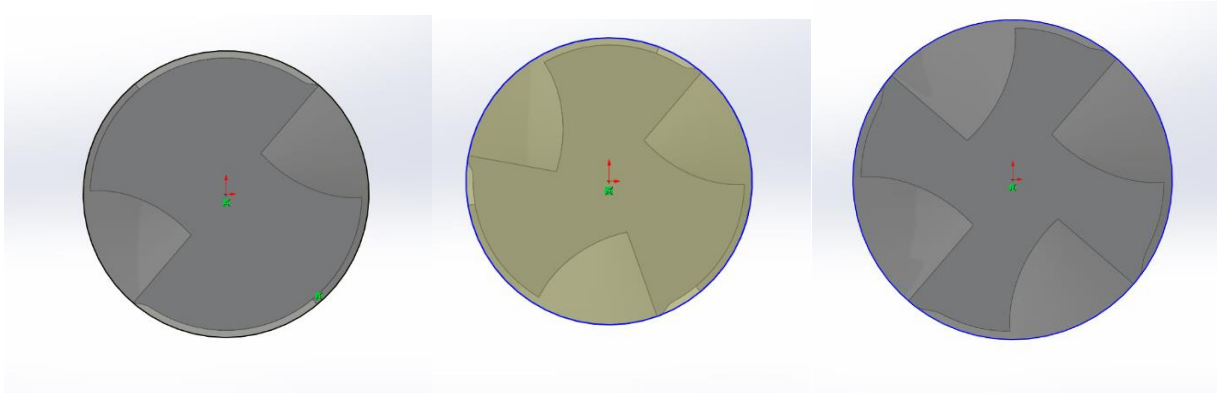


Εικόνα 41: Περιστροφή για δημιουργία ελίκωσης

Αφότου έχουν σχεδιαστεί όλα τα χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιείτε την εντολή Flex για περιστραφεί το κοπτικό και να δημιουργηθεί η ελίκωση. Για να εφαρμοστεί η εντολή Flex επιλέγεται η αφετηρία και το τελικό σημείο ανάμεσα στα οποία θα πραγματοποιηθεί η περιστροφή. Στην συνέχεια ορίζοντας τις μοίρες της περιστροφής προσαρμόζεται και η γωνία ελικοειδούς

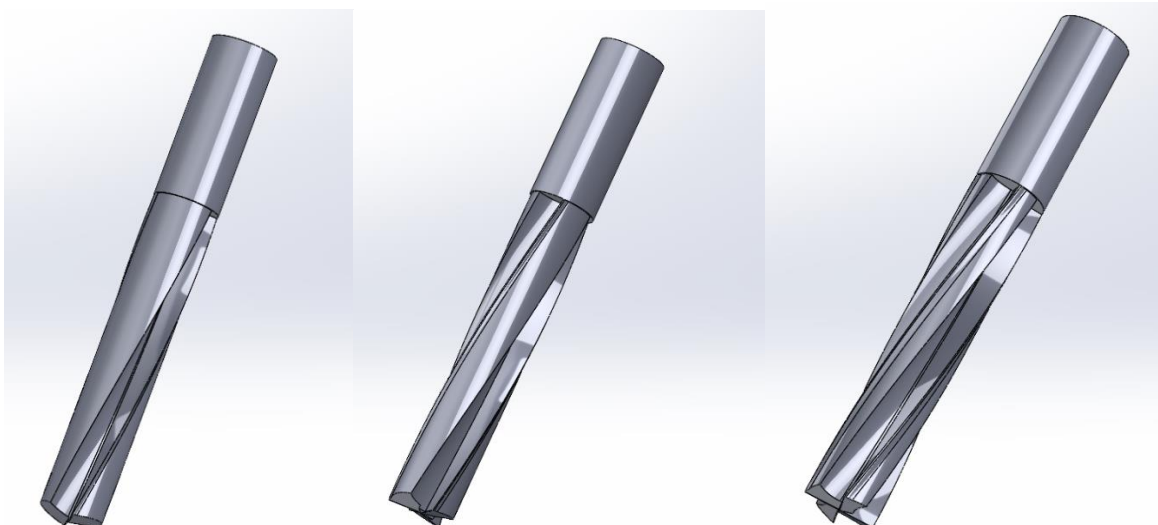
αυλάκωσης. Το μήκος των κοπτικών είναι ίδιο ,επιλέγοντας 100 μοίρες περιστροφής και στα τρία, εξασφαλίζω ίδια γωνία ελίκωσης .

Τέλος, για την ολοκλήρωση του κοπτικού δημιουργείται ένα sketch στο πίσω εγκάρσιο μέρος του κοπτικού.



Εικόνα 42 : sketch για δημιουργία στελέχους συγκράτησης

Με την εντολή extruded από την καρτέλα features δημιουργείται κύλινδρος ο οποίος αποτελεί το στέλεχος συγκράτησης του κοπτικού στην μηχανή κατεργασίας. Κατά την προσομοίωση το κοπτικό δεν θα χρησιμοποιηθεί με όλο το μήκος του αλλά ένα μέρος από αυτό, το μπροστά άκρο δηλαδή το τμήμα εκείνο που θα συμβάλει στην κατεργασία. Η σχεδίαση έγινε για ολόκληρο το κοπτικό για λόγους αισθητικής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τελική μορφή των τριών κοπτικών όπου αριθμείται το πλήθος των πτερυγίων 2-3-4 κατά σειρά.

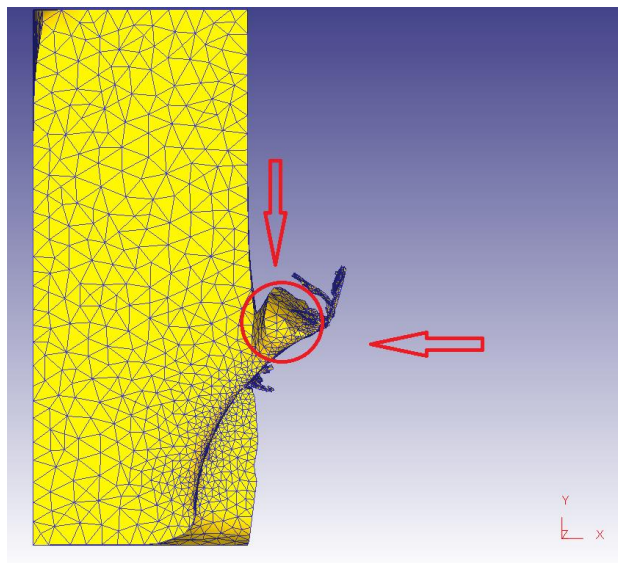


Εικόνα 43: Τελική μορφή κοπτικών

3.4 Σχεδιασμός κατεργαζόμενου τεμαχίου SOLIDWORKS (CAD)

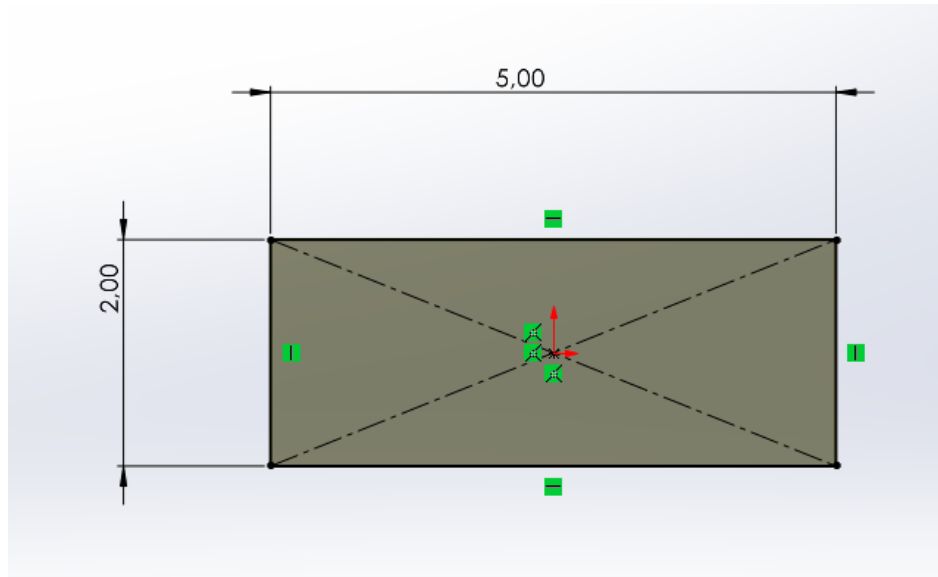
Το τεμάχιο οπού πρόκειται να κατεργαστούμε θα έχει την μορφή ορθογωνίου με διαστάσεις , μήκος 5mm , πλάτος 2mm , ύψος 1,5mm. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι ο AISI 1045 ένας χάλυβας μέσου εφελκυσμού που παράγεται σε μαύρη θερμή έλαση . Έχει αντοχή σε εφελκυσμό 570 - 700 MPa και σκληρότητα κατά Brinell που κυμαίνεται μεταξύ 170 και 210. Ο χάλυβας 1045 παρουσιάζει μέση αντοχή σε εφελκυσμό, καλή συγκολλησιμότητα και κατεργασιμότητα και υψηλή αντοχή. Συνήθως χρησιμοποιείται σε εξαρτήματα μηχανημάτων, γρανάζια, στροφαλοφόρους άξονες, άξονες, μπουλόνια, πείρους, γρανάζια, τροχούς και πλάκες στήριξης. Όλα αυτά τα εξαρτήματα για να παραχθούν χρειάζονται μηχανουργικές κατεργασίες και πολλές φορές φραιζάρισμα για τον λόγο αυτόν και η επιλογή του υλικού το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο.

Σε προγενέστερες δοκιμαστικές προσομοιώσεις που έγιναν, παρατηρήθηκε πρόβλημα με το τεμάχιο κατεργασίας ορθογωνικής διατομής. Το πρόβλημα δημιουργήθηκε με την αφαίρεση του πρώτου απόβλιττου μεγάλου σχετικά όγκου όπου δεν αποκολλήθηκε από το τεμάχιο αλλά συνέχισε να στρεβλώνεται ως απόληξη καθ' όλη την διάρκεια της προσομοιώσεις μη αφήνοντας και τα υπόλοιπα απόβλιττα να αποκολληθούν πράγμα που σημαίνει πιθανόν λάθος αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη προσομοίωση έγινε με κοπτικό δυο πτερυγίων και συνθήκες κατεργασίας με αυτές που αποφασίστηκαν για την διεκπεραίωση όλων των προσομοιώσεων Το πρώτο απόβλιττο φαίνεται κυκλωμένο στην παρακάτω εικόνα, επίσης διακρίνονται και τα επόμενα απόβλιττα που δεν απομακρύνθηκαν και παρέμειναν πάνω σε αυτό. Η προσομοίωση συνεχίστηκε αλλά μάταια, το πρώτο απόβλιττο παρέμεινε. Η εικόνα που ακολουθεί είναι στα πρώτα στάδια (step).



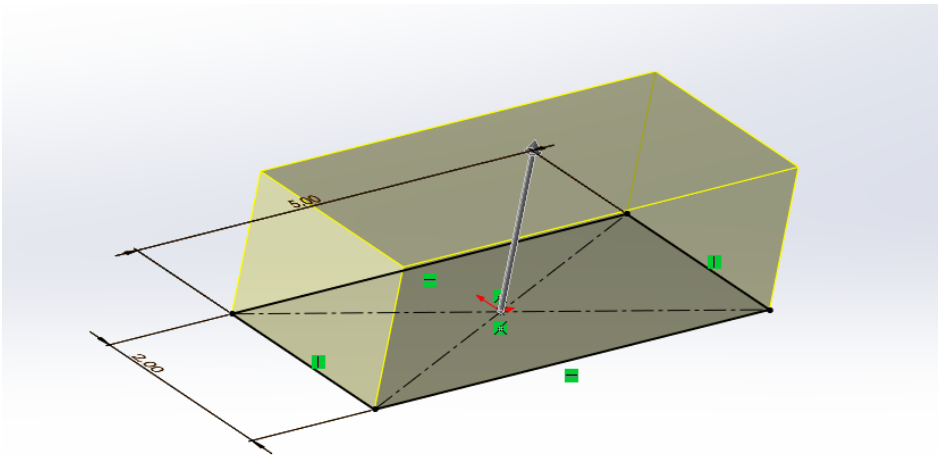
Εικόνα 44 : Απεικόνιση σφάλματος DEFORM

Για να δοθεί λύση σε αυτό το πρόβλημα επιλέχθηκε να σχεδιαστεί ένα τεμάχιο ιδίων διαστάσεων, αφαιρώντας σχεδιαστικά το πρώτο απόβλιττο μεγάλου όγκου ώστε να αποφύγουμε την στρέβλωση του. Με την βοήθεια του SOLIDWORKS δημιουργήθηκε το sketch ορθογωνίου με διαστάσεις 5mm μήκος και 2mm πλάτος.



Εικόνα 45: sketch τεμαχίου

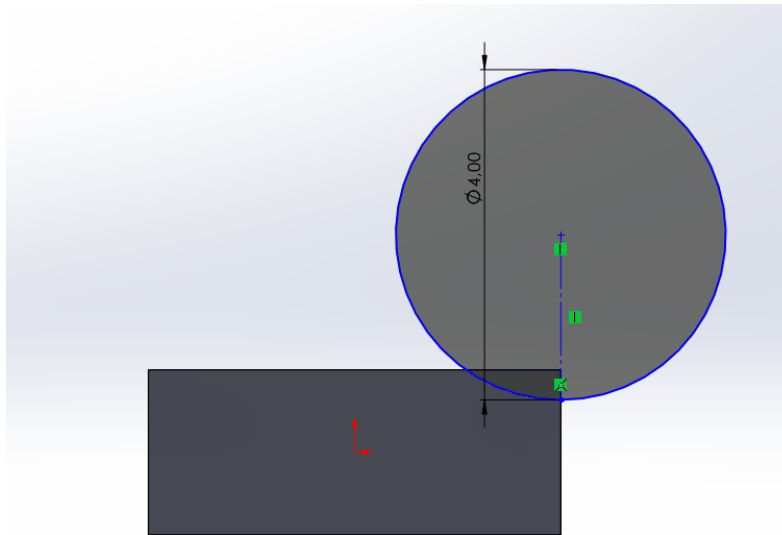
Στην συνέχεια με την εντολή extruded από την καρτέλα features και ύψος 1,5mm δημιουργήθηκε ο παρακάτω όγκος.



Εικόνα 46: Όγκος τεμαχίου

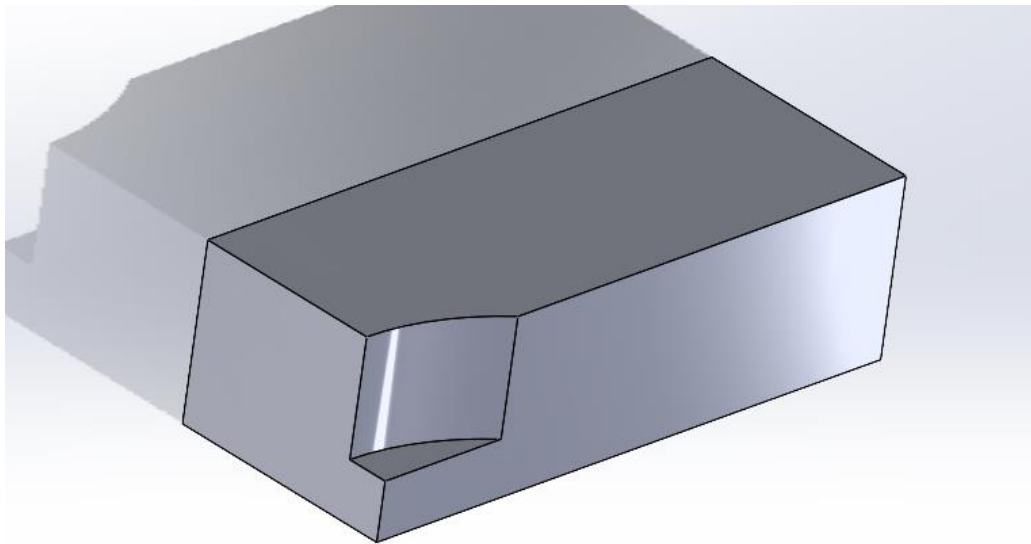
Μέχρι στιγμής δημιουργήθηκε το αρχικό τεμάχιο με το οποίο είχαμε πρόβλημα. Επόμενο βήμα είναι η αφαίρεση το πρώτου αποβλίττου. Δημιουργείται ένα sketch με κύκλο διαμέτρου ίσου με αυτό της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου δηλαδή 4 mm.

Το κέντρο του κύκλου τοποθετείται στην ευθεία αρχής του τεμαχίου όπως χρειάζεται για την λειτουργία του προγράμματος και εκτοπισμένο όσο το ακτινικό βάθος κοπής όπου θα αναφερθούμε παρακάτω.



Εικόνα 47: sketch τομής

Με την εντολή extruded cut από την καρτέλα features αφαιρείται το τμήμα με βάθος όσο το αξονικό βάθος κοπής και με τον τρόπο αυτό ολοκληρώσαμε το σχεδιασμό του τεμαχίου με σκοπο να αποφύγουμε το πρώτο απόβλιττο να γίνει απόληξη.



Εικόνα 48 : Τελική μορφή τεμαχίου κατεργασίας

3.5 Υπολογισμός παραμέτρων κατεργασίας Microsoft Excel

Το Microsoft Excel είναι ένα πρόγραμμα λογιστικών φύλλων που χρησιμοποιεί πλέγμα κελιών διατεταγμένα σε σειρές και στήλες με σκοπό την οργάνωση και τον χειρισμό δεδομένων. Προσφέρει την δυνατότητα επίλυσης αριθμητικών πράξεων, πολύπλοκων εξισώσεων και την δημιουργία γραφικών παραστάσεων, ιστογραμμάτων και γραφημάτων. Ακόμα περιέχει μια πτυχή προγραμματισμού με την χρήση μακροεντολών με το όνομα Visual Basic for Applications. Έχει γίνει χρήση των υπολογιστικών φύλλων του Microsoft Excel ώστε να υπολογιστούν διάφορες παράμετροι και συνθήκες κατεργασίας που θα εισαχθούν στο λογισμικό προσομοίωσης. Το υπολογιστικό φύλλο χρησιμοποιείται ως βοηθητικό για εύκολους υπολογισμούς και συγκέντρωση των πληροφοριών.

	A	B	C	D	E	F
1	Tool	Carbide (15%)				
2	Tool height (H)	5 mm				
3	Tool diameter (D)	4 mm				
4	Spindle speed (N)	6000 rpm	100,0 rps			
5	feed/tooth (fz)	0,1 mm/tooth				
6	Axial depth (az)	1 mm				
7	radial depth (axy)	0,5 mm				
8	Number of tooth (z)	2				
9						
10	Workpiece	AISI-1045(Machining)	15 Volume (mm ³)			
11	Workpiece width	2 mm				
12	Workpiece height	1,5 mm				
13	Workpiece length	5 mm				
14	Cutting length	1 mm				
15						
16	Feeding velocity (fr)	1200 mm/min	20,00 mm/sec			
17	cutting speed (V)	75 m/min				
18						
19						
20	Time for one rev	0,01 sec				
21						
22	Degrees / steps	1				
23	Steps / rev	720				
24	Size ratio	10				
25						
26	Step increment	2,00E-05 sec/step				
27	Number of Steps	2750				
28	Stop (Primary Die displacement-mm)	2				
29	Minimum element size	0,025				
30	Maximum element size	0,25				
31						
32	produced chips	10				
33						
34						

Εικόνα 49: Υπολογισμός παραμέτρων κοπτικών 2-3 πτερυγίων αντίστοιχα

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν οι συνθήκες κατεργασίας. Με βάση το μέγεθος του κοπτικού και κυρίως της διαμέτρου επιλέγονται οι βασικές συνθήκες κατεργασίας. Μετά από έρευνα στην βιβλιογραφία επιλέγεται ως ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού τα 6.000 RPM. Η πρόωση επιλέγεται στα 20 mm/sec ίδια και στις τρεις προσομοιώσεις όπως είναι αναμενόμενο. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στα 40 N/sec/mm/C. Διάμετρος του κοπτικού 4mm, μήκος κοπτικού 5mm, αξονικό βάθος κοπής (az) 1mm και το ακτινικό βάθος κοπής (axy) 0.5mm.

Σε ένα λογιστικό φύλλο του Excel δημιουργήθηκε κατάλληλη φόρμουλα για τον υπολογισμό διαφόρων πληροφοριών που βοηθάνε στο στήσιμο του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες εισαγωγής δεδομένων, η πρώτη με τίτλο tool όπου δίνουμε τα στοιχεία του κοπτικού εργαλείου ενώ στη δεύτερη με τίτλο workpiece δίνουμε τα στοιχεία του δοκιμίου προς κατεργασία. Χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εξισώσεις με τα δεδομένα που εισήγαμε προηγούμενος μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των βημάτων (step) για την ολοκλήρωση του επιθυμητού μήκους κατεργασίας, την ταχύτητα κοπής ανά πτερύγιο, τον αριθμό βημάτων για μια πλήρη περιστροφή του κοπτικού, τον ελάχιστο ή μέγιστο μέγεθος των element και πολλά άλλα όπως φαίνονται στις επόμενες εικόνες. Η διαδικασία αυτή, επαναλήφθηκε τρεις φορές κάθε μία για το αντίστοιχο κοπτικό.

	A	B	C	D	E	F
1	Tool	Carbide (15%)				
2	Tool height (H)	5	mm			
3	Tool diameter (D)	4	mm			
4	Spindle speed (N)	6000	rpm	100,0	rps	
5	feed/tooth (fz)	0,1	mm/tooth			
6	Axial depth (az)	1	mm			
7	radial depth (axy)	0,5	mm			
8	Number of tooth (z)	4				
9						
10	Workpiece	AISI-1045(Machining)		15	Volume (mm ³)	
11	Workpiece width	2	mm			
12	Workpiece height	1,5	mm			
13	Workpiece length	5	mm			
14	Cutting length	1	mm			
15						
16	Feeding velocity (fr)	2400	mm/min	40,00	mm/sec	
17	cutting speed (V)	75	m/min			
18						
19						
20	Time for one rev	0,01	sec			
21						
22	Degrees / steps	1				
23	Steps / rev	720				
24	Size ratio	10				
25						
26	Step increment	2,00E-05	sec/step			
27	Number of Steps	1375				
28	Stop (Primary Die displacement-mm)	2				
29	Minimum element size	0,0125				
30	Maximum element size	0,125				
31						
32	produced chips	10				
33						
34						

Εικόνα 50 : Υπολογισμός παραμέτρων κοπτικού 4 πτερυγίων

4. Υπολογιστική μέθοδος προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων με χρήση DEFORM 3D

Το DEFORM-3D της Scientific Forming Technologies Corporation είναι ένα πανίσχυρο λογισμικό προσομοίωσης που σχεδιάστηκε ειδικά για την ανάλυση της τρισδιάστατης ροής σε πολύπλοκες διαδικασίες μορφοποίησης μετάλλων. Αποτελεί ένα πρακτικό και αποτελεσματικό εργαλείο που επιτρέπει στον χρήστη να προβλέπει την εξέλιξη της κατεργασίας χωρίς το κόστος και την καθυστέρηση που συνήθως συνδέονται με τις δοκιμές στο εργαστήριο. Το DEFORM βασίζεται σε ένα ανοικτό σύστημα που προσφέρει μεγάλη ευελιξία στους σχεδιαστές και αναλυτές, επιτρέποντάς τους να ορίζουν δικές τους μεθόδους και μεταβλητές για την προσομοίωση των ενώσεων και τη μελέτη των τάσεων μεταξύ σωμάτων.

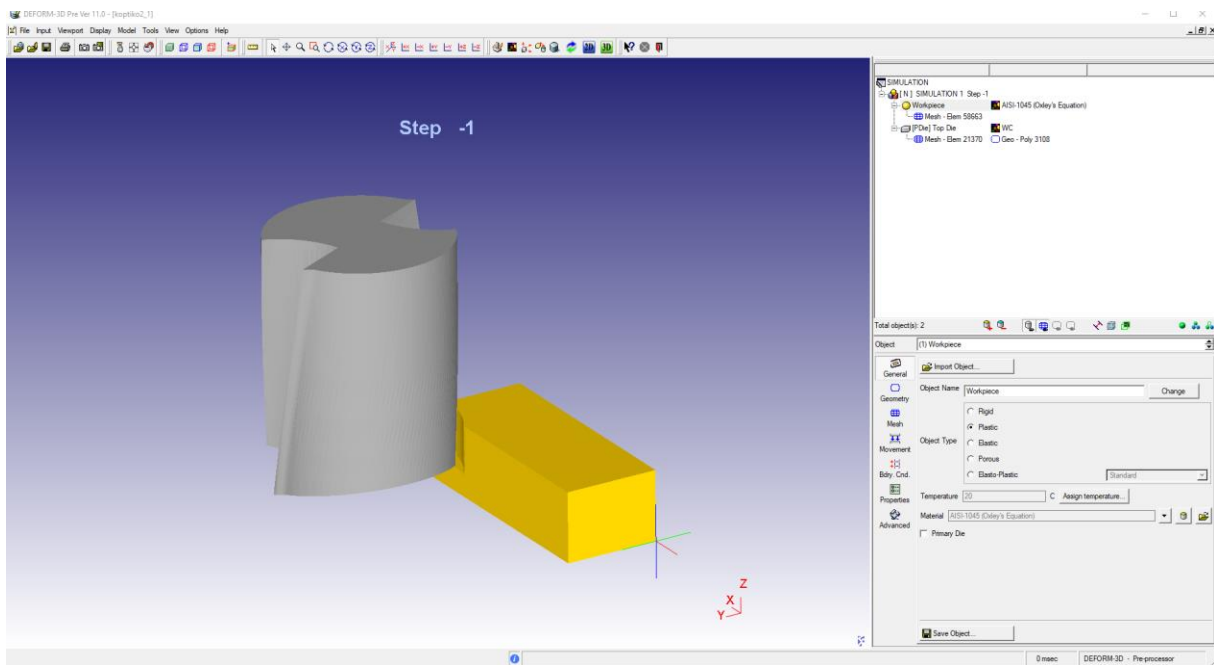
Με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το DEFORM έχει αποδειχθεί ακριβές και εξαιρετικά ικανό σε βιομηχανικές εφαρμογές για περισσότερες από δύο δεκαετίες. Μπορεί να προβλέπει τη ροή υλικού με μεγάλη παραμόρφωση και τη θερμική του συμπεριφορά με υψηλή ακρίβεια. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν ευρέως χρησιμοποιούμενο από ερευνητικά κέντρα και κατασκευαστές σε πολλούς τομείς.

Οι δυο πιο βασικές μεθοδολογίες είναι η Eulerian και η Lagrangian αλλά και σε συνδιασμό αυτών όπως η Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) και Coupled Eulerian Lagrangian (CEL). Η μέθοδος Lagrangian χρησιμοποιείται κυρίως για κατεργασίες διάτρησης μιας και οι επιλυτές του λογισμικού είναι βελτιστοποιημένοι γι' αυτή και η προσομοίωση εξελίσσεται πολύ πιο γρήγορα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι διατηρεί σε αρχείο ολόκληρη την διαδικασία της προσομοίωσης και επιτρέπει την αναδρομή σε οποιαδήποτε βήμα της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει πως ακόμα και αν η προσομοίωση σταματήσει ή παρουσιάσει κάποιο σφάλμα, που είναι πολύ σύνηθες φαινόμενο, υπάρχει πάντα η δυνατότητα της επανεκκίνησης από εκεί που σταμάτησε. Αυτή η δυνατότητα υπάρχει διότι με την Lagrangian μέθοδο σε κάθε βήμα της προσομοίωσης γίνεται επαναδιακρητοποίηση των στοιχείων προκυμμένου να διαχειριστεί το λογισμικό την παραμόρφωση του υλικού.

Η προσομοίωση κοπτικών φρεζαρίσματος αποτελεί σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας του DEFORM-3D, καθώς επιτρέπει στους χρήστες να αναλύουν την επίδραση των διάφορων παραμέτρων κοπτικής επεξεργασίας στον τελικό τρισδιάστατο σχηματισμό των μεταλλικών εξαρτημάτων. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, μπορούν να εξεταστούν πολλοί παράγοντες, όπως η γωνία κοπής, η ταχύτητα πρόωσης, το βάθος κοπής, θερμοκρασίες σε κοπτικό και τεμάχιο και οι υλικοτεχνικές ιδιότητες του υλικού που επεξεργάζεται. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις κοπτικών φρεζαρίσματος μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον κατανομή της θερμότητας και των τάσεων εντός του υλικού κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς και σχεδιαστές να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους κοπτικής επεξεργασίας για

τη μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής, καθώς και για τη βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης των κατεργασιών. Ως εκ τούτου, η προσομοίωση κοπτικών φραιζαρίσματος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας των μεταλλικών κατεργασιών.

Λόγω της φύσης της εργασίας που μελετάτε, η προσομοίωση φραιζαρίσματος θεωρήθηκε κατάλληλη για το λογισμικό DEFORM-3D V11.0. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, θα προσομοιώσετε το φραιζάρισμα ενός δοκιμίου AISI 1045 χρησιμοποιώντας ένα κοπτικό εργαλείο από καρβίδιο του βολφραμίου (WC) με επικάλυψη TiALN, χωρίς τη χρήση υγρού κοπής. Μέσω του λογισμικού DEFORM-3D V11.0 θα εκτελέσετε αναλύσεις για τις τάσεις και τη θερμοκρασία που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Έχει οριστεί ότι το δοκίμιο παραμορφώνεται πλαστικά, ενώ το κοπτικό εργαλείο παραμένει άκαμπτο και δεν υφίσταται καμία παραμόρφωση. Η προσομοίωση θα διεξαχθεί σε τρία στάδια. Αρχικά, το μοντέλο θα δημιουργηθεί στον προ-επεξεργαστή, στη συνέχεια θα προσομοιωθεί στον επιλυτή, και τα αποτελέσματα θα εξαχθούν μέσω του μετ-επεξεργαστή. Στο πρώτο στάδιο, θα οριστούν στον προ-επεξεργαστή οι συνθήκες κατά τις οποίες θα πραγματοποιηθεί το φραιζάρισμα.



Εικόνα 51: Περιβάλλον εργασίας του pre-processor

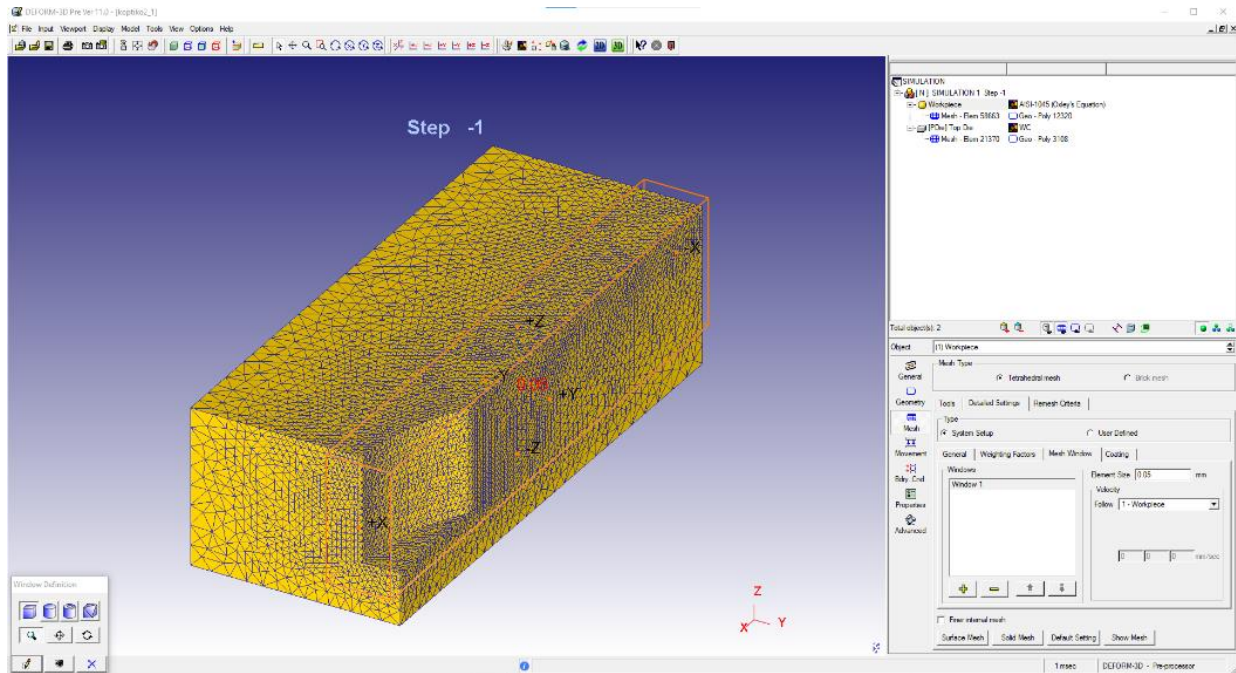
Το κοπτικό εργαλείο με το οποίο θα πραγματοποιήσει το φραιζάρισμα μπορεί είτε να επιλεγθεί χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες εργαλειοθήκες του λογισμικού, είτε να εισαχθεί από κάποιο λογισμικό CAD. Από το κοπτικό που σχεδιάστηκε θα χρησιμοποιηθεί το μπροστά τμήμα για λόγους μείωσης του χρόνου προσομοίωσης και του αριθμού των πλεγματικών στοιχείων.

Πρακτικά το υπόλοιπο τμήμα του κοπτικού δεν συμβάλει κατά την κατεργασία. Στην προκυμμένη περίπτωση τα αρχεία που δημιουργήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού SOLIDWORKS μετατρέπονται σε αρχεία μορφής stl και εισάγονται στο DEFORM. Η τοποθέτηση του κοπτικού γίνεται αυτόματα, αλλά υπάρχει επίσης η δυνατότητα μετακίνησής του σε περίπτωση που δεν είναι σε επαφή με το δοκίμιο. Στη συνέχεια, ορίζονται το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το κοπτικό εργαλείο και, αν υπάρχει, η επικάλυψή του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το υλικό του πυρήνα είναι το καρβίδιο του βολφραμίου (WC), ενώ η επικάλυψη αποτελείται από νιτρίδια τιτανίου αλουμινίου (TiAlN) με μία στρώση.

Οι συνθήκες κατεργασίας υπολογίστηκαν μέσω των υπολογιστικών φύλλων του Excel, και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν, ορίστηκαν οι συντελεστές τριβής, η μετάδοση θερμότητας και η πυκνότητα του πλέγματος που διακρίτοποιούν το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο. Αυτά τα δεδομένα δημιούργησαν τη βάση δεδομένων που απαιτείται για να ξεκινήσει η προσομοίωση. Ο συντελεστής τριβής είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη θερμοκρασία και τις δυνάμεις κατά τη διάτρηση, αλλά ο υπολογισμός του είναι πολύπλοκος λόγω πολλών παραγόντων. Για λόγους απλότητας και εξοικονόμησης χρόνου, ορίστηκε ως προτεινόμενη τιμή το 0.6 και χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή σε όλες τις προσομοιώσεις.

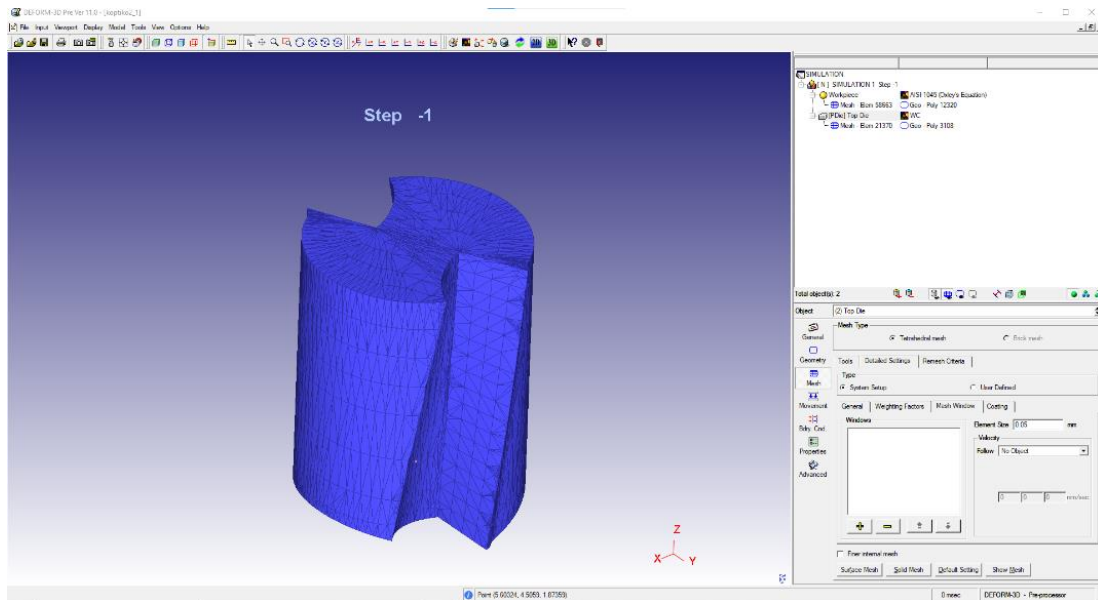
Ο υπολογισμός του ακριβούς συντελεστή μετάδοσης θερμότητας είναι μια περίπλοκη διαδικασία που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τα υλικά, η πίεση, ο βαθμός ολίσθησης και η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία. Επομένως, το λογισμικό έχει ορίσει ως προεπιλεγμένη τιμή τους 40 N/s/mm/°C για να εξοικονομηθεί χρόνος κατά τις προσομοιώσεις.

Το DEFORM παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της ποιότητας του πλέγματος, παρέχοντας επιλογές για τον αριθμό των στοιχείων και την πυκνότητά τους σε συγκεκριμένη επιφάνεια. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει γεωμετρία τετραέδρων και κυλίνδρων μέσω του mesh window. Αυτό το παράθυρο ορίζει ένα πλαίσιο με διαστάσεις που καθορίζονται από τον χρήστη, όπου εφαρμόζεται διαφορετική διακριτοποίηση του πλέγματος σε σύγκριση με την επιφάνεια εκτός ορίων. Τα στοιχεία εντός του πλαισίου είναι μικρότερα από αυτά εκτός με αναλογία 1/10, αυξάνοντας τον αριθμό και την πυκνότητα των στοιχείων στην περιοχή ενδιαφέροντος, προσεγγίζοντας έτσι την πραγματική παραμόρφωση του δοκιμίου όσο το δυνατόν περισσότερο.



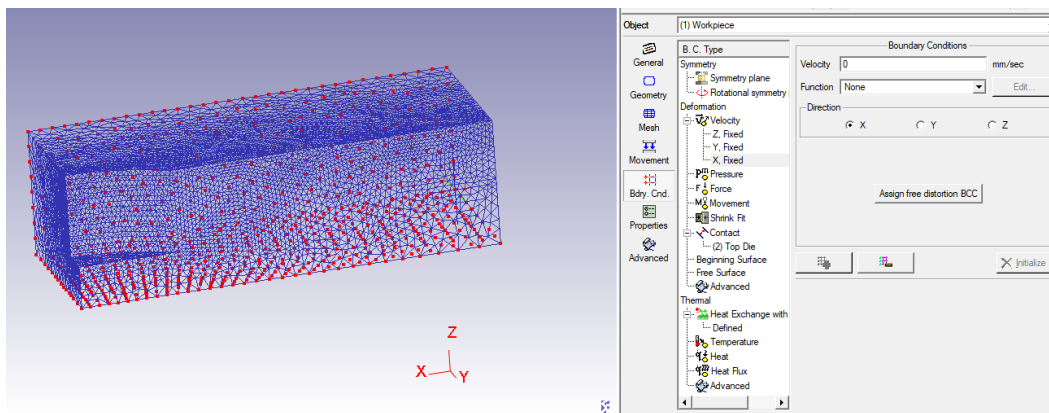
Εικόνα 52 : Εφαρμογή Mesh Window

Το πλήθος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για το δοκίμιο και το κοπτικό εργαλείο έχει σημαντική σημασία στην προσομοίωση. Για το δοκίμιο, βρέθηκε ότι το ιδανικό πλήθος είναι περίπου 60.000 στοιχεία, ενώ για το κοπτικό εργαλείο, όπου δεν απαιτείται τόσο υψηλή πυκνότητα στοιχείων, ορίστηκε ότι αντιστοιχεί σε 20.000 στοιχεία. Αυτό επιτυγχάνει την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων χωρίς υπερβολικό φόρτο υπολογισμού.



Εικόνα 53: Διακριτοποίηση κοπτικού

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής, χρησιμοποιείται μια συνεχής διαδικασία προσαρμογής του πλέγματος, γνωστή ως Adaptive Meshing Grid. Σε αυτήν τη διαδικασία, τα πλαίσια των δύο αντικειμένων προσαρμόζονται για να διατηρούνται σταθερά τα πυκνά στοιχεία του πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτό είναι σημαντικό για να αποφευχθούν δυσκολίες σύγκλισης που οφείλονται σε πολύ παραμορφωμένα στοιχεία. Μόλις επιτευχθεί η σύγκλιση, ενεργοποιείται η υπορουτίνα αναδημιουργίας του πλέγματος, διατηρώντας ταυτόχρονα τα δεδομένα της προσομοίωσης.



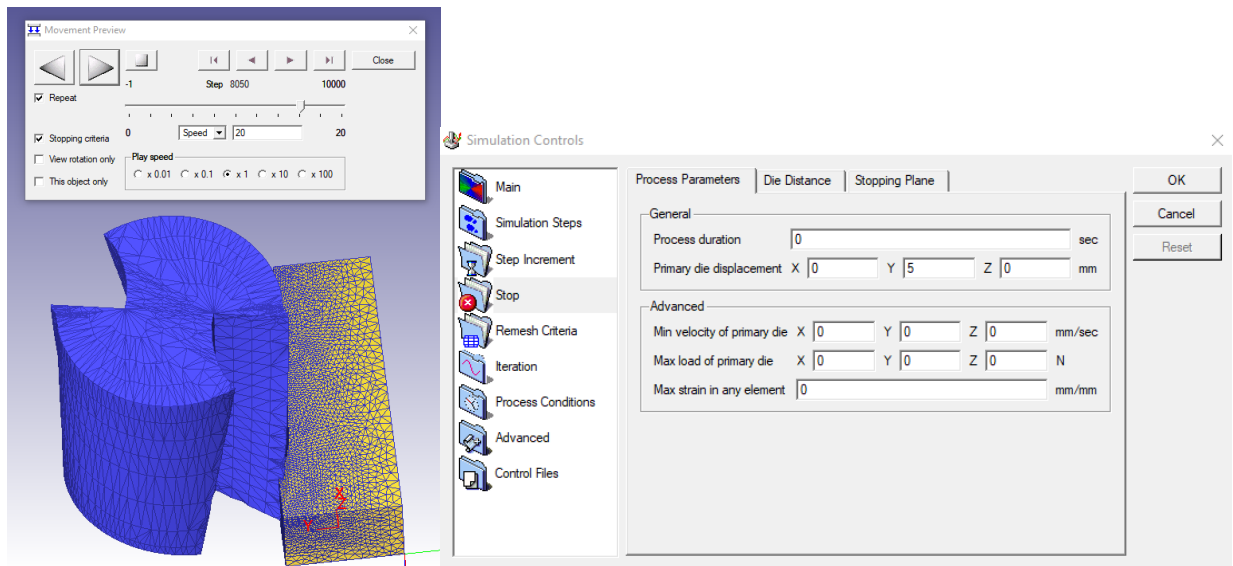
Εικόνα 54: Πάκτωση τεμαχίου

Τέλος, πρέπει να οριστούν οριακές συνθήκες που αφορούν κυρίως την κίνηση των σωμάτων, τη μεταξύ τους επαφή και τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, προκειμένου να ολοκληρωθεί η προσομοίωση με επιτυχία.

Συγκεκριμένα, για να διασφαλιστεί η σταθερότητα του δοκιμίου κατά τη διαδικασία κοπής, πρέπει να οριστούν οι κόμβοι της περιμέτρου του ως σταθερά σημεία. Αυτό εξασφαλίζει ότι το δοκίμιο παραμένει ακίνητο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επίσης, ορίζεται η επιφάνεια με την οποία γίνεται ανταλλαγή θερμότητας και δημιουργείται η αρχική επαφή μεταξύ των στοιχείων του κοπτικού εργαλείου και του δοκιμίου.

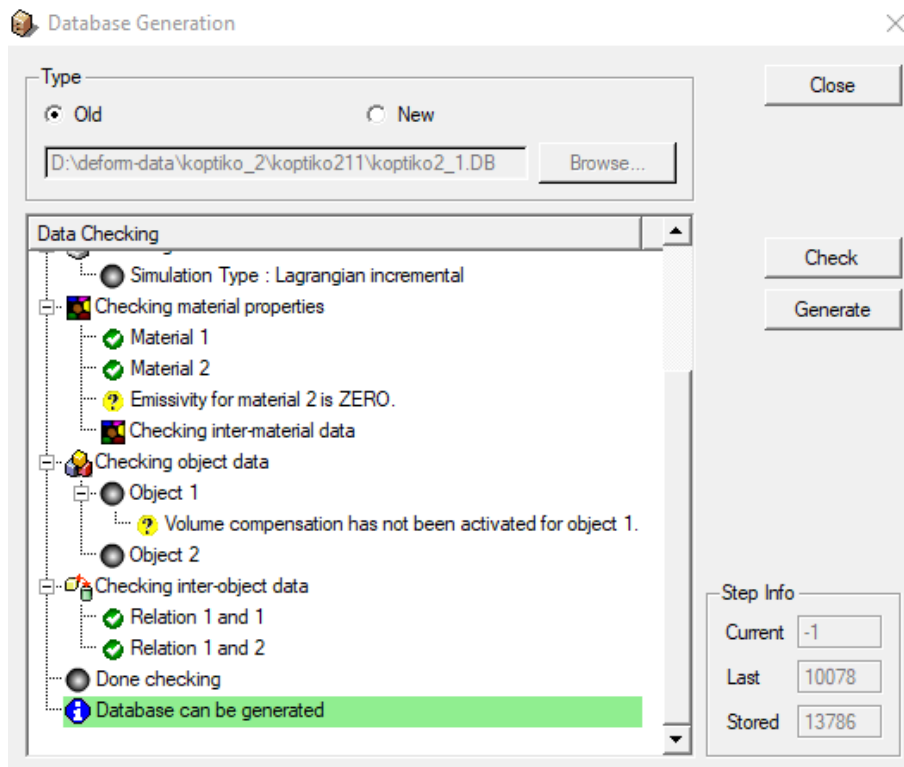
Στο κοπτικό εργαλείο, ορίζεται η ευθύγραμμη προώθηση στον άξονα X και η περιστροφή στον άξονα Z. Αυτές οι κινήσεις εισάγονται μέσω της καρτέλας "movement". Επιπλέον, γίνεται επιλογή της ταχύτητας ευθύγραμμης κίνησης (translation) στο πεδίο "constant value" με τιμή 20 mm/sec και της ταχύτητας περιστροφής (rotation) στα 6.000 RPM μέσω της καρτέλας "rotation".

Για την επιβεβαίωση των σωστών κατευθύνσεων περιστροφής και πρόωσης του κοπτικού, χρησιμοποιείται η εντολή "movement preview". Αυτή η λειτουργία προσφέρει τη δυνατότητα κίνησης του κοπτικού χωρίς την έναρξη της προσομοίωσης, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο των κατευθύνσεων κίνησης πριν την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.



Εικόνα 55: Έλεγχος κίνησης κοπτικού - Πίνακας ρύθμισης των βημάτων της προσομοίωσης

Στη συνέχεια, μέσω της επιλογής "Simulation Controls" που παρουσιάζεται και στην εικόνα, εφαρμόζονται δεδομένα που έχουν υπολογιστεί από τα φύλλα του Excel. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν την ταχύτητα που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα στην καρτέλα "Step Increment", το μήκος που θα πρέπει να διασχίσει το κοπτικό εργαλείο στην καρτέλα "Stop" και τον τελικό αριθμό των βημάτων για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης στην καρτέλα "Simulation Steps".



Εικόνα 56 : Καρτέλα δημιουργίας βάσης δεδομένων

Επιπλέον, οι παράμετροι του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και του συντελεστή τριβής ορίστηκαν στις τιμές 45 N/s/mm/°C και 0,6 αντίστοιχα. Ο προσδιορισμός αυτών των τιμών είναι πολύπλοκος και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ωστόσο, μετά από έρευνα στη βιβλιογραφία και παραδείγματα από συναδέλφους με εμπειρία, ορίστηκαν οι συγκεκριμένες τιμές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

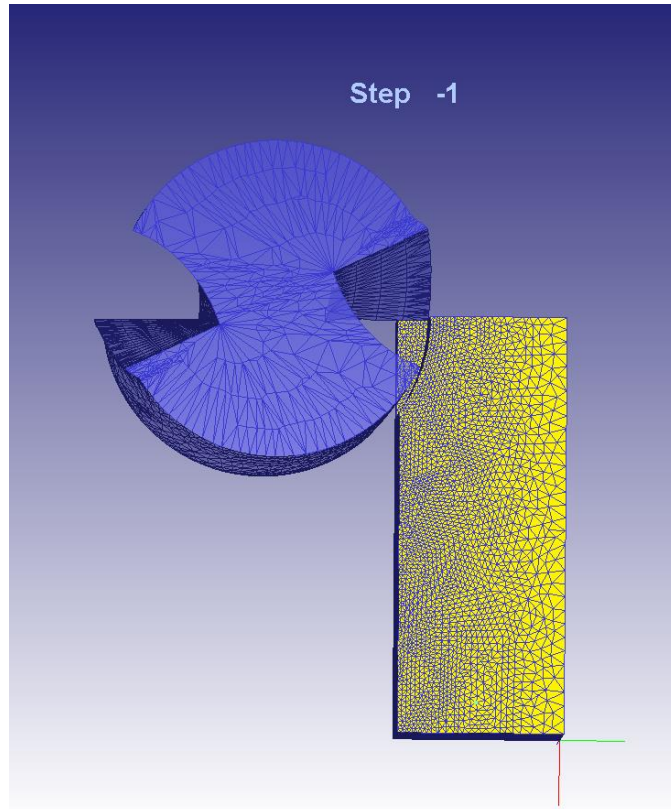
Πριν από τη μετάβαση στον επιλυτή, γίνεται ένας έλεγχος στην καρτέλα Database Generation με την εντολή Check, προκειμένου να επαληθευτούν όλες οι προϋποθέσεις. Αν όλα τα βήματα έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία, δίνεται η δυνατότητα για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων με την εντολή Generate. Η επιτυχής δημιουργία της βάσης δεδομένων σηματοδοτείται με ένδειξη πράσινου χρώματος, ενώ σε περίπτωση προβλημάτων εμφανίζεται ένδειξη κόκκινου χρώματος. Με αυτόν τον τρόπο, το λογισμικό προειδοποιεί τον χρήστη για τυχόν λάθη στα προηγούμενα βήματα της μοντελοποίησης.

Για να ξεκινήσει η προσομοίωση, απαιτείται μόνο η εντολή Run από την καρτέλα Simulator στην αρχική σελίδα του λογισμικού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξάγονται μέσω του μεταεπεξεργαστή (post-processor) μετά την ολοκλήρωσή της. Στην αρχική σελίδα του λογισμικού, στην καρτέλα Post Processor, υπάρχει η επιλογή με το όνομα DEFORM-2D/3D Post, από όπου ανοίγει το παράθυρο του Post Processor. Μέσω αυτού παρουσιάζεται ολόκληρη η προσομοίωση της κατεργασίας βήμα προς βήμα. Ο Post Processor προσφέρει πολλές δυνατότητες για την εξαγωγή αποτελεσμάτων όπως η τάση, η παραμόρφωση, οι δυνάμεις και η θερμοκρασία σε κάθε βήμα της διεργασίας. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται με εναλλαγές χρωμάτων ανάλογα με την εκάστοτε τιμή αλλά και με γραφήματα που προκύπτουν μέσω της καρτέλας Summary.

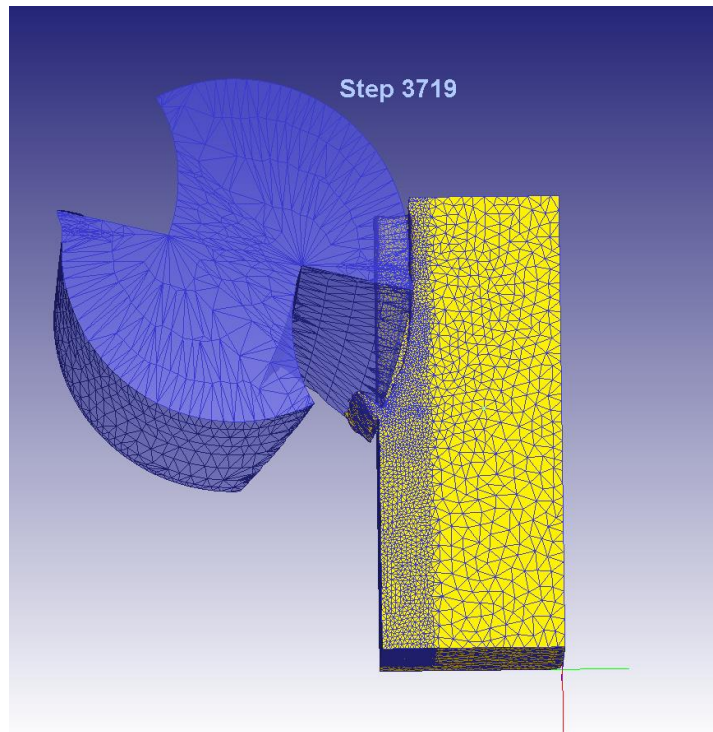
5. Αποτελέσματα

5.1 Κοπτικό δύο πτερυγίων

Αρχικά παρουσιάζεται το κοπτικό δύο πτερυγίων στην αρχική του θέση πριν ξεκινήσει η κατεργασία. Το κοπτικό πριν την έναρξη της προσομοίωσης πρέπει να βρίσκεται σε επαφή με το τεμάχιο όπως επιβάλλει το πρόγραμμα για την ορθή διεκπεραίωση της κατεργασίας. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφαλαίο η σχεδίαση του τεμαχίου με αφαίρεση του πόρτου αποβλίττου ευνοεί την κατεργασία. Η προσομοίωση είναι ένα δυναμικό μοντέλο συνεπώς αυτό δε μπορεί να αποδοθεί επαρκώς μέσω του κειμένου, οπότε παρουσιάζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα που εξήχθησαν κατά την διάρκεια που εξελισσόταν η προσομοίωση.

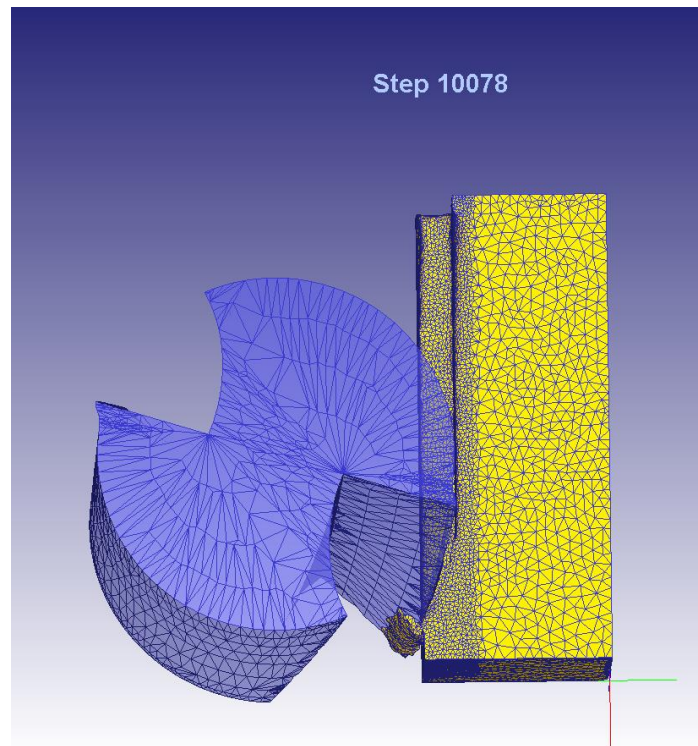


Εικόνα 57: Αρχική θέση κοπτικού πριν ξεκινήσει η κατεργασία



Εικόνα 58: Ενδιάμεσο στιγμιότυπο κατεργασίας

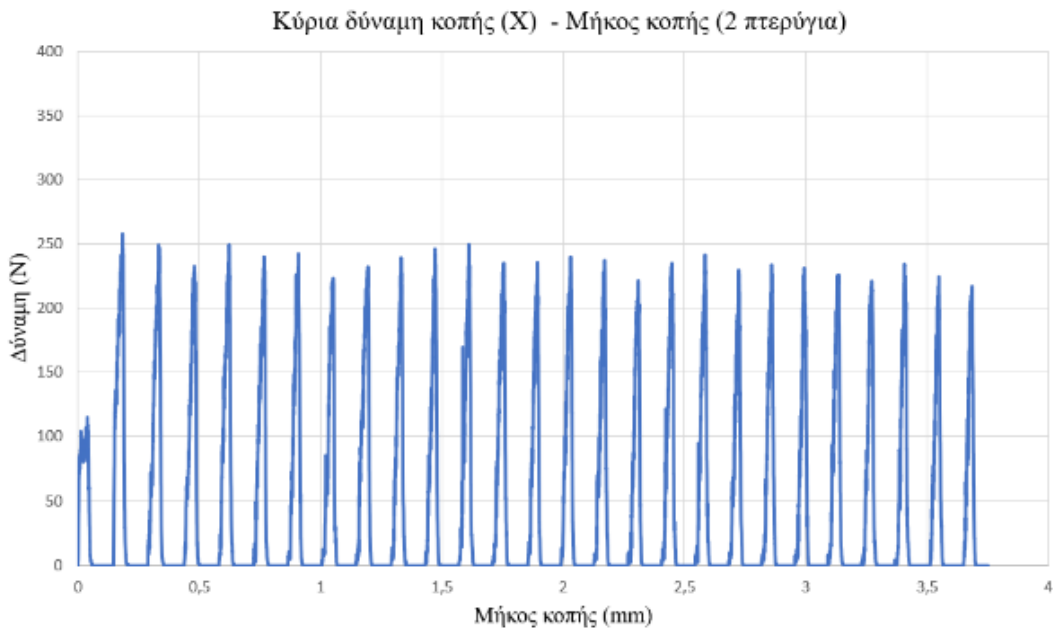
Για εξοικονόμηση χρόνου, η κατεργασία τερματίστηκε πριν διανύσει όλο το μήκος του τεμαχίου διότι οι δυνάμεις και οι θερμοκρασίες είχαν σταθεροποιηθεί και υπήρχαν επαρκής δεδομένα .



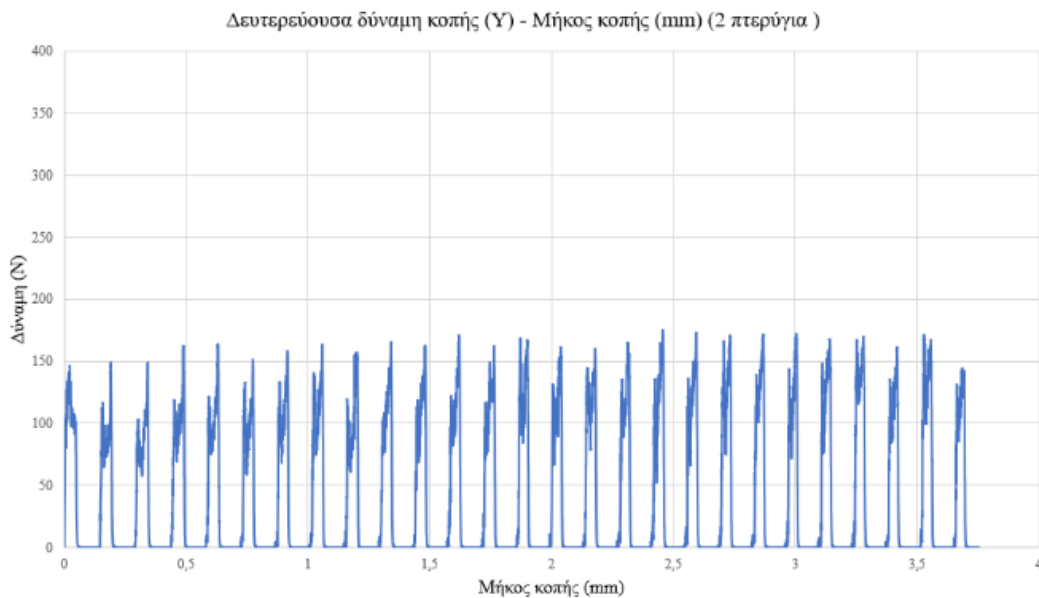
Εικόνα 59: Τελικό στάδιο προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η προσομοίωση τερματίστηκε με μη αυτοματοποιημένη μέθοδο με αποτέλεσμα η κάθε προσομοίωση να βρίσκεται σε διαφορετικό στάδιο κατά την λήξη της . Αυτό δεν μας εξυπηρετεί στην περίπτωση που θέλουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και ειδικότερα σε μορφή διαγραμμάτων. Για να γίνει μελέτη όλων των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις άλλες δυο προσομοιώσεις με τρία και τέσσερα πτερύγια πρέπει να υπάρχει ένα κοινό μετρό σύγκρισης. Σε πρώτη φάση μελετήθηκε ο χρόνος της κατεργασίας ο οποίος μετράτε με την διακριτοποίηση του λογισμικού κατά τον υπολογισμό των εξισώσεων στο κάθε στάδιο (step) χρονικού μεγέθους μερικών milliseconds. Η μέθοδος αυτή δεν βοήθησε όσον αφορά την καλή και εύκολη κατανόηση κατά την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και έτσι απορρίφθηκε. Η καλύτερη λύση βρέθηκε μελετώντας το μήκος της κατεργασίας , με την εντολή measure μετρήθηκε το μήκος που διάνυσε το κοπτικό από την αρχική του θέση έως το σημείο τερματισμού της εκάστοτε προσομοίωσης. Με την βοήθεια των υπολογιστικών φύλλων του Microsoft Excel δημιουργήθηκε η βάση υπολογισμού και στην συνέχεια η εξαγωγή των διαγραμμάτων. Το μήκος της κατεργασίας που μετρήθηκε έως την ολοκλήρωση της προσομοίωσης έγινε αναγωγή σε σχέση με το πλήθος των (step) , επομένως όλα τα αποτελέσματα θα είναι συναρτήσει του μήκους κατεργασίας .

Σε όλα τα διαγράμματα ως άνω όριο του μήκους κοπής έχει οριστεί το μικρότερο μήκος κατεργασίας και από τις τρεις προσομοιώσεις, ενώ ως μικρότερο το μηδέν όπου είναι η αρχή της κατεργασίας.

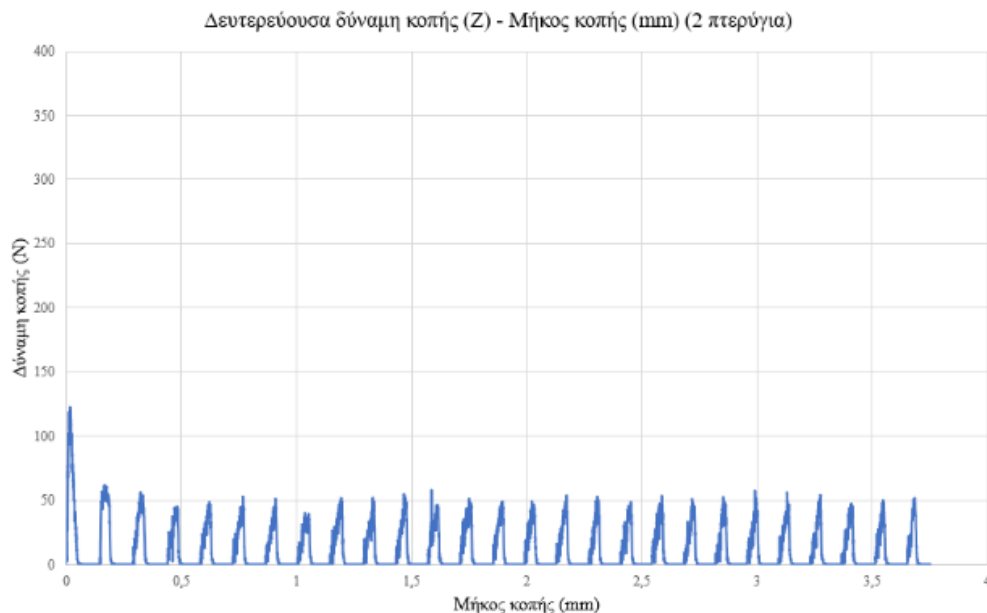


Εικόνα 60 : Κύρια δύναμη στον άξονα X (κοπτικό 2 πτερύγια)



Εικόνα 61 : Δύναμη στον άξονα Y (κοπτικό 2 πτερύγια)

Παρατηρήθηκε πως η μεγαλύτερη δύναμη αναπτύσσεται κατά τον άξονα X με τιμή να κυμαίνεται στα 245 N , αντίστοιχα στον άξονα Y 160 N , ενώ οι μικρότερες τιμές παρατηρήθηκαν στον άξονα Z με τιμή 50 N .



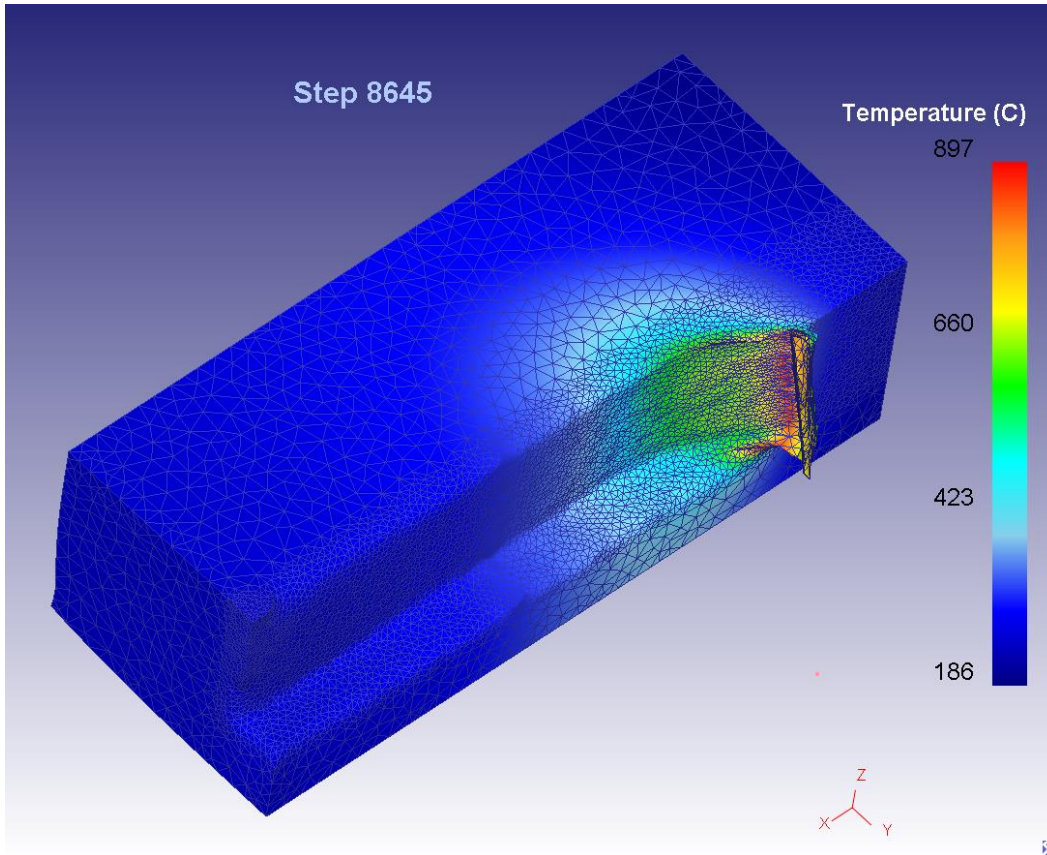
Εικόνα 62 :Δύναμη στον άξονα Z (κοπτικό 2 πτερύγια)

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται στιγμιότυπο κατά την αποκόλληση αποβλήτου ,καθώς και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο τεμάχιο προς κατεργασία .

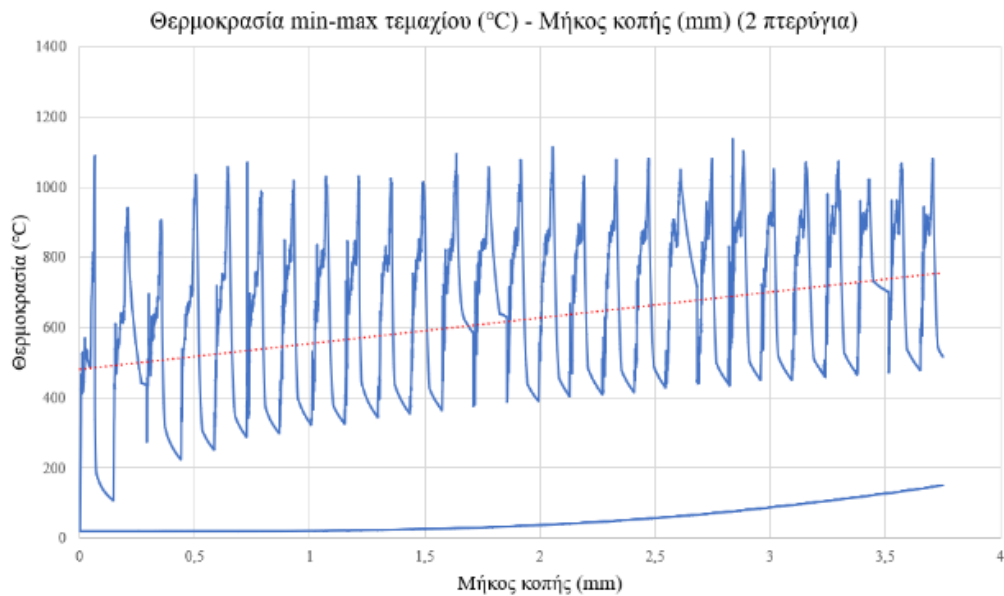
Στο διάγραμμα θερμοκρασιών του τεμαχίου παρατηρείτε αυξομείωση της μέγιστης θερμοκρασίας, αυτό συμβαίνει διότι η κοπή είναι διακοπτόμενη, δηλαδή αυξάνεται η θερμοκρασία του τεμαχίου κατά την εισχώρηση του πτερυγίου και μεγιστοποιείται έως την αποκοπή του αποβλήτου με μέγιστη τιμή τους 1.100 °C .

Η πτώση της θερμοκρασίας συμβαίνει διότι το τεμάχιο αποβάλλει συνεχώς ποσότητα στο περιβάλλον και έτσι , την στιγμή που δεν υπάρχει κοπή μειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία. Συνολικά οι τιμές των θερμοκρασιών αυξάνονται έως το σημείο ισορροπίας της παραγομένης θερμότητας κοπής και της θερμότητας που μεταφέρεται στο περιβάλλον.

Η συνεχής κάτω γραμμή στο διάγραμμα εκπροσωπεί τη ελάχιστη θερμοκρασία κατά το μήκος της κατεργασίας η οποία έχει αφετηρία τους 20 βαθμούς κελσίου όπου συνεχώς αυξάνεται διότι το τεμάχιο θερμαίνεται συνολικά και δεν προλαβαίνει να αποβάλει όλο το ποσό θερμότητας που παράγεται κατά την κοπή .



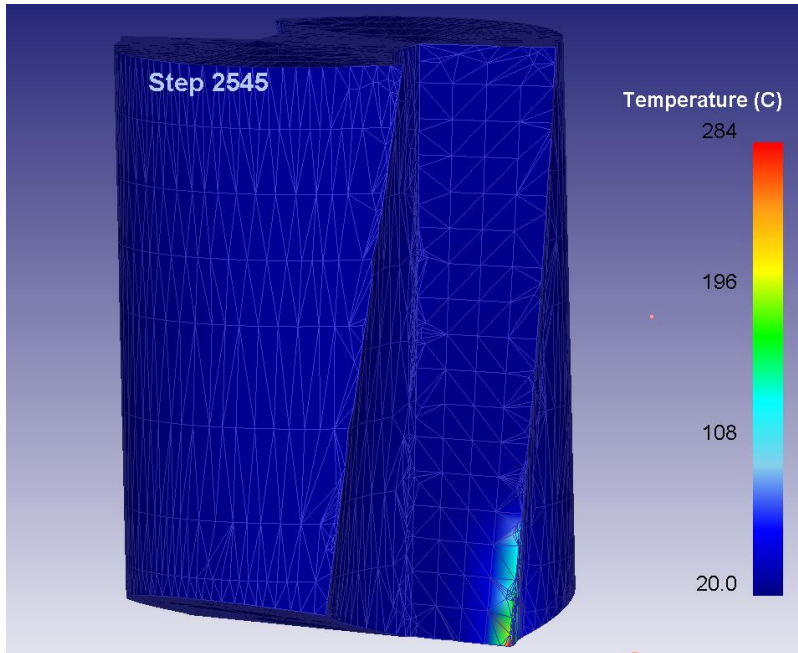
Εικόνα 63 : Στιγμιότυπο κατεργασίας , θερμοκρασίες κατά την αποκόλληση αποβλίττου



Εικόνα 64 : Διάγραμμα θερμοκρασιών τεμαχίου (2 πτερύγια)

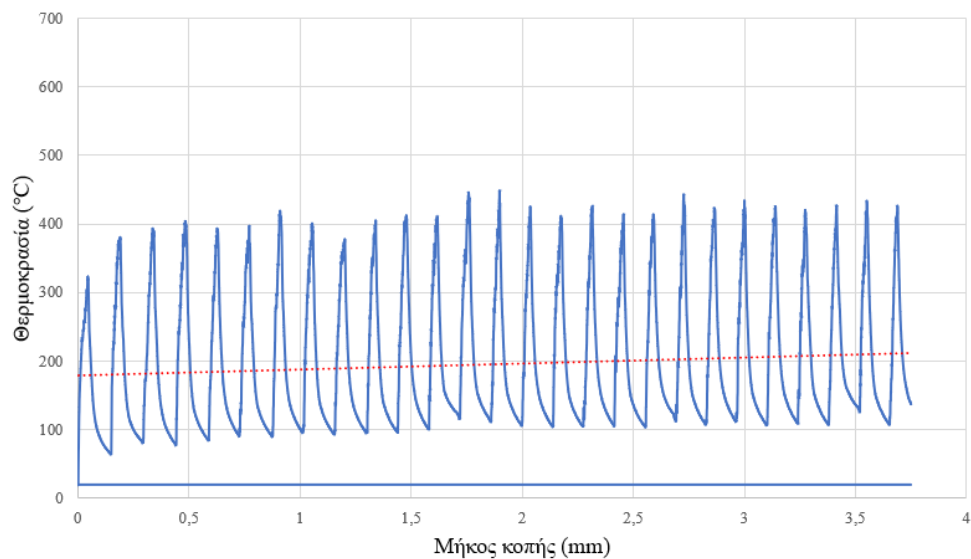
Αντίστοιχα , στο κοπτικό εργαλείο παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας στην κοπτική ακμή όπου έρχεται σε επαφή με το απόβλιττο και κυρίως στο κάτω άκρο όπως φαίνεται στην εικόνα 65 .

Ακολουθεί το διάγραμμα θερμοκρασιών του κοπτικού που περιλαμβάνει μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται από 20 έως 420 °C. Η συνεχής γραμμή στο διάγραμμα εκπροσωπεί την ελάχιστη τιμή στους 20°C σε όλη την διάρκεια του μήκους κοπής διότι δεν προλαβαίνει να θερμανθεί συνολικά , σε αυτό βοηθάει η επικάλυψη του κοπτικού .



Εικόνα 65: Στιγμιότυπο κοπτικού 2 πτερυγίων – θερμοκρασίες

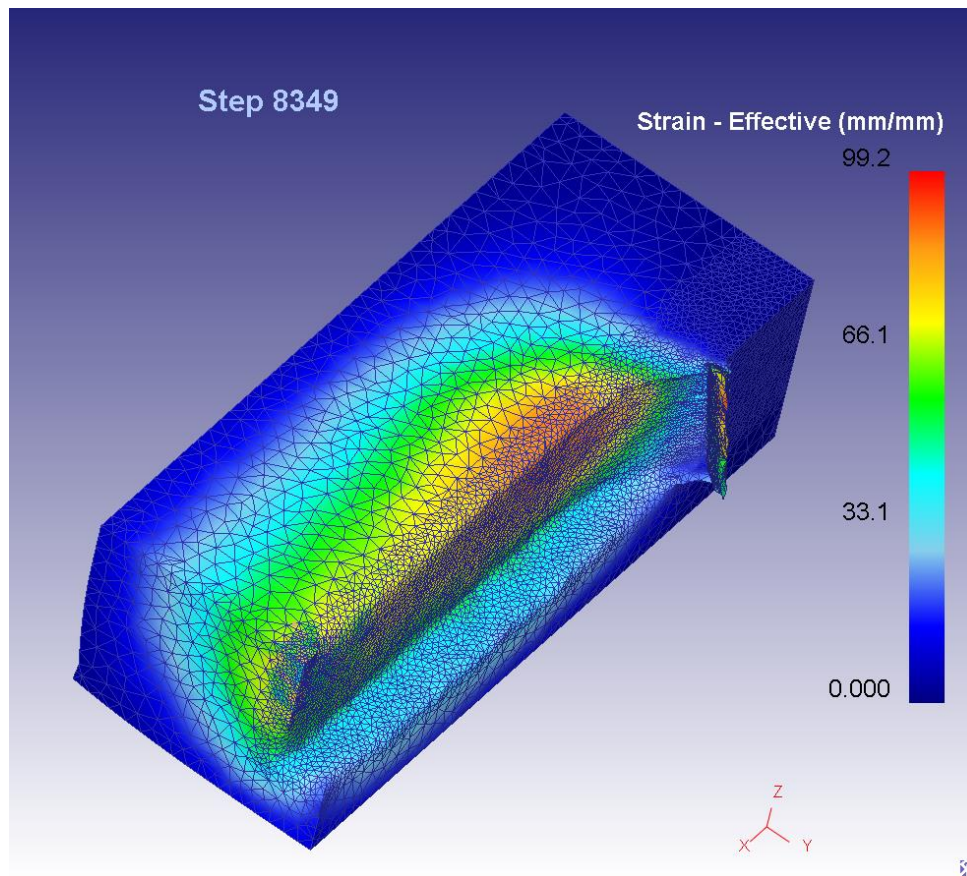
Θερμοκρασία min-max κοπτικού (°C) - Μήκος κοπής (mm) (2 πτερύγια)



Εικόνα 66 : Διάγραμμα θερμοκρασιών κοπτικού (2 πτερύγια)

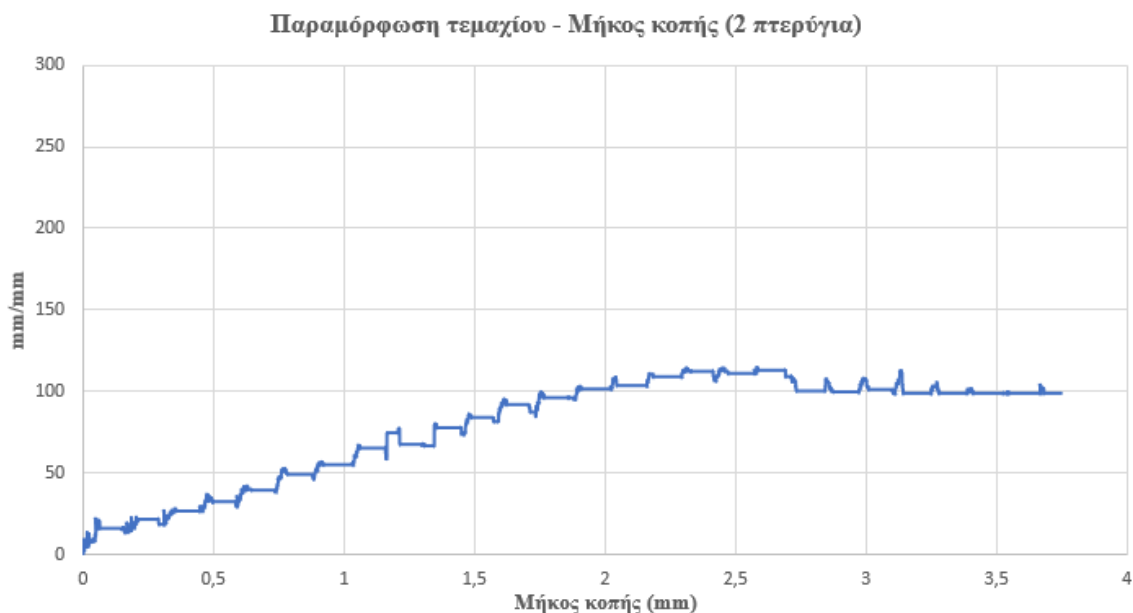
Με τον όρο παραμόρφωση εννοούμε την διαφοροποίηση του αρχικού όγκου και σχήματος του τεμαχίου και μετράται ως σύγκριση αρχικής γεωμετρίας και τελικής mm/mm. Η παραμόρφωση

εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το υλικό ,ταχύτητα , πρόωση ,βάθος κοπής και γεωμετρία κοπτικού. Κατά την κατεργασία παρατηρείται μεγάλη παραμόρφωση κυρίως στο απόβλιττο το οποίο είναι λογικό .



Εικόνα 67 : Στιγμιότυπο κατεργασίας – παραμόρφωση (2 πτερύγια)

Επίσης , εμφανίζεται παραμόρφωση και στο υπόλοιπο τεμάχιο , στην εικόνα 67 η οποία απεικονίζει στιγμιότυπο της κατεργασίας, φαίνεται η παραμόρφωση ειδικότερα στο μέσον και επάνω τμήμα του τεμαχίου όπου έχει εντονότερο χρώμα σημαίνει μεγαλύτερη τιμή. Εφόσον οι παράμετροι που αναφέρθηκαν προηγούμενος παραμένουν σταθεροί το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα ήταν και η παραμόρφωση να είναι και αυτή σταθερή. Η απάντηση βρίσκεται στο διάγραμμα θερμοκρασιών του τεμαχίου (εικόνα 64) , κατά την διάρκεια της κατεργασίας αυξάνεται συνολικά η θερμοκρασία του τεμαχίου, με αποτέλεσμα να αλλάζει το όριο διαρροής του υλικού τεμαχίου και με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η παραμόρφωση. Σημαντικό αποτέλεσμα της μελέτης αυτής είναι ότι εμφανίζεται τάξης μεγέθους μεγαλύτερη παραμόρφωση κατά το ακτινικό βάθος κοπής και μικρότερο στο ακτινικό, δηλαδή ανάλογα με την κατεύθυνση του κοπτικού είναι δυνατόν να γίνει πρόβλεψη της πλευράς με μεγαλύτερη και μικρότερη παραμόρφωση μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας .

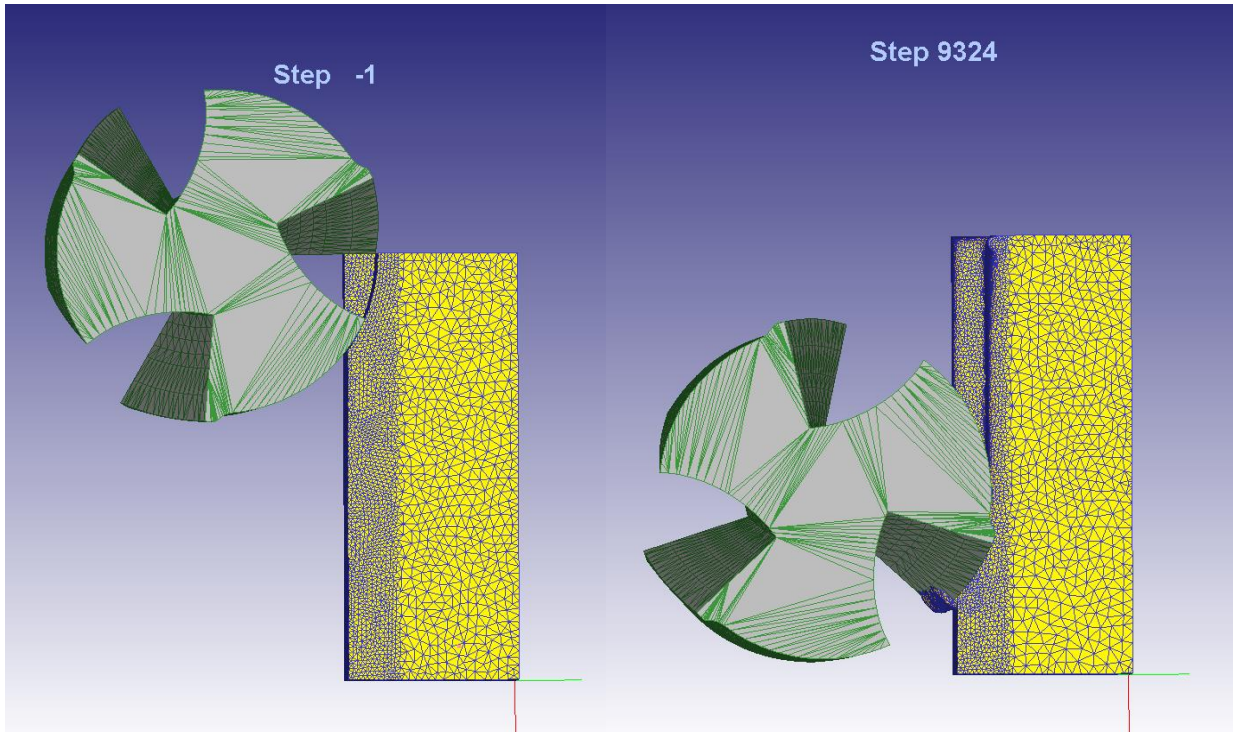


Εικόνα 68 : Διάγραμμα παραμόρφωση – Μήκος κοπής (2πτερύγια)

5.2 Κοπτικό τριών πτερυγίων

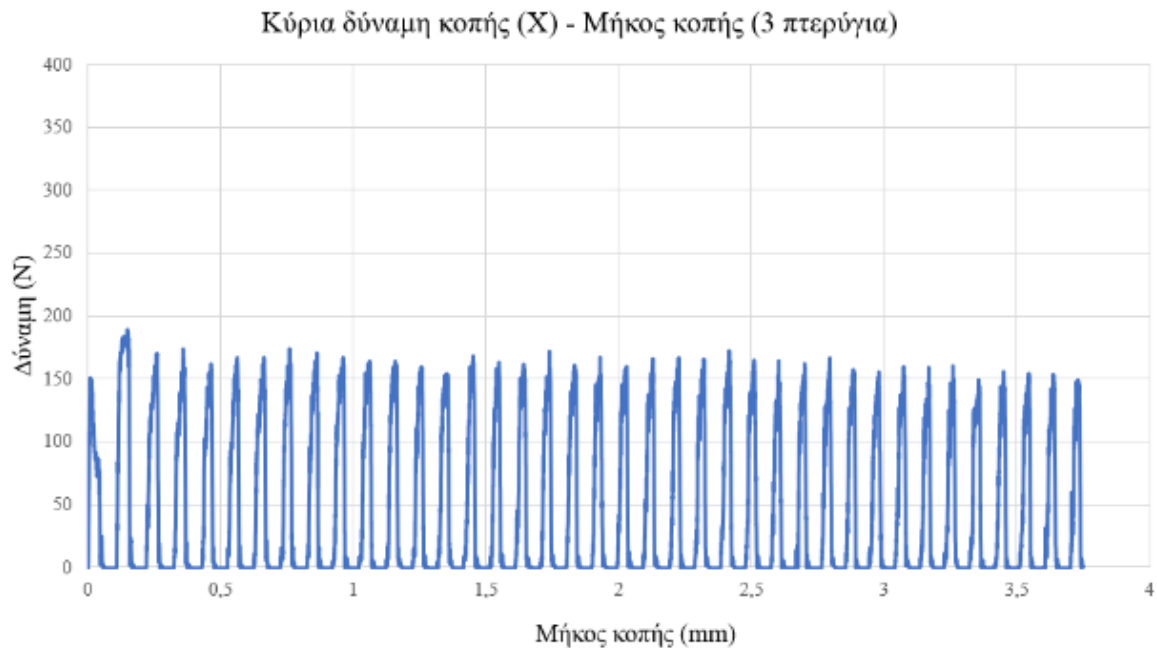
Τα αποτελέσματα στο κοπτικό τριών πτερυγίων παρουσιάζονται συνοπτικά χωρίς περαιτέρω επεξήγηση διότι έγινε αναλυτική αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο , αναφέρονται μόνο τα σημεία τα οποία διαφοροποιούνται. Αρχικά παρουσιάζεται το κοπτικό στην αρχική θέση πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Η κοπτική ακμή, μια εκ των τριών τοποθετείτε στο σε οριζόντια θέση με τέτοιο τρόπο ώστε να οριστεί το επιθυμητό αξονικό και ακτινικό βάθος κοπής κατά την ποριά του κοπτικού.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν έχουν προκύψει με την αφαίρεση 39 αποβλίπτων καθώς το κοπτικό έχει διανύσει την απόσταση των 3,75 mm. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δυνάμεις που αναπτυχθήκαν κατά την κατεργασία σε συνάρτηση του μήκους κοπής. Οι μέγιστες δυνάμεις στον άξονα X έχουν μέση τιμή 160 N, στον άξονα Y 275 N ενώ στον άξονα Z 48 N. Σε ορισμένα διαγράμματα παρατηρείται μείωση της δύναμης όσο αυξάνεται το μήκος κοπής , αυτό οφείλεται στην συνολική αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχίου όπου αλλάζει το όριο διαρροής του υλικού .

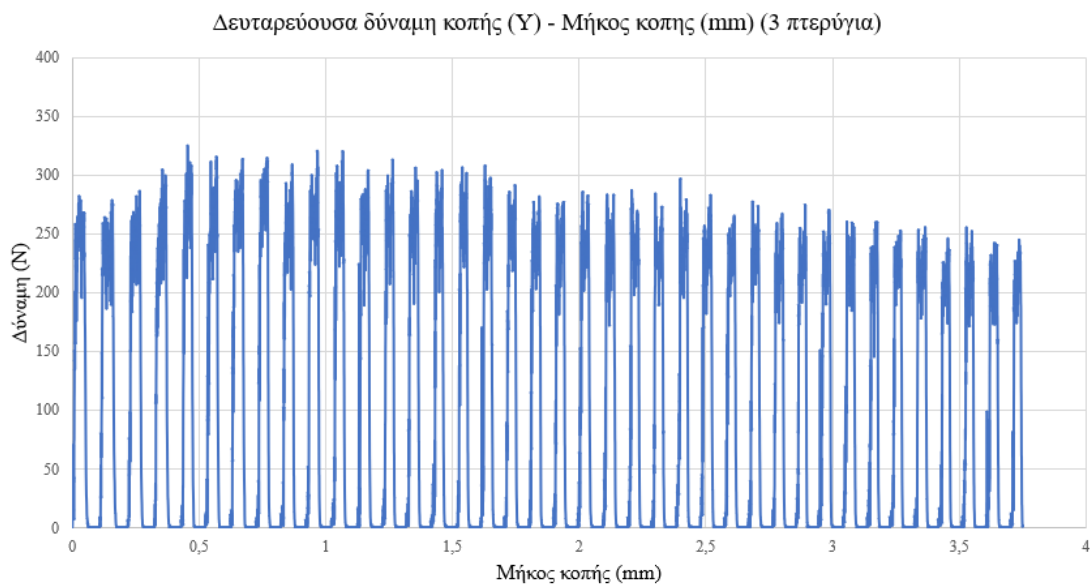


Εικόνα 69 : Αρχική θέση κοπτικού τριών πτερυγίων

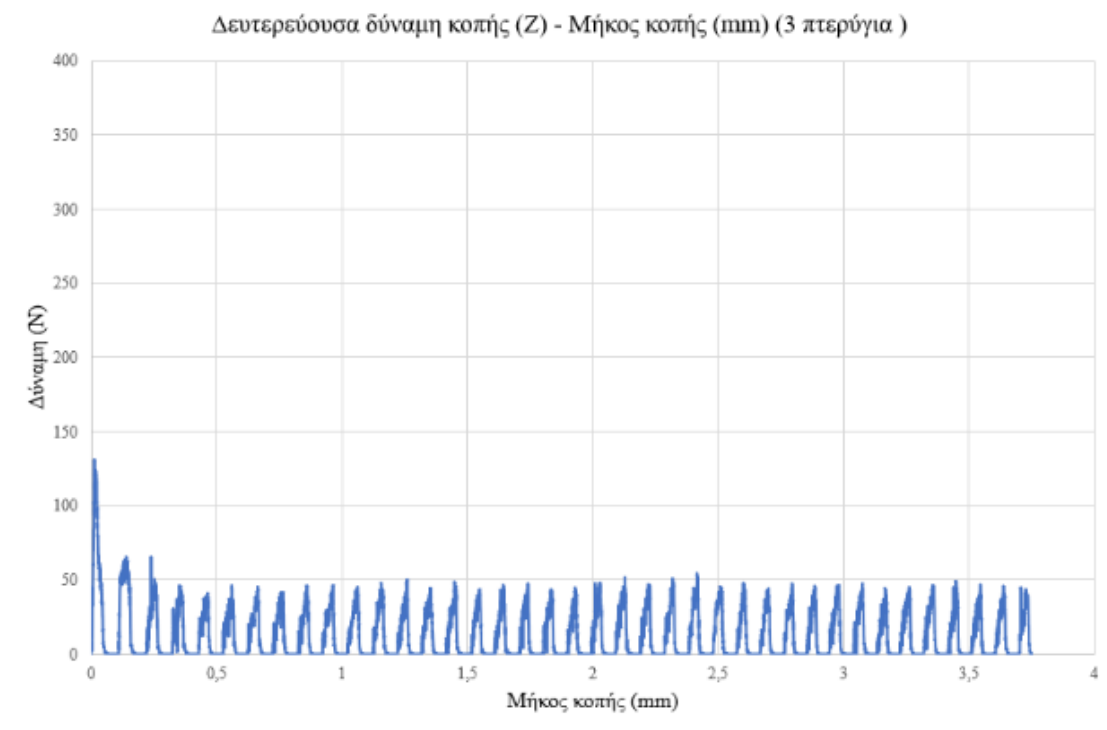
Εικόνα 70 : Τελικό στάδιο προσομοίωσης



Εικόνα 71 : Δύναμης κοπής στον άξονα X (3 πτερύγια)

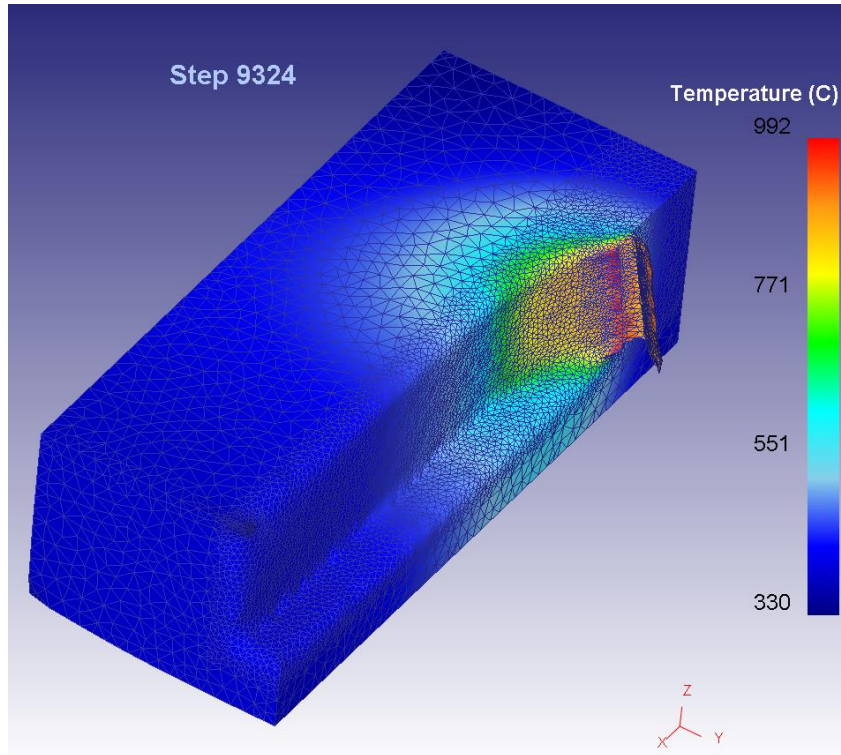


Εικόνα 72 : Δύναμης κοπής στον άξονα Y (3 πτερύγια)



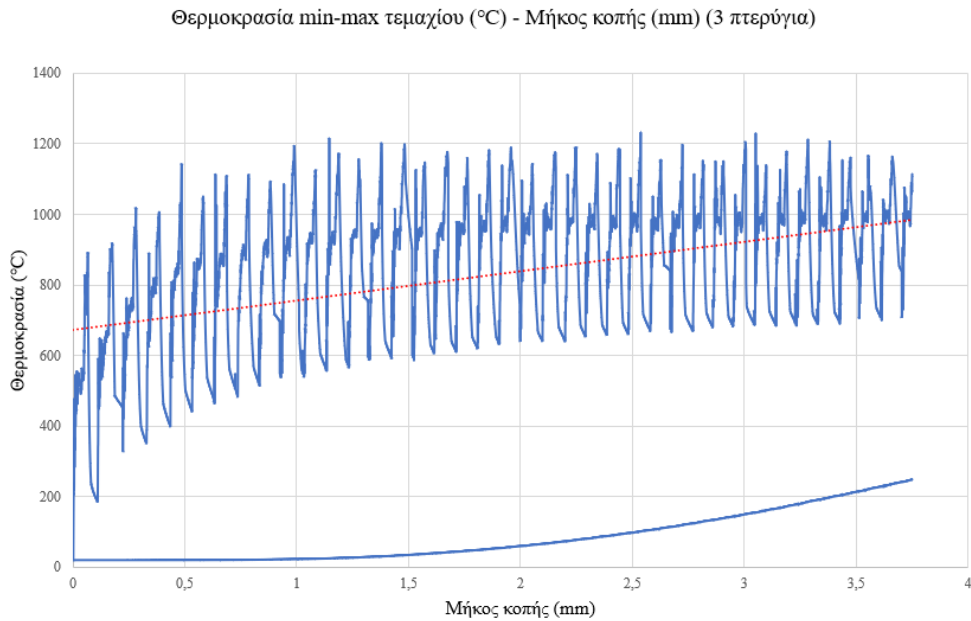
Εικόνα 73 : Δύναμη κοπής στον άξονα Z (3 πτερύγια)

Ακολουθεί η ανάλυση των θερμοκρασιών στο τεμάχιο. Στην εικόνα 74 φαίνονται οι ζώνες θερμοκρασιών κατά την απομάκρυνση του αποβλίττου , οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στην γραμμή διάτμησης όπως ήταν αναμενόμενο.



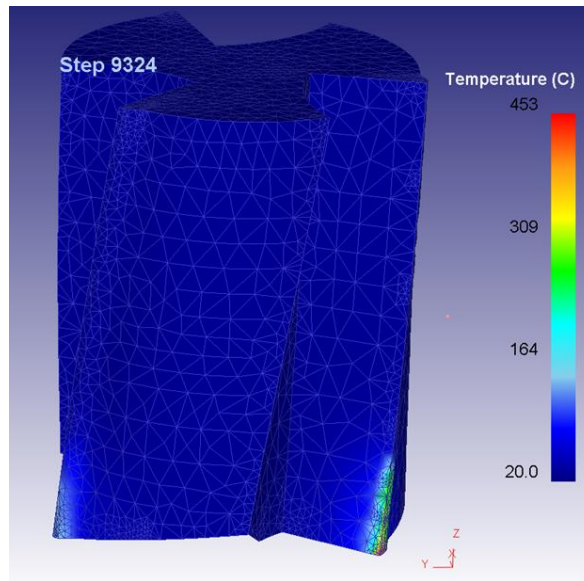
Εικόνα 74 : Στιγμιότυπο κατεργασίας – θερμοκρασίες τεμαχίου (3 πτερύγια)

Στο διάγραμμα θερμοκρασιών του τεμαχίου διατυπώνεται συνολική αύξηση στις μέγιστες τιμές κατά την διάρκεια της κοπής έως την σταθεροποίηση της μετά τα 2 mm κατεργασίας . Οι θερμοκρασίες φτάνουν τους 1200 °C ενώ υπάρχει αύξηση και της ελάχιστης θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 200 °C.



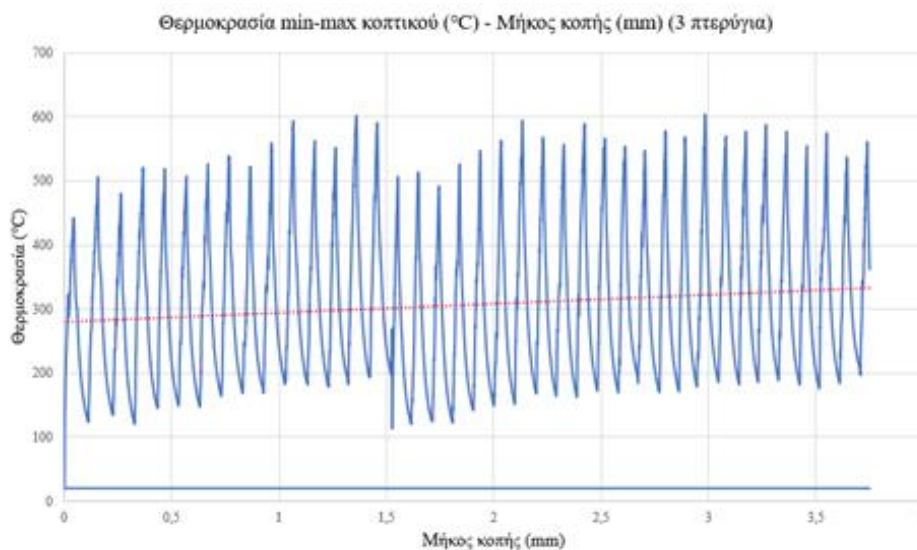
Εικόνα 75 : Θερμοκρασίες τεμαχίου (3 πτερύγια)

Στην εικόνα 76 φαίνεται το κοπτικό εργαλείο 3 πτερυγίων κατά την αφαίρεση αποβλίττου. Η μέγιστη θερμοκρασία σημειώνεται στην κοπτική ακμή και κυρίως στην γωνιά που σχηματίζεται μεταξύ των δύο κοπτικών ακμών . Επίσης , αριστερά της εικόνας φαίνεται η κοπτική ακμή που αφαιρείται το προηγούμενο απόβλιττο , αυτό σημαίνει ότι για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα δεν βρίσκεται σε επαφή με το τεμάχιο, παρόλα αυτά διατηρεί την θερμοκρασία των 160°C όπου συνεχώς μειώνεται έως την έναρξη αφαίρεσης του επομένου αποβλίττου.



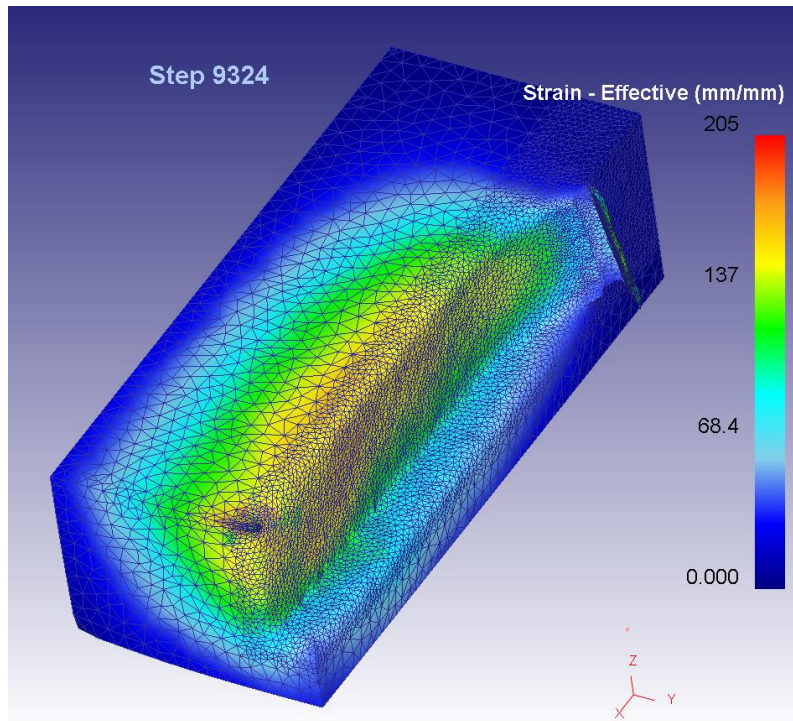
Εικόνα 76 : Στιγμιότυπο κατεργασίας – θερμοκρασίες κοπτικού (3 πτερύγια)

Στο επόμενο διάγραμμα θερμοκρασιών παρατηρείται ένα παράδοξο φαινόμενο , μετά την ομαλή εξέλιξη των θερμοκρασιών εμφανίζεται μια μείωση 1,5 mm μετά την έναρξη της κατεργασίας η οποία δεν είναι λογική και οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα του λογισμικού προσομοίωσης .

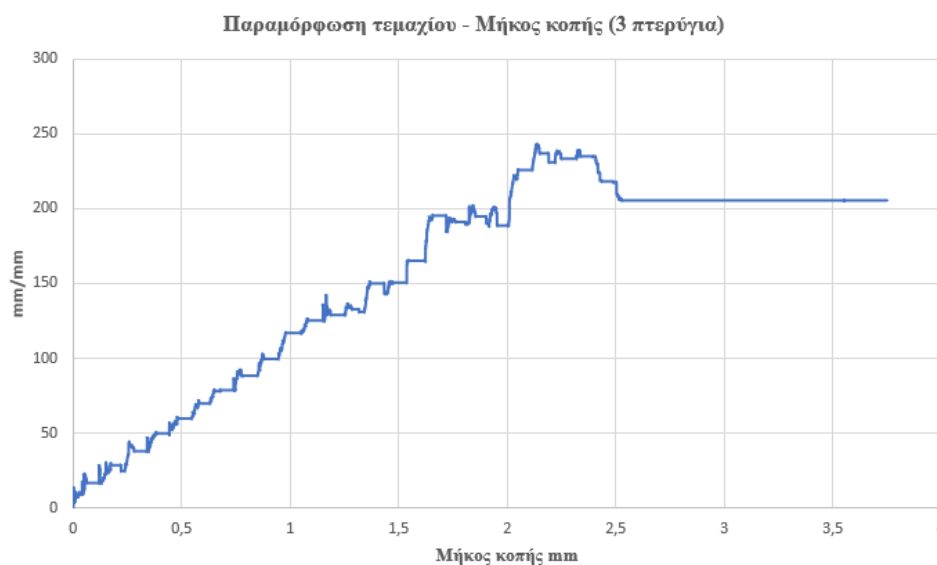


Εικόνα 77: Θερμοκρασίες κοπτικού (3 πτερύγια)

Στην συνέχεια παρατίθεται εικόνα με την παραμόρφωση του τεμαχίου μετά το πέρας της κατεργασίας. Οι χρωματικές ζώνες υποδεικνύουν τα σημεία με μεγαλύτερη και μικρότερη παραμόρφωση. Άμεσος μετά στο διάγραμμα παραμόρφωσης φαίνεται η συνεχόμενη αύξηση της παραμόρφωσης κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται μεταξύ 2mm και 2,5 mm στο σημείο μέγιστων θερμοκρασιών, έπειτα η παραμόρφωση σταθεροποιείται, πιθανόν να υπάρχει σφάλμα στο σημείο αυτό διότι αναμενόταν έστω μια μικρή διακύμανση.



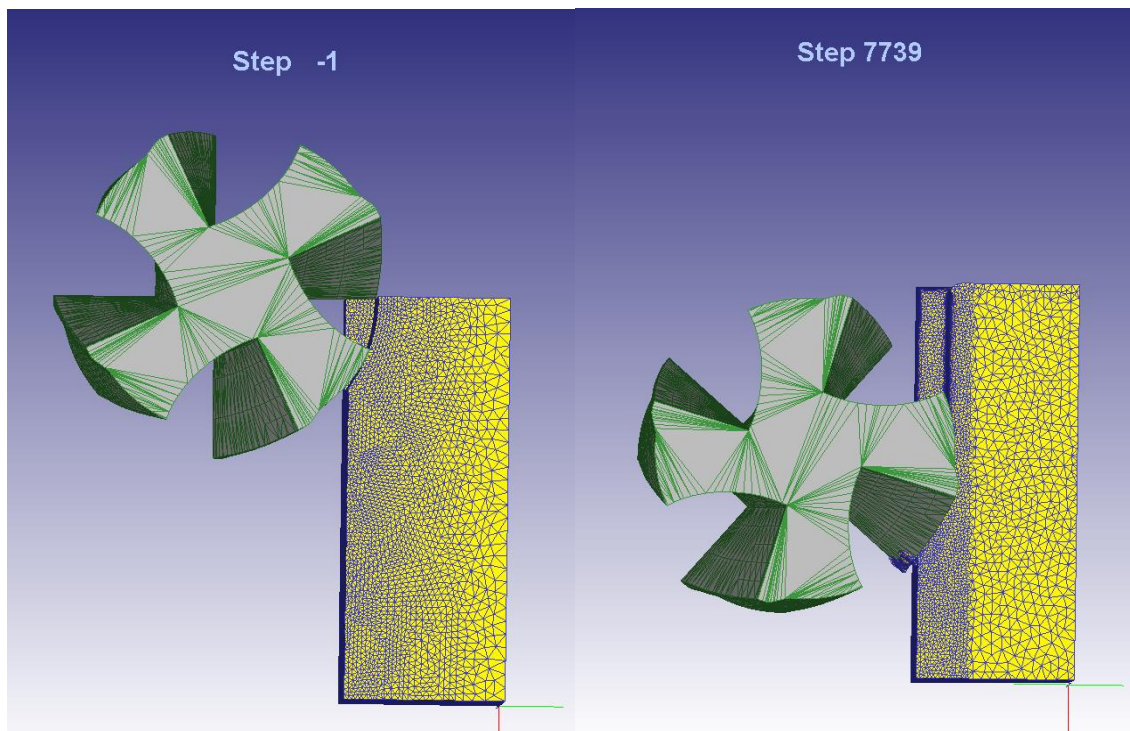
Εικόνα 78 : Στιγμιότυπο κατεργασίας – παραμόρφωση τεμαχίου (3 πτερύγια)



Εικόνα 79 : Διάγραμμα παραμόρφωσης τεμαχίου (3 πτερύγια)

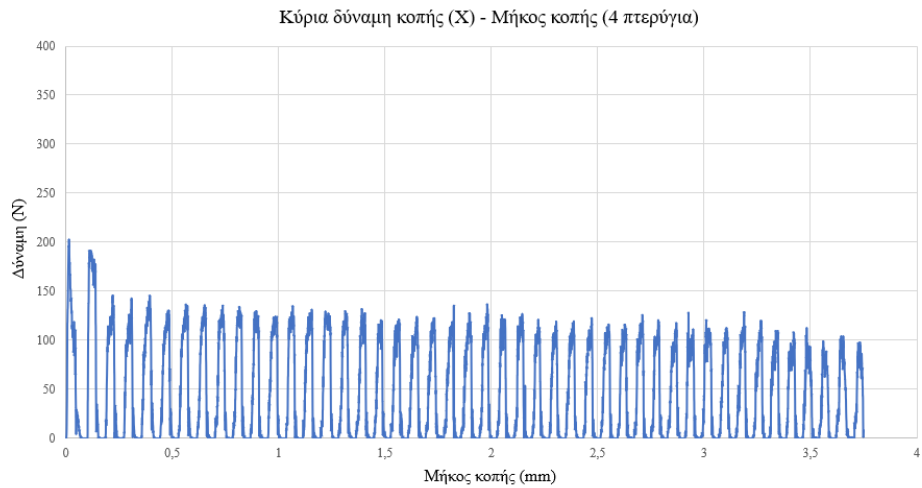
5.3 Κοπτικό τεσσάρων πτερυγίων

Το τελευταίο κοπτικό των προσομοιώσεων έχει τέσσερα πτερύγια. Με την παρουσίαση της κατεργασίας του κοπτικού τεσσάρων πτερυγίων ολοκληρώνονται οι προσομοιώσεις που είχαν σχεδιαστεί αρχικά. Τα τέσσερα πτερύγια σαν γεωμετρία είναι πολύ καλύτερη έναντι των τριών διότι εξασφαλίζει συμμετρία και σταθερότητα κατά την κοπή σύμφωνα με την βιβλιογραφία . Κοπτικά με πολλά πτερύγια συνιστώνται για μικρότερα βάθη κοπής , μικρή πρόωση και μεγάλες ταχύτητες κοπής . Στην παρούσα διπλωματική οι συνθήκες κατεργασίας επιλέχθηκαν σε ενδιάμεσο σημείο με αποτέλεσμα τα κοπτικά να μην εργάζονται στις ιδανικές συνθήκες .Η παραδοχή αυτή ήταν αναγκαία για να είναι δυνατόν να γίνει σύγκριση της παραμέτρου των πτερυγίων. Ακολουθεί εικόνα με το αρχικό σημείο της προσομοίωσης και την τοποθέτηση του κοπτικού στο σωστό σημείο, έπειτα παρουσιάζεται το τελικό στάδιο της προσομοίωσης. Το μήκος που διένυσε το κοπτικό έως την ολοκλήρωση ήταν το μικρότερο 3,75mm ,έτσι η σύγκριση με τις άλλες προσομοιώσεις έγινε έως το σημείο αυτό.

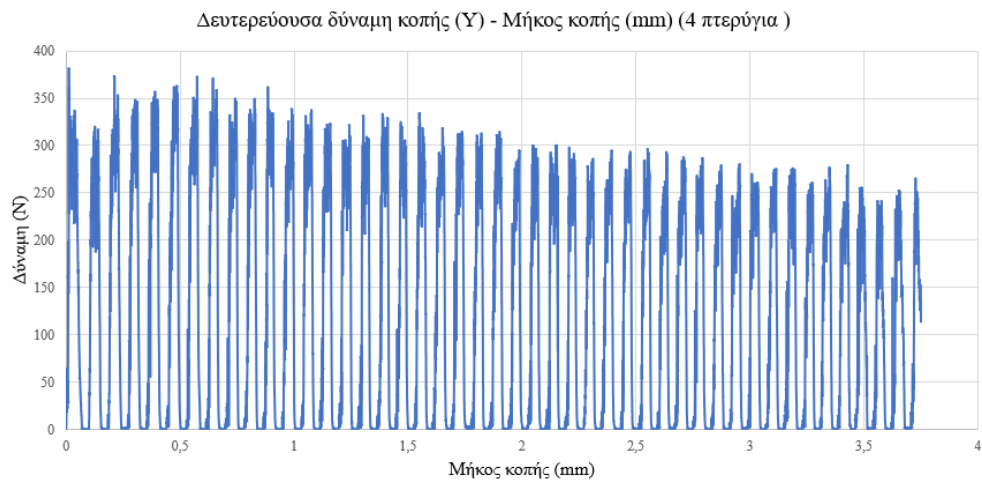


Εικόνα 80 : Αρχικό στάδιο προσομοίωσης Εικόνα 81 : τελικό στάδιο προσομοίωσης

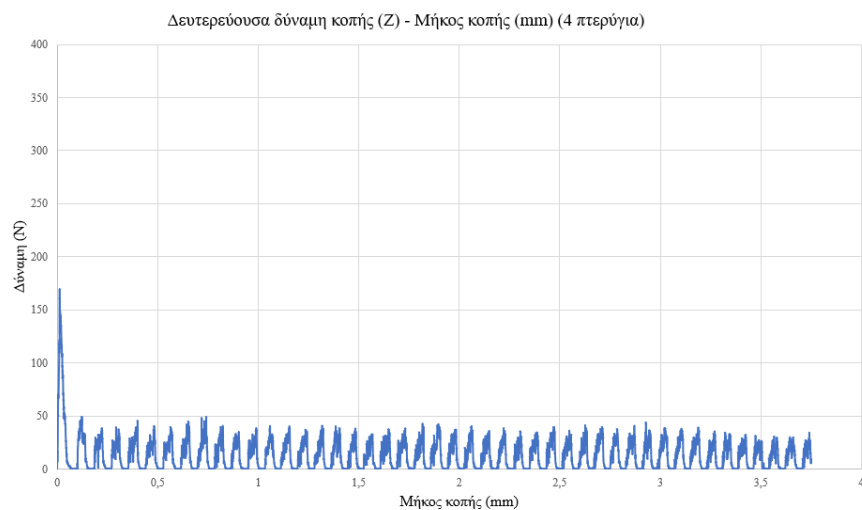
Σε πρώτη φάση παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία. Στον άξονα X καταγράφεται δύναμη 125N, κατά την έναρξη της προσομοίωσης με την αφαίρεση των πρώτων δύο αποβλίττων οι δυνάμεις φτάνουν τα 200N το οποίο είναι φυσιολογικό έως να δρομολογηθεί η κοπή.Στον άξονα Y οι δυνάμεις είναι πολύ μεγαλύτερες με τιμή 300N κατά μέσο ορό. Υπάρχει πτώση των δυνάμεων η οποία οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και πτώσης του ορίου διαρροής. Στον άξονα Z η τιμή κείμεναί στα 45 N



Εικόνα 82: Κύρια δύναμη κοπής στον άξονα X (4 πτερύγια)

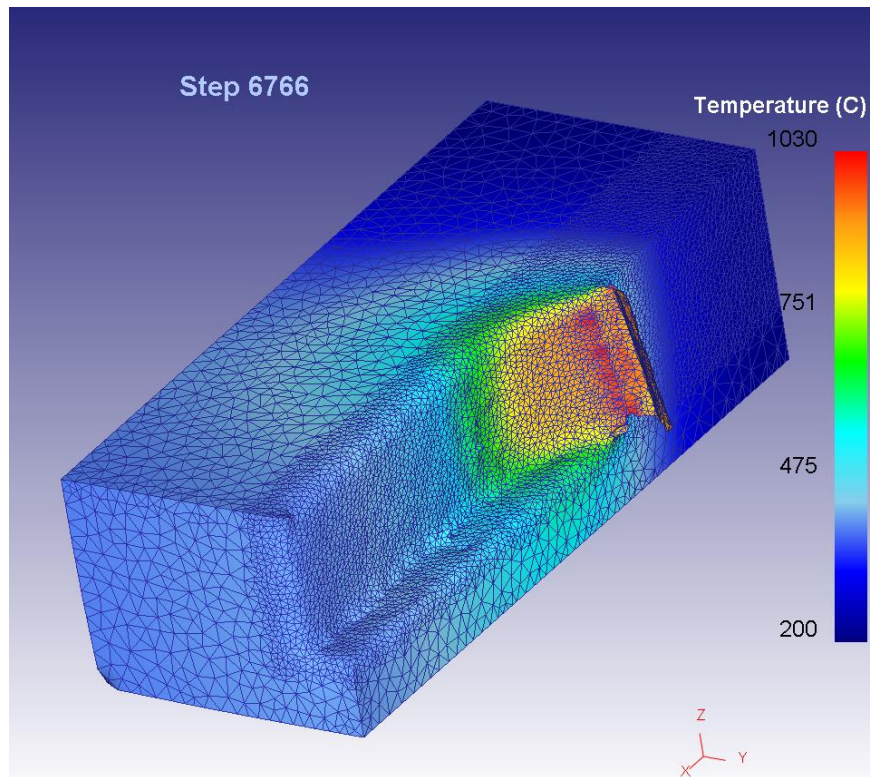


Εικόνα 83 : Δευτερεύουσα δύναμη κοπής στον άξονα Y (4 πτερύγια)

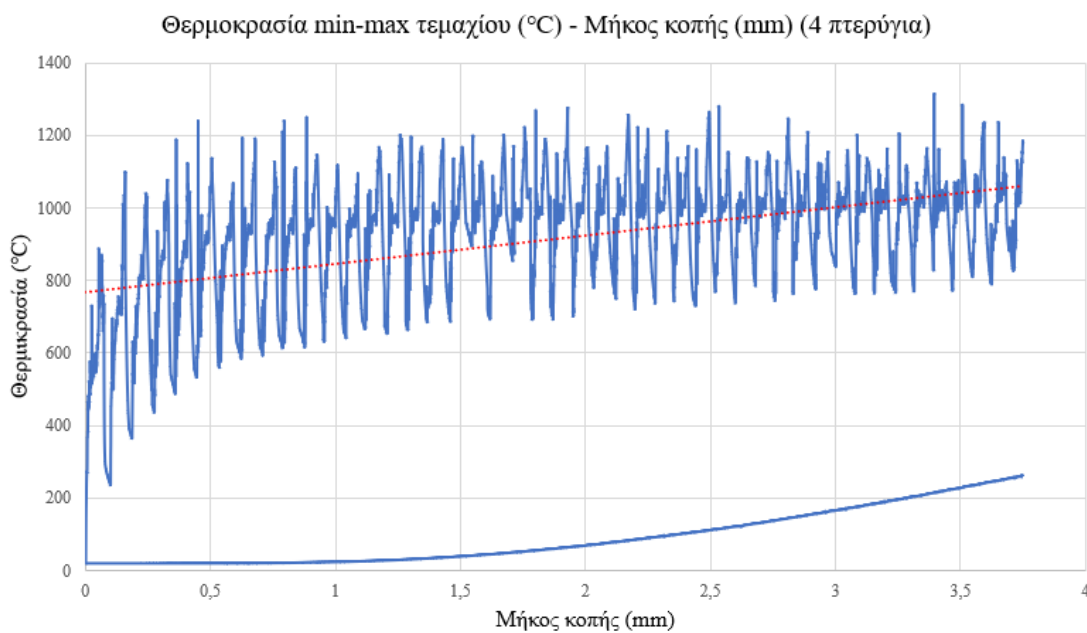


Εικόνα 84 : Δευτερεύουσα δύναμη στον άξονα Z (4 πτερύγια)

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται το τεμάχιο και οι θερμοκρασιακές διαφορές κατά τη αφαίρεση αποβλίττου ,έπειτα το διάγραμμα θερμοκρασιών στο οποίο οι μέγιστες θερμοκρασίες φτάνουν του 1200°C, ενώ οι ελάχιστες θερμοκρασίες φτάνουν τους 300°C

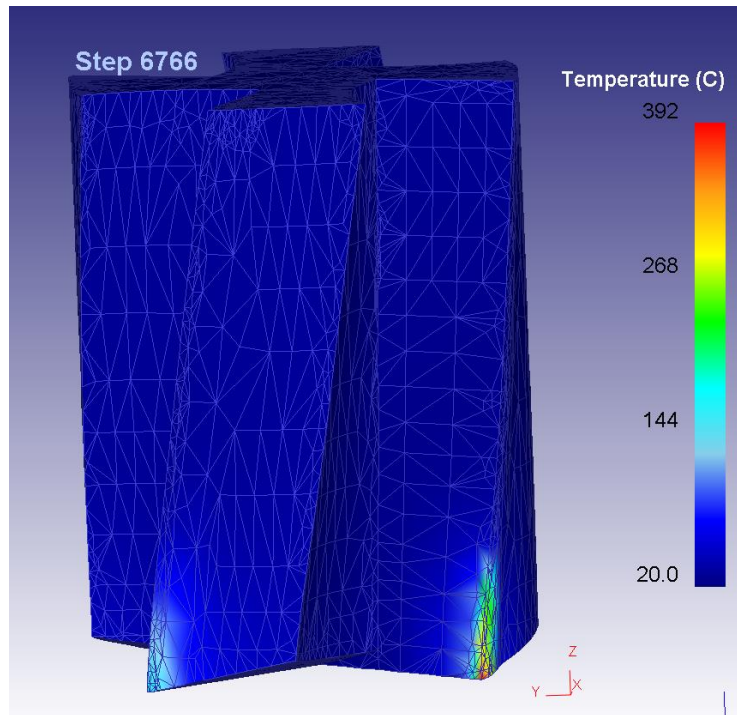


Εικόνα 85 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης – θερμοκρασίες τεμαχίου (4 πτερύγια)

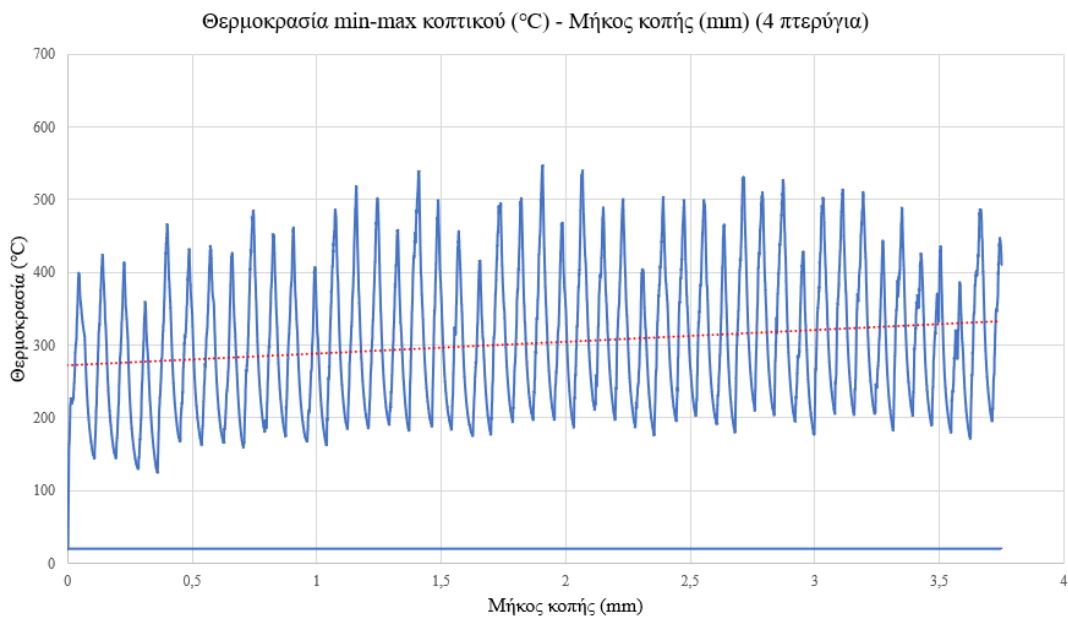


Εικόνα 86 : Διάγραμμα θερμοκρασιών τεμαχίου (4 πτερύγια)

Ακολουθεί εικόνα του κοπτικού εργαλείου με θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή . Παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία στο πτερύγιο που συμβάλει στην αφαίρεση του αποβλίττου την δεδομένη χρονική στιγμή καθώς και στο πτερύγιο που αποσύρθηκε .Έπειτα παρατίθεται το διάγραμμα θερμοκρασιών του κοπτικού στο οποίο διακρίνεται η τιμή των 500°C σε ορισμένες χρωμικές στιγμές .

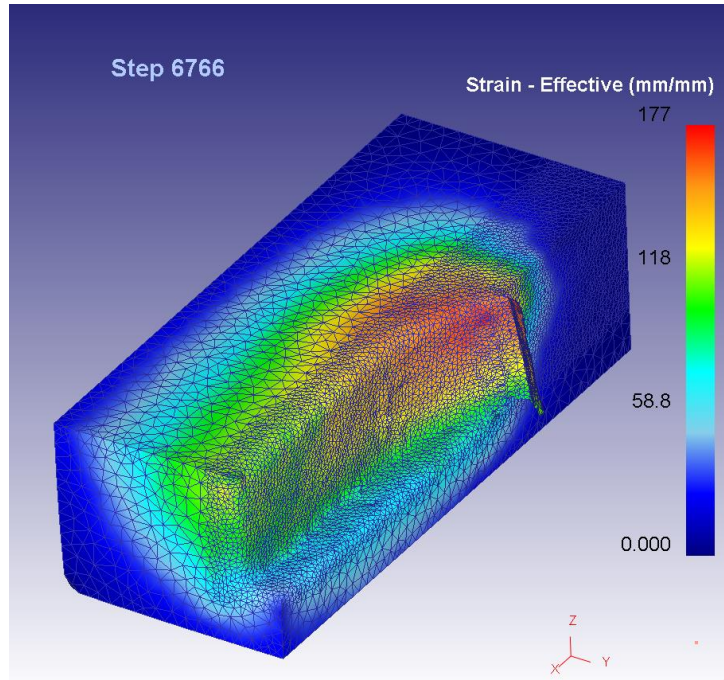


Εικόνα 87 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης θερμοκρασιών κοπτικού (4 πτερύγια)

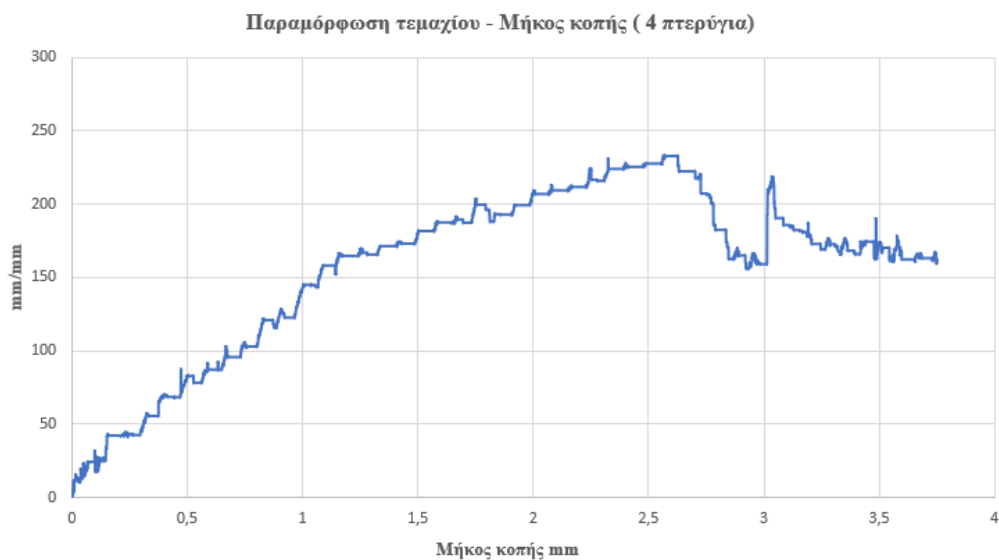


Εικόνα 88 : Διάγραμμα θερμοκρασιών κοπτικού (4 πτερύγια)

Η επόμενη παρατήρηση θα γίνει στην παραμόρφωση του τεμαχίου . Στο αρχικό μήκος της κατεργασίας η παραμόρφωση είναι μικρότερη και αυξάνεται κατά μήκος της κοπής , ο μηχανισμός που λειτουργεί πίσω από αυτό ,έχει εξηγηθεί και προηγούμενος ο οποίος οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και της ιδιότητες του υλικού. Άμεσος μετά βρίσκεται το διάγραμμα παραμόρφωσης όπου εκεί φαίνεται καλύτερα η ανοδική πορεία της παραμόρφωσης συναρτήσει του μήκους κοπής .Στο σημείο 3 από τον άξονα του μήκους κοπής παρατηρείται μια απότομη μείωση της παραμόρφωσης η οποία πιθανόν οφείλεται σε σφάλμα του λογισμικού.



Εικόνα 89 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης – παραμόρφωσης τεμαχίου (4 πτερύγια)



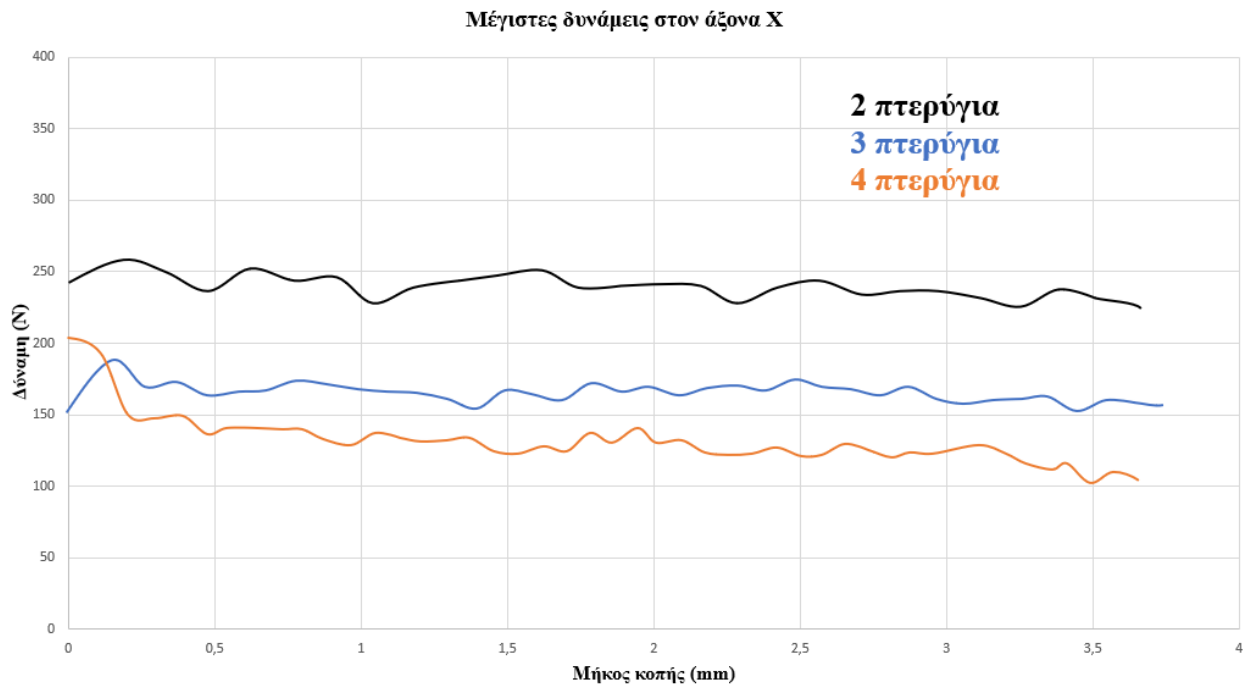
Εικόνα 90 : Διάγραμμα παραμόρφωσης τεμαχίου (4 πτερύγια)

6. Συμπεράσματα

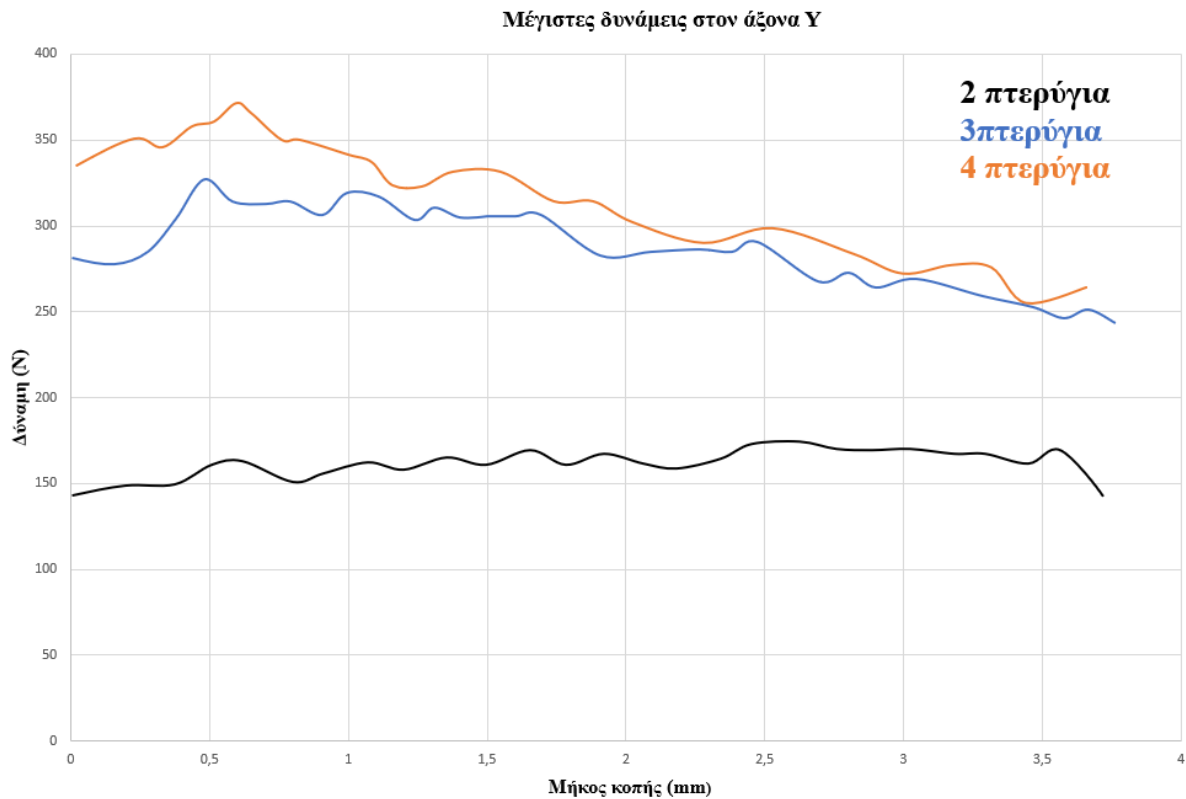
Ολοκληρώνοντας την διπλωματική εργασία σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των τριών γεωμετριών, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθώς και παρατηρήσεις οι οποίες δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια μελέτης και εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με όλες τις χρήσιμες παραμέτρους καθώς και τιμές αποτελεσμάτων.

Αριθμός πτερυγίων	2	3	4
Διάμετρος κοπτικού	4 (mm)	4 (mm)	4 (mm)
RPM Κοπτικού	6.000	6.000	6.000
Πρόωση	20 (mm/sec)	20 (mm/sec)	20 (mm/sec)
Αξονικό βάθος κοπής (az)	1 (mm)	1 (mm)	1 (mm)
Ακτινικό βάθος κοπής (axy)	0,5 (mm)	0,5 (mm)	0,5 (mm)
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (N/s/mm/°C)	40	40	40
Συντελεστής τριβής	0,6	0,6	0,6
Step τεμαχίου	58.663	68.428	58.663
Step κοπτικού	21.370	34.432	27.166
Αριθμός αποβλίττων	27	39	46
Μέγιστη δύναμη (X) (N)	250	170	130
Μέγιστη δύναμη (Y) (N)	170	300	350
Μέγιστη δύναμη (Z) (N)	55	47	40
Μέγιστη θερμοκρασία τεμαχίου (°C)	1.100	1.200	1.250
Μέγιστη θερμοκρασία κοπτικού (°C)	430	560	560
Παραμόρφωση (mm/mm)	120	245	245

Η σημαντικότερη παρατήρηση έγινε στα διαγράμματα δυνάμεων. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε τρία διαγράμματα για εύκολη κατανόηση και σύγκριση μεταξύ τους. Στο πρώτο διάγραμμα υπάρχουν οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων κατά την κατεύθυνση X των τριών κοπτικών. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται στο κοπτικό με δυο πτερύγια τιμή έως 250N ενώ το κοπτικό με τρία πτερύγια 170N και η μικρότερη τιμή στο κοπτικό με τέσσερα περίγυρα. Στο διάγραμμα των δυνάμεων στον άξονα Y, οι δυνάμεις είναι εντελώς αντίθετες η μέγιστη παρατηρείται στο κοπτικό με τέσσερα πτερύγια, ενδιάμεση τιμή τα τρία πτερύγια και την μικρότερη το κοπτικό με δυο πτερύγια. Αναλύονται οι δυο ακραίες τιμές (2 πτερύγια – 4 πτερύγια) για να γίνει πιο εμφανές η σύγκριση. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει διότι, για τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας το κοπτικό με δύο πτερύγια απαιτείται να αφαιρέσει απόβλιττο μεγαλύτερου πάχους ενώ το κοπτικό με τέσσερα πτερύγια απόβλιττα μικρότερου πάχους. Στην περίπτωση μεγάλου αποβλίττου είναι δυσκολότερη η κάμψη του για να αποκοπεί από το τεμάχιο και έτσι χρειάζεται μεγαλύτερη δύναμη στην κατεύθυνση X ενώ στο μικρό απόβλιττο κάμπτεται ευκολότερα και υπάρχει καταπόνηση στην κατεύθυνση Y. Επίσης σε περιπτώσεις με πολύ μικρό απόβλιττο, το κοπτικό συμπιέζει το τεμάχιο χωρίς να αφαιρείτε υλικό, δηλαδή κατά την καταπόνηση του τεμαχίου το υλικό θα βρίσκεται στην ελαστική περιοχή και όχι στην πλαστική με αποτέλεσμα το τεμάχιο να ασκεί συνέχεια δύναμη αντίδρασης στο κοπτικό. Οποιαδήποτε πτώση δυνάμεων στα διαγράμματα οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και αλλαγής του ορίου διαρροής του υλικού.



Εικόνα 91 :Διάγραμμα μέγιστων δυνάμεων στον άξονα X



Εικόνα 92 :Διάγραμμα μέγιστων δυνάμεων στον άξονα Y

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στον άξονα Z και για τα τρία κοπτικά . Στην κατεύθυνση Z δεν παρατηρείται διαφοροποίηση στις δυνάμεις οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 40 N και 55 N, αρά ο αριθμός των δοντιών δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις δυνάμεις κατά την κατεύθυνση Z.

Χρησιμοποιώντας την μέση τιμή των ακραίων δυνάμεων γίνεται σύνθεση αυτών για το κάθε κοπτικό ξεχωριστά. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείτε είναι ο εξής :

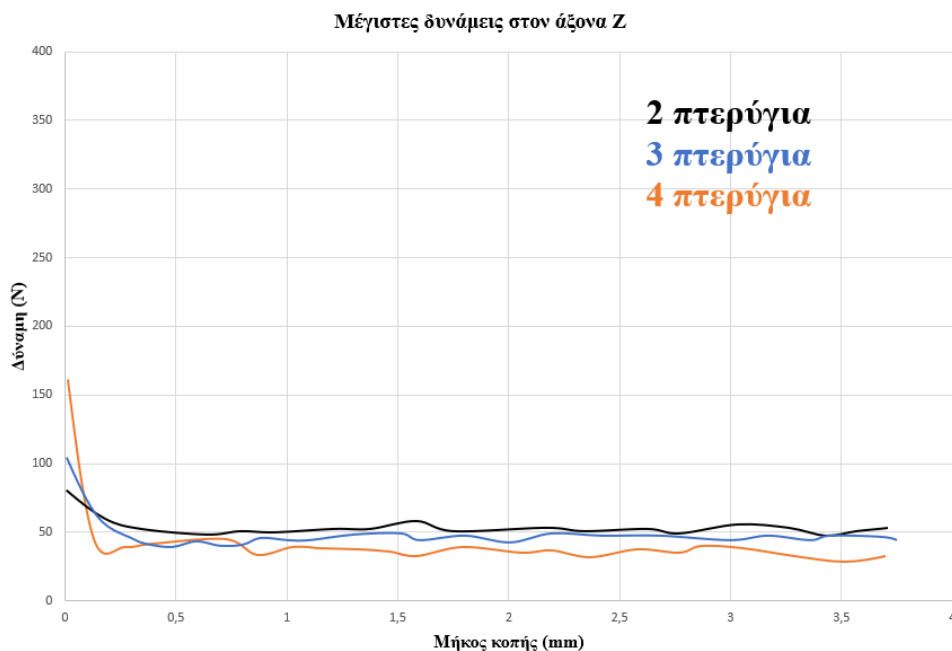
$$\text{Συνολική δύναμη κοπής : } F = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$$

Για το κοπτικό δυο πτερυγίων προκύπτει : $F_2 = 307.28 \text{ N}$

Για το κοπτικό τριών πτερυγίων προκύπτει : $F_3 = 348 \text{ N}$

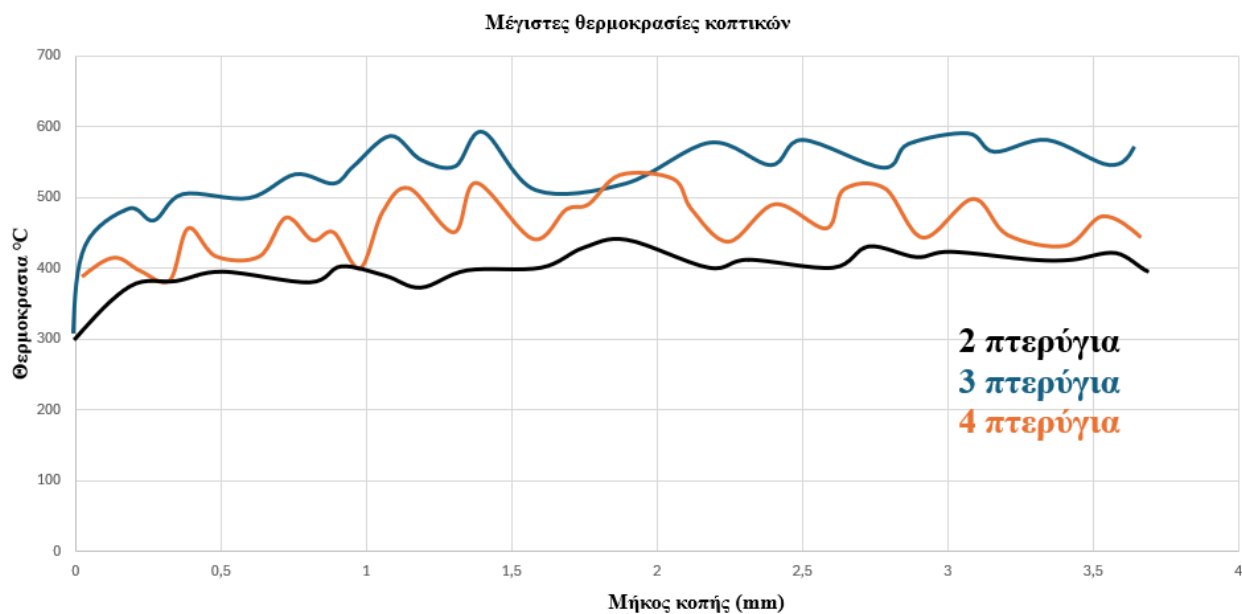
Για το κοπτικό τεσσάρων πτερυγίων προκύπτει : $F_4 = 375 \text{ N}$

Με τα αποτελέσματα που προκύπτουν βγαίνει το συμπέρασμα ότι χρειάζεται περισσότερη δύναμη και κατ' επέκταση ενέργεια για την αφαίρεση ίδιου όγκου υλικού για την ίδια χρονική περίοδο ανάλογα με τον αριθμό των δοντιών. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει περισσότερη τριβή και κατανάλωση ενέργειας όσο αυξάνονται τα απόβλιττα για τον ίδιο όγκο αφαίρεσης υλικού.



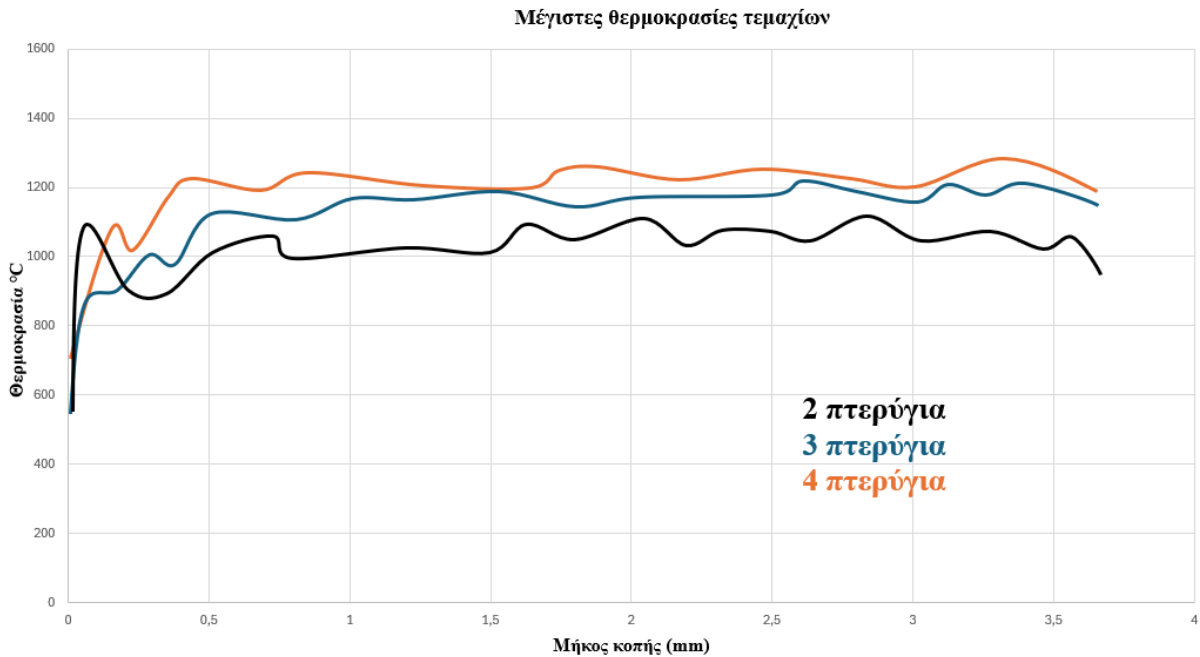
Εικόνα 93 :Διάγραμμα μέγιστων δυνάμεων στον άξονα Z

Επόμενο σημείο αναφοράς είναι οι θερμοκρασίες που προκύπτουν στα κοπτικά και στα τεμάχια. Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα θερμοκρασιών των κοπτικών απεικονίζεται το κοπτικό τριών πτερυγίων με τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες ,ακολουθεί το κοπτικό τεσσάρων πτερυγίων ,ενώ τις χαμηλότερες θερμοκρασίες έχει το κοπτικό δυο πτερυγίων. Στο διάγραμμα θερμοκρασιών του κοπτικού τριών πτερυγίων πιθανόν υπάρχει υπολογιστικό σφάλμα και για αυτό τον λόγο εμφανίζει τις υψηλότερες θερμοκρασίες ενώ αυτές θα έπρεπε να υπάρχουν στο κοπτικό τεσσάρων πτερυγίων.

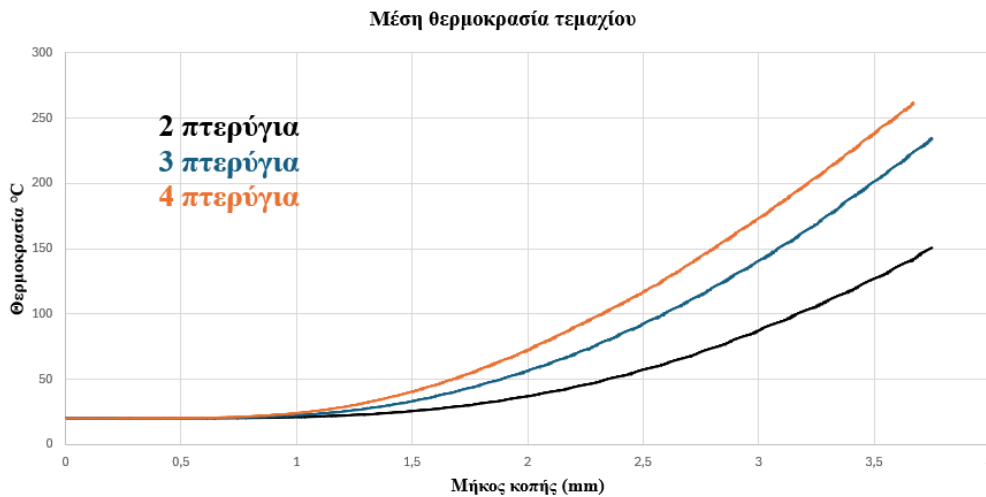


Εικόνα 94 :Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών κοπτικών

Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών των τεμαχίων εμφανίζεται με την μεγαλύτερη θερμοκρασία το κοπτικό τεσσάρων πτερυγίων, στην συνέχεια το κοπτικό τριών πτερυγίων ,ενώ οι μικρότερες θερμοκρασίες στο κοπτικό δυο πτερυγίων. Το αποτέλεσμα είναι λογικό διότι είναι άμεσα συνδεδεμένο με την κατανάλωση ενέργειας όπως αναφέραμε προηγουμένως, το κοπτικό με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες διότι υπάρχει περισσότερη τριβή καθώς το κοπτικό βρίσκεται σε επαφή με το τεμάχιο για περισσότερο χρονικό διάστημα ,το διπλάσιο έναντι του κοπτικού δύο πτερυγίων.

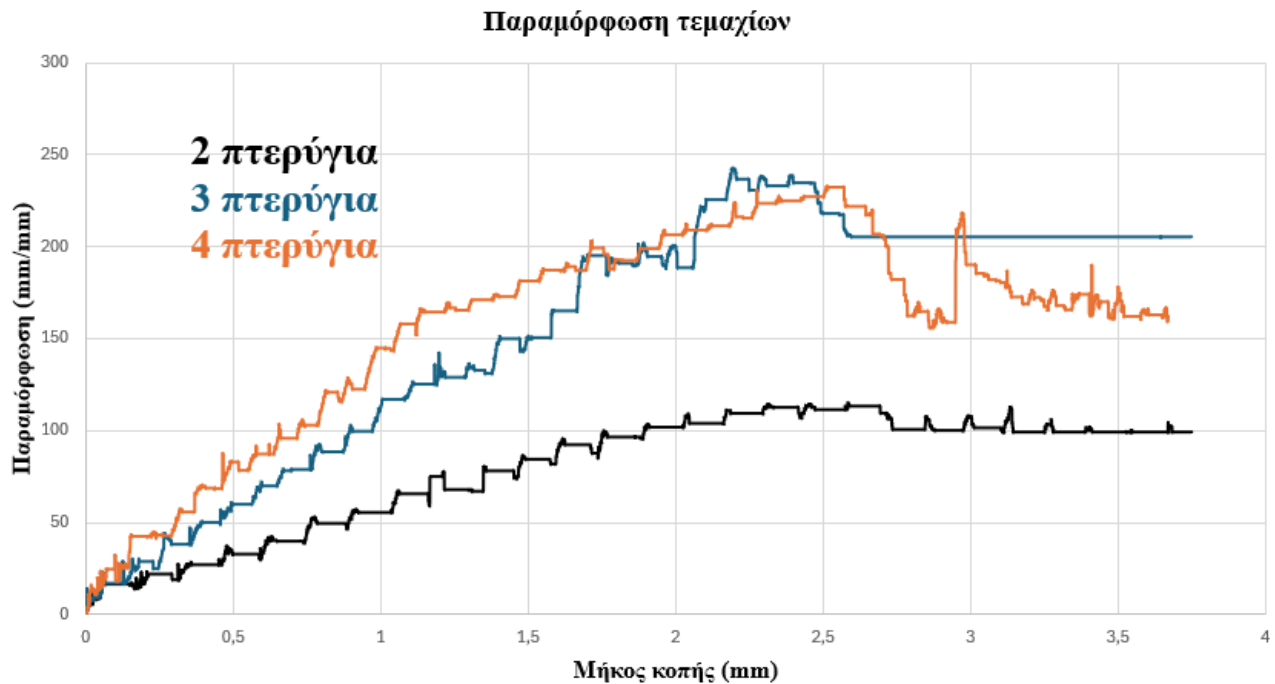


Εικόνα 95 :Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών τεμαχίων



Εικόνα 96 :Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσων θερμοκρασιών τεμαχίων

Στην εικόνα 96 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η μέση θερμοκρασία των τεμαχίων κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Παρατηρείται μέγιστη μέση θερμοκρασία κατά την κατεργασία του κοπτικού τεσσάρων πτερυγίων ενώ η ελάχιστη στο κοπτικό δύο πτερυγίων. Αναμενόμενο αποτέλεσμα εφόσον και οι μέγιστες τιμές όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως έχουν την ίδια σειρά .



Εικόνα 97 :Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμορφώσεων τεμαχίων

Τέλος, ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμορφώσεων των τεμαχίων. Η παραμόρφωση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αύξηση της θερμοκρασίας όπως ξέρουμε από την αντοχή υλικών. Στα περισσότερα μεταλλικά υλικά όταν αυξάνεται η θερμοκρασία αλλάζει το όριο διαρροής και έτσι επιτυγχάνετε πλαστική παραμόρφωση με μικρότερη δύναμη. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η παραμόρφωση των τεμαχίων η οποία ταυτίζεται με τις μέγιστες θερμοκρασίες. Όσα αναφέρθηκαν επαληθεύονται στο παρόν διάγραμμα, αυξημένη θερμοκρασία και αυξημένη δύναμη συνεπάγεται με μεγάλη παραμόρφωση.

7. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία παρέχεται μια σφαιρική γνώση όσον αφορά την επίδραση του πλήθους των δοντιών στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες. Ο τομέας των κατεργασιών είναι πολύ μεγάλος και το τελικό αποτέλεσμα επηρεάζεται από πληθώρα παραγόντων, στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας έγινε προσπάθεια να αναλυθούν όσο το δυνατόν καλύτερα όλα τα δεδομένα και αποτελέσματα της προσομοίωσης. Έγινε ανάλυση των δεδομένων και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτημάτων. Ωστόσο υπάρχουν πολλές πτυχές οι οποίες μπορούν να μελετηθούν και να επιφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη. Στην συνέχεια παρατίθενται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα :

- Μελέτη διαφορετικών γεωμετριών
- Προσομοίωση με μεγάλη πρόωση ώστε να αφαιρείτε μεγάλο απόβλιπτο και να μελετηθεί η στρέβλωση του πάνω στο κοπτικό
- Μελέτη των ταλαντώσεων στο κοπτικό και στο τεμάχιο κατά την διακοπτόμενη κοπή του κοπτικού φραιζαρίσματος
- Μελέτη της φθοράς του κοπτικού ανάλογα με το πλήθος των δοντιών κοπτικού
- Μελέτη της επίδρασης του πλήθους δοντιών σε αξονικό φραιζάρισμα
- Μελέτη της τραχύτητας του τελικού τεμαχίου
- Μελέτη των απολήξεων για τις ίδιες γεωμετρίες
- Μελέτη γεωμετριών κονδυλίου χωρίς ελικωση
- Μελέτη με παρουσία υγρού κοπής

8. Βιβλιογραφία

1. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΚΑΡΑΒΕΛΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ
2. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΣΤΡΙΤΣΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
3. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Κλάιντι Τμπραϊ
4. Rattat C. Introduction. In: Cloot J, editor Dr. Michael Barabas. CNC Milling for Makers. San Rafael. dpunkt.verlag. 2017. p. 18-27.
5. Haynes G. Milling Machines and Milling Operations. Milling Machines and Milling Operations - The Fundamentals of Conventional and CNC Milling. Ohio. Cyber Press. 2015. p 21-73.
6. Fitzpatrick M. Mills and Milling Operations. Machining and cnc technology. New York. McGraw-Hill. 2014. P 392-405.
7. Engineering articles. Milling Machine Definition, Process & Types. Available from: <https://www.engineeringarticles.org/milling-machine-definition-process-types/>
8. Groover M. MACHINING OPERATIONS AND MACHINE . Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems. USA. 2010. P 536-583
9. <https://eclass.uowm.gr/modules/document/?course=MECH370>
10. <http://www.antoniadis.gr/MANUF2/PAROYSIASEIS%20PDF/CHAPTER%202%20-%20YLIKA%20%CE%9A%OPTIKWN%20ERGALEIWN.pdf>
11. https://www.researchgate.net/profile/Yusuf-Altintas-3/publication/223603010_Mechanics_and_dynamics_of_general_milling_cutters_Part_I_Helical_end_mills/links/5a398f36458515889d2acdaf/Mechanics-and-dynamics-of-general-milling-cutters-Part-I-Helical-end-mills.pdf
12. https://www.mmccarbide.com/in/technical_information/tec_rotating_tools/technical/tec_solid_end_mills_terminology
13. Burrs - Analysis, Control and Removal. Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-00568-8.
14. Γεώργιος Κ. Τριανταφυλλίδης, ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ, 3η έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα , 2021.
15. S. and S. Das, “Burr minimization in face milling: An edge bevelling approach,” in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Sep. 2011, vol. 225, no. 9, pp. 1528–1534. doi: 10.1177/0954405411411768.
16. Department of Mechanical Engineering, R.V.R&J.C.College of Engineering (A), Guntur, Andhra Pradesh, INDIA
17. NEW TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING ISBN 978-80-214-4267-2 HOLE QUALITY AND BURR REDUCTION IN DRILLING ALUMINIUM SHEETS

18. Drilling Burr Minimization by Changing Drill Geometry
19. <https://www.matweb.com/>
20. Cutting parameters and tool geometry selection for plunge milling - Analysis of cutting forces at the bottom of deep titanium workpieces
21. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
22. Effect of punch force on the upsetting deformation process using three- dimensional finite element analysis
23. Jae Hyun Kim - Se Heun Lee - Jun Whan Park - Tae Jo Ko, 3D shape modeling of endmill cutters by cutting simulation approach, Yeungnam University, Korea
24. Ying Chien Tsai - Jone Ming Hsieh, A study of a design and NC manufacturing model of ball-end cutters, National Sun Yat-Sen University - Cheng Shiu Institute of Technology, Taiwan, 2001
25. - Jun Whan Park - Tae Jo Ko, End mill design and machining via cutting simulation, Yeungnam University, Republic of Korea, 2002
26. Sung Lim Ko - Trung Thanh Pham - Yong Hyun Kim, Visualization process for design and manufacturing of endmills, Konkuk University, South Korea, 2005
27. Mechanics and dynamics of general milling cutters - part I: helical endmills, University of British Columbia, Canada, 2001
28. .Z. Fang - H. Wu - Y.C. Liu - S.T. Ng, Tool geometry study in micromachining, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore, 2003
29. Ελευθέριος Δ. Παπαδανιήλ- Μιχαήλ Μ. Σφαντζικόπουλος, « Μηχανουργική Τεχνολογία- Εργαστήριο 2», Ίδρυμα Ευγενίδου, 2006
30. Λάζαρος Ε. Λαζαρίδης, « Μηχανουργική Τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1990
31. Γ. Μάμαλης, «Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Φοίβος, 1996
32. Νικόλαος Ι. Γαλάνης, «Κατεργασιμότητα Λίαν Υψηλής Ακρίβειας Βιολογικών Εμφυτευμάτων Τεχνητού Ισχίου», Διδακτορική Διατριβή, 2011
33. Κωνσταντίνος Καντζάβελος, «Κατεργασίες Κοπής Υψηλής Ταχύτητας: Πειραματική Μελέτη και Αριθμητική Προσομοίωση», Διπλωματική Εργασία, 2009
34. M. Ginting, «Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end- milling of titanium alloy», Surface and Coatings Technology, Elsevier, 2004
35. Viktor P. Astakhov, José C. Outeiro, « Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling», General Motors Business Unit of PSMi
36. ASM Handbook, «Machining: Volume 16», ASM International, 1989

37. Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 1», 1998
38. Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 2», 1999
39. Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 4», 1999
40. Άγγελος Μαρκόπουλος, «Κατεργασίες Αποβολής Υλικού Λίαν Υψηλής Ακρίβειας», Διδακτορική Διατριβή, 2006
41. M. Nouari, A. Ginting, «Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated tool in dry end- milling of titanium alloy», Surface and Coatings Technology, Elsevier, 2004
42. Σημειώσεις μαθήματος << μηχανουργικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού >> κ. Στέφανος Γεράρδης
43. P. G. Benardos, G.-C. Vosniakos, « Predicting surface roughness in machining: a review», International Journal of Machine Tools and Manufacture, Pergamon, 2003