



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕ
ΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΟΠΤΙΚΗΣ ΑΚΜΗΣ**

υπό
ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΗΝΤΣΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕ
ΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΟΠΤΙΚΗΣ ΑΚΜΗΣ**

υπό
ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΗΝΤΣΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

© 2025 Βασίλειος Μήντσου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Σωτηρία Χουλιαρά
Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή Κ. Εμμανουήλ Μπουζάκη, για την πολύτιμη συνεργασία και καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Αλέξη Κερμανίδη και Σωτηρία Χουλιανρά, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Βέργο για την συνδρομή του στη διεκπεραίωση του πειραματικού σκέλους της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υλική και πνευματική υποστήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΟΠΤΙΚΗΣ ΑΚΜΗΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΗΝΤΣΟΥ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης,
Αναπληρωτής Καθηγητής Κατεργασιών Μορφοποίησης Υλικών

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η μελέτη δυνάμεων κατά την κατεργασία της διαμήκους τórνευσης και η συσχέτιση με τις τάσεις και παραμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου.

Η διεκπεραίωση αυτής της ανάλυσης γίνεται σε έξη κεφάλαια, αρχικά τα τρία πρώτα κεφάλαια αναφέρονται στο θεωρητικό υπόβαθρο των βασικών εννοιών κοπής με αφαίρεση υλικού, της επιλογής της εργαλειομηχανής και με περισσότερες λεπτομέρειες των εργαλειομηχανών τórνου και φρέζας. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν σε χάλυβα χρωμίου-μολυβδαίνιου (42CrMo4) με κοπτικό πλακίδιο WNMG 08 04 08-PM4325. Το κεφάλαιο 5 αφορά τις προσομοιώσεις που έγιναν στο λογισμικό Ansys με σκοπό την μελέτη τάσεων και παραμορφώσεων στο κοπτικό εργαλείο κατά την διάρκεια των διεργασιών του κεφαλαίου 4. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των κεφαλαίων 4 και 5.

Λέξεις κλειδιά : Διαμήκης τórνευση, μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων στο Ansys, κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, ελαστική παραμόρφωση.

EXPERIMENTAL STUDY OF CUTTING FORCE DURING LONGITUDINAL TURNING PROCESS AND ITS CORRELATION WITH THE STRESSES AND DEFORMATIONS OF THE CUTTING EDGE

VASILEIOS MINTSOU

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2025

Supervisor: Dr. Emmanouil Bouzakis

Associate Professor in Manufacturing Engineering

Abstract

The objective of this thesis is to study forces during longitudinal turning processes and their correlation with the stresses and deformations of the cutting tool.

This analysis is conducted in six chapters. The first three chapters provide the theoretical background of fundamental concepts of material removal processes, the selection of machine tools, and specifically, a detailed focus on lathes and milling machines. In Chapter 4, the results of experimental procedures performed on chromium-molybdenum steel (42CrMo4) using a WNMG 08 04 08-PM4325 cutting insert are presented. Chapter 5 discusses simulations conducted in Ansys software to study the stresses and deformations in the cutting tool during the operations described in Chapter 4. Finally, Chapter 6 presents the conclusions drawn from the findings of Chapters 4 and 5.

Keywords: Longitudinal turning, finite element methods in Ansys, material removal processes, elastic deformation.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ	4
	Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού	4
1.1	Κατάταξη των κατεργασιών κοπής.....	4
1.1.2	Βασικές κατεργασίες κοπής γεωμετρικά καθορισμένης κόψης	5
1.2	Βασικές αρχές κοπής.....	7
1.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπής	9
1.3	Σχηματισμός του αποβλίττου	12
1.3.1	Συνεχές απόβλιττο με ψευδόκοψη	15
1.4	Δυνάμεις κοπής	17
1.4.1	Υπολογισμός δυνάμεων κοπής	17
1.4.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τις συνιστώσες της δύναμης κοπής.....	19
1.4.3	Μέτρηση των δυνάμεων κοπής	20
1.5	Θερμοκρασία κοπής	21
1.5.1	Θερμοκρασίες κοπής.....	22
1.6	Κοπτικά πλακίδια.....	23
1.6.1	Υλικά κοπτικών πλακιδίων.....	23
1.6.2	Φθορά κοπτικών εργαλείων	26
1.6.3	Διάρκεια ζωής εργαλείων	30
1.7	Κοπτικό υγρό	31
1.7.1	Είδη Κοπτικού Υγρού	33
1.7.2	Εφαρμογή των υγρών κοπής.	35
1.8	Ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας.....	37

1.8.1. Τραχύτητα Επιφάνειας	37
1.9 Κατεργασιμότητα.....	39
1.9.1 Κατεργασιμότητα συνήθεις υλικών στις κατεργασίες.....	40
1.9.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασιμότητα.....	43
1.9.3 Βελτιστοποίηση της κατεργασιμότητας.	46
1.10 Δυναμική της κοπής.....	47
1.11 Αυτοδιεγερόμενες Ταλαντώσεις	48
2 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ	50
2.1. Συνήθεις εργαλειομηχανές και οι βασικές λειτουργίες τους.	50
2.2. Εργαλειομηχανές CNC.....	53
2.3. Η επιλογή της κατάλληλης εργαλειομηχανής.....	54
3 ΤΟΡΝΟΣ ΚΑΙ ΦΡΕΖΑ.....	56
3.1. Τόρνευση	56
3.1.1.Μορφές Τόρνευσης.....	57
3.1.2. Δομή και τα μέρη του Τόρνου	61
3.1.3. Είδη Τόρνου	64
3.1.4. Κοπτικά Εργαλεία	66
3.2. Φραιζάρισμα	70
3.2.1. Βασικές κατεργασίες Φραιζαρίσματος	70
3.2.2. Κοπτικά Εργαλεία Φραιζαρίσματος	75
3.2.3. Η Φραίζα	78
3.3 Βιωσιμότητα	79
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	82
4.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	82
4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμόμετρου	82
4.3 Εργαλειομηχανή	83

4.4 Κοπτικό εργαλείο	84
4.5 Δοκίμιο κατεργασίας	85
4.6 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας	86
5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ANSYS	90
5.1 Βασικά χαρακτηριστικά του ANSYS	90
5.2 Στατικό πρόβλημα	92
5.3 Ιδιότητες προσομοίωσης	94
5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	96
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	107
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	109
Κύρια Βιβλιογραφία	109
Πηγές Διαδικτύου	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	113
Εικόνες	113
Σχήματα.....	113
Πίνακες.....	114
Διαγράμματα.....	115

1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

Οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, συχνά ονομαζόμενες και κατεργασίες κοπής, αποτελούν σημαντική και ευρέως χρησιμοποιημένη κατηγορία τεχνικών στη βιομηχανία και την κατασκευή. Αναφέρονται στην διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται απομάκρυνση υλικού από ένα αντικείμενο με σκοπό την μετατροπή του. Συνήθως για την παραγωγή εξαρτημάτων ή τη βελτίωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών του. Στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα τελικό προϊόν με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του περιττού υλικού με την μορφή αποβλίττου. Τέτοιες κατεργασίες χρησιμοποιούνται συνήθως για να μετατρέψουν ένα τεμάχιο προερχόμενο από πρωτογενείς διαδικασίες διαμόρφωσης, όπως χύτευση ή σφυρηλάτηση, σε τελικό προϊόν. Τέλος, στην πλειοψηφία τους τέτοιες εφαρμογές των κατεργασιών που συναντώνται στη βιομηχανία αφορούν μεταλλικά προϊόντα και εφαρμόζονται με τη βοήθεια εργαλειομηχανών. Ειδικών δηλαδή μηχανών που έχουν συγκεκριμένο τρόπο υλοποίησης της κοπής αλλά και της κινηματικής ανάμεσα σε κοπτικό εργαλείο και κατεργαζόμενο τεμάχιο.[1],[2]

1.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΠΗΣ

Οι κατεργασίες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη μορφή του κοπτικού εργαλείου. Σε κατεργασίες κοπής με γεωμετρικώς καθορισμένη μορφή του κοπτικού εργαλείου και σε αυτές με ακαθόριστη μορφή κοπτικού εργαλείου. Στις πρώτες ανήκουν οι κατεργασίες *τόρνευσης, διάτρησης και συναφείς κατεργασίες (γλύφανση, εμβύθιση, εσωτερική σπειροτόμηση)*, *φραιζάρισμα, πλάνισμα, κοπή οδοντώσεων , πριόνισμα, αυλάκωση και boring*. Ενώ στις δεύτερες κατεργασίες όπως *λείανση(βασική και ειδική), χόνιγκ (honing), λάπτιγκ (lapping) και υπερλείανση*. Υπάρχει και μία τρίτη κατηγορία κοπής οι μη συμβατικές κατεργασίες

όπως ηλεκτροχημικές κατεργασίες, ηλεκτροδιάβρωση (EDM), laser-plasma, δέσμη ηλεκτρονίων (EBM), δέσμη ιόντων (IBM), υπέρηχοι κ.λπ. .[1],[5]

1.1.2 Βασικές κατεργασίες κοπής γεωμετρικά καθορισμένης κόψης

Στη βιομηχανία οι κατεργασίες κοπής αποτελούν πυλώνα της δημιουργίας μιας ευρείας γκάμας προϊόντων. Από την αφαίρεση υλικού από ένα κομμάτι εργασίας για την επίτευξη επιθυμητών σχημάτων, διαστάσεων και επιφανειακών φινιρισμάτων. Οι κυριότερες κατεργασίες κοπής είναι η τόννευση, το φραιζάρισμα, η διάτρηση, η πλάνιση, το πριόνισμα, κοπή οδοντώσεων και η λείανση. Περιληπτικά η κάθε μια τους :

1) *Τόννευση*, με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε μια μηχανική διαδικασία διαφόρων υλικών όπου χρησιμοποιείται ένας τόννος για να αφαιρεθεί υλικό από ένα κομμάτι εργασίας, προκειμένου να διαμορφωθεί σε μία άλλη μορφή από την υπάρχουσα. Διεργασία που χρησιμοποιείται για την δημιουργία αξόνων, κοχλιών και άλλων κατασκευών συνήθως κυκλικής διατομής. Ίσως και η πιο βασική κατεργασία, η τόννευση παρά τον απλό σχεδιασμό και λειτουργία της χρησιμοποιείται στην βιομηχανία για παν πολλές περιπτώσεις .

2) *Φραιζάρισμα*, αφορά μηχανουργική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πολλών και διαφορετικών διατομών . Από απλές υποδοχές έως πολύπλοκες τρισδιάστατες επιφάνειες. Οι μηχανές αυτές αποτελούνται από περιστρεφόμενους κόφτες για την αφαίρεση υλικού από ένα κομμάτι εργασίας. Το οποίο κομμάτι μπορεί να κινηθεί συνήθως και στις τρεις κατευθύνσεις. Οι βασικοί τύποι φρεζαρίσματος είναι το φρέζαρισμα επιφάνειας, το φρέζαρισμα άκρου και το περιφερειακό φρέζαρισμα. Ανάλογα με το υλικό που υπόκειται σε διεργασία γίνεται και η αντίστοιχη επιλογή του εργαλείου φρεζαρίσματος, της ταχύτητας κοπής και του ρυθμού τροφοδοσίας για να παραχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

3) *Διάτρηση*, η διαδικασία δημιουργίας οπών. Σε διάφορα κομμάτια εργασίας. Περιλαμβάνει τη χρήση ενός περιστρεφόμενου εργαλείου κοπής που ονομάζεται τρυπάνι, το οποίο διεισδύει στο κομμάτι εργασίας δημιουργώντας την οπή. Οι μηχανές διάτρησης μπορεί να είναι χειροκίνητες ή υπολογιστικού ελέγχου, ανάλογα με τις απαιτήσεις ακρίβειας. Στη διάτρηση οι παράγοντες που πέζουν ρόλο στην

κατεργασία περιλαμβάνουν την επιλογή του τρυπανιού (διάμετρος), το ρυθμό τροφοδοσίας και τη χρήση ψυκτικού υγρού.

4)Πλάνιση, ασχολείται κυρίως με επίπεδες επιφάνειες και χρησιμοποιείται συχνά για τη αφαίρεση καμπυλών και ακανόνιστων σχημάτων από κομμάτια εργασίας. Ένα εργαλείο κοπής κινείται γραμμικά και αφαιρεί υλικό, αφήνοντας πίσω ένα επιθυμητό προφίλ. Η πλάνιση είναι λιγότερο κοινή από άλλες μηχανουργικές μεθόδους λόγω των περιορισμένων εφαρμογών της. Αλλά είναι απαραίτητη σε ορισμένες περιπτώσεις.

5)Πριόνιση, διαδικασία με την οποία αφαιρείτε υλικό , συνήθως ευθύγραμμο , με σκοπό την αλλαγή στο μήκος του τεμαχίου. Οι πριονοκορδέλες και τα δισκοπρίονα είναι οι πιο διαδεδομένες εργαλειομηχανές για αυτόν τον σκοπό, που είναι απαραίτητες στην βιομηχανία. Η πριόνιση είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη για τη δημιουργία ευθειών κοψιμάτων σε ράβδους, σωλήνες και άλλα υλικά. Χρήσιμα χαρακτηριστικά είναι η ταχύτητα κοπής και το βήμα των δοντιών της κορδέλας για την κοπή επιθυμητών διατομών.

6)Κοπή οδοντώσεων, η διεργασία κατά την οποία δημιουργούνται γρανάζια, ή άλλα εξαρτήματα οδοντώσεων, από ένα υλικό δοκίμιο . Η ακρίβεια αυτής της διεργασίας κοπής είναι μείζονος σημασίας ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή εφαρμογή τους στο μηχανικό σύστημα (σωστή μετάδοση ισχύος και κίνησης σε μηχανήματα). Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται από αυτές τις εργαλειομηχανές μπορεί να περιλαμβάνουν από φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, πλάνιση μέχρι και τórνευση ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού και τον όγκο παραγωγής. Για αυτό το λόγο και επειδή η ακρίβεια και η ποιότητα της κοπής γραναζιών έχουν καίρια σημασία οι μηχανές αυτές είναι συνήθως περίπλοκες και συνάμα ακριβές .

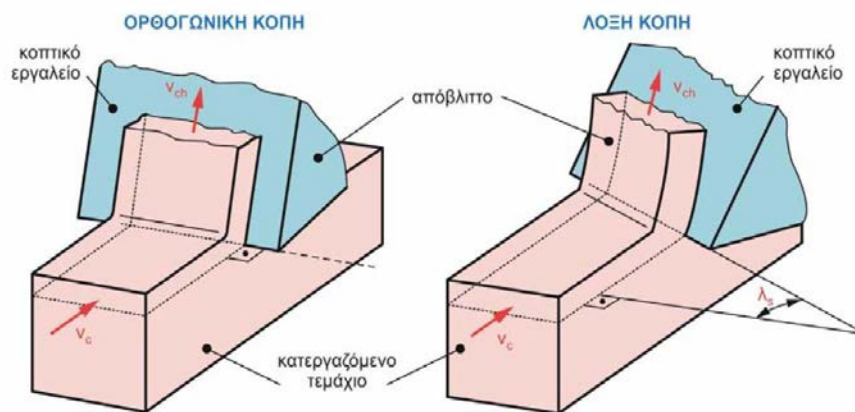
7)Λείανση, σκοπός της διεργασίας αυτής είναι το τελικό προϊόν να αποκτήσει επιφάνεια υψηλής ποιότητας αλλά και διαστατικής ακρίβεια. Η λείανση πραγματοποιείται με έναν περιστρεφόμενο λειαντικό τροχό διαφόρων σχημάτων και μεγεθών που έχετε σε επαφή με το υλικό και αφαιρεί τυχόν ατέλειες. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές αυτής της κατεργασίας είναι για το τρόχισμα κοπτικών εργαλείων .[1],[2]

Συνολικά, οι κατεργασίες κοπής είναι ουσιαστικές διαδικασίες στη βιομηχανία, απαραίτητες για την δημιουργία των περισσότερων μεταλλικών προϊόντων και όχι μόνο. Έχουν καθεμιά τους μοναδικές εφαρμογές, εργαλεία και παράγοντες προς εξέταση. Η μηχανουργία απαιτεί βαθιά κατανόηση των ιδιοτήτων του υλικού, της επιλογής του εργαλείου κοπής και των παραμέτρων κοπής (όπως του ρυθμού τροφοδοσίας και της ταχύτητας κοπής). Με τη συνεχιζόμενη πρόοδο της τεχνολογίας, η μηχανουργία συνεχίζει να εξελίσσεται, προσφέροντας πιο ακριβείς και αποτελεσματικές λύσεις για τις ανάγκες της βιομηχανίας. Από την δημιουργία ενός απλού άξονα, τις ακριβείς διατρήσεις ή την κατασκευή περίπλοκων συστημάτων, μια γερή βάση σε αυτά τα βασικά της μηχανουργίας είναι κρίσιμη για την επιτυχία στη σύγχρονη βιομηχανία.

1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΟΠΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν οι βασικές αρχές κοπής στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, περιλαμβάνοντας τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις κατεργασίες και κάποιες λεπτομέρειες σχετικά με την γεωμετρία της κοπής.

Όπως έχουμε προαναφέρει οι διεργασίες κοπής πραγματοποιούνται μέσω ενός τεμαχίου και της εργαλειομηχανής με συγκεκριμένη κινηματική. Κατά την κοπή σημαντικοί παράγοντες είναι το βάθος κοπής αλλά και το τμήμα του υλικού που αφαιρείται το απόβλιττο ή γρέζι. Οι αιχμές των εργαλείων έχουν συνήθως τη μορφή σφήνας (γνωστή και ως σφήνα κοπής), ενώ υπάρχουν δύο είδη κοπής η ορθογωνική και η λοξή κοπή όπως φαίνονται στο σχήμα 1.1 . Η πρώτη είναι και η απλούστερη από τις δύο με πλάτος κοπτικού εργαλείου μεγαλύτερο από αυτό του τεμαχίου και κάθετο στην κίνηση κοπής. Αντίθετα στην λοξή κοπή το κοπτικό εργαλείο παρουσιάζει μία κλίση στην κάθετη ευθεία την κίνησης κοπής κατά γωνία λ_s (γωνία κλίσης κόψης). [1],[5]

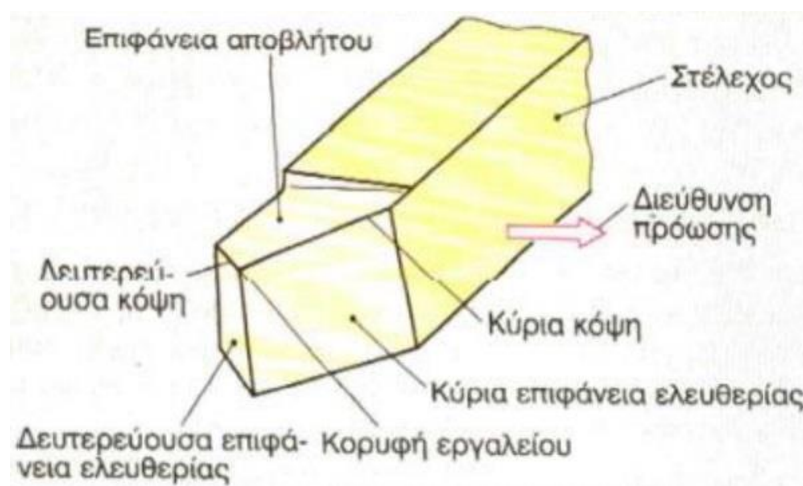


Σχήμα 1-1 Ορθογωνική και Λοξή κοπή.[1]

Τα εργαλεία έχουν κύριες και δευτερεύουσες κόψεις, κύριες είναι αυτές προς την διεύθυνση της πρόωσης οι οποίες παράγουν το μεγαλύτερο έργο κοπής αλλά και τη μεγαλύτερη δύναμη. Αντίθετα, δευτερεύουσες ονομάζονται οι κόψεις με κατεύθυνση διαφορετική ως προς τη διεύθυνση πρόωσης, σχήμα 1.2. [2]

Υπάρχουν επίσης τρεις βασικές περιοχές που είναι σημαντικές περιοχές κατά την κοπή οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 1.3.

- **Περιοχή 1** (διατμήσεως), η περιοχή μεταξύ του παραμορφωμένου και απαραμόρφωτου τμήματος του τεμαχίου.
- **Περιοχή 2** (αποβλίπτου), αυτή που ορίζεται μεταξύ κοπτικού εργαλείου και παραμορφωμένου τμήματος του υλικού.
- **Περιοχή 3** (κατεργασμένη), είναι ουσιαστικά η επιφάνεια του τεμαχίου που έχει ήδη υποστεί επεξεργασία.



Σχήμα 1-2 Κύρια και δευτερεύουσα κόψη.[2]

Καθεμία από τις περιοχές αυτές είναι σημαντική για διαφορετικούς λόγους. Γενικά τα σημεία ενδιαφέροντος είναι η πλαστική παραμόρφωση, η τριβή στην επιφάνεια 2 (μεταξύ αποβλήτου και κοπτικού εργαλείου) και η φθορά του κοπτικού εργαλείου. [1]

1.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπής

Ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια κατά την διάρκεια της κοπής είναι η γεωμετρία και αυτό επειδή με την βοήθεια της υπολογίζονται μεγέθη όπως το πάχος του αποβλήτου και οι σχετικές δυνάμεις της κοπής.

Καταρχάς, οι τρεις βασικοί παράμετροι αποτελούν το επιλεγμένο βάθος κοπής της κάθε κατεργασίας, το πάχος του απαραμόρφωτου τμήματος του κατεργαζόμενου τεμαχίου που ονομάζεται h_1 αλλά και το πάχος του αποβλήτου h_2 . Τα h_1 και h_2 διαφέρουν μεταξύ τους λόγω της συνεχής πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το τεμάχιο στην περιοχή 1, ωστόσο συνδέονται με μία σχέση που θα αναφερθεί παρακάτω.

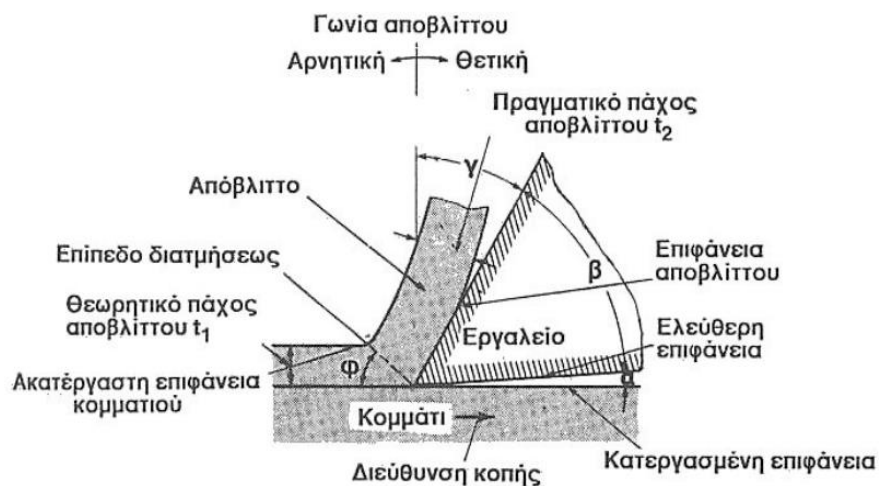
Εξίσου σημαντικά μεγέθη με τα δύο αυτά πάχη αποτελούν και οι χαρακτηριστικές γωνίες κοπής, τρεις στον αριθμό γνωστές ως γωνίες α , β και γ , σχήμα 1.3. Το άθροισμα τους ισούται με 90° ($\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$), επηρεάζουν σημαντικά την κόψη και επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε κατεργασίας. Η καθεμιά ξεχωριστά παρουσιάζει το δικό της ενδιαφέρον, η γωνία α

ή γωνία ελευθερίας είναι αυτή που σχηματίζεται μέσο της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου και της κατεργασμένης επιφάνειας του αντικειμένου. Αντιστρόφως ανάλογη της τριβής , δηλαδή με μεγαλύτερη γωνία α συνεπάγεται μικρότερη τριβή, όμως αυξάνεται παράλληλα η φθορά στο κοπτικό εργαλείο.

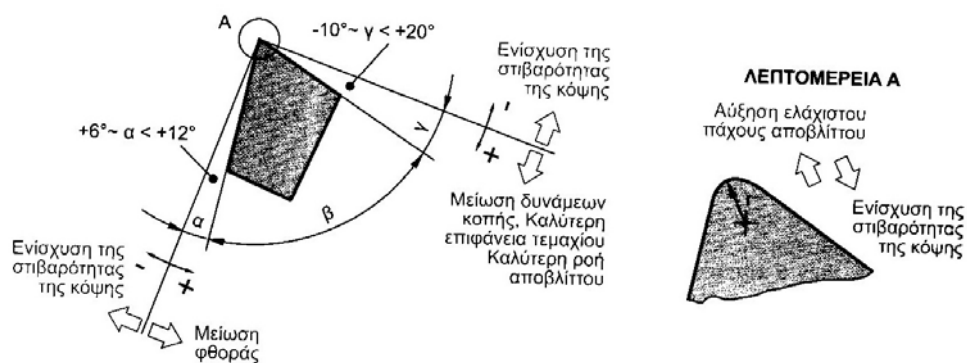
Η γωνία γ ορίζετε ως η γωνία μεταξύ της επιφάνειας αποβλίπτου και της νοητής, κάθετης προς την επιφάνεια κατεργασίας, γραμμής. Η εν λόγο γωνία επηρεάζει την ροή του γρεζιού , πιο συγκεκριμένα μεγαλύτερη γωνία γ σημαίνει καλύτερη ροή αποβλίπτου , μείωση των δυνάμεων κοπής και κατ' επέκταση βελτίωση της κατεργασίας. Για αρνητικές γωνίες γ παρουσιάζονται μεγαλύτερες δυνάμεις κοπής και άρα οι εργαλειομηχανές πρέπει να έχουν μεγαλύτερη ισχύ .

Τέλος, η γωνία β ή γωνία σφήνας κοπής, καθορίζεται από υλικό του τεμαχίου. Όσο μικρότερη είναι η γωνία σφήνας τόσο ευκολότερα διεισδύει το κοπτικό εργαλείο στο τεμάχιο, αλλά και τόσο δυσκολότερα απάγεται η παραγόμενη θερμότητα από την περιοχή της κόψης . Εξάλλου η μεγαλύτερη αντοχή του υλικού απαιτεί και καλύτερη στιβαρότητα . Είναι λοιπών γεγονός ότι ανάλογα με την σκληρότητα του δοκιμίου γίνεται και η επιλογή του εργαλείου με βάση τις κατάλληλες γωνίες , ενδεικτικές γωνίες φαίνονται στο σχήμα 1.3 . [1],[2]

Συμπερασματικά, ανάλογα με την σκληρότητα του κομματιού που θα υποστεί επεξεργασία γίνεται και η αντίστοιχη επιλογή γωνιών , σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι για σκληρότερα υλικά επιλέγονται μικρότερες γωνίες α και γ και μεγαλύτερη γωνία β για καλύτερη στιβαρότητα. Με γωνία α να συναντάται συνήθως μεταξύ 6° και 10° από την άλλη η γωνία γ για πολύ μαλακά υλικά μπορεί να είναι και μεγαλύτερη των 10° και για πολύ ψαθυρά μπορεί να επιλεγεί ακόμη και αρνητική. [2]



Σχήμα 1-3 Επιφάνειες και γωνίες κατά την κόψη.[5]



Σχήμα 1-4 Ακτίνα καμπυλότητας r [1]

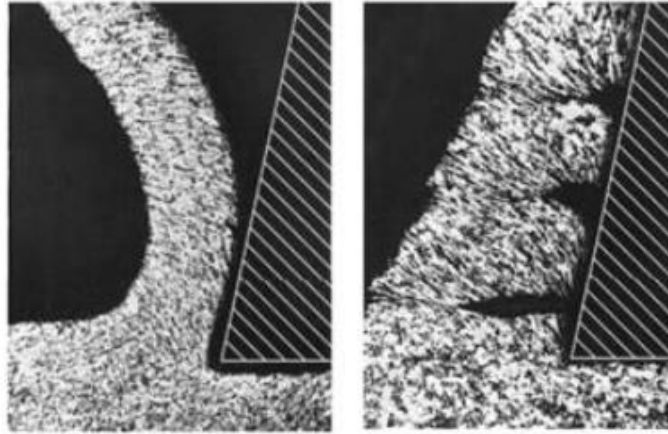
Τέλος, δεν μπορούμε να παραλείψουμε την καμπυλότητα στην άκρη του κοπτικού εργαλείου ως σημαντικό γεωμετρικό στοιχείο κοπής, σχήμα 1.4 . Η ακτίνα αυτής της καμπυλότητας ονομάζεται r , και ανάλογα με το μέγεθος της επηρεάζεται η στιβαρότητα της κοπής . Για την ακρίβεια όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα r τόσο αυξάνει η στιβαρότητα , όμως για λεπτά τεμάχια μπορεί να προκληθούν ταλαντώσεις. Για αυτό το λόγο γενικά η ακτίνα r επιλέγεται με βάση το βάθος κοπής της πρόωσης αλλά και το αν το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι ψαθυρό . [1]

1.3 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ

Έχει γίνει πολλές φορές στα προηγούμενα κεφάλαια αναφορά στο απόβλιττο (γρέζι), σε αυτό λοιπόν το κεφάλαιο θα μελετηθεί ο σχηματισμός , τα είδη του αποβλίττου και η σημασία του στις κατεργασίες κοπής . Επίσης , θα μελετηθούν οι επιδράσεις των υπόλοιπων παραγόντων της κοπή , όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπής , της πρόωσης, των περιστροφών κ.λπ. , για το σχηματισμό και το είδος του αποβλίττου.

Ξεκινώντας με τις βασικές μορφές του γρεζιού , που χωρίζονται σε δύο είδη συνεχές και ασυνεχές , εικόνα 1.1. Αυτό που καθορίζει το είδος του γρεζιού είναι η αντοχή σε διάτμηση τ και το βάθος παραμόρφωσης ϵ . Η περίπτωση κατά την οποία δημιουργείτε συνεχές απόβλιττο είναι όταν το τμήμα του υλικού που έρχεται σε επαφή με την αιχμή του κοπτικού εργαλείου υφίσταται συνεχή πλαστική παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης . Συναντάται ως επί τον πλείστον σε κατεργασίες με όλκιμα υλικά, υψηλές ταχύτητες κοπής και κοπτικά εργαλεία από σκληρομέταλλα. Γενικά, το συνεχές γρέζι είναι μια επιθυμητή κατάσταση επειδή συνδέεται με ευνοϊκές συνθήκες. Δηλαδή, δυνάμεων κοπής , καταναλισκόμενης ισχύος , τραχύτητας των κατεργασμένων επιφανειών και φθοράς του κοπτικού εργαλείου . [5] Ευνοϊκές συνθήκες κοπής εμφανίζονται επίσης, με μεγάλη ταχύτητα κοπής , μικρή πρόωση και μεγάλη ταχύτητα αποβλίττου.

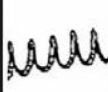
Το ασυνεχές απόβλιττο είναι αυτό που κατά την διάρκεια της διεργασίας το τμήμα του υλικού που υφίσταται πλαστική παραμόρφωση υπόκειται σε θραύση κατά την ζώνη διατμήσεως και τεμαχίζεται . Προφανώς αυτό γίνεται επειδή η παραμόρφωση υπερβαίνει την παραμόρφωση θραύσης του κατεργαζόμενου δοκιμίου. Μορφή γρεζιού που παρατηρείται συνήθως σε κοπή ψαθυρών υλικών , ωστόσο δεν αποκλείεται να εμφανιστεί και σε όλκιμα υλικά , όπως είναι ο μαλακός χάλυβας ο μόλυβδος κ.λπ. , για μη ευνοϊκές συνθήκες. Δηλαδή, σε όλκιμα με χαμηλές ταχύτητες κοπής μ μεγάλες προώσεις και εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλίττου είναι πιθανό να έχουμε ασυνεχές γρέζι . [1],[5]



Εικόνα 1-1 Συνεχές γρέζι (αριστερά), ασυνεχές γρέζι (δεξιά) [1]

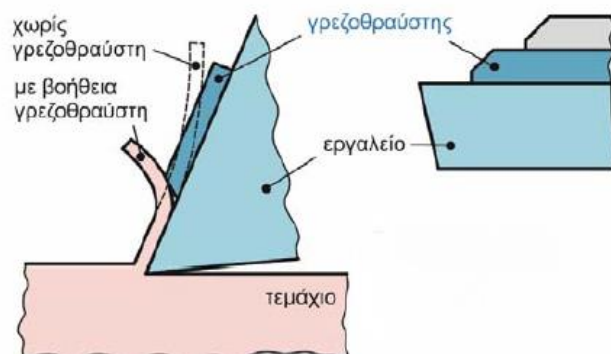
Με βάση το ISO 3685-1977 το γρέζι ταξινομείται επίσης και με βάση τη γεωμετρική μορφή του. Πιο συγκεκριμένα, χωρίζεται σε οκτώ ομάδες οι οποίες με την σειρά τους υποδιαιρούνται σε περαιτέρω υποομάδες ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται οι μορφές του γρεζιού.

Εν συνεχεία, αξίζει να σημειωθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό του αποβλίττου, ονομαστικά είναι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής, η γωνία του αποβλίττου και η γωνία τοποθέτησης του εργαλείου. Καταρχάς, η γωνία τοποθέτησης του εργαλείου καθώς επίσης και η πρόωση έχουν αρνητική επιρροή στην ομαλότητα της κατεργασία όταν αυξάνονται, σε αντίθεση με το βάθος κοπής του οποίου η αύξηση οδηγεί σε μία πιο επιθυμητή μορφή για το απόβλιττο. Δεύτερον, η ταχύτητα κοπής έχει σημαντική επίδραση στο όριο διαρροής του υλικού επειδή μεταβάλλει την ταχύτητα παραμόρφωσης, αλλά και την γωνία διάτμησης. Πράγμα που την καθιστά σημαντική στον σχηματισμό του αποβλίττου και μάλιστα η αύξηση της για όλες τις διαφορετικές προώσεις προσφέρει ομαλότερη κοπή (και ακόμη πιο ομαλή όσο μειώνεται η πρόωση φυσικά). Επίσης η γωνία αποβλίττου καθορίζει την κατεύθυνση που ακολουθεί ο σχηματισμός του γρεζιού αλλά και την πλαστική παραμόρφωση που απαιτείται. Γενικά μιλώντας, η μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου συνεπάγεται μειωμένη απαιτούμενη πλαστική παραμόρφωση, ομαλότερη ροή και κατ'επέκταση καλύτερο σχηματισμό αποβλίττου.

ΤΑΙΝΙΟ-ΕΙΔΗ	ΣΩΛΗΝΟ-ΕΙΔΗ	ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ	ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΤΥΠΟΥ ΡΟΔΕΛΑΣ	ΚΩΝΙΚΑ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ	ΣΠΕΙΡΟ-ΕΙΔΗ	ΤΕΜΑΧΙΑ ΣΠΕΙΡΟ-ΕΙΔΟΥΣ	ΒΕΛΟΝΟ-ΕΙΔΗ
							
1.1 μακρύ	2.1 μακρύ	3.2 επίπεδο	4.1 μακρύ	5.1 μακρύ	6.1 ενωμένο		
							
1.2 κοντό	2.2 κοντό	3.2 κωνικό	4.2 κοντό	5.2 κοντό	6.2 θρυμματισμένο		
							
1.3 περιπλεγμένο	2.3 περιπλεγμένο		4.3 περιπλεγμένο	5.3 περιπλεγμένο			
						ISO 3685-1977	

Σχήμα 1-5 Μορφές αποβλίττου [1]

Όταν το συνεχές απόβλιττο φτάνει σε ένα μεγάλο μήκος αρχίζει να δυσχεραίνει την διαδικασία της κοπής. Για αυτό λοιπόν το λόγο, στις κατεργασίες συχνά χρησιμοποιούνται εργαλεία κοπής ειδικά σχεδιασμένα για να αποτρέπουν την δημιουργία τέτοιου αποβλίττου και ονομάζονται γρεζοθραύστες, σχήμα 1.6.



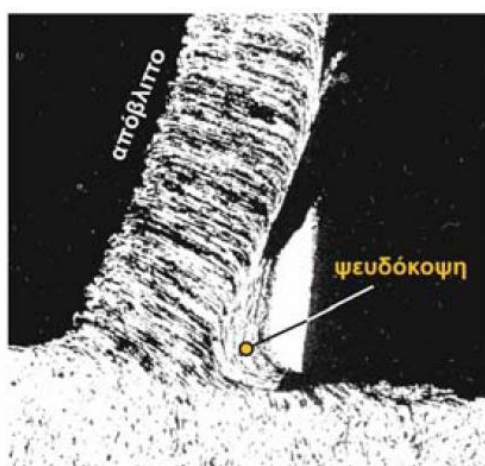
Σχήμα 1-6 Κοπή με γρεζοθραύστη. [1]

Η δουλειά του γρεζοθραύστη είναι να μειώνει την ακτίνα καμπυλότητας του αποβλίττου με αποτέλεσμα τελικά να σπάει. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο τύποι γρεζοθραύστη είτε με καμπυλώσεις ή αυλακώσεις στο κοπτικό εργαλείο, είτε με εμπόδιο στην κίνηση του αποβλίττου. Συνήθως, τα κοπτικά πλακίδια φέρουν συγκεκριμένη γεωμετρία (με αυλακώσεις) που οδηγεί στην διάσπαση του γρεζιού

κατά την κόψη. Το τελευταίο σημαντικό κομμάτι στο σχηματισμό του γρεζιού και συγκεκριμένα του συνεχούς είναι ένα φαινόμενο που ονομάζεται ψευδόκοψη . [1],[4]

1.3.1 Συνεχές απόβλιττο με ψευδόκοψη

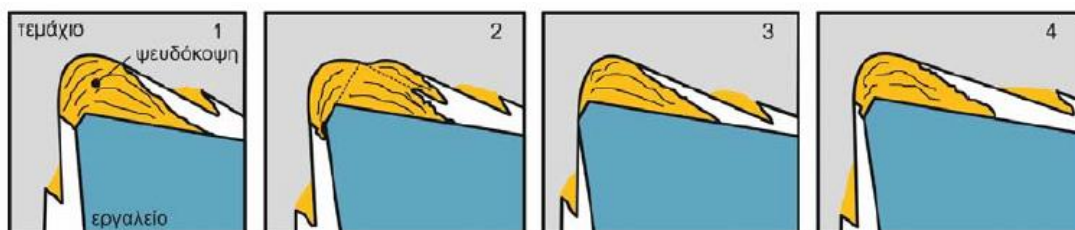
Κατά την διάρκεια της κόψης μπορεί να δημιουργηθεί σώμα με ασύμμετρο σχήμα σφήνας από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο μέταλλο από επάλληλα λεπτά στρώματα αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ψευδόκοψη . Το απόβλιττο αυτό μοιάζει όπως το συνεχές απόβλιττο με την διαφορά ότι στην περιοχή μεταξύ του αποβλίττου και του κοπτικού εργαλείου εμφανίζεται η ψευδόκοψη, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 1.2 . Ο σχηματισμός αυτού του φαινομένου δίδεται σε έναν συνδυασμό ορθών θλιπτικών τάσεων αλλά και λόγω τριβής και θερμοκρασίας που δημιουργούνται μεταξύ της επιφάνειας αποβλίττου και κοπτικού εργαλείου.[1]



Εικόνα 1-2 Συνεχές απόβλιττο με ψευδοκόψη. [1]

Η διαδικασία συνεχίζεται κατά την διάρκεια της κοπής, όταν φτάσει το απόβλιττο σε κάποιο μήκος, αποκολλώνται κομματάκια από το σώμα της ψευδόκοψης και παρασύρονται προσκολλημένα επάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου με συνέπεια την χειροτέρευση της τραχύτητας και κατά συνέπεια της υποβάθμισης της ποιότητας της επεξεργασμένης επιφάνειας. Ειδικότερα οι βασικότερες συνέπειες του σχηματισμού ψευδόκοψης είναι οι εξής :

- Αύξηση της γωνίας αποβλίπτου γ του κοπτικού εργαλείου.
- Μείωση της επιφάνειας μεταξύ αποβλίπτου και εργαλείου.
- Μεταβάλλονται οι φυσικές ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου αλλά και χειροτερεύει την τραχύτητα της, κάτι που είναι γενικά ανεπιθύμητο.
- Επίδραση στην φθορά και κατά συνέπεια στη διάρκεια ζωής του εργαλείου αλλά και στην γεωμετρική ακρίβεια της επιφάνειας.
- Δημιουργία ταλαντώσεων κατά την διάρκεια της κοπής[1],[5]



Σχήμα 1-7 Φάσεις της ψευδόκοψης. [1]

Για να σχηματιστεί ωστόσο η ψευδόκοψη πρέπει να ισχύουν τρεις βασικές προϋποθέσεις. Να εμφανιστούν συνθήκες τριβής ακινησίας, το κατεργαζόμενο τεμάχιο να είναι κρατυνόμενο και να ισχύει η συνθήκη διαρροής στο ευσταθές κομμάτι της ψευδόκοψης. Τέλος, υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό και τα χαρακτηριστικά της ψευδόκοψης.

1. Η ταχύτητα κοπής, όσο αυξάνεται, αυξάνει μαζί της και θερμοκρασίας στην περιοχή που υπάρχει τριβή οδηγώντας τη ψευδόκοψη σε σμίκρυνση και τελικά εκφύλιση σε ένα μικρό επικόλλημα μετάλλου.
2. Το βάθος κοπής η πρόωση αλλά και η γωνία αποβλίπτου διαμορφώνουν τις διαστάσεις του αποβλίπτου που με την σειρά του επηρεάζει την θερμότητα στην διεπιφάνεια μεταξύ κοπτικού εργαλείου και γρεζιού. Όσο δηλαδή μικρότεροι είναι αυτοί οι παράγοντες τόσο μικρότερη θα είναι η εκλυόμενη θερμότητα και άρα θα είναι μεγαλύτερη η κρίσιμη ταχύτητα κοπής, όπου εξαφανίζεται η ψευδόκοψη.

3. Τέλος, το υγρό κοπής αλλά και το υλικού του κατεργαζόμενου μετάλλου είναι σημαντικοί παράγοντες επηρεάζουν τον σχηματισμό της ψευδόκοψης. Αφενός, όσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα κρατύνσεως τόσο ευκολότερο είναι να δημιουργηθεί ψευδόκοψη. Αφετέρου, η χρήση κοπτικού υγρού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση στο φαινόμενο συντελεστή τριβής και έτσι ο σχηματισμός ψευδόκοψης εμφανίζεται σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Ωστόσο αυτό ισχύει για σχετικά χαμηλές ταχύτητες κοπής ενώ για υψηλές ταχύτητες το κοπτικό υγρό χάνει τις λιπαντικές του ιδιότητες.[5]

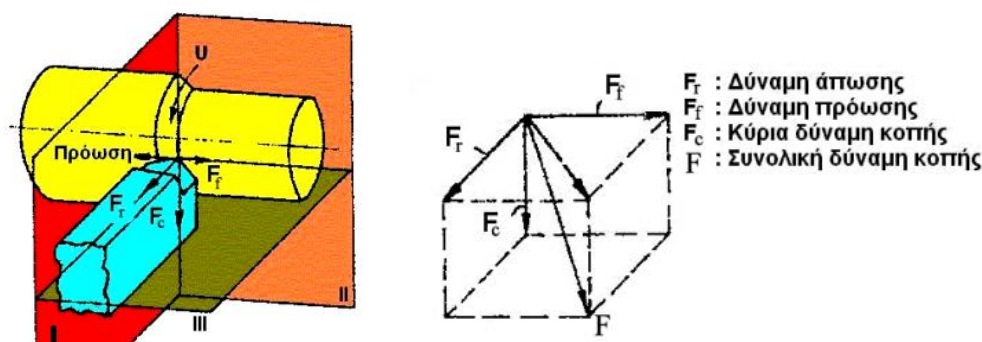
1.4 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΟΠΗΣ

Οι δυνάμεις κοπής είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του υλικού του τεμαχίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες συνιστώσες οι οποίες είναι διατμητική δύναμη (F_t), ακτινική ή δύναμη κοπής (F_c) και δύναμη άπωσης (F_r). Για να πραγματοποιηθεί η κοπή θα πρέπει πρώτα η δύναμη που θα επιβληθεί από την εργαλειομηχανή να είναι επαρκούς μεγέθους ώστε να ξεπερνά την αντίσταση του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

1.4.1. Υπολογισμός δυνάμεων κοπής

Η διατμητική δύναμη (F_t) δρα παράλληλα με την κατεύθυνση τροφοδοσίας και είναι υπεύθυνη για την κίνηση του εργαλείου κατά μήκος του τεμαχίου εργασίας. Η ακτινική δύναμη (F_c) δρα κάθετα προς την κατεύθυνση τροφοδοσίας και είναι υπεύθυνη για την αντίσταση στη δράση κοπής. Η δύναμη άπωσης (F_r) δρα κατά μήκος της ευέλικτης κατεύθυνσης προς την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας και είναι υπεύθυνη για την ενέργεια που απαιτείται για το σχηματισμό του. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων κοπής (ταχύτητα κοπής, ρυθμός τροφοδοσίας και βάθος κοπής), γεωμετρία εργαλείου (γωνία τσουγκράνας, γωνία διάκενου και ακτίνα κοπής), ιδιότητες υλικού τεμαχίου (σκληρότητα, αντοχή και ολκιμότητα) και ιδιότητες υλικού εργαλείου (αντοχή, σκληρότητα και θερμική

αγωγιμότητα). Ο προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής μπορεί να επιτευχθεί μέσω θεωρητικών μοντέλων ή πειραματικών μεθόδων.



Σχήμα 1-8 Δυνάμεις κοπής [6]

Όσον αφορά τα θεωρητικά μοντέλα, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έχουν αναπτυχθεί αρκετά αναλυτικά μοντέλα και εμπειρικές εξισώσεις για την εκτίμηση των δυνάμεων κοπής με βάση γνωστές παραμέτρους. Τα πιο κοινά θεωρητικά μοντέλα περιλαμβάνουν το κυκλικό διάγραμμα του Merchant, τη μέθοδο slab και το μοντέλο Johnson-Cook. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού για να προβλέψουν τις δυνάμεις κοπής. Ωστόσο, είναι σημαντικό να επικυρωθούν αυτά τα μοντέλα μέσω πειραματικών δεδομένων, καθώς στην πραγματικότητα πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τους υπολογισμούς δυνάμεων. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος όμως υπολογισμού των δυνάμεων κατά την διάρκεια της κοπής είναι με τον τύπο του Kienzle :

$$F_c = b \cdot K_{s1,1} \cdot h^{1-z} \quad (1.1)$$

Όπου: F_c – κύρια δύναμη κοπής

b – πλάτος αποβλίπτου

h – πάχος αποβλίπτου

$K_{s1,1}$ – ειδική αντίσταση κοπής

Z – σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Η ειδικής αντίστασης κοπής προσδιορίζεται μέσω πειραματικής μελέτης, για τα περισσότερα διαδεδομένα υλικά έχουν γίνει οι αντίστοιχες μελέτες και έχουν δημοσιευθεί πίνακες με τις χαρακτηριστικές τιμές. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, καταρχάς από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, από το υλικό και την γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου αλλά και από τις συνθήκες κοπής. Σε σχέση με το απόβλιττο η ειδική αντίσταση μειώνεται όσο το πάχος του αποβίττου αυξάνεται. Αντίστοιχες σχέσεις υπάρχουν και για τις συνιστώσες της κύριας δύναμης κοπής, δύναμη άπωσης F_r και πρόωσης F_f [1]:

$$F_r = b \cdot K_{r1,1} \cdot h^{1-y} \quad (1.2)$$

$$F_f = b \cdot K_{f1,1} \cdot h^{1-x} \quad (1.3)$$

Υπάρχουν ωστόσο και οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής με ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρήση αισθητήρων δύναμης, δυναμόμετρων και διαφόρων συσκευών μέτρησης. Οι μετρούμενες δυνάμεις μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, την επιλογή εργαλείων και την κατανόηση της συμπεριφοράς διαφορετικών υλικών κατά την κοπή.[15]

Είναι απαραίτητο να γίνεται σωστός έλεγχος των παραπάνω δυνάμεων έτσι ώστε να υπάρχει η ακρίβεια και η υψηλή ποιότητα των κατεργαζόμενων κομματιών στις κατεργασίες κοπής. Η χρήση κατάλληλων εργαλείων παράλληλα με την σωστή χρήση άλλων παραγόντων βοηθάει στην σωστή ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων κατά την διαδικασία τόννευσης.[1]

1.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τις συνιστώσες της δύναμης κοπής

Υπάρχουν έξι παράγοντες που επηρεάζουν τις συνιστώσες της δύναμης κοπής. Ο πρώτος παράγοντας έχει να κάνει με τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζεται με την σύνθεση, την δομή και τις συνθήκες που πρέπει να κοπεί. Ωστόσο υπάρχουν διάφορα υλικά που αντιδρούν αλλιώς εξαιτίας της ελαστικότητας ή

σκληρότητας τους. Ο δεύτερος παράγοντας έχει να κάνει με την γεωμετρία του αντικειμένου και πιο συγκεκριμένα έχει να κάνει με την μορφή και την διάταξη του αντικειμένου. Ο τρίτος παράγοντας έχει να κάνει με την γεωμετρία της κοπής δηλαδή με την διάταξη του εργαλείου που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία αυτή έχει να κάνει με τις γωνίες κοπής, την ακμή, την αιχμή και φυσικά επηρεάζουν την δύναμη της κοπής που δημιουργείτε. Ο επόμενος παράγοντας αναφέρεται στην τριβή μεταξύ του εργαλείου κοπής και του υλικού που πρόκειται να κοπεί. Σε περιπτώσεις που υπάρχει υψηλή τριβή, είναι πιθανόν να αυξηθεί η δύναμη της κοπής. Ο πέμπτος παράγοντας είναι η ταχύτητα της κοπής που εφαρμόζεται και μπορεί να επηρεάζει την απόδοση της διαδικασίας. Ωστόσο, όταν υπάρχει υπερβολικά γρήγορη κοπή υπάρχει αρκετά μεγάλη πιθανότητα να αυξηθεί η τριβή. Τέλος, αναφορά γίνεται στην θερμοκρασία του υλικού και του εργαλείου μπορεί να επηρεάσει τη δύναμη κοπής. Ένα δοκίμιο ανάλογα με την θερμοκρασία του μπορεί να μεταβληθούν όλοι οι παραπάνω παράγοντες που επηρεάζουν τις δυνάμεις που απαιτούνται για την κατεργασία. Συμπερασματικά θα μπορούσε κανείς να πει ότι η δύναμη της κοπής θεωρείται μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και πάντα επηρεάζεται από πολλούς και διάφορους παράγοντες. Ο σωστός συνδυασμός είναι πολύ σημαντικός έτσι ώστε να υπάρχει ασφάλεια και η μέγιστη αποδοτικότητα. [6]

1.4.3. Μέτρηση των δυνάμεων κοπής

Η ακριβής μέτρηση των δυνάμεων κοπής είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας και την κατανόηση της συμπεριφοράς διαφορετικών υλικών κατά την κοπή. Για τη μέτρηση της δύναμης χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και συσκευές, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τους διαθέσιμους πόρους. Υπάρχουν τέσσερις (4) διαφορετικοί τρόποι που μπορεί να γίνει η μέτρηση των δυνάμεων κοπής.

Ο πρώτος τρόπος είναι με τα δυναμόμετρα που είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής. Διατίθενται σε διάφορα σχέδια, συμπεριλαμβανομένων πιεζοηλεκτρικών, μετρητών καταπόνησης και μαγνητοηλεκτρικών δυναμόμετρων. Τα δυναμόμετρα μπορούν να ενσωματωθούν στην εργαλειομηχανή ή να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερικές

συσκευές για τη μέτρηση αξονικών, ακτινικών και εφαπτόμενων δυνάμεων ταυτόχρονα. Ο δεύτερος τρόπος είναι με την χρήση αισθητήριων δυνάμεων. Αυτός ο τρόπος μέτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τις δυνάμεις της κοπής. Αυτοί οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στην εργαλειομηχανή ή στη βάση του τεμαχίου εργασίας και στην παροχή δεδομένων δύναμης σε πραγματικό χρόνο. Ο τρίτος τρόπος μέτρησης είναι με τις πλατφόρμες δύναμης. Αυτές οι πλατφόρμες χρησιμοποιούνται συχνά σε ερευνητικές ή εργαστηριακές εγκαταστάσεις και είναι εξειδικευμένες συσκευές που μετρούν τις δυνάμεις που δρουν σε μια επιφάνεια. Μπορούν να παρέχουν λεπτομερή δεδομένα κατανομής δύναμης σε όλο το εργαλείο κοπής και να προσδιορίζουν τις διακυμάνσεις των δυνάμεων κοπής κατά τη διαδικασία μιας κατεργασίας. Ο τελευταίος τρόπος μέτρησης που θα αναφερθεί είναι η πρόβλεψη δύναμης κοπής με την οποία γίνεται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) ή ακόμα και αριθμητικές προσομοιώσεις. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιεί κάποια υπολογιστικά μοντέλα τα οποία μπορούν να εκτιμήσουν την δύναμη της κοπής με βάση τους παραμέτρους που εισάγονται στο εκάστοτε λογισμικό. Είναι χρήσιμη μέθοδος για την πρόβλεψη δυνάμεων υπό διάφορες συνθήκες κοπής χωρίς να απαιτείται φυσική μέτρηση, κάνοντας αυτή τη μέθοδο ιδανική για περίπλοκες διαδικασίες ή για πολύ ακριβά υλικά.

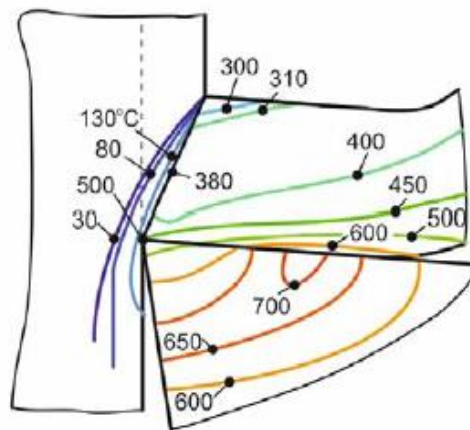
Κατανοώντας τις δυνάμεις που ασκούνται κατά την κοπή, οι κατασκευαστές μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για να βελτιώσουν την απόδοση, να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση της μηχανουργικής κατεργασίας. Να συμβάλουν στην σωστή επιλογή των κατάλληλων εργαλείων κοπής και την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών κατά την κοπή.[15]

1.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ

Όπως αναφέραμε ήδη στις μηχανουργικές κατεργασίες, οι θερμοκρασίες κοπής και η φθορά του εργαλείου είναι δύο κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την αντοχή των εργαλείων κοπής.

1.5.1. Θερμοκρασίες κοπής

Οι θερμοκρασίες κοπής αναφέρονται στη θερμότητα που παράγεται κατά τη διαδικασία κοπής. Καθώς το εργαλείο κοπής αλληλοεπιδρά με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η ενέργεια μεταφέρεται στο απόβλιττο και στο εργαλείο, οδηγώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας. Είναι σημαντικό να παρακολουθούνται και να ελέγχονται οι θερμοκρασίες κοπής, καθώς η υπερβολική θερμότητα μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής του εργαλείου και στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, σε ακραίες ακόμα περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε πλήρης αποτυχία της διεργασίας. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία κοπής αναφέρεται στο συγκεκριμένο σημείο όπου έρχεται σε επαφή το εργαλείο με το κατεργαζόμενο υλικό. Η θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται αναλόγως τις συνθήκες κοπής, την ταχύτητα που πραγματοποιείται η διαδικασία, το υλικό το οποίο κόβεται και το εργαλείο που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 1-3 Κατανομή θερμοκρασιών στο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο.[1]

Ακόμα, πρέπει κανείς να λάβει υπόψιν ότι την στιγμή που η θερμοκρασία αυξάνεται, μπορεί να προκληθούν προβλήματα όπως απότομη φθορά του εργαλείου ή να μην υπάρξει ακρίβεια στο κόψιμο. Τέλος, ο ρυθμός τροφοδοσίας, το βάθος κοπής, η γεωμετρία του εργαλείου, το υλικό κοπτικού εργαλείου, οι ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου εργασίας και η παρουσία υγρών κοπής είναι μερικοί ακόμα παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία κοπής.

1.6. ΚΟΠΤΙΚΑ ΠΛΑΚΙΔΙΑ

Τα πλακίδια κοπής χρησιμοποιούνται σε εργαλείομηχανές όπως τρυπάνια, τροχοί κοπής, και πριόνια. Κατά τη χρήση, το πλακίδιο έρχεται σε επαφή με το υλικό που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η κόψη. Οι σκληρές επιφάνειες των πλακιδίων παρέχουν την αναγκαία αντίσταση για να κόψουν μέσα στο υλικό. Τα κοπτικά πλακίδια μπορούν να είναι κυκλικά, οβάλ, τετραγωνικά, ορθογώνια ή με άλλα γεωμετρικά σχήματα και μπορούν να έχουν διάφορες χαρακτηριστικές επιφάνειες, όπως εσοχές, ραβδώσεις και πολλά άλλα.[7] Κάθε είδος πλακιδίου κοπής είναι σχεδιασμένο για να εκτελεί κοπές σε συγκεκριμένα υλικά με αποτελεσματικό και ασφαλή τρόπο, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια και απόδοση στην εφαρμογή. Θα πρέπει λοιπόν, να έχουν τέτοια χαρακτηριστικά ώστε να μπορούν να αντεπεξέλθουν στις διεργασίες κοπής. Πρώτον, σκληρότητα, το κοπτικό εργαλείο θα πρέπει να είναι σκληρότερο από κάθε κατεργαζόμενο τεμάχιο σε θερμοκρασίες κοπής, έτσι ώστε να αποφεύγεται η πλαστική παραμόρφωση του από τις δυνάμεις κοπής. Θα πρέπει ωστόσο, να είναι ανθεκτικό στη θραύση, δεν αρκεί μόνο να είναι σκληρό το κοπτικό πλακίδιο καθώς τα σκληρά και συνάμα ψαθυρά υλικά είναι ευάλωτα στην θραύση από κάποια απότομη αλλαγή στην τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου. Για να αποφευχθούν τέτοιες συνέπειες το εργαλείο έχει σκληρή επικάλυψη που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο ενώ στο εσωτερικό του είναι πιο μαλακό αλλά ανθεκτικό σε κραδασμούς και ταλαντώσεις. Είναι απαραίτητο επίσης να είναι ανθεκτικό στην φθορά, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ικανό αριθμό διεργασιών μέχρι να αντικατασταθεί. Τέλος, ιδιαίτερης σημασίας είναι και το κόστος του, όπως είναι προφανές τα κοπτικά πλακίδια χρησιμοποιούνται για πληθώρα εργασιών και εργαλείομηχανών και το κόστος τους παίζει καθοριστικό ρόλο στο κόστος του τελικού προϊόντος.

1.6.1 Υλικά κοπτικών πλακιδίων

Τα κοινά υλικά υποστρώματος εργαλείων που χρησιμοποιούνται σήμερα περιλαμβάνουν σκληρομέταλλα, χάλυβες υψηλής ταχύτητας (HSS), κοβάλτιο εμπλουτισμένο με χάλυβες υψηλής ταχύτητας (HSS-Co), πυροσυσσωματωμένο καρβίδιο βολφραμίου (WC), κεραμομεταλλικά, κεραμικά, πολυκρυσταλλικό κυβικό

νιτρίδιο του βορίου (PCBN), πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD) και μονοκρυσταλλο φυσικό διαμάντι.

- Τα σκληρομέταλλα ήταν παλαιότερα πιο διαδεδομένα στις κατεργασίες κοπής, είναι χάλυβες άνθρακα με περιεκτικότητα 0,90 έως 1,30 % που έχουν υποστεί βαφή . Είναι αρκετά σκληροί και ανθεκτικοί, όμως για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 200 °C χάνουν την σκληρότητά τους επειδή είναι βαμμένα και για αυτό το λόγο έχουν αντικατασταθεί από άλλα υλικά.
- Οι ταχυχάλυβες (HSS) είναι επισκληρημένοι χάλυβες που εμπεριέχουν κράματα W, Mo, Co, V και Cr, αυτό τους δίνει την δυνατότητα να επεξεργαστούν επιφάνειες σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να φθείρονται. Είναι ανθεκτικά σε κραδασμούς και κόπωση, εύκολο να επεξεργαστούν και επίσης το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό σε σύγκριση με τα άλλα υλικά. Όμως για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 540-600 °C η σκληρότητά τους μειώνεται αρκετά.
- Τα κεραμικά αποτελούνται από καθαρό οξείδιο του αλουμινίου, Al_2O_3 που χρησιμοποιείται ως μεταλλικό συνδετικό. Είναι πολύ σκληρά και αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής από άλλα υλικά. Είναι ευάλωτα στους κραδασμούς και στις ταλαντώσεις λόγω της ψαθυρότητας τους.
- Τα κεραμομέταλλα είναι μια νέα κατηγορία υλικών εργαλείων κατάλληλα για φινίρισμα. Είναι ουσιαστικά κεραμικά με κράματα μετάλλων όπως νικέλιο, TiC, κοβάλτιο, ταντάλιο και κασσίτερο. Τα κεραμομέταλλα είναι ανώτερα από τα συμβατικά υλικά σε πολλούς τομείς, έχουν καλύτερη σκληρότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερη αντοχή στην φθορά και άρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Τα βιομηχανικά διαμάντια υπάρχουν σε πολυκρυσταλλική μορφή, είναι εξαιρετικά σκληρά και άρα ιδανικά για την μορφοποίηση σκληρών επιφανειών. Το υψηλό κόστος τους όμως καθιστά την χρήση τους στη βιομηχανία περιορισμένη.

Τα πλακίδια με σκοπό να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες των διεργασιών κοπής συχνά φέρουν επικαλύψεις από άλλα υλικά που αλλάζουν τις ιδιότητες στην

επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και το κάνουν καταλληλότερο για την εκάστοτε κατεργασία και υλικό. Η επίστρωση των κοπτικών πλακιδίων είναι φτιαγμένη από υλικά, όπως το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN), καρβίδιο του τιτανίου (TiC), το ανθρακικό νιτρίδιο τιτανίου (TiCN) και το νιτρίδιο του τιτανίου αλουμινίου (AlTiN). Οι δύο πιο αποτελεσματικές διαδικασίες επίστρωσης για τη βελτίωση της διάρκειας ζωής και της απόδοσης του εργαλείου είναι η χημική απόθεσης ατμών (CVD) και η φυσική απόθεσης ατμών (PVD) του νιτρίδιου του τιτανίου (TiN) και καρβίδιο τιτανίου (TiC). Αναλόγως με τις επιθυμητές ιδιότητες που απαιτούνται για την εκάστοτε μηχανουργική κατεργασία γίνεται και η αντίστοιχη επιλογή στο υλικό του κοπτικού εργαλείου και στην επίστρωση που θα έχει. Οι διάφορες ιδιότητες που δίνουν οι επιστρώσεις στο κοπτικό εργαλείο είναι :

- Αντοχή στην οξείδωση, τη διάβρωση σταθερότητα σε υψηλή θερμοκρασία .
- Αντοχή σε φθορά κρατήρα.
- Σκληρότητα και συγκράτηση άκρων.
- Αντοχή σε τριβή και φθορά ελεύθερης πλευράς.
- Χαμηλός συντελεστής τριβής και λεία επιφάνεια επαφής.
- Λεπτό μέγεθος κόκκου.[8],[17]

Παρακάτω παραθέτονται οι ιδιότητες και συνθέσεις των βασικών επιστρώσεων των κοπτικών εργαλείων :

Επιστρώσεις TiN (Νιτρίδιο Τιτανίου)

Σύνθεση: Οι επιστρώσεις TiN αποτελούνται από τιτάνιο και άζωτο. Συνήθως εφαρμόζονται μέσω διαδικασίας φυσικής απόθεσης ατμών (PVD). Η επίστρωση είναι γνωστή για τη χρυσή της εμφάνιση.

Ιδιότητες: Οι επιστρώσεις TiN παρέχουν εξαιρετική αντοχή στη φθορά και μειώνουν την τριβή μεταξύ του εργαλείου και του εργοταξίου. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε υψηλές ταχύτητες κοπής λόγω της ικανότητάς τους να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Επιστρώσεις TiCN (Ανθρακονιτρίδιο Τιτανίου)

Σύνθεση: Οι επιστρώσεις TiCN αποτελούνται από τιτάνιο, άνθρακα και άζωτο. Εφαρμόζονται συνήθως μέσω της διαδικασίας φυσικής απόθεσης ατμών (PVD) και έχουν γκρι χρώμα.

Ιδιότητες: Οι επιστρώσεις TiCN προσφέρουν υψηλότερη σκληρότητα σε σχέση με τις επιστρώσεις TiN, καθιστώντας τις κατάλληλες για το κόψιμο ακατέργαστων υλικών. Συνδυάζουν τα οφέλη των επιστρώσεων TiN και TiAlN, προσφέροντας βελτιωμένη αντοχή στη φθορά και τη θερμότητα.

Επιστρώσεις TiAlN (Νιτρίδιο Τιτανίου Αλουμινίου)

Σύνθεση: Οι επιστρώσεις TiAlN περιλαμβάνουν τιτάνιο, αλουμίνιο και άζωτο. Αυτές οι επιστρώσεις συνήθως εφαρμόζονται μέσω διαδικασιών PVD.

Ιδιότητες: Οι επιστρώσεις TiAlN προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στη θερμότητα και σκληρότητα, καθιστώντας τις κατάλληλες για την υψηλή θερμοκρασία επεξεργασίας. Εξαιρετικά αποτελεσματικές σε εφαρμογές κοπής που αφορούν ανοξείδωτο χάλυβα, χαρτονένιους χάλυβες και κράματα νικελίου.

Επιστρώσεις AlTiN

Σύνθεση: Οι επιστρώσεις AlTiN αποτελούνται από αλουμίνιο, τιτάνιο και αζωτικό. Εφαρμόζονται μέσω τεχνικών PVD, και η χρωματική τους απόχρωση κυμαίνεται από σκούρο γκρι έως μαύρο.

Ιδιότητες: Οι επιστρώσεις AlTiN συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των επιστρώσεων αλουμινίου και τιτανίου νιτρικού. Προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στην οξείδωση, υψηλή σκληρότητα και χαμηλή τριβή, καθιστώντας τις ιδανικές για εργαλεία υψηλής ταχύτητας κοπής και μακρά διάρκεια ζωής. [8],[17],[18]

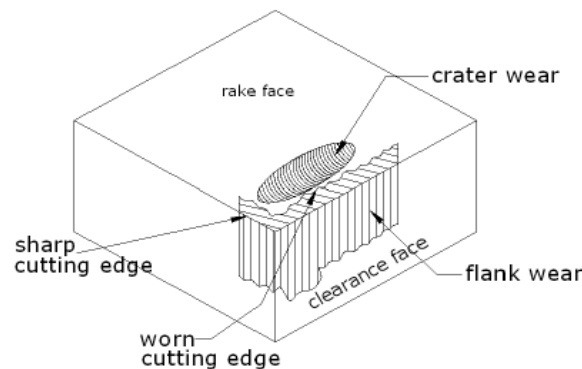
1.6.2. Φθορά κοπτικών εργαλείων

Η φθορά του εργαλείου είναι μια αναπόφευκτη συνέπεια των εργασιών μηχανουργικής κατεργασίας καθώς τα υλικά τρίβονται, διατμούνται συνεχώς και υφίστανται θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της κοπής. Μπορούν να προκύψουν διάφοροι τύποι φθοράς εργαλείων οι πιο συχνοί είναι :

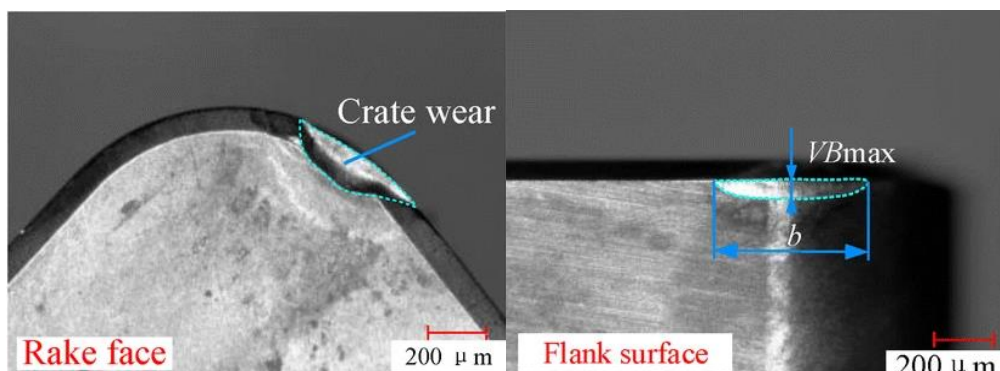
- Η πλευρική φθορά είναι η σταδιακή φθορά της ελεύθερης πλευράς του κοπτικού εργαλείου λόγω της τριβής μεταξύ του εργαλείου και του

υλικού του τεμαχίου εργασίας. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη διάρκεια ζωής του εργαλείου, κακή τελική διαμορφωμένη επιφάνεια και πιθανές ανακρίβειες διαστάσεων.

- Η φθορά του κρατήρα, αναφέρεται στην τοπική φθορά και παραμόρφωση της επιφάνειας του εργαλείου κοπής. Η υπερβολική φθορά του κρατήρα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα κακό έλεγχο του απόβλιττο και μειωμένη διάρκεια ζωής του εργαλείου.



Σχήμα 1-9 Βασικά είδη φθοράς κοπτικού εργαλείου. [9]



Εικόνα 1-4 Φθορά κρατήρα (αριστερά) και ελεύθερης επιφάνειας(δεξιά).[9]

- Η απολέπιση της κόψης, εμφανίζεται συνήθως σε κατεργασίες roughturning και ειδικά όταν χρησιμοποιείται σκληρό δοκίμιο. Εναλλακτικά μπορεί να εμφανιστεί λόγω οξείδωσης σε περιπτώσεις που γίνεται χρήση κοπτικού υγρού.
- Στην αιχμή του κοπτικού εργαλείου μπορεί να πραγματοποιηθεί συσσώρευση άκρων. Αυτό σημαίνει πρακτικά την συσσώρευση υλικού του τεμαχίου εργασίας στο κοπτικό πλακίδιο. Μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες δυνάμεις κοπής, παραμόρφωση του εργαλείου και μειωμένη απόδοση κοπής. Συμβαίνει όταν κατά την διάρκεια της κοπής μικρά κομμάτια της

άκρης του κοπτικού εργαλείου σπάσουν. Συχνά προκαλείται από υπερβολικές δυνάμεις κοπής, θερμικό σοκ ή ακατάλληλη επιλογή υλικού εργαλείου. Το σχίσσιμο οδηγεί σε πρόωρη αστοχία του εργαλείου και προβλήματα ποιότητας κατεργασμένης επιφάνειας.



Εικόνα 1-5 Απολέπιση κοπτικού εργαλείου αριστερά, Build-up Edge δεξιά. [13]

- Η πλαστική παραμόρφωση, που εμφανίζεται λόγω της αδυναμίας του εργαλείου να αντέξει τις πιέσεις που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της κοπής. Αυτό μπορεί να συμβεί και λόγω της υψηλής θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της διεργασίας.
- Θερμικές ρωγμές, όταν στην άκρη του κοπτικού εργαλείου η θερμοκρασία αλλάζει απότομα από πολύ υψηλή σε κρύα δημιουργούνται πολλές μικρές ρωγμές στην άκρη του πλακιδίου όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται συνήθως στο φραιζάρισμα και με την χρήση ψυκτικού υγρού. [8],[9],[12],[13]



Εικόνα 1-6 Πλαστική παραμόρφωση αριστερά, θερμικές ρωγμές δεξιά.[13]

Για τη βελτίωση της διάρκειας ζωής του εργαλείου, τη μείωση του κόστους παραγωγής και τη διατήρηση της ποιότητας των τελικών προϊόντων στην βιομηχανία, ο μετριασμός των δυσμενών επιπτώσεων των υψηλών θερμοκρασιών κοπής στη φθορά του εργαλείου είναι απαραίτητος.

Αυτό γίνεται εφικτό βελτιστοποιώντας τις παράμετρους κοπής. Κατά συνέπεια αυτών έχουμε μείωση των θερμοκρασιών κοπής ελέγχοντας την ποσότητα της θερμότητας που παράγεται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Ένας άλλος τρόπος για καλύτερη διάχυση θερμοκρασίας είναι με την κοπτικών υγρών ή ψυκτικών που επίσης βοηθούν στη λίπανση της κοπτικής ακμής και την απομάκρυνση των απόβλητων. Οι τρεις βασικοί τύποι υγρών κοπής, είναι με βάση το ορυκτέλαιο, το νερό και τα ημισυνθετικά. Καθένα προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα ανάλογα με την εφαρμογή και το υλικό του τεμαχίου εργασίας. Φυσικά υπάρχουν και διαφορετικές τεχνικές από τις βασικές, όπως συστήματα ψυκτικού υγρού υψηλής πίεσης, ψύξη μέσω άξονα και κρυογονική κατεργασία (με χρήση υγρού αζώτου ή CO₂). Αυτές μπορούν να ελέγξουν αποτελεσματικά την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι επιστρώσεις των κοπτικών εργαλείων έχουν αυτό το σκοπό, την απόκτηση δηλαδή αυτών των ιδιοτήτων που θα δώσουν μικρότερη τριβή (και άρα μικρότερη παραγωγή θερμότητας), καλύτερο έλεγχο αποβλήτου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Τέλος, η συντήρηση κοπτικού εργαλείου καθώς επίσης η τακτική επιθεώρηση και η εκ νέου λείανση ή ακόμα και η αντικατάσταση φθαρμένων εργαλείων για να διατηρείται η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Βελτιστοποιώντας λοιπόν, τις παραμέτρους κοπής, οι κατασκευαστές μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, να μειώσουν τη φθορά του εργαλείου, να βελτιώσουν την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας και γενικά να επιτύχουν εξοικονόμηση κόστους όσον αφορά την απόδοση παραγωγής και την αντικατάσταση του εργαλείου.

Συμπερασματικά, οι θερμοκρασίες κοπής και η φθορά του εργαλείου είναι έννοιες που συνδέονται μεταξύ τους και μπορούν να καθορίσουν την απόδοση του εργαλείου κοπής αλλά και την διάρκεια ζωής του. Ονομαστικά οι πιο σημαντικοί παράγοντες που εντέλει ορίζουν την εμφάνιση ή όχι των δυσμενών επιπτώσεων των θερμοκρασιών κοπής και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι : Η προσεκτική επιλογή υλικών κοπτικών εργαλείων (και των κατάλληλων επιστρώσεων τους), η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής, η χρήση κοπτικών υγρών ή ψυκτικών, ο έλεγχος των αποβλήτων και η συντήρηση των εργαλείων κοπής είναι. Υιοθετώντας αυτές τις στρατηγικές, οι κατασκευαστές μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη

διάρκεια ζωής του εργαλείου, βελτιωμένη παραγωγικότητα και υψηλότερης ποιότητας κατεργασμένα εξαρτήματα [10]

1.6.3. Διάρκεια ζωής εργαλείων

Με τον όρο διάρκειας ζωής στα κοπτικά εργαλεία ορίζεται η χρονική περίοδο που αντέχει ένα εργαλείο να λειτουργεί πριν φθαρεί ή πριν σταματήσει να λειτουργεί εντελώς .Συχνά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οπότε δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς είναι ωστόσο ένας σημαντικός δείκτης όσον αφορά τις εργασίες παραγωγής. Ουσιαστικά, η διάρκεια ζωής είναι ο κυριολεκτικός χρόνος όπου λειτουργεί το εργαλείο πριν φτάσει στο σημείο να χρειαστεί κάποια επισκευή (καθώς σε κάποιες περιπτώσεις το εργαλείο ακονίζεται όταν αρχίζει και φθείρεται.). [14]

Υπάρχουν ωστόσο, αρκετοί παράγοντες που ορίζουν την διάρκεια ζωής ενός εργαλείου. Ο πρώτος σημαντικός παράγοντας αναφέρεται στο πόσο συχνά χρησιμοποιείται ένα εργαλείο, και με βάση λογικής μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι όσο περισσότερο χρησιμοποιείται ένα εργαλείο, τόσο πιο γρήγορα φθείρεται. Εξίσου σημαντικό είναι η ποιότητα της κατασκευής του εργαλείου που χρησιμοποιείται. Η ποιότητα κατασκευής πρακτικά σημαίνει να έχει τις ιδιότητες εκείνες ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις συνθήκες που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της κοπής. Αρχικά η σκληρότητα, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να έχει σκληρότητα ικανή να κόψει το τεμάχιο χωρίς να δεχθεί πλαστική παραμόρφωση. Θα πρέπει όμως ταυτόχρονα, να έχει και συγκεκριμένη αντοχή στην θραύση αλλά και στην ταλάντωση καθώς αυτές είναι συνθήκες που εμφανίζονται σε μία κατεργασία κοπής. Οι συνθήκες υπό τις οποίες φυλάσσετε και συντηρείτε ένα εργαλείο μπορεί να ενισχύσει την διάρκεια ζωής του εργαλείου. Τα κοπτικά εργαλεία είναι φτιαγμένα από κράματα μετάλλου και άρα είναι ευαίσθητα στην υγρασία ή στις υψηλές θερμοκρασίες και άρα αναμενόμενο να φθαρούν γρηγορότερα όταν αυτές ικανοποιούνται .

Οι σύγχρονες, μελέτες έχουν σημαντική επίδρασή στα κοπτικά εργαλεία, η συνεχής βελτίωση τους έχει επιφέρει αποτελέσματα όχι μόνο στην διάρκεια ζωής τους αλλά επίσης και στη βιωσιμότητα . Σε περιβαλλοντολογικά ζητήματα που

αφορούν την παραγωγή τους αλλά και στο κόστος ή στην ενέργεια που καταναλώνεται κατά την κατεργασία.

Σε γενικές γραμμές όπως γίνεται αντιληπτό, δεν μπορούμε να δώσουμε μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής για ένα εργαλείο καθώς αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. [11].

1.7. ΚΟΠΤΙΚΟ ΥΓΡΟ

Τα υγρά κοπής χρησιμοποιούνται στις περισσότερες κατεργασίες κοπής και έχουν γίνει ουσιαστικά αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας. Η χρήση τους γίνεται στην περιοχή της κοπής και βελτιώνει την αποδοτικότητα σε σχέση με την ξερή κοπή, που είναι η κατεργασία χωρίς την χρήση κοπτικού υγρού. Τα υγρά αυτά λειτουργούν τόσο ως ψυκτικά αλλά και ως λιπαντικά ή και τα δύο μαζί. Αναλυτικά, τα οφέλη από την εφαρμογή αυτών των υγρών είναι :

1. Μείωση της θερμοκρασίας κοπής : Ένας από τους βασικούς ρόλους των υγρών κοπής είναι να απομακρύνουν τη θερμότητα που δημιουργείται κατά τη μεταλλουργική διαδικασία. Καθώς τα εργαλεία κόβουν, τρίβουν ή διαμορφώνουν υλικά, παράγουν σημαντική θερμότητα λόγω τριβής. Τα υγρά κοπής απορροφούν αυτήν τη θερμότητα, αποτρέποντας την υπερθέρμανση των εργαλείων και των εργαστηρίων, προλαμβάνοντας έτσι την πρόωρη φθορά των εργαλείων και τη ζημιά του υλικού.
2. Επέκταση Διάρκειας Ζωής Εργαλείων: Τα υγρά κοπής λειτουργούν ως λιπαντικά, μειώνοντας την τριβή μεταξύ του εργαλείου κοπής και του εργασιακού κομματιού. Αυτή η μείωση της τριβής οδηγεί σε μικρότερη φθορά των εργαλείων και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής τους.
3. Βελτιωμένη τραχύτητα στην επιφάνεια του τεμαχίου: Αυτό οδηγεί σε πιο λείες και πιο ακριβείς κοπές, με αποτέλεσμα βελτιωμένη ποιότητα επιφάνειας και διαστασιακή ακρίβεια.
4. Έλεγχος αποβλίττου: Τα υγρά κοπής συμβάλλουν στον έλεγχο των αποβλίττων, απομακρύνοντάς τα αποτελεσματικά από τη περιοχή κοπής. Η κατάλληλη απομάκρυνση των αποβλίττων αποτρέπει από το να παρεμβαίνουν στη

διαδικασία και να προκαλούν ζημιά στα εργαλεία ή ατέλειες στο επεξεργαζόμενο κομμάτι.

5. Αυξημένες Ταχύτητες Κοπής: Με την ψύξη που προσφέρουν τα υγρά κοπής, είναι δυνατή η επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων κοπής χωρίς να υπονομεύεται η ακεραιότητα των εργαλείων. Οι γρηγορότερες ταχύτητες κοπής αυξάνουν την παραγωγικότητα και μειώνουν τους χρόνους επεξεργασίας, με αποτέλεσμα αυξημένη παραγωγή.

6. Πρόληψη Διάβρωσης: Τα υγρά κοπής συχνά περιλαμβάνουν αναστολείς διάβρωσης που προστατεύουν τόσο το εργασιακό κομμάτι όσο και τα εργαλεία κοπής από σκουριά και οξείδωση, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής και των δύο.

7. Ευκολία στο χειρισμό του τεμαχίου: Τα υγρά κοπής μπορούν να βελτιώσουν τη κατεργασσιμότητα των υλικών που συνήθως είναι δύσκολα στην επεξεργασία, όπως κράματα υψηλής αντοχής.

8. Διαστασιακή Ακρίβεια: Ο έλεγχος της θερμοκρασίας που παρέχουν τα υγρά κοπής αποτρέπει τη θερμική παραμόρφωση του εργασιακού κομματιού, με αποτέλεσμα καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια. Αυτό εξασφαλίζει ότι το τελικό προϊόν πληροί τις αυστηρές ιδιότητες και προδιαγραφές.

9. Μειώνουν τις δυνάμεις και την ισχύ κοπής . [5]



Σχήμα 1-10 Δράσεις του κοπτικού υγρού.[5]

1.7.1. Είδη Κοπτικού Υγρού

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υγρών κοπής, καθένας προσαρμοσμένος σε συγκεκριμένες εφαρμογές και απαιτήσεις. Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει τις διάφορες κατηγορίες των υγρών κοπής, συμπεριλαμβανομένων των καθαρών ελαίων, υδατοβασικών υγρών, αερού, ομίχλης αέρος-ελαίου αλλά και πιο σύγχρονες μορφές ψύξης.

1. Τα ελαία κοπής είναι από ορυκτά ή συνθετικά έλαια, μπορεί επίσης να προέρχονται από φυτικές ή ζωικές πηγές που χρησιμοποιούνται ανακατεμένα. Παρέχουν εξαιρετική λίπανση και ικανότητες ψύξης, καθιστώντας τα κατάλληλα για εργασίες μηχανουργίας βαρέων κατεργασιών. Τα έλαια είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη μείωση της τριβής, την επέκταση της διάρκειας ζωής του εργαλείου και τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας. Ωστόσο, έχουν περιορισμούς, όπως η αδυναμία διάχυσης της θερμότητας και η πιθανότητα χρώσης(λεκέ) στο επεξεργασμένο κομμάτι. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε διαδικασίες τόννευσης, κατεργασίας σπειρωμάτων.

2. Τα γαλακτώματα κοπής, αποτελούνται κυρίως από νερό αναμιγμένο με κάποιο έλαιο. Αυτά τα υγρά είναι ευέλικτα και μπορούν να προσαρμοστούν με την προσθήκη διάφορων πρόσθετων. Συνηθισμένες παραλλαγές μπορεί να αποτελούνται από μίγματα ελαίου και νερού. Τα γαλακτώματα προσφέρουν αποτελεσματική ψύξη και απομάκρυνση των αποβλίττων, καθιστώντας τα κατάλληλα για μια ευρεία γκάμα μεταλλουργικών διαδικασιών. Υπάρχουν τρία βασικά είδη διαλυτά έλαια, ημι-συνθετικά και συνθετικά. Τα *διαλυτά έλαια* είναι ειδικοί τύποι ορυκτών ή άλλων βασικών ελαίων που έχουν αναμιχτεί με νερό σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται συνήθως από 5% έως 20%, με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις (λιγότερο από 10%) να είναι πιο κοινές στην επεξεργασία γενικής χρήσης. Τα *ημι-συνθετικά* κοπτικά υγρά συνδυάζουν χαρακτηριστικά τόσο των διαλυτών λαδιών όσο και των συνθετικών. Το βασικό μίγμα περιέχει συνήθως ανάμεσα σε 5% και 30% ορυκτό λάδι και 30% - 50% νερό, ενώ έχουν βελτιωμένη λιπαντικότητα και είναι διάφανα ή ημιδιαφανή. Τα *συνθετικά* κοπτικά υγρά είναι υγρά με βάση το νερό που αποτελούνται από χημικούς λιπαντικούς παράγοντες. Είναι πραγματικές διαλύσεις στο νερό και δεν περιέχουν λάδι, χρησιμοποιούνται σε

σχετικά χαμηλή συγκέντρωση (συνήθως 5%) . Παρέχουν εξαιρετική ψύξη και δημιουργούν λείες επιφάνειες σε σύγκριση με τα λάδια που διαλύονται σε νερό. Οι ατέλειές τους περιλαμβάνουν μειωμένη λιπαντικότητα λόγω της απουσίας πετρελαιοειδών, την τάση να αφήνουν σκληρά κρυστάλλινα υπολείμματα και την υψηλή αλκαλικότητα.

3. Οι αεροί υγροί κοπής (Gaseous Fluids) , όπως το συμπιεσμένο αέριο ή το άζωτο, χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες όπως η κοπή με λείζερ και η ηλεκτρική διαφορά. Αυτά τα υγρά βοηθούν στην απομάκρυνση του λιωμένου υλικού και των θραυσμάτων από τη ζώνη κοπής. Επιλέγονται για τη μη επαφή τους, που εξαλείφει τον κίνδυνο μόλυνσης. Οι αεροί υγροί κοπής είναι ιδιαίτερα ωφέλιμοι για εφαρμογές όπου οι παραδοσιακά υγρά υγρά κοπής είναι ανέφικτα ή θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία. [8]

Σύγχρονες μορφές ψύξης παρέχουν ποικίλα οφέλη τόσο στην ίδια την διαδικασία παραγωγής όσο και στην ασφάλεια του προσωπικού και την βιωσιμότητα. Αυτές συμπεριλαμβάνουν

Τα συστήματα αέρος-ελαίου ομίχλης (Mist cooling technique) συνδυάζουν έναν λεπτό ομίχλης ελαίου με συμπιεσμένο αέριο. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων μεταλλουργίας, όπως το φραιζάρισμα και η διάτρηση. Αυτά τα συστήματα προσφέρουν αποτελεσματική ψύξη και λίπανση, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση υγρού.

Κρυογενή Υγρά (Cryogenic Cooling) περιλαμβάνουν τη χρήση ακραία κρύων ουσιών, κυρίως υγρό αζώτο ή διοξείδιο του άνθρακα, για τη ψύξη της ζώνης κοπής. Αυτά τα υγρά είναι ιδιαίτερα ωφέλιμα για την επεξεργασία υλικών ευαίσθητων στη θερμότητα ή όταν η επίτευξη ακριβούς έλεγχου της θερμοκρασίας είναι κρίσιμη. Τα κρυογενή υγρά προσφέρουν εξαιρετικές ικανότητες ψύξης. Ωστόσο, απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό για αποθήκευση και παράδοση, καθιστώντας τα λιγότερο κοινά στη συμβατική μηχανουργία.

Λιπαντικά ελάχιστης ποσότητας MQL είναι μια τεχνολογία λίπανσης που χρησιμοποιείται πλέον στις κατεργασίες κοπής, η οποία βασίζεται στην ελάχιστη χρήση λιπαντικού και ψυκτικού υγρού με την μορφή σταγονιδίων ή νέφους απευθείας στη ζώνη κοπής.

Πλεονεκτήματα :

1. Βιωσιμότητα: Τεχνολογίες όπως το MQL ελαχιστοποιούν τη χρήση και απόρριψη λιπαντικών, αλλά και με τα ανακυκλώσιμα λιπαντικά μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
2. Μείωση Κόστους: Λιγότερα υλικά ψύξης/λίπανσης σημαίνουν μικρότερο κόστος.
3. Βελτίωση Απόδοσης: Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εργαλείων λόγω μείωσης της θερμότητας και της τριβής στη ζώνη κοπής.
4. Καλύτερη Ποιότητα Επιφάνειας: Η ακριβής εφαρμογή μειώνει τη φθορά και τις ατέλειες.[26]

Καταλήγοντας, η επιλογή του υγρού κοπής εξαρτάται από την συγκεκριμένη εφαρμογή μεταλλουργίας, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τα επιθυμητά αποτελέσματα. Κάθε τύπος υγρού κοπής έχει τα πλεονεκτήματά του και τους περιορισμούς του. Ωστόσο, τα γαλακτώματα είναι τα πιο συνηθισμένα υγρά κοπής στην βιομηχανία σήμερα λόγω χαμηλού κόστους και ευκολίας στη χρήση τους .[8]

1.7.2. Εφαρμογή των υγρών κοπής

Η αποτελεσματικότητα των υγρών κοπής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο εφαρμογής τους κατά την διάρκεια της διεργασίας. Υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι εφαρμογής ψυκτικού: εφαρμογή με χαμηλή πίεση ροής, εφαρμογή με υψηλή πίεση ροής, εφαρμογή μέσω του εργαλείου κοπής και εφαρμογή ομίχλης.[2]

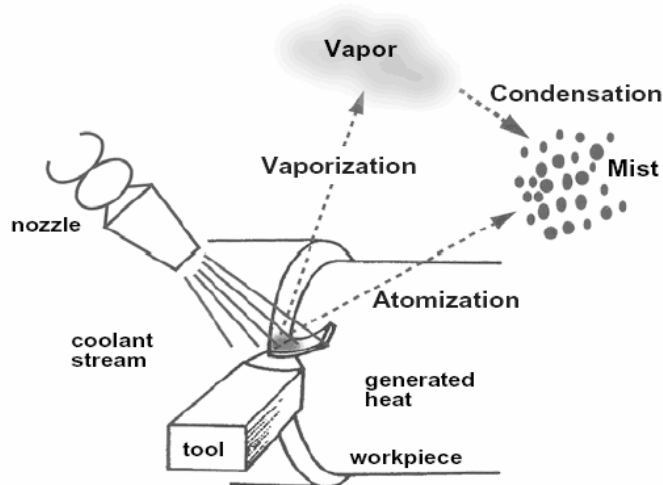
Στην εφαρμογή με χαμηλή πίεση , το ψυκτικό εισέρχεται μέσω ακροφυσίων πάνω από τη ζώνη κοπής με μικρή πίεση. Σε κάθε περίπτωση, τα ακροφύσια του ψυκτικού θα πρέπει να είναι στραμμένα προς την κατεργασία κοπής, με επαρκές ψυκτικό ώστε να καλύψει το κομμάτι εργασίας και την πίσω πλευρά του κοπτικού. Ανεπαρκής ή διακεκομμένη εφαρμογή ψυκτικού σε λειτουργίες τροχίσματος μπορεί να οδηγήσει σε θερμική φθορά του κοπτικού. Εάν ο όγκος του ψυκτικού είναι επαρκής, η εφαρμογή με χαμηλή πίεση ροής είναι αποτελεσματική στο να καθαρίζει

τα απόβλιττα και να ψύχει το κομμάτι για να διατηρηθεί η διαστασιακή ακρίβεια, αλλά έχει περιορισμένη λιπαντική αποτελεσματικότητα.

Στην εφαρμογή με υψηλή πίεση, το ψυκτικό διοχετεύεται μέσω ακροφυσίων σε υψηλότερες πιέσεις. Παρέχει πιο αποτελεσματική λίπανση και δυνατότητες εκκαθάρισης των γρεζιών, αλλά δημιουργεί ομίχλη, η οποία μπορεί να είναι επικίνδυνη. Συνήθως διοχετεύεται μέσω άκαμπτου σωλήνα στην διεργασία.

Στα συστήματα ψύξης μέσω εργαλείου, το ψυκτικό παρέχεται μέσω της αξονικής γραμμής ή των διαδρόμων ψύξης στο εργαλείο υπό υψηλή πίεση. Απαιτεί ειδικές βαλβίδες και αντλίες ενσωματωμένες στη μηχανολογική μονάδα. Αποτελεσματικό για την ψύξη της κοπής και τον καθαρισμό των αποβλίττων, αλλά απαιτεί συντήρηση για την αποφυγή διαρροών.

Η εφαρμογή ομίχλης γίνεται με συστήματα αναρρόφησης ή άμεσης πίεσης, συνήθως σε λειτουργίες διάτρησης, μηχανικής κοπής γκρανάζων και πριονίσματος.[8]



Σχήμα 1-11. Εφαρμογή του κοπτικού υγρού.

Σε γενικές γραμμές είναι σημαντικό ο όγκος του κοπτικού υγρού που προσκρούει στην επιφάνεια κοπής να είναι επαρκής για την ψύξη και την λίπανση, αλλά και η πίεση να είναι υψηλή ώστε να διαπερνά την ομίχλη υδρατμών που δημιουργούνται. Στη βιομηχανία συνηθέστερος τρόπος ψύξης συναντάται με χαμηλή πίεση ροής διότι είναι ο πιο απλός και φτηνός τρόπος. Λειτουργεί με μία απλή αντλία η οποία ρουφάει το υγρό από μία δεξαμενή και μέσω σωληνώσεων το

διοχετεύει στην διεργασία από εκεί περισυλλέγετε φιλτράρεται από γρέζια και ξαναμπαίνει στην δεξαμενή για να επαναχρησιμοποιηθεί.[17]

1.8 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η ποιότητα μιας επεξεργασμένης επιφάνειας είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει άμεσα τη λειτουργικότητα, την αισθητική και την απόδοση ενός κατεργασμένου εξαρτήματος. Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι μια θεμελιώδης πτυχή που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας μιας επεξεργασμένης επιφάνειας. Θα διερευνηθεί η έννοια της τραχύτητας επιφάνειας, θα συζητηθούν οι διάφοροι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρησή και θα εξεταστούν τόσο οι θεωρητικές όσο και οι φυσικές πτυχές της τραχύτητας. [1]

1.8.1. Τραχύτητα Επιφάνειας

Η τραχύτητα επιφάνειας είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό που ορίζει την υφή και τις ανωμαλίες που υπάρχουν στην επιφάνεια των υλικών. Αυτή η παράμετρος παίζει έναν κρίσιμο ρόλο σε διάφορες μηχανικές εφαρμογές, επηρεάζοντας τη λειτουργικότητα, την απόδοση και την αλληλεπίδραση μεταξύ υλικών. Σε αυτή την εργασία, εξετάζουμε τον όρο της τραχύτητας επιφάνειας, τις τεχνικές μέτρησής της, τη σημασία της στη μηχανική και τις επιπτώσεις της σε διάφορους τομείς.

Η τραχύτητα επιφάνειας μετριέται με διάφορες μεθόδους, όπως προφίλομετρα, μικροσκοπία ατομικής δύναμης (AFM), ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), αλλά και μέθοδοι απόδοσης των οπτικών χαρακτηριστικών. Κάθε τεχνική προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα στην απεικόνιση των ανωμαλιών της επιφάνειας και στην παροχή λεπτομερών πληροφοριών για την τοπογραφία της.

Στη μηχανική, η τραχύτητα επιφάνειας επηρεάζει σημαντικά την τριβή, τη φθορά, τη λίπανση και την απόδοση των επιφανειών σε μηχανικά συστήματα. Η κατανόηση και ο έλεγχος της τραχύτητας είναι ουσιώδης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής των μηχανικών συστημάτων.

Στις ιδιότητες των υλικών, η τραχύτητα επιφάνειας επηρεάζει την πρόσφυση, την αντοχή στη διάβρωση και την τριβολογική συμπεριφορά. Οι τροποποιήσεις της επιφάνειας με βάση τον έλεγχο της τραχύτητας παίζουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Παράγοντες που επηρεάζουν

Η τραχύτητα επιφάνειας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων κοπής, της γεωμετρίας του εργαλείου κοπής, των ιδιοτήτων του υλικού του κομματιού, της φθοράς του εργαλείου, των υγρών κοπής και της ακαμψίας του μηχανήματος. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της τελειότητας της επιφάνειας και την ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων όπως κυματισμοί, γρατσουνιές και σημάδια τριβής. Πραγματοποιούνται πειράματα για να εξεταστούν οι επιδράσεις διαφόρων παραμέτρων στην τραχύτητα επιφάνειας στις διαδικασίες επεξεργασίας. Παράγοντες όπως η ταχύτητα κοπής, η ταχύτητα πρόωσης, το βάθος κοπής, το υλικό του εργαλείου και η εφαρμογή ψυκτικού υγρού ποικίλλουν συστηματικά, και η επίδρασή τους στην τελειότητα της επιφάνειας αξιολογείται χρησιμοποιώντας στατιστική ανάλυση και εμπειρική μοντελοποίηση. Τα αποτελέσματα παρέχουν πολύτιμες εισηγήσεις για την πολύπλοκη σχέση μεταξύ των μεταβλητών της διαδικασίας και των χαρακτηριστικών της τραχύτητας της επιφάνειας. [20]

Η βελτιστοποίηση της τραχύτητας επιφάνειας περιλαμβάνει τη συστηματική προσαρμογή των παραμέτρων κοπής και την επιλογή κατάλληλων εργαλείων και τεχνικών κοπής. Τεχνικές όπως η υψηλή ταχύτητα κοπής, η πολυάξονια φρεζαρία, η απόσβεση κραδασμών και η επικάλυψη εργαλείων μπορούν να βελτιώσουν αποτελεσματικά την τελειότητα της επιφάνειας διατηρώντας την παραγωγικότητα και την οικονομικότητα. Επιπλέον, μεθοδολογίες βελτιστοποίησης όπως η μεθοδολογία απόκρισης επιφάνειας (RSM) και οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA) χρησιμοποιούνται για την εντοπισμό των βέλτιστων παραμέτρων διαδικασίας για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας της επιφάνειας.

Η θεωρητική ανάλυση συμπεριλαμβάνει τη χρήση μοντέλων που βασίζονται σε αρχές της μηχανικής επεξεργασίας, όπως η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων

(FEA) και αναλυτικά μοντέλα, για να προβλέψουν την τραχύτητα της επιφάνειας. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η παραμόρφωση του υλικού, η γεωμετρία του εργαλείου, η διαμόρφωση του γρεζιού, και οι θερμικές επιδράσεις για να προσομοιώσουν τη διαδικασία της επεξεργασίας και να προβλέψουν την ποιότητα της επιφάνειας. Η θεωρητική ανάλυση συμπληρώνει τα πειραματικά ευρήματα και διευκολύνει την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων για τη βελτιστοποίηση της τελειότητας της επιφάνειας.

Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι ένας κρίσιμος παράγοντας ποιότητας που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και τη λειτουργικότητα των επεξεργασμένων εξαρτημάτων. Κατανοώντας τις τεχνικές μέτρησης, τους παράγοντες που επηρεάζουν και τις στρατηγικές βελτιστοποίησης, οι κατασκευαστές μπορούν να βελτιώσουν την τελειότητα της επιφάνειας, να ενισχύσουν την ποιότητα των προϊόντων τους και να βελτιστοποιήσουν τις διαδικασίες επεξεργασίας για μεγαλύτερη αποδοτικότητα και ανταγωνιστικότητα στην παγκόσμια αγορά.[19]

1.9 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η κατεργασιμότητα των υλικών είναι ένας κρίσιμος παράγοντας σε διάφορους τομείς της μηχανικής, ιδίως στη μηχανολογία, αναφέρεται στη δυνατότητα των υλικών να υφίστανται διαδικασίες παραμόρφωσης, όπως κάμψη, τάση, κοπή και διαμόρφωση χωρίς να σπάνε ή να εμφανίζουν υπερβολική αντίσταση. Στη μηχανική, η κατανόηση της κατεργασιμότητας των υλικών είναι ουσιώδης για τον σχεδιασμό και την παραγωγή στοιχείων με επιθυμητά σχήματα, διαστάσεις και ιδιότητες. Διάφορα υλικά εκδηλώνουν διαφορετικού βαθμού κατεργασιμότητα, ανάλογα με τις εμφυτευμένες ιδιότητές τους και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες επεξεργάζονται. . Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια συνολική ανασκόπηση της κατεργασιμότητας διαφορετικών υλικών στη μηχανική, καλύπτοντας μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα. Με βάση μια ευρεία γκάμα πηγών λογοτεχνίας και πειραματικών μελετών, εξετάζει τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασιμότητα των υλικών, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών τους ιδιοτήτων, της μικροδομής τους, της θερμοκρασίας και του ρυθμού

παραμόρφωσης. Επιπλέον, συζητά διάφορες τεχνικές και διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας των υλικών, όπως η θερμική επεξεργασία, η κραμάτωση και η μηχανική επεξεργασία.[21]

1.9.1 Κατεργασιμότητα συνήθεις υλικών στις κατεργασίες

1. Μέταλλα:

Χάλυβας:

Ο χάλυβας είναι γνωστός για την εξαιρετική του κατεργασιμότητα, προσφέροντας μια ευρεία γκάμα μηχανικών ιδιοτήτων και δυνατοτήτων διαμόρφωσης. Μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα μέσω διαδικασιών όπως το σφυρηλάτημα, η διάτρηση και οι κατεργασίες κοπής, καθιστώντας τον κατάλληλο για μια ποικιλία εφαρμογών στις βιομηχανίες της κατασκευής, του αυτοκινήτου και των μηχανημάτων. Η κατεργασιμότητά του επηρεάζεται από παράγοντες όπως η περιεκτικότητα του σε άνθρακα, τα στοιχεία κράματος και η μικροδομή. Οι χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα έχουν υψηλή κατεργασιμότητα και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν μέσω διαδικασιών. Τα στοιχεία κράματος όπως το χρώμιο και το νικέλιο μπορούν να βελτιώσουν την κατεργασιμότητα αυξάνοντας την αντοχή και την ανθεκτικότητα. Η μικροδομή του χάλυβα, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους και της κατανομής των κόκκων, παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της.

Αλουμίνιο:

Το αλουμίνιο εμφανίζει καλή κατεργασιμότητα, ειδικά τα κράματα του. Μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί, να κοπεί και να συγκολληθεί, καθιστώντας το προτιμημένο για εφαρμογές που απαιτούν ελαφρό βάρος, αντοχή στη διάβρωση και εξαρτήματα, όπως αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία και ηλεκτρονικά καταναλωτικά αγαθά.

Χαλκός:

Ο χαλκός είναι επίσης εξαιρετικά κατεργάσιμος, διαθέτοντας εξαιρετική ολκιμότητα και θερμική αγωγιμότητα. Μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί σε σύρματα,

σωλήνες και φύλλα, καθιστώντας τον ιδανικό για ηλεκτρικά καλώδια, υδραυλικά και ανταλλακτικά αντικείμενα.

Τιτάνιο:

Το τιτάνιο, παρά την υψηλή του αντοχή και τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, έχει καλή κατεργασιμότητα, όχι όσο τα μέταλλα που προαναφέρθηκαν. Μπορεί να παραμορφωθεί, να σφυρηλατηθεί και να συγκολληθεί με κατάλληλες τεχνικές, καθιστώντας τον αξιόλογο στις βιομηχανίες της αεροναυτικής, της ιατρικής και της χημικής βιομηχανίας.

Ορείχαλκος:

Ο ορείχαλκος εμφανίζει πολύ καλή κατεργασιμότητα μαζί με αντοχή στη διάβρωση και αισθητική εμφάνιση. Χρησιμοποιείται συχνά σε διακοσμητικές εφαρμογές, σωλήνες και μουσικά όργανα.

Χάλκινα Κράματα:

Τα χάλκινα κράματα, κατασκευασμένα από χαλκό και κράμα, εμφανίζουν καλή κατεργασιμότητα μαζί με αντοχή στη διάβρωση και αισθητική εμφάνιση. Χρησιμοποιείται συχνά σε διακοσμητικές εφαρμογές, σωλήνες και μουσικά όργανα.

Ανοξείδωτος Χάλυβας:

Ο ανοξείδωτος χάλυβας προσφέρει αντοχή στη διάβρωση και μηχανική αντοχή. Μπορεί να διαμορφωθεί, να συγκολληθεί και να παραμορφωθεί με συμβατικές τεχνικές, καθιστώντας τον κατάλληλο για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών στην κατασκευή, την επεξεργασία τροφίμων και την ιατρική.

Κράματα Νικελίου:

Τα κράματα νικελίου εμφανίζουν διαφορετικού βαθμού κατεργασιμότητα ανάλογα με τη σύνθεσή τους και τη θερμική τους επεξεργασία. Χρησιμοποιούνται συχνά σε υψηλές θερμοκρασίες, χημικές επεξεργασίες και αεροναυπηγικές εφαρμογές λόγω της εξαιρετικής τους αντοχής στη διάβρωση και των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Χυτοσίδηρος:

Ο χυτοσίδηρος είναι εύπλαστος, είναι σχετικά αβρός, αλλά σε σύγκριση με άλλα μέταλλα και δεν αντέχει στην παραμόρφωση. Χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές

που απαιτούν υψηλή αντοχή στη φθορά, όπως μπλοκ κινητήρα, δισκόφρενα και εξαρτήματα μηχανημάτων.

Μόλυβδος:

Ο μόλυβδος είναι εξαιρετικά εύπλαστος και διαμορφώσιμος, προσφέροντας εξαιρετική κατεργασιμότητα για εφαρμογές όπως η προστασία από ακτινοβολία, η κατασκευή μπαταριών και η κόλληση.

Ψευδάργυρος:

Ο ψευδάργυρος εμφανίζει καλή κατεργασιμότητα και αντοχή στη διάβρωση, ιδίως σε κράματα του. Χρησιμοποιείται συχνά σε χυτές κατασκευές, γαλβανισμό και αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Μαγνήσιο:

Το μαγνήσιο και ιδίως τα κράματα του είναι εύκολα κατεργάσιμο. Είναι ελαφρύ και διαθέτει εξαιρετική αντοχή σε σχέση με το βάρος του, καθιστώντας το χρήσιμο σε αεροναυπηγικές, αυτοκινητοβιομηχανία και βιομηχανία αθλητικών ειδών.

Βόλφραμιο:

Το βόλφραμιο έχει κακή κατεργασιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου λόγω του υψηλού σημείου τήξης και της εύθραυστης φύσης του. Ωστόσο, μπορεί να διαμορφωθεί και να παραμορφωθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, κάνοντάς το χρήσιμο σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, όπως φίλτρα φωτός και ηλεκτρικές επαφές.

Πλατίνα:

Η πλατίνα εμφανίζει μέτρια κατεργασιμότητα, είναι σχετικά μαλακή και διαμορφώσιμη. Χρησιμοποιείται συχνά σε κοσμήματα, καταλύτες, και εξοπλισμό εργαστηρίου λόγω της αντοχής της στη διάβρωση και τη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

2. Πολυμερή:

Τα πολυμερή διαθέτουν μοναδικές μηχανικές ιδιότητες και εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή κατεργασιμότητα. Η κατεργασιμότητα των πολυμερών επηρεάζεται από παράγοντες όπως το μοριακό βάρος, οπρσανατολισμένοςτουπλέγματοςκαι η κρυσταλλικότητα. Τεχνικές όπως ηχύτευση με έγχυση, η εξώθηση και η θερμοδιαμόρφωση χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό και τη μετατροπή των πολυμερών σε επιθυμητές μορφές.

3. Κεραμικά:

Τα κεραμικά εκδηλώνουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά σε σύγκριση με τα μέταλλα και τα πολυμερή, κυρίως λόγω της ευθραυστότητάς τους και της υψηλής σκληρότητάς τους. Η κατεργασιμότητα των κεραμικών είναι περιορισμένη, αλλά τεχνικές όπως η συμπίεση σκόνης (powder compaction), η σύντηξη και η μηχανική επεξεργασία με λέιζερ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κεραμικών στοιχείων με περίπλοκα σχήματα και λεπτομέρειες.

4. Σύνθετα:

Τα σύνθετα αποτελούνται από συνδυασμό διαφορετικών υλικών και προσφέρουν μοναδικές μηχανικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά κατεργασιμότητας. Η κατεργασιμότητα των συνθετικών εξαρτάται από τα συστατικά υλικά, τον προσανατολισμό του πλέγματος και τη διαδικασία κατασκευής. Τεχνικές όπως η χύτευση, η περιέλιξη νήματος και η εισροή ρητίνης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων δομών με προσαρμοσμένες ιδιότητες.

Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση από Ινοβλαβής Άνθρακα (CFRP):

Τα υλικά CFRP προσφέρουν εξαιρετική κατεργασιμότητα όσον αφορά το διαμορφωμένο και τον πλαστικό τους τύπο. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροναυτική, αυτοκινητοβιομηχανία και βιομηχανία αθλητικών ειδών λόγω του ελαφρού βάρους τους, της υψηλής αντοχής σε σχέση με το βάρος και της αντοχής τους στην κόπωση.

Αυτά τα υλικά αντιπροσωπεύουν μια ποικιλία χαρακτηριστικών κατεργασιμότητας, καθένα κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές και διαδικασίες κατασκευής. Η κατανόηση αυτών των ιδιοτήτων είναι ζωτικής σημασίας για την επιλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε εφαρμογή και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατασκευής. [19]

1.9.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασιμότητα

Η κατεργασιμότητα των υλικών, αναφερόμενη στην ικανότητά τους να υποστούν διαδικασίες παραμόρφωσης ή αφαίρεσης υλικού χωρίς να αστοχήσουν ή να αντιμετωπίσουν υπερβολική αντίσταση, επηρεάζεται από μια ποικιλία παραγόντων.

Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατασκευής και την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων στο τελικό προϊόν. Παρακάτω παρατίθενται μερικοί κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασιμότητα:

Μέγεθος και Δομή Κόκκων:

Το μέγεθος και η δομή των κόκκων ενός μετάλλου επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασιμότητά του. Τα μέταλλα με λεπτότερους κόκκους εμφανίζουν γενικά υψηλότερη κατεργασιμότητα λόγω της μειωμένης αντίστασης στην παραμόρφωση. Οι λεπτοί κόκκοι επιτρέπουν την πιο ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση, ενώ τα χοντρά κοκκα υλικά μπορεί να οδηγήσουν σε τοπική παραμόρφωση και ρωγμές.

Κραματοποίηση:

Η προσθήκη κράματος μπορεί να αλλάξει τις μηχανικές ιδιότητες και την κατεργασιμότητα των μετάλλων. Διαφορετικά στοιχεία κράματος έχουν διαφορετικές επιδράσεις σε αυτήν. Για παράδειγμα, ορισμένα στοιχεία μπορεί να βελτιώσουν τη δυσκαμψία, ενώ άλλα μπορεί να αυξήσουν τη σκληρότητα ή την αντοχή. Η σύνθεση και η συγκέντρωση των στοιχείων κράματος παίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της.

Θερμοκρασία:

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει πόσο εύπλαστο είναι ένα υλικό είναι η θερμοκρασία. Γενικά, η αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει την κατεργασιμότητα μειώνοντας την επικρατούσα αντοχή του μετάλλου και προωθώντας την πλαστική παραμόρφωση. Οι υψηλές θερμοκρασίες διευκολύνουν την ολίσθηση, επιτρέποντας μεγαλύτερη δυσκαμψία και πιο εύκολο διαμορφωτικό του υλικού.

Ρυθμός Παραμόρφωσης:

Ο ρυθμός με τον οποίο ένα μέταλλο παραμορφώνεται, γνωστός ως ρυθμός παραμόρφωσης, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητές του. Υψηλοί ρυθμοί παραμόρφωσης, όπως αυτοί που συναντώνται κατά τη διάρκεια γρήγορων διαδικασιών διαμόρφωσης, μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη αντίσταση στην παραμόρφωση και μεγαλύτερη πιθανότητα θραύσης. Ο έλεγχος του ρυθμού παραμόρφωσης είναι ουσιώδης για τη βελτιστοποίηση της κατεργασιμότητας και την πρόληψη ελαττωμάτων στο τελικό προϊόν.

Μικροδομικά Ελαττώματα:

Ελαττωματικά στοιχεία στη μικροδομή ενός μετάλλου, όπως ολισθήσεις, όρια κόκκων μπορούν να γίνουν εμπόδια κατά την διεργασία. Αυτά τα ελαττώματα λειτουργούν ως φράγματα στην πλαστική ροή και μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη κατεργασιμότητα και αυξημένη ευαισθησία στη αστοχία. Η ελαχιστοποίηση των μικροδομικών ελαττωμάτων μέσω κατάλληλης επεξεργασίας και θερμικής επεξεργασίας είναι ουσιώδης για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας.

Δομή και Προσανατολισμός:

Η δομή και ο προσανατολισμός των κόκκων ενός μετάλλου μπορούν επίσης να επηρεάσουν την κατεργασιμότητά του. Τα ανισοτροπικά υλικά, τα οποία εμφανίζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις, μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα κατεργασιμότητας ανάλογα με τον προσανατολισμό του εφαρμοζόμενου στρεσαρίσματος σε σχέση με το κρυσταλλογραφικό πλέγμα. Τεχνικές ελέγχου προσανατολισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της κατεργασιμότητας και την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων του υλικού.

Συνθήκες Επεξεργασίας:

Διάφοροι παράμετροι επεξεργασίας, όπως ο ρυθμός παραμόρφωσης, η γεωμετρία του εργαλείου, η λίπανση και η σχεδίαση του καλουπιού, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την κατεργασιμότητα των διαφόρων δοκιμίων. Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων βασιζόμενη στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του υλικού και της επιθυμητής διαδικασίας διαμόρφωσης είναι ουσιώδης για την επίτευξη υψηλής ποιότητας, χωρίς ελαττώματα, εξαρτημάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες και εφαρμόζοντας κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας, οι κατασκευαστές μπορούν να βελτιώσουν αποτελεσματικά την ευκολία με την οποία γίνονται οι διεργασίες των μετάλλων αλλά και άλλων υλικών και να επιτύχουν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες στο τελικό προϊόν.

1.9.3 Βελτιστοποίηση της κατεργασιμότητας

Η κατανόηση της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε αυτούς τους παράγοντες είναι ουσιώδης για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατασκευής και τη διασφάλιση της επιτυχίας των λειτουργιών διαμόρφωσης των υλικών. Πολλές τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας των μετάλλων, κάθε μια προσαρμοσμένη σε συγκεκριμένα υλικά, διαδικασίες και επιθυμητά αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές κοινές τεχνικές βασιζόμενες στους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας των μετάλλων και γενικότερα των υλικών :

Θερμική Επεξεργασία:

Οι διαδικασίες θερμικής επεξεργασίας, όπως ανόπτηση, επαναφορά και εξομάλυνση εσωτερικών τάσεων, χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση της μικροδομής των μετάλλων. Αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν τη θέρμανση του μετάλλου σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και στη συνέχεια την ψύξη του σε ελεγχόμενες ταχύτητες. Η θερμική επεξεργασία μπορεί να καθαρίσει τη δομή του κόκκου, να ανακουφίσει τις εσωτερικές τάσεις και να βελτιώσει τη δυσκαμψία, ενισχύοντας έτσι την κατεργασιμότητα.

Κραμάτωση:

Η προσθήκη στοιχείων στη μικροδομή χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει τις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Με την προσθήκη στοιχείων όπως άνθρακα, μαγγάνιο, χρώμιο ή νικέλιο, οι μηχανικοί μπορούν να βελτιώσουν την κατεργασιμότητα διατηρώντας τα επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως η αντοχή, η σκληρότητα και η αντοχή στη διάβρωση.

Ψυχρή διαμόρφωση:

Οι διαδικασίες ψυχρής κατεργασίας, συμπεριλαμβανομένης της έλασης, σφυρηλάτησης και εξώθησης χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό μετάλλων σε θερμοκρασία δωματίου ή ελαφρώς αυξημένης θερμοκρασίας. Η κρύα κατεργασία προκαλεί πλαστική παραμόρφωση και σκλήρυνση, καθαρίζοντας την μικροδομή του μετάλλου και αυξάνοντας την αντοχή και τη ολκιμότητα. Η κρύα εργασία μπορεί να βελτιώσει την κατεργασιμότητα των μετάλλων μειώνοντας το μέγεθος του κόκκου, ενισχύοντας τις μηχανικές ιδιότητες και επιτρέποντας την επόμενη επεξεργασία.

Τεχνικές θερμικής επεξεργασίας κόκκου, όπως η σκληρή πλαστική παραμόρφωση (SPD) χρησιμοποιείται για τη μείωση του μεγέθους του κόκκου των μετάλλων. Οι λεπτότεροι κόκκοι οδηγούν σε αυξημένη αντοχή, ολκιμότητα και κατεργασιμότητα προωθώντας την ομοιόμορφη παραμόρφωση και αναστέλλοντας τους τοπικούς μηχανισμούς αποτυχίας όπως σπάσιμο και θραύση. Οι τεχνικές αυτές είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες για τη βελτίωση των ελαφρών κράματων και των υλικών υψηλής αντοχής.

Λίπανση:

Η χρήση λιπαντικών κατά τις διαδικασίες διαμόρφωσης μετάλλων μειώνει την τριβή μεταξύ του μετάλλου και των εργαλείων, διευκολύνοντας έτσι την παραμόρφωση και μειώνοντας τη φθορά του εξοπλισμού. Τα λιπαντικά μπορούν να εφαρμοστούν ως λάδι, μείγμα λαδιού-νερού ή γράσο, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τις απαιτήσεις της διαδικασίας. Η κατάλληλη λίπανση ελαχιστοποιεί την ακαμψία της επιφάνειας, εμποδίζει την τραχύτητα και το σκάσιμο και βελτιώνει την επιφανειακή υφή των διαμορφωμένων τμημάτων, βελτιώνοντας τελικά την κατεργασιμότητα και την απόδοση της διαδικασίας.

Με τη χρήση αυτών των τεχνικών, οι κατασκευαστές μπορούν να βελτιώσουν την κατεργασιμότητα των δοκιμίων και να επιτύχουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του προϊόντος, βελτιώνοντας τελικά την απόδοση της διαδικασίας, την ποιότητα του προϊόντος και τον ανταγωνισμό στην αγορά.[21]

1.10 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η δυναμική των υλικών κοπής με σκοπό την κατανόηση τις επιρροής που έχει στο τελικό αποτέλεσμα και στην διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Κατά την διεργασία της κοπής εμφανίζονται διάφοροι τύποι ταλαντώσεων, συμπεριλαμβανομένων των ελεύθερων, εξαναγκασμένων και αυτοδιεγειρόμενων ταλαντώσεων, και των επιπτώσεών τους στις μηχανουργικές διεργασίες. Επίσης συζητούνται πρακτικές εφαρμογές και στρατηγικές για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των ταλαντώσεων στη μηχανουργική εργασία.

Τύποι Ταλαντώσεων στην Κοπή:

- Ελεύθερες Ταλαντώσεις: Προκαλούνται από απρόβλεπτες αλλαγές στις παραμέτρους της κοπής ή από ανισομορφίες στην τροχιά του εργαλείου, οδηγώντας σε φυσικές συχνότητες που σβήνουν με τον χρόνο.
- Εξαναγκασμένες Ταλαντώσεις: Προκύπτουν από αρμονικές διεγέρσεις, όπως η διακοπτόμενη κοπή στο φρέζαρισμα, και μπορεί επίσης να προκύψουν από μη ισορροπημένους τροχούς εργαλείων ή εξωτερικούς παράγοντες περιβάλλοντος.
- Αυτοδιεγειρόμενες Ταλαντώσεις: Προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου υλικού κατά τη διάρκεια της κοπής, οδηγώντας σε αστάθεια στο σύστημα κοπής. [1]

1.11 ΑΥΤΟΔΙΕΓΕΙΡΟΜΕΝΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αυτοδιεγειρόμενων ταλαντώσεων: πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς ταλαντώσεις οφείλονται στη διαδικασία κοπής, ενώ οι δευτερογενείς προκύπτουν από μεταβολές στη δύναμη κοπής. Συνήθως, η αναγεννώμενη αυτοδιέγερση είναι η πιο συνηθισμένη δευτερογενής ταλάντωση που προκαλείται από τις μεταβολές στη δύναμη κοπής λόγω της μεταβολής του πάχους του αποβλίττου. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας και να καθορίσουν τη σταθερότητα της διαδικασίας κοπής. Συγκεκριμένα, μπορούν να οδηγήσουν σε:

- Κακή ποιότητα επιφάνειας: Οι ταλαντώσεις μπορούν να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες ατέλειες στην επιφάνεια του εργαζόμενου κομματιού.
- Μειωμένη διαστατική ακρίβεια και ακρίβεια μορφής: Οι ταλαντώσεις μπορούν να προκαλέσουν απόκλιση από τις επιθυμητές διαστάσεις και μορφές του κομματιού.

- Αυξημένη τραχύτητα: Οι ταλαντώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη τριβή μεταξύ του εργαλείου κοπής και του υλικού, προκαλώντας αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας.
- Φθορά εργαλείου: Οι ταλαντώσεις μπορούν να προκαλέσουν γρηγορότερη φθορά του εργαλείου κοπής λόγω αυξημένων δυνάμεων και θερμότητας.
- Βλάβες μηχανής: Ανεπιθύμητες ταλαντώσεις μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα συστήματα της μηχανής.
- Αυξημένο κόστος: Οι πρόσθετες απαιτήσεις συντήρησης, αλλαγών εργαλείων και επεξεργασίας εξαιτίας των ταλαντώσεων μπορούν να αυξήσουν το κόστος παραγωγής.

ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ							
	ΑΥΤΟΔΙΕΓΕΙΡΟΜΕΝΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ CHATTERS			ΑΠΕΡΙΟΔΙΚΕΣ & ΕΛΕΥΘΕΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ			ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ
	Αναγεννώμενη αυτοδιέγερση	Εξαιτίας της τριβής	Σύζευξη ιδιομορφών	Σχετιζόμενες με το κοπτικό εργαλείο	Σχετιζόμενες με το τεμάχιο	Σχετιζόμενες με το περιβάλλον	Σχετιζόμενες με την εργαλειομηχανή
Θέση	ανάμεσα στην κοπτική ακμή και το κατεργαζόμενο τεμάχιο	παρειά εργαλείου - κατεργαζόμενο τεμάχιο και στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου	στην κατεύθυνση της κύριας δύναμης κοπής και της δύναμης απώθησης	παρειά εργαλείου - κατεργαζόμενο τεμάχιο και στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου	ζώνη κοπής	σε όλην την κατεργασία	σε όλην την κατεργασία
Αιτιολογία	επικαλυπτόμενες τροχιές του κοπτικού εργαλείου	τριβή στην παρειά του εργαλείου και στην επιφάνεια αποβλίττου του	τριβή στην ελεύθερη επιφάνεια και στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, μη σταθερή γωνία διάτμησης	φθορά εργαλείου, θραύσεις ακμών, ψευδόκοψη, κ.λπ.	αλλαγές στη σκληρότητα του υλικού του τεμαχίου, ανομοιομορφία κόκκων, ρωγμές	διαταραχές από το εξωτερικό περιβάλλον	αζυγοστάθμιες κινούμενων στοιχείων εργαλειομηχανής
Παρουσίαση	αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις έχουν ως αποτέλεσμα κυματοειδή επιφάνεια του τεμαχίου	αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις το εύρος των σπαιών εξαρτάται από την απόσβεση του συστήματος	ταλαντώσεις λόγω σύζευξης ιδιομορφών. Ταυτόχρονη ταλάντωση σε δύο κατευθύνσεις	τυχαία ταλάντωση εξαρτώμενη από τις συνθήκες της κατεργασίας	τυχαία ταλάντωση εξαρτώμενη από τις ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού και τη θερμική του επεξεργασία	τυχαία ταλάντωση εξαρτώμενη από το περιβάλλον εργασίας της εργαλειομηχανής	εξανασκασμένη ταλάντωση
Μέθοδος αντιμετώπισης	επιλογή κατάλληλου βάθους κοπής και στροφών ατράκτου σύμφωνα με το διάγραμμα ευστάθειας	επιλογή κατάλληλης γωνίας ελευθερίας και γωνίας αποβλίττου	αλλαγή της τροχιάς του κοπτικού εργαλείου, κατάλληλη επιλογή παραμέτρων της κατεργασίας	επιλογή υψηλής ποιότητας υλικού του κοπτικού εργαλείου, κατάλληλη επιλογή παραμέτρων της κατεργασίας	επιλογή κατάλληλου κοπτικού εργαλείου και παραμέτρων της κατεργασίας	εάν απαιτείται μόνωση της εργαλειομηχανής από εξωτερικές διεγέρσεις	ζυγοστάθμιση των κινούμενων μερών της εργαλειομηχανής

Σχήμα 1-12 Αστάθεια στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.[1]

Οι ταλαντώσεις μπορούν να οφείλονται είτε στη διαδικασία κοπής ίδια της είτε σε μεταβολές της δύναμης κοπής. Οι τελευταίες, που προκαλούνται από μεταβολές στο πάχος του αποβλίττοντος υλικού κατά τη διάρκεια της κοπής, είναι συνήθως η πιο συνηθισμένη πηγή αυτοδιεγείρομενων ταλαντώσεων. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια στη διαδικασία κοπής, επηρεάζοντας την ποιότητα της επιφάνειας και τη σταθερότητα της διαδικασίας.[1]

2 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ

Ο όρος «εργαλειομηχανές» αναφέρεται στα μηχανήματα ή ακόμα και τις συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να εκτελεστούν κάποια έργα και κάποιες κατασκευές. Ωστόσο, οι εργαλειομηχανές διαφέρουν με βάση την εργασία που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί. Αυτό το κεφάλαιο προσφέρει μια εμπεριστατωμένη εξέταση των διαφόρων κατηγοριών εργαλειομηχανών που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη βιομηχανία, εξετάζοντας τις λειτουργίες τους, τις εφαρμογές τους και τις προηγμένες τεχνολογίες που τους εφαρμόζονται. Ξεκινώντας από τα βασικά εργαλεία κοπής, όπως οι τροχοί λείανσης και τα δράπανα, και φτάνοντας σε πιο εξειδικευμένα όπως τα εργαλειομηχανήματα CNC, η επιλογή της κατάλληλης εργαλειομηχανής είναι κρίσιμη για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων στις βιομηχανικές διεργασίες. Αρχικά θα δοθεί μια σφαιρική επισκόπηση διαφόρων ειδών εργαλειομηχανών, ερμηνεύοντας τις λειτουργίες τους και αναλύοντας τις εφαρμογές τους σε διάφορες βιομηχανίες.

2.1. ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΟΥΣ

Οι πιο συνηθισμένες εργαλειομηχανές που συναντώνται στην βιομηχανία είναι οι εξής :

Οι *τόρνοι* (Lathes) είναι ευέλικτα μηχανολογικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση κυλινδρικών κομματιών εργασίας μέσω λειτουργιών τόννευσης. Περιστρέφουν το κομμάτι εργασίας γύρω από τον άξονά του, ενώ ένα εργαλείο κοπής εισέρχεται σε αυτό για να αφαιρέσει υλικό, παράγοντας συμμετρικά σχήματα όπως άξονες, ράβδους και δίσκους. Οι τόρνοι μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων του τόννευσης, της διαμόρφωσης, διμουργείασπειρώματος και της κεκλιμένης επεξεργασίας. Χρησιμοποιούνται ευρέως στις περισσότερες βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορία και οι κατασκευαστικές για τη δημιουργία ακριβών προϊόντων με λεία επιφάνεια.

Οι *Φρέζες* (Milling machines) είναι ισχυρά εργαλεία για τη μηχανοκίνηση στερεών υλικών για τη δημιουργία σύνθετων σχημάτων και χαρακτηριστικών.

Χρησιμοποιούν περιστρεφόμενους κόφτες με πολλές κοπτικές ακμές για την αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια ενός κομματιού εργασίας, παράγοντας επίπεδες, σχεδιασμένες ή ακανόνιστες επιφάνειες. Στην βιομηχανία χρησιμοποιούνται κυρίως για την δημιουργία αυλακώσεων.

Τα *Δράπανα* (Drilling machines) είναι εξειδικευμένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τρυπών σε κομμάτια εργασίας. Χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο με αιχμηρές κοπτικές ακμές για να διεισδύσουν στο υλικό και να αφαιρέσουν απόβλιττο, παράγοντας τρύπες με ακριβή διάμετρο και βάθος. Το δράπανο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εσωτερική λείανση ενός δοκιμίου, προσαρμόζοντας το κατάλληλο κοπτικό εργαλείο. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η κατασκευή, η μεταλλουργία, η ξυλουργία και η κατασκευή για το τρύπημα τρυπών σε υλικά όπως μέταλλο, ξύλο, πλαστικό και σύνθετα.

Οι *μηχανές λείανσης* (Grinding machines) είναι ακριβή εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τελική επεξεργασία για την επίτευξη υψηλής ποιότητας επιφάνειας και στενών ανοχών σε κομμάτια εργασίας. Χρησιμοποιούν τροχούς ή ταινίες για να αφαιρέσουν υλικό από την επιφάνεια του κομματιού εργασίας, παράγοντας λείες επιφάνειες, ακριβείς διαστάσεις και βελτιωμένη επιφανειακή τραχύτητα. Μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες λείανσης, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής, της κυλινδρικής και της εσωτερικής. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορία, η κατασκευή εργαλείων και η ακριβής μηχανική για το τρίψιμο υλικών όπως μέταλλο, κεραμικά και σύνθετα.

Οι *πρέσες* (Press machines) είναι μηχανικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για λειτουργίες διαμόρφωσης ή διαμόρφωσης με την εφαρμογή πίεσης σε κομμάτια εργασίας. Χρησιμοποιούν υδραυλικούς, μηχανικούς ή αεροσυμπιεζόμενους μηχανισμούς για να ασκήσουν δύναμη στο κομμάτι εργασίας, παραμορφώνοντάς το για τη δημιουργία επιθυμητών σχημάτων ή χαρακτηριστικών. Οι πρέσες μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων της σφυρηλάτησης, του τρυπήματος, του λυγίσματος, κοψίματος κ.α.. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η μεταλλουργία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορία και η

κατασκευή για την παραγωγή συστατικών και προϊόντων με ακριβή σχήματα και διαστάσεις.

Τα *δισκοπρίονα* (Sawingmachines) είναι ευέλικτα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για το κόψιμο υλικών σε επιθυμητά σχήματα ή μεγέθη χρησιμοποιώντας λεπίδα ή ταινία. Χρησιμοποιούν μια εμπρόσθια ή περιστρεφόμενη κίνηση για να μετακινήσουν το εργαλείο κοπής μέσα από το κομμάτι εργασίας, παράγοντας ευθείες, καμπύλες ή ακανόνιστες κοπές. Μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες κοπής υπό διάφορες γωνίες και προφίλ. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η ξυλουργία, η μεταλλουργία, η κατασκευή και η κατασκευή για το κόψιμο υλικών όπως ξύλο, μέταλλο, πλαστικό και σύνθετα.

Οι *μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης* (Weldingmachines) είναι εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση υλικών μεταξύ τους μέσω του τήξη και της συγχώνευσής τους. Εφαρμόζουν θερμότητα στα κομμάτια εργασίας και δημιουργώντας μια σύνδεση κατά την ψύξη τους. Οι μηχανές συγκόλλησης χρησιμοποιούν διάφορες διαδικασίες συγκόλλησης, συμπεριλαμβανομένης της συγκόλλησης με αέριο, με ηλεκτρόδιο και της συγκόλλησης με λέιζερ. Οι ηλεκτροσυγκολλήσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούν MIG(Metal InertGas) και TIG(TungstenInertGas) στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείτε κάποιο μέταλλο (συνήθως ανοξείδωτο χάλυβα)ως συνδετικό υλικό ενώ στην δεύτερη Βολφράμιο. Οι ηλεκτροσυγκολλήσεις είναι απαραίτητες σε όλες τις βιομηχανίες ιδιαίτερα στις κατασκευές, τη ναυπηγική κατασκευή κτιρίων για την κατασκευή δομών, συστατικών και συναρμολογήσεων.

Ψαλίδια κοπής (Shearingmachines) χρησιμοποιούνται για το κόψιμο μεγάλων φύλλων μετάλλου σε μικρότερα μεγέθη χρησιμοποιώντας μια δράση κοπής. Χρησιμοποιούν μια κινούμενη λεπίδα για να εφαρμόσουν μια δύναμη κοπής στο κομμάτι εργασίας, διαχωρίζοντάς το κατά μήκος μιας προκαθορισμένης γραμμής. Τα ψαλίδια μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες κοπής, συμπεριλαμβανομένων της ευθείας κοπής, της γωνίας κοπής και της κυκλικής κοπής. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες κατασκευής για το κόψιμο υλικών

όπως χάλυβας, αλουμίνιο και ανοξείδωτο ατσάλι σε ακριβή σχήματα και διαστάσεις.[4],[1]

2.2. ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ CNC

Η εμφάνιση της τεχνολογίας CNC (Computerized Numerical Control) έχει μετασχηματίσει τις παραδοσιακές διαδικασίες κατεργασίας, επιτρέποντας στους κατασκευαστές να παράγουν σύνθετα εξαρτήματα με υψηλή ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Παρακάτω θα εξεταστεί η εξέλιξη των εργαλειομηχανών CNC, επισημαίνοντας βασικές τεχνολογικές προόδους, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων αυτόματου ελέγχου, της αυτοματοποίησης, της μηχανικής ακρίβειας και της ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών κατασκευής, όπως η προσθετική κατασκευή και η τεχνητή νοημοσύνη. Επιπλέον, εξετάζονται οι αναδυόμενες τάσεις στην σχεδίαση των εργαλειομηχανών CNC, όπως τα υβριδικά συστήματα κατασκευής και οι βιώσιμες πρακτικές κατεργασίας. Μια εργαλειομηχανή CNC είναι ένας τύπος μηχανολογικού εξοπλισμού που ελέγχεται από έναν υπολογιστή χρησιμοποιώντας αριθμητικά δεδομένα για να εκτελέσει αυτόματα διάφορες επεξεργασίες με υψηλή ακρίβεια. Σχεδόν κάθε διεργασία που γίνεται με παραδοσιακές εργαλειομηχανές μπορούν να πραγματοποιηθούν και από CNC.

Η δομή μία τέτοιας μηχανής μπορεί να είναι ακριβώς η ίδια με μία παραδοσιακή όπως ο τόρνος, η φρέζα ή ένα δράπανο, χρησιμοποιούν τα ίδια εξαρτήματα σύσφιξης και κόβουν στους ίδιους άξονες. Επίσης, χρησιμοποιούν παρόμοια εργαλεία κοπής, όπως αρίδες τρυπανιών, μαχαίρια τόρνου κ.λπ., ανάλογα με τον τύπο της επεξεργασίας που απαιτείται. Εκεί που διαφέρουν με τις χειροκίνητες εργαλειομηχανές που είναι και η καρδιά μιας μηχανής CNC είναι το σύστημα αυτόματου ελέγχου της, το οποίο αποτελείται από έναν υπολογιστή και λογισμικό. Ο υπολογιστής ερμηνεύει αριθμητικά δεδομένα (κώδικα G) που παράγονται από το λογισμικό CAM (μέσω εφαρμογής Υπολογιστή) ή προγραμματίζονται χειροκίνητα και μεταφράζονται σε ακριβείς κινήσεις και ενέργειες της μηχανής. Οι μηχανές CNC συχνά ενσωματώνουν συστήματα κλειστού βρόγχου (Feedback) όπως αισθητήρες για να παρέχουν πραγματική χρονική ανατροφοδότηση σχετικά με τη θέση και την

κίνηση των μερών της μηχανής. Αυτή η ανατροφοδότηση βοηθά στη διασφάλιση της ακρίβειας και της συνέπειας στις επεξεργασίες. Όσον αφορά τον προγραμματισμό τους τα προγράμματα μπορούν να δημιουργηθούν χειροκίνητα χρησιμοποιώντας τον κώδικα G, μια γλώσσα προγραμματισμού που καθορίζει τις διαδρομές εργαλείων και τις παραμέτρους επεξεργασίας, ή δημιουργούνται αυτόματα χρησιμοποιώντας λογισμικό CAM με βάση μοντέλα CAD.

Συνοψίζοντας, οι μηχανές εργαλειομηχανής CNC επαναπροσδιορίζουν την κατασκευή με τον αυτόματο και ακριβή έλεγχο των επεξεργασιών, οδηγώντας σε αυξημένη αποδοτικότητα, ακρίβεια και ευελιξία στην παραγωγή πολύπλοκων εξαρτημάτων και τμημάτων σε διάφορους κλάδους.[23]

2.3. Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ

Η επιλογή της κατάλληλης εργαλειομηχανής εξαρτάται από τον συγκεκριμένο τύπο εργασίας που πρόκειται να γίνει, τις ανάγκες της εργασίας και τον προϋπολογισμό που υπάρχει για την εργασία. Για την επιλογή της κατάλληλης εργαλειομηχανής, πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του κάποιους παράγοντες.

Ο πρώτος σημαντικός παράγοντας είναι ο τύπος εργασίας που πρέπει να γίνει και αναλόγως να γίνει η σωστή επιλογή του καλύτερου τύπου. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η ισχύς της εργαλειομηχανής έτσι ώστε να μπορεί κανείς να διασφαλίσει ότι το έργο θα γίνει με επιτυχία. Εξίσου σημαντικό είναι η ποιότητα και η αξιοπιστία της μηχανής έτσι ώστε να γίνει σωστά και αποτελεσματικά η δουλειά. Περαιτέρω, ο τρόπος χειρισμοί της μηχανής πρέπει να είναι άνετος και ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου θα υπάρχει πολύωρη χρήση. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες είναι η ασφάλεια που πρέπει να διαθέτει η μηχανή έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα και ο χειριστής να νιώθει ασφάλεια κατά την διάρκεια της χρήσης της. Τέλος, η συντήρηση είναι επίσης ένας ουσιαστικός παράγοντας για να μειωθούν τα έξοδα της εργαλειομηχανής. Η επιλογή της σωστής εργαλειομηχανής είναι αρκετά σημαντική διαδικασία και χρειάζεται αρκετή σκέψη και προετοιμασία έτσι ώστε να καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις του έργου που χρειάζεται να καλυφθούν. [22]

Εφόσον, έγινε λοιπόν μια γενικότερη αναφορά στις εργαλειομηχανές και τις λειτουργίες τους στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει εκτενής ανάλυση στις δύο βασικότερες από αυτές τον τόρνο και την φρέζα. Που είναι οι πλέον σημαντικές για αυτήν την εργασία και για τα πειράματα που θα λάβουν μέρος.

3 ΤΟΡΝΟΣ ΚΑΙ ΦΡΕΖΑ



Εικόνα 3-1 Φρέζα (αριστερά), Τόρνος (δεξιά). (3)(4)

Αντικείμενο μελέτης αυτού του κεφαλαίου αποτελεί η ανάλυση των δύο βασικότερων εργαλειομηχανών του τóρνου και της φρέζας, που αποτελούν ιστορικό θεμέλιο της βιομηχανικής επανάστασης αλλά και βασικό κομμάτι της σύγχρονης βιομηχανίας. Θα γίνει εκτενείς αναφορά στην δομή, στις διάφορες εργασίες που πραγματοποιούνται μέσω αυτών των εργαλειομηχανών αλλά και στα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούν. Η κατανόηση τόσο της λειτουργίας όσο και τον επιμέρους χαρακτηριστικών τους είναι σημαντική για την συνέχεια της διπλωματικής.

3.1. ΤΟΡΝΕΥΣΗ

Η διεργασία της τóρνευσης πραγματοποιείται με περιστροφική κίνηση του τεμαχίου ενώ το κοπτικό εργαλείο προκαθορισμένης γεωμετρίας που μπορεί να κινείται στον χώρο έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο και μέσω αφαίρεσης υλικού το μετασχηματίζει στην θελημένη γεωμετρία. Για την κινηματική ταξινόμηση, λαμβάνεται πάντα υπόψη η σχετική κίνηση μεταξύ του κομματιού εργασίας και του εργαλείου. Οι μέθοδοι τóρνευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν από διάφορες

οπτικές. Για παράδειγμα, διαφορετικοί στόχοι της εργασίας κατεργασίας οδηγούν στη διάκριση μεταξύ λείας και μη επιφάνειας. Στην περίπτωση της μη λείας κοπτικής επιφάνειας, επιτυγχάνεται υψηλός ρυθμός απομάκρυνσης υλικού. Στην άλλη περίπτωση ο στόχος είναι η πραγματοποίηση υψηλού επιπέδου διαστηματικής ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας με μικρές τομές του αδιαμόρφωτου αποβλίττου. Η ευελιξία αυτής της διαδικασίας κατασκευής επιτρέπει την οικονομική χρήση τόσο στην πρωτοτυπία όσο και στη μαζική παραγωγή, πολλαπλά εργαλεία μπορούν να εμπλακούν ταυτόχρονα κατά τη διαδικασία κατεργασίας προκειμένου να μειωθούν οι χρόνοι κατασκευής και να αυξηθεί ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού. Η υποδιαίρεση των παραλλαγών της διαδικασίας τόννευσης θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Οι σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την τόννευση είναι :

- b είναι το πλάτος του αδιαμορφωτων αποβλίττων
- h είναι το πάχος του αδιαμορφωτων αποβλίττων
- a_p είναι το βάθος κοπής
- f είναι η πρόωση
- κ_r είναι η γωνία της κοπτικής του εργαλείου

Οπού προκύπτουν οι εξής σχέσεις :

$$b \approx \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (3.1.1) \quad h \approx f \cdot \sin \kappa_r \quad (3.1.2) \quad A = b \cdot h = a_p \cdot f \quad (3.1.3)$$

Που προβλέπουν τις διαστάσεις που θα έχει το απόβλιττο με βάση τις μεταβλητές κοπής.

Αυτή η δομημένη προσέγγιση για την κατηγοριοποίηση των μεθόδων τόννευσης και των συστατικών της παρέχει ένα πλαίσιο για την κατανόηση των εφαρμογών και των κατεργασιών τόννευσης.[4]

3.1.1.Μορφές Τόννευσης

Υπάρχουν οκτώ βασικές κατεργασίες τόννευσης καθεμία φέρει διαφορετικά αποτελέσματα για διαφορετικές ανάγκες που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

Τις περισσότερες φορές απαιτούνται περισσότερες από μία για την παραγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος. Ενώ ονομαστικά είναι: Απλή τórνευση , Τórνευση προσώπου , Τórνευση μορφής ,Boring, Διάτρηση , Απότμηση, Σπειρωτόμηση , Τórνευση ρίκνωσης.

Η απλή τórνευση είναι μια θεμελιώδης κατεργασία στον τórνο, όπου το κοπτικό εργαλείο αφαιρεί υλικό από την εξωτερική επιφάνεια ενός κυλινδρικού τεμαχίου για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος και επιφάνεια. Το τεμάχιο εργασίας περιστρέφεται συνεχώς γύρω από τον άξονα του, ενώ το εργαλείο κινείται παράλληλα ή κατά μήκος του άξονα για να αφαιρέσει σταδιακά στρώματα υλικού. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή αξόνων, ράβδων και άλλων κυλινδρικών εξαρτημάτων με μεγάλη ακρίβεια.[1]

Η τórνευση προσώπου επικεντρώνεται στην αφαίρεση υλικού από το ακραίο τμήμα του τεμαχίου εργασίας, δημιουργώντας μια επίπεδη επιφάνεια. Το κοπτικό εργαλείο κινείται κάθετα προς τον άξονα περιστροφής του τεμαχίου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1b, επιτυγχάνοντας μια επίπεδη και λεία επιφάνεια εάν πρέπει να κατεργαστούν και οι δύο άκρες του τεμαχίου, το τεμάχιο πρέπει να γυριστεί μετά την ολοκλήρωση της πρώτης άκρης και η διαδικασία τórνευσης να επαναληφθεί. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για την προετοιμασία των άκρων για περαιτέρω κατεργασία ή συναρμολόγηση και χρησιμοποιείται συχνά για την προετοιμασία επιφανειών για συγκόλληση ή άλλες συνδέσεις. Κατά την τórνευση προσώπου χυτών ή άλλων υλικών που έχουν σκληρή επιφάνεια, το βάθος της πρώτης κοπής πρέπει να είναι αρκετό για να διαπεράσει το σκληρό υλικό και να αποφεύγεται η υπερβολική φθορά του εργαλείου. Στην τórνευση προσώπου, το εργαλείο προωθείται κάθετα προς τον άξονα του περιστρεφόμενου τεμαχίου. Επειδή οι στροφές ανά λεπτό είναι σταθερές, η ταχύτητα κοπής μειώνεται συνεχώς όσο πλησιάζει τον άξονα.[2]

Η τórνευση μορφής επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων γεωμετριών και προφίλ σε ένα τεμάχιο. Με την καθοδήγηση του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών, μπορούν να δημιουργηθούν κωνικές, σφαιρικές ή άλλες μη κυλινδρικές μορφές. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για την κατασκευή εξαρτημάτων με συγκεκριμένα σχήματα, όπως διακοσμητικά στοιχεία,

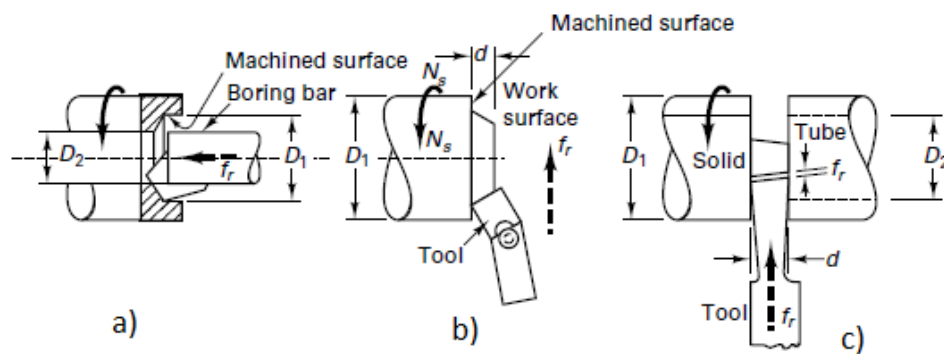
σύνθετους άξονες και ειδικά εξαρτήματα μηχανών. Το μειονέκτημα αυτής της κατεργασίας είναι ότι απαιτεί διαφορετικό κοπτικό εργαλείο για κάθε τεμάχιο που απαιτείται διαφορετική γεωμετρία.

Το *Boring* είναι η διαδικασία διεύρυνσης και τελειοποίησης μιας υπάρχουσας οπής, η οποία μπορεί να έχει δημιουργηθεί με τρυπάνι ή ως αποτέλεσμα χύτευσης (Σχήμα 3.1a). Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την ακρίβεια στις διαστάσεις της οπής και τη σωστή ευθυγράμμιση της με τον άξονα περιστροφής του τεμαχίου, διορθώνοντας τυχόν εκκεντρότητα. Η διάτρηση χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, όπως στην κατασκευή εξαρτημάτων κινητήρων και μηχανών. Όταν η διάτρηση πραγματοποιείται σε τόρνο, το τεμάχιο στερεώνεται συνήθως χρησιμοποιώντας τσοκ. Η διαδικασία μπορεί να παράγει διάφορες γεωμετρίες οπών, συμπεριλαμβανομένων ίσιων, κωνικών, με σπειρώματα ή ακόμα και ακανόνιστων περιγραμμάτων, προσφέροντας ευελιξία για διάφορες εφαρμογές.[2]

Η *διάτρηση* είναι η διαδικασία δημιουργίας νέας οπής σε ένα τεμάχιο χρησιμοποιώντας ένα τρυπάνι. Το τρυπάνι περιστρέφεται και προωθείται μέσα στο υλικό, αφαιρώντας υλικό και δημιουργώντας την επιθυμητή οπή. Αυτή η διαδικασία είναι θεμελιώδης για την κατασκευή βιδών, μπουλονιών και άλλων εξαρτημάτων που απαιτούν οπές για τη σύνδεση ή συναρμολόγηση.

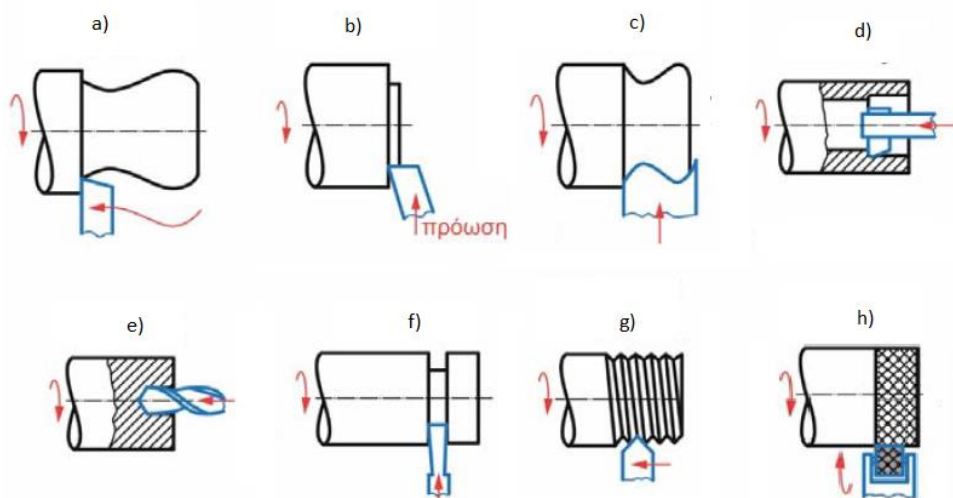
Η *απότμηση* (ή απόκοψη) είναι η διαδικασία αφαίρεσης ενός τμήματος από το άκρο του τεμαχίου. Συνήθως, το κοπτικό εργαλείο κινείται κάθετα προς τον άξονα του τεμαχίου, κόβοντας και απομακρύνοντας το επιθυμητό τμήμα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1c. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για τη διαμόρφωση του τεμαχίου στο επιθυμητό μήκος ή για την αφαίρεση περιττών τμημάτων μετά από άλλες κατεργασίες.

Η *σπειρωτόμηση* είναι η διαδικασία δημιουργίας σπειρωμάτων σε μια επιφάνεια, εσωτερική ή εξωτερική. Χρησιμοποιώντας ειδικά εργαλεία, τα σπειρώματα δημιουργούνται για την κατασκευή βιδών, παξιμαδιών και άλλων εξαρτημάτων με σπειρώματα. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την ακρίβεια και την αντοχή των σπειρωμάτων, επιτρέποντας τη σύνδεση εξαρτημάτων με ασφάλεια και αξιοπιστία.



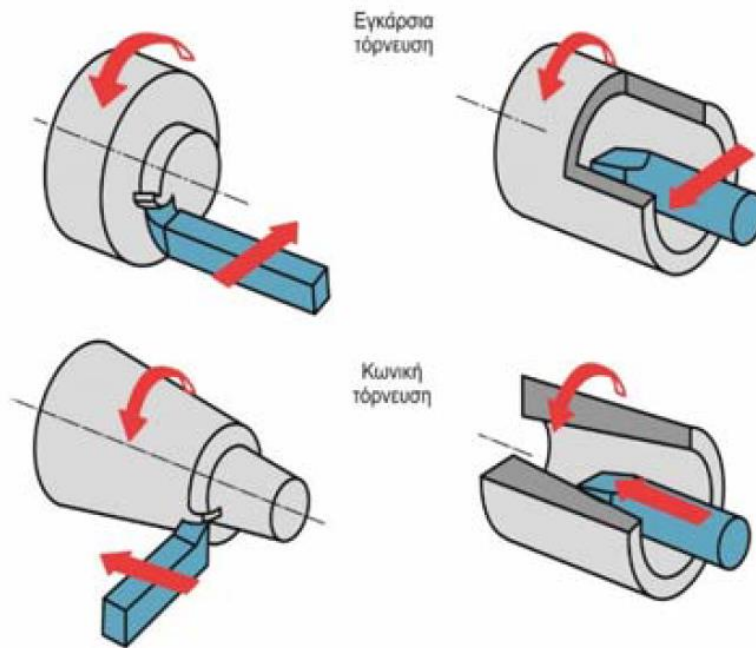
Σχήμα 3-1 Κατεργασίες Τόρνευσης [2]

Η τόρνευση ρίκνωσης περιλαμβάνει την αφαίρεση υλικού για τη δημιουργία στενών αυλακώσεων ή εσοχών στο τεμάχιο. Αυτές οι αυλακώσεις χρησιμοποιούνται συχνά για τη συναρμολόγηση εξαρτημάτων, παρέχοντας ακριβείς και σταθερές διαστάσεις. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προετοιμασία επιφανειών για εφαρμογές όπως η εγκατάσταση δαχτυλιδιών, ρουλεμάν και άλλων συναρμολογούμενων μερών.



Σχήμα 3-2 Κατεργασίες τόρνευσης, α) Απλή τόρνευση, β) Τόρνευση προσώπου, γ) Τόρνευση μορφής, δ) Boring, ε) Διάτρηση, ς) Απότμηση, ζ) Σπειρωτόμηση, η) Τόρνευση ρίκνωσης. [1]

Οι κατεργασίες τόρνευσης μπορούν να πραγματοποιηθούν εγκάρσια ή κωνικά. Καθώς επίσης και εσωτερικά ή εξωτερικά. Παραδείγματος χάριν μπορεί μια σπειρωτόμηση να πραγματοποιηθεί εγκάρσια και εξωτερικά ή και κωνικά και εξωτερικά ή κωνικά και εσωτερικά κ.τ.λ. στο σχήμα 3.3 φαίνονται οι μορφές αυτές.



Σχήμα 3-3 Μορφές Τόννευσης, ξεκινώντας από πάνω αριστερά εγκάρσια και εξωτερική, εγκάρσια και εσωτερική, κωνική και εξωτερική και κωνική και εσωτερική. [1]

3.1.2. Δομή και τα μέρη του Τόρνου

Ο παραδοσιακός τόρνος αποτελείται από διάφορα βασικά μέρη, μερικά από τα πιο κρίσιμα των οποίων είναι το κιβώτιο ταχυτήτων, ο κεντροφορέας, το εργαλειοφορείο, ο σφιγκτήρας-τσοκ και το κρεβάτι. Η κατανόηση των τύπων και των μερών του τόρνου αλλά και των δυνατοτήτων του είναι ουσιώδης για την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος για συγκεκριμένες κατεργασίες .

1. Κιβώτιο Ταχυτήτων (Headstock)

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι το πιο σημαντικό μέρος του τόρνου, καθώς είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση της κίνησης στον άξονα και την περιστροφή του τεμαχίου που κατεργαζόμαστε. Στο εσωτερικό του κιβωτίου υπάρχουν γρανάζια, τα οποία επιτρέπουν τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα, ανάλογα με το υλικό και το είδος της κατεργασίας. Η ρύθμιση αυτή επιτρέπει την ακριβή προσαρμογή της ταχύτητας στις ανάγκες της κατεργασίας, καθώς άλλες εργασίες απαιτούν μεγαλύτερη ταχύτητα (π.χ. λείανση) και άλλες χαμηλότερη (π.χ. κοπή). Το κιβώτιο ταχυτήτων περιλαμβάνει επίσης τον κύριο άξονα (main spindle), ο οποίος

συγκρατεί το τεμάχιο και το περιστρέφει, όπως και το σπείρωμα για το σφικτήρα που εξασφαλίζει την ασφαλή συγκράτηση του υλικού.[1]

2. Κεντροφορέας (Tailstock)

Ο κεντροφορέας ή κουκουβάγια βρίσκεται στο αντίθετο άκρο από το κιβώτιο ταχυτήτων και χρησιμεύει για τη στήριξη του άλλου άκρου του τεμαχίου, όταν αυτό είναι μεγάλο ή χρειάζεται επιπλέον υποστήριξη κατά την κατεργασία. Ο κεντροφορέας μπορεί να κινείται κατά μήκος του κρεβατιού του τόρνου για να προσαρμόζεται στο μέγεθος του τεμαχίου, και μπορεί επίσης να φιλοξενεί διάφορα εργαλεία, όπως τρυπάνια για διάτρηση ή σπειροτόμους. Η λειτουργία του είναι πολύ σημαντική για την ευθυγράμμιση και τη σταθερότητα του τεμαχίου, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι μακρύ ή όταν απαιτούνται μεγαλύτερες ακριβείας κατεργασίες.[1]

3. Εργαλειοφορείο (Carriage)

Το εργαλειοφορείο είναι η διάταξη που υποστηρίζει και κατευθύνει το κοπτικό εργαλείο κατά μήκος του άξονα περιστροφής του τεμαχίου αλλά και παράλληλα σε αυτόν. Αποτελείται από το κυρίως σώμα το οποίο κινείται στις ράγες του κρεβατιού και άρα εκτελεί την παράλληλη κίνηση ενώ πάνω σε αυτό βρίσκονται ένας εγκάρσιος και ένας διαμήκης οδηγός. Ο τελευταίος διαθέτει και τον εργαλειοδέτη όπου προσαρμόζεται το κοπτικό εργαλείο. Το εργαλειοφορείο μπορεί να μετακινείται είτε χειροκίνητα με μοχλούς είτε αυτόματα μέσω του κιβωτίου προώσεων. Από το εργαλειοφορείο περνάνε επίσης δύο άξονες ο έξονας προώσεων και ο κοχλιωτός άξονας που επιτρέπει την κοπή σπειρωμάτων. Έτσι το εργαλειοφορείο επιτρέπει την ακριβή διαμήκη και εγκάρσια κίνηση του εργαλείου και κάθε κατεργασία της εξωτερικής ή της εσωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου.[2],[1]

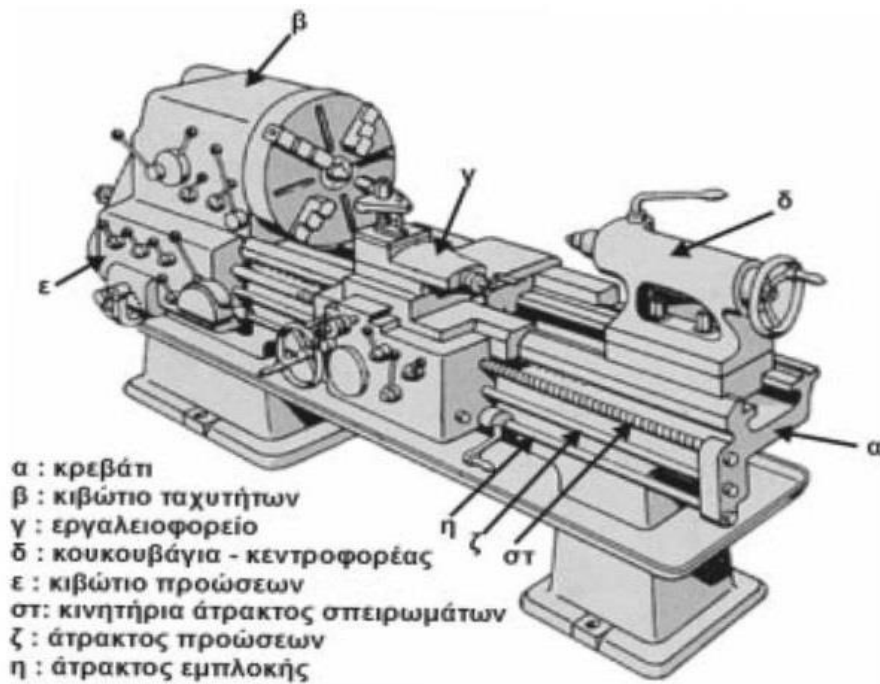
4. Σφικτήρας (Chuck)

Ο σφικτήρας είναι το εξάρτημα που συγκρατεί το τεμάχιο και το περιστρέφει μαζί με τον άξονα. Συνήθως βρίσκεται στο κιβώτιο ταχυτήτων και έρχεται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τη φύση του τεμαχίου. Ο πιο κοινός τύπος είναι ο σφικτήρας με τρία σιαγόνια (three-jaw chuck), ο οποίος χρησιμοποιείται για

κυλινδρικά τεμάχια και τα συγκρατεί αυτόματα στο κέντρο. Υπάρχουν επίσης και σφιγκτήρες με τέσσερα σιαγόνια (four-jaw chuck), οι οποίοι επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς κάθε σιαγόνα μπορεί να προσαρμοστεί ανεξάρτητα, κάτι που είναι χρήσιμο για ακανόνιστα ή μη συμμετρικά τεμάχια. Η σωστή τοποθέτηση και σύσφιξη του τεμαχίου είναι κρίσιμη για την ασφάλεια της εργασίας και την ποιότητα της κατεργασίας.[1]

5. Κρεβάτι (Bed)

Το κρεβάτι του τόρνου είναι το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίζονται και κινούνται τα υπόλοιπα μέρη του τόρνου, όπως ο κεντροφορέας και το εργαλειοφορείο. Είναι κατασκευασμένο από σκληρό και βαρύ υλικό, συνήθως από χυτοσίδηρο, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα και η απορρόφηση των κραδασμών κατά τη λειτουργία του τόρνου. Το κρεβάτι διαθέτει δύο ράγες (οδηγούς) που τρέχουν κατά μήκος του, οι οποίες επιτρέπουν την κίνηση του εργαλειοφορείου και του κεντροφορέα σε ευθεία γραμμή. Αυτές οι ράγες είναι ακρίβειας και πρέπει να είναι απόλυτα ευθύγραμμες, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή και ακριβής κατεργασία του τεμαχίου. Η στιβαρότητα του κρεβατιού είναι κρίσιμη για την ποιότητα της εργασίας, καθώς ακόμη και μικρές παραμορφώσεις ή δονήσεις μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ακρίβεια της κατεργασίας. Επομένως, το κρεβάτι διασφαλίζει τη σταθερότητα ολόκληρου του συστήματος και συμβάλλει στην απόδοση του τόρνου, διατηρώντας την ευθυγράμμιση και την αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις.[2]



Εικόνα 3-2 Τα μέρη του τόρνου. (5)

Γνώση της ορολογίας ενός μηχανήματος είναι θεμελιώδης για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του, του τρόπου εναλλαγής των συσκευών συγκράτησης και του τρόπου τοποθέτησης και σύνδεσης των εργαλείων κοπής με το έργο. Υπάρχουν και άλλα μέρη σε ένα τόρνο όπως το κιβώτιο προώσεων και η άτρακτος εμπλοκής τα σημαντικότερα ωστόσο, μεγέθη που έχουν ενδιαφέρον σε ένα τόρνο είναι δύο , η διάμετρος που έχει δυνατότητα να δέσει ο σφικτήρας(chuck) το τεμάχιο , από το οποίο ορίζεται και η δυνατότητα του τόρνου να επεξεργαστεί τα διάφορα μεγέθη ως προς την διατομή του τεμαχίου. Η δεύτερη καθοριστική παράμετρος ενός τόρνου είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων του κιβωτίου ταχυτήτων και του κεντροφορέα , που ορίζει το μέγιστο μήκος του τεμαχίου που μπορεί να επεξεργαστεί ένας τόρνος. Η γνώση αυτών είναι απαραίτητη σε κάθε τόρνο για την κατανόηση των ογκομετρικών δυνατοτήτων του τόρνου.[1],[2]

3.1.3. Είδη Τόρνου

Οι τόρνοι που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική παραγωγή μπορούν να ταξινομηθούν ως τόρνοι ταχύτητας, κλασικοί τόρνοι, τόρνοι ακριβείας, τόρνοι πυργίσκου και αυτόματοι τόρνοι CNC.

Ο τόννος ταχυτήτων είναι μια απλή μορφή τόννου που αποτελείται από την κεφαλή, την πρύμνη και μια απλή βάση εργαλείων τοποθετημένη σε ελαφρύ κρεβάτι. Αυτό το είδος τόννου έχει συνήθως μόνο τρεις ή τέσσερις ταχύτητες και χρησιμοποιείται κυρίως για εργασίες όπως η επεξεργασία ξύλου, το γυάλισμα και η μεταλλοτεχνία (σχηματισμός μετάλλου). Είναι ελαφρύ και έχει υψηλές στροφές, με συνηθισμένες ταχύτητες ατράκτου μέχρι και 4000 στροφές ανά λεπτό (rpm).

Ο τόννος κινητήρα είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος τόννου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανική παραγωγή. Είναι βαρέως τύπου μηχάνημα με ισχυρή κατασκευή. Διαθέτει όλες τις βασικές εξαρτήσεις όπως κιβώτιο ταχυτήτων, κεντροφορέας, το εργαλειοφορείο, ο σφικτήρας-τσοκ και το κρεβάτι. Χρησιμοποιείται για ένα ευρύ φάσμα εργασιών και διατίθεται σε ποικιλία μεγεθών. Μπορεί να φέρει μεγάλα βάρη και να εκτελεί βαθιές κοπές σε υλικά όπως σίδηρο και χάλυβα.

Ο τόννος ακριβείας είναι μια ειδική μορφή τόννου που χρησιμοποιείται για κατεργασίες ακριβείας, συχνά σε εργαστήρια εργαλείων και καλουπιών. Είναι κατασκευασμένος για εργασίες υψηλής ακρίβειας. Διαθέτει υψηλή σταθερότητα και δυνατότητα χειρισμού μικρών κομματιών με λεπτομέρεια. Συχνά χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαλείων και τη συντήρηση μηχανών.

Ο κάθετος τόννος είναι ένα είδος τόννου όπου ο άξονας περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση, αντί για την οριζόντια που συναντάται στους παραδοσιακούς τόννους. Αυτό επιτρέπει την επεξεργασία μεγάλων και βαριών τεμαχίων που θα ήταν δύσκολο να συγκρατηθούν σε οριζόντιο τόννο. Στον κάθετο τόννο, το τεμάχιο στερεώνεται σε ένα περιστρεφόμενο τραπέζι (συνήθως μεγάλο και σταθερό) και περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, ενώ το εργαλείο κοπής κινείται κάθετα και οριζόντια για την κατεργασία του. Χρησιμοποιείται κυρίως για μεγάλα και βαριά τεμάχια, όπως εξαρτήματα αεροσκαφών, τροχούς και μεγάλα κυλινδρικά αντικείμενα, που δεν μπορούν να τοποθετηθούν με ευκολία σε παραδοσιακούς οριζόντιους τόννους. Οι κάθετοι τόννοι μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερα βάρη και να παρέχουν μεγαλύτερη σταθερότητα λόγω της κατακόρυφης θέσης του τεμαχίου, καθιστώντας τους ιδανικούς για τραχιές κοπές και βαριές εργασίες.

Ψηφιακά καθοδηγούμενοι τόρνοι(CNC Turning Center) είναι ο πιο εξελιγμένος τόρνος και χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά συστήματα για να ελέγχει όλες τις κινήσεις. Λειτουργεί με λογισμικό μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή επιτρέποντας την ακριβή κατεργασία σύνθετων τεμαχίων για πολύπλοκες γεωμετρίες. Είναι ιδανικός για μαζική παραγωγή και για τεμάχια που απαιτούν υψηλή ακρίβεια. Μπορεί να εκτελεί πολύπλοκες διαδικασίες κατεργασίας σε διάφορους άξονες και να συνδυάζει διαφορετικές εργασίες κατεργασίας όπως τρύπημα, φρέζα και τórνευση. Κάθε τύπος τόρνου έχει τις δικές του εφαρμογές και δυνατότητες ανάλογα με το είδος της εργασίας που πρόκειται να εκτελεστεί. Προσφέρουν εξειδικευμένες λύσεις για κατεργασίες υψηλής ακρίβειας ή μαζικής παραγωγής.[2]

3.1.4. Κοπτικά Εργαλεία

Οι περισσότερες λειτουργίες του τόρνου γίνονται χρησιμοποιώντας εργαλεία κοπής μονής άκρης (single point cutting tools) όπου μόνο μία άκρη του κοπτικού εκτελεί την κύρια κοπή σε αντίθεση με τα κοπτικά πολλαπλών σημείων (multi point cutting tools). Οι κύριες ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα κοπτικά εργαλεία είναι τρεις , μεγάλη σκληρότητα , αντίσταση στην θερμοκρασία και αντίσταση στην φθορά . Για αυτό το λόγο τα κοπτικά εργαλεία κατασκευάζονται από διάφορους τύπους βαρέων, σφυρηλατημένων χαλύβδων όπως υψηλής ταχύτητας χάλυβα (HSS) ή κράματα καρβιδίου και κεραμικά. Στη χρήση καρβιδίου, κεραμικών ή επικαλυμμένων καρβιδίων για κοπή υψηλής ταχύτητας, χρησιμοποιούνται ως αναλώσιμα που μπορούν να αγοραστούν σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων, γεωμετρικών σχεδίων. Δεδομένου ότι τα υλικά εργαλείων είναι ακριβά, επιθυμείται η χρήση τους να είναι όσο το δυνατόν λιγότερη. Ταυτόχρονα, είναι ουσιώδες το εργαλείο κοπής να υποστηρίζεται με ισχυρό και σταθερό τρόπο για να ελαχιστοποιηθεί η παραμόρφωση και οι πιθανές δονήσεις. [2]

Εκτός από τις γωνίες κοπής, που έχει γίνει εκτενής αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν ορισμένες σημαντικές γωνίες ορίζουν τη γεωμετρία των εργαλείων κοπής κατά την διάρκεια της τórνευσης.

Γωνία τοποθέτησης (κ). Αυτή η γωνία είναι ανάμεσα στην κύρια ακμή του κοπτικού εργαλείου και το υλικό που κόβουμε (την επιφάνεια που κατεργαζόμαστε).

- Όταν η γωνία είναι μεγάλη : Το εργαλείο κόβει λίγο υλικό (το απόβλιπτο είναι λεπτό), αλλά επειδή η πίεση συγκεντρώνεται σε μια μικρή περιοχή του εργαλείου, φθείρεται πιο γρήγορα.
- Όταν η γωνία είναι μικρή : Το εργαλείο κόβει περισσότερο υλικό (το απόβλιπτο είναι παχύτερο), αλλά η φθορά του εργαλείου είναι πιο αργή, γιατί η φόρτιση κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια του εργαλείου.

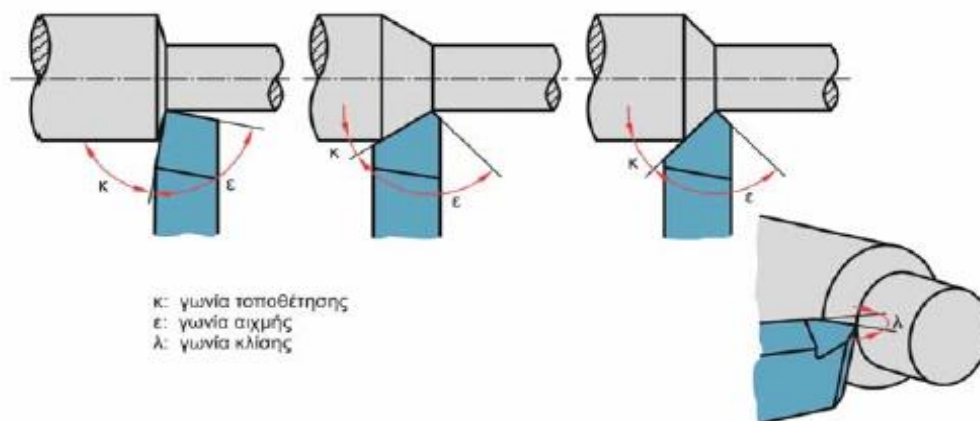
Για το λόγο αυτό, συχνά επιλέγεται μια ενδιάμεση γωνία, συνήθως 45° , που είναι μια καλή ισορροπία μεταξύ φθοράς εργαλείου και απόδοσης κοπής.

2. Γωνία αιχμής (ε). Αυτή η γωνία είναι ανάμεσα στην κύρια και τη δευτερεύουσα κόψη του εργαλείου.

- Όταν η γωνία είναι περίπου 90° (κανονική γωνία): Το εργαλείο είναι ανθεκτικό και μπορεί να αντέξει αρκετή πίεση πριν φθαρεί.
- Όταν η γωνία είναι μικρότερη : Το εργαλείο γίνεται πιο αιχμηρό και μπορεί να κόψει πιο εύκολα, αλλά φθείρεται πιο γρήγορα επειδή η αιχμή του είναι πιο λεπτή και ευάλωτη.

Γωνία κλίσης (λ). Αυτή η γωνία δείχνει αν η κύρια κοπτική ακμή του εργαλείου είναι οριζόντια ή υπό κλίση σε σχέση με την επιφάνεια κοπής.

- Όταν η γωνία κλίσης είναι μικρή (3° - 5°): Το εργαλείο είναι ελαφρώς κεκλιμένο, κάτι που βοηθά το υλικό που κόβεται (το απόβλιπτο) να απομακρύνεται πιο εύκολα. Αυτό είναι χρήσιμο στην τόννευση, όπου το υλικό απομακρύνεται συνεχώς καθώς περιστρέφεται το αντικείμενο που κατεργαζόμαστε.[1]



Σχήμα 3-4 Γωνίες κοπτικού εργαλείου -τεμαχίου κατά την διάρκεια της τόννευσης. [1]

Στην τόννευση, τα κοπτικά εργαλεία χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση τη χρήση, το υλικό κατασκευής και τη γεωμετρία τους. Κάθε εργαλείο έχει σχεδιαστεί για συγκεκριμένες λειτουργίες όπως η εκχόνδριση, η φινιρίσμα, και η σπειρωμάτωση.

Κοπτικά εργαλεία εξωτερικής τόννευσης (εκχόνδρισης): Χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση υλικού από την εξωτερική επιφάνεια ενός κυλίνδρου ή άλλου αντικειμένου. Έχουν κύρια και δευτερεύουσα κοπτική ακμή και στερεώνονται σε ειδικές βάσεις ή κεφαλές, όπου ασφαλίζονται μέσω βιδών ή συστημάτων γρήγορης αλλαγής.

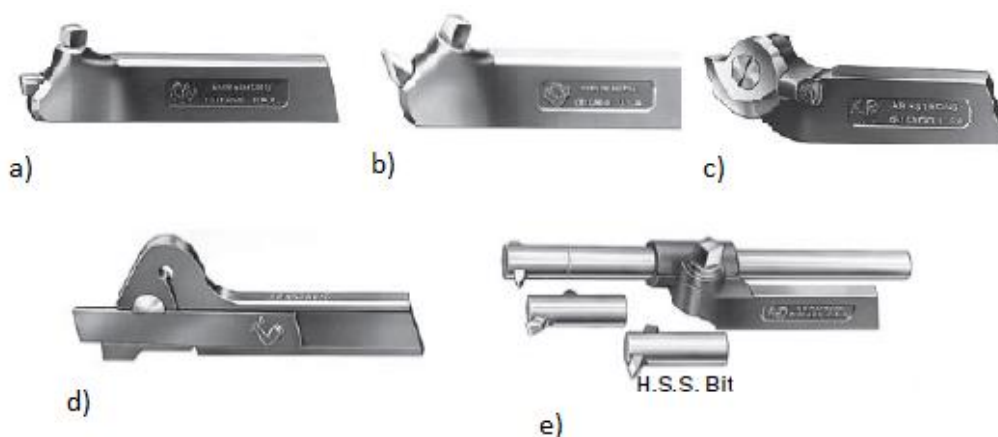
Κοπτικά εργαλεία εσωτερικής τόννευσης : Χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση υλικού από την εσωτερική επιφάνεια ενός κυλίνδρου ή άλλου κοίλου αντικειμένου. Είναι λεπτότερα και μακρύτερα για να φτάνουν στο εσωτερικό των αντικειμένων και στερεώνονται σε βάσεις παρόμοιες με τα εξωτερικά εργαλεία.

Πλευρικά κοπτικά εργαλεία (profiling): Σχεδιάζονται για να κόβουν συγκεκριμένα σχήματα στην εξωτερική ή εσωτερική επιφάνεια. Η γεωμετρία τους είναι πιο περίπλοκη για να ανταποκρίνονται στο επιθυμητό τελικό σχήμα.

Κοπτικά εργαλεία κοπής τεμαχίων (parting tools ή grooving tools): Αυτά τα εργαλεία χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν το κομμάτι από τη ράβδο ή για να

δημιουργήσουν αυλάκια. Συνήθως είναι λεπτά και κοφτερά για να ελαχιστοποιήσουν την παραμόρφωση.

Κοπτικά εργαλεία αποπεράτωσης (φινιρίσματος): Σχεδιάζονται για λεπτές κοπές και για να δώσουν τελικό φινιρίσμα στην επιφάνεια. Η γωνία κοπής και η γεωμετρία τους μειώνουν την τριβή και εξασφαλίζουν ομαλή επιφάνεια.



Εικόνα 3-3 Κοπτικά εργαλεία τórνευσης α)Εκχόνδρισης, b)Πλευρικά, c)Σπειρωμάτοσης, d)Απότμησης, e)Εσωτερικής τórνευσης. [2]

Τα εργαλεία σπειρώματος χρησιμοποιούνται για την κοπή σπειρωμάτων είτε στην εξωτερική είτε στην εσωτερική επιφάνεια ενός κυλίνδρου.

- **Εξωτερικά Εργαλεία Σπειρώματος:** Χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία εξωτερικών σπειρωμάτων. Το εργαλείο έχει μια ειδική γεωμετρία με αιχμές που αντιστοιχούν στις προδιαγραφές του σπειρώματος, όπως το βήμα και η γωνία του νήματος.
- **Εσωτερικά Εργαλεία Σπειρώματος:** Σχεδιάζονται για να δημιουργούν εσωτερικά σπειρώματα, σε τρύπες ή κοίλα αντικείμενα. Η γεωμετρία τους είναι κατάλληλη για λεπτομερείς κοπές σε περιορισμένο χώρο.
- **Σειρές κοπτικών για σπειρώματα:** Αυτά τα εργαλεία έχουν μια διαμορφωμένη ακμή που επιτρέπει τη δημιουργία ενός πλήρους σπειρώματος μέσα από επαναλαμβανόμενες κοπές. Τα εργαλεία αυτά είναι

συνήθως πιο κοφτερά και ευπαθή σε φθορά, απαιτώντας ακριβή γεωμετρία για σωστό αποτέλεσμα.

Στις σύγχρονες ρυθμίσεις παραγωγής ο χρόνος που απαιτείται για την αλλαγή εργαλείων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική αποδοτικότητα. Οι γρήγορες βάσεις εργαλείων είναι σχεδιασμένες να ελαχιστοποιούν τον χρόνο αλλαγής εργαλείων, επιτρέποντας την προρύθμιση και εύκολη εναλλαγή εργαλείων σε λίγα δευτερόλεπτα. Ορισμένα συστήματα επιτρέπουν ακόμη την προετοιμασία ενός δεύτερου εργαλείου ενώ ένα άλλο είναι σε χρήση, βελτιστοποιώντας περαιτέρω τη ροή εργασίας.[21]

3.2. ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ

Το φραιζάρισμα είναι μία από τις πιο διαδεδομένες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, όπου ένας περιστρεφόμενος κοπτικός δίσκος αφαιρεί τμήματα του κατεργαζόμενου αντικειμένου. Στο φραιζάρισμα, η βασική αρχή είναι η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου (φρέζας) με ταυτόχρονη κίνηση του τεμαχίου. Η αφαίρεση υλικού γίνεται μέσω της επαφής των κοπτικών ακμών του εργαλείου με το υλικό του τεμαχίου, όπου δημιουργούνται αποβλίττα με στόχο να διαμορφωθεί η επιθυμητή γεωμετρία. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή επίπεδων, κυρτών, ή λοξών επιφανειών, καθώς και για πιο σύνθετα τρισδιάστατα σχήματα, καθώς επίσης και για την παραγωγή μηχανολογικών εξαρτημάτων, καλουπιών, και εργαλείων.

3.2.1. Βασικές κατεργασίες Φραιζαρίσματος

Οι κύριες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση επίπεδων επιφανειών, αυλακώσεων, και σύνθετων γεωμετριών. Στην πράξη, το φραιζάρισμα εφαρμόζεται τόσο σε μικρά εξαρτήματα όσο και σε μεγάλα τμήματα με υψηλή ακρίβεια.

Το περιφερικό φραιζάρισμα είναι μια μέθοδος κοπής που χρησιμοποιείται στη μηχανουργική για την κατεργασία μετάλλων και άλλων υλικών. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση κοπτικών εργαλείων που έχουν δόντια στην περιφέρεια

τους. Τα δόντια του κοπτικού εργαλείου έρχονται σε επαφή με το υλικό που κατεργάζεται και αφαιρούν υλικό από την επιφάνεια του τεμαχίου. Το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με μια συγκεκριμένη ταχύτητα (στροφές ανά λεπτό), το τεμάχιο κινείται προς το κοπτικό εργαλείο, προκαλώντας κοπή του υλικού (εικόνα 3.5). Οι παράμετροι κοπής, όπως η ταχύτητα κοπής και η τροφοδοσία, ρυθμίζονται ανάλογα με το υλικό του τεμαχίου και τις απαιτήσεις της διαδικασίας. [1]Το περιφερικό φραιζάρισμα χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανίες και εφαρμογές. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξαρτημάτων από διάφορα μέταλλα, όπως αλουμίνιο, χάλυβας και χαλκός. Εφαρμόζεται στην παραγωγή εργαλείων και μηχανημάτων που απαιτούν ακριβή διαστάσεις και ανοχές όπως εξαρτήματα αυτοκινήτων ή για την κατασκευή εξαρτημάτων αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών.

Υπολογισμός Παραμέτρων Κοπής

$$\text{Στροφές (N):} \quad Ns = \frac{12V}{\pi D} \quad 3.2.1$$

$$\text{Ταχύτητα Κοπής (V):} \quad V = \pi D Ns \quad 3.2.2$$

$$\text{Τροφοδοσία (fm):} \quad fm = ft Nsn \quad 3.2.3$$

$$\text{Χρόνος Κοπής (Tm):} \quad Tm = \frac{L+LA}{fm} \quad 3.2.4$$

$$\text{Ρυθμός Αφαίρεσης Μετάλλου (MRR):} \quad MRR = \frac{L \cdot W \cdot d}{Tm} \quad 3.2.5$$

Το μήκος προσέγγισης είναι:

$$LA = \sqrt{\left(\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - DOC\right)^2\right)} = \sqrt{d(D-d)} \quad 3.2.6$$

Όπου, D η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου, W το πλάτος του κοπτικού εργαλείου, L το μήκος του, ft η τροφοδοσία ανά δόντι και DOC ή d το βάθος κοπής.[2]

Το μετωπικό φραιζάρισμα είναι μια κοπτική διαδικασία όπου η κοπή πραγματοποιείται από τα δόντια του κοπτικού εργαλείου που βρίσκονται στην επίπεδη επιφάνεια του εργαλείου. Στο μετωπικό φραιζάρισμα, το κοπτικό εργαλείο είναι τοποθετημένο κάθετα ή υπό γωνία σε σχέση με την επιφάνεια του τεμαχίου που κατεργάζεται (εικόνα 3.5). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την παραγωγή επίπεδων, λείων και καλοφτιαγμένων επιφανειών.[1]

Υπολογισμός Παραμέτρων Κοπής. Το LA είναι το μήκος προσέγγισης και σε αυτή την περίπτωση η διαφορά τώρα είναι το Lo , μήκος απομάκρυνσης.

$$\text{Στροφές (N):} \quad Ns = \frac{12V}{\pi D} \quad 3.2.1$$

$$\text{Ταχύτητα Κοπής (V):} \quad V = \pi D Ns \quad 3.2.2$$

$$\text{Τροφοδοσία (fm):} \quad fm = ft Nsn \quad 3.2.3$$

$$\text{Χρόνος Κοπής (Tm):} \quad Tm = \frac{L+LA+Lo}{fm} \quad 3.2.7$$

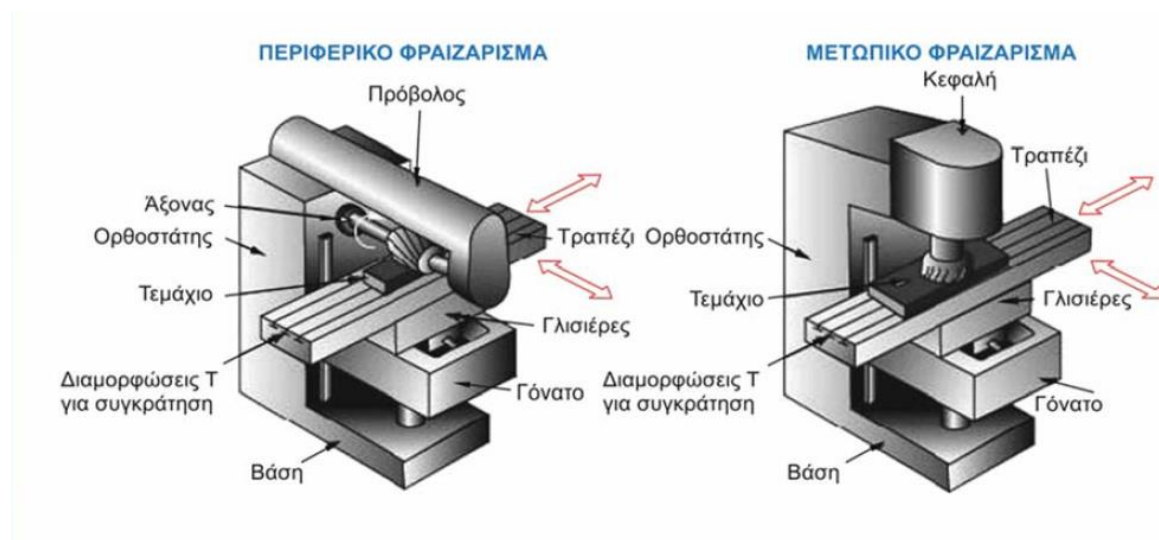
$$\text{Ρυθμός Αφαίρεσης Μετάλλου (MRR):} \quad MRR = \frac{L \cdot W \cdot d}{Tm} \quad 3.2.5$$

Το μήκος προσέγγισης είναι:

$$Lo = LA = \sqrt{W(D - W)}, \text{ for } W < \frac{D}{2} \quad 3.2.8$$

$$Lo = LA = \frac{D}{2} \text{ for } W \geq \frac{D}{2}$$

Όπου, D η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου, W το πλάτος του κοπτικού εργαλείου, L το μήκος του, ft η τροφοδοσία ανά δόντι και DOC ή d το βάθος κοπής.[2]

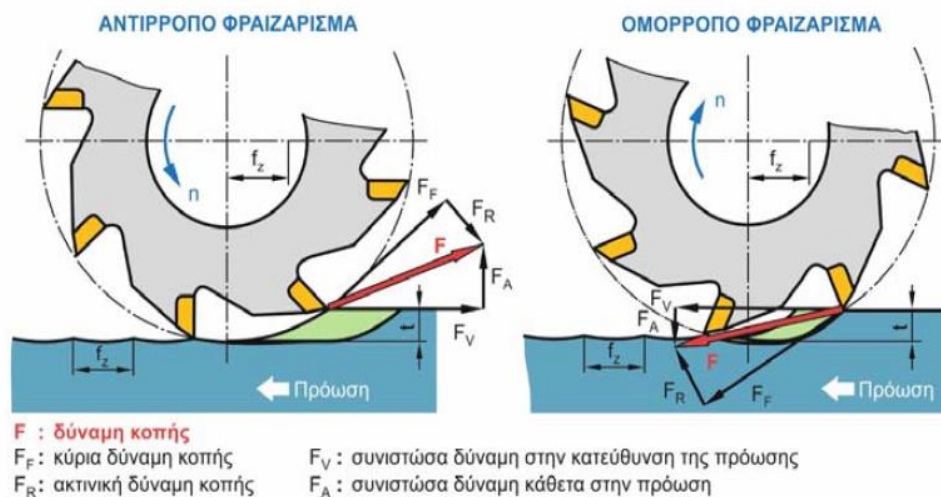


Εικόνα 3-4 Μετωπικό και περιφερικό φραιζάρισμα. [1]

Το περιφερικό και μετωπικό φραιζάρισμα είναι οι δύο βασικές κατηγορίες φραιζαρίσματος με βάση την τον τρόπο αφαίρεσης του υλικού. Ωστόσο υπάρχουν και ειδικές διεργασίες σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιθυμητού τελικού προϊόντος όπως αυλάκωση, πλάγιο φραιζάρισμα και φραιζάρισμα μορφής. [1] Είναι επίσης δυνατή και η κατεργασία φινιρίσματος της επιφάνειας που μπορεί να κυμαίνεται από 60 έως 150 μm . Το φραιζάρισμα είναι μια διακοπτόμενη διαδικασία κοπής. Τα μεμονωμένα δόντια εισέρχονται και εξέρχονται από την κοπή, υποβάλλοντας το εργαλείο σε επιβάρυνση κρούσης, κυκλική θέρμανση και κυκλικές κοπτικές δυνάμεις, στη διαδικασία φρεζαρίσματος ανόδου, η κοπτική δύναμη, F_c , αυξάνεται γρήγορα καθώς το εργαλείο εισέρχεται στο τεμάχιο. [2]

Ένα από τα πιο λεπτά σημεία του φρεζαρίσματος αφορά την κατεύθυνση περιστροφής του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με την κίνηση του τεμαχίου εργασίας. Η διάκριση αυτή εμφανίζεται ως αντίρροπο (up milling), ο παραδοσιακός τρόπος φρεζαρίσματος και ονομάζεται επίσης συμβατικό φρεζάρισμα. Σε αυτή τη μέθοδο, το εργαλείο περιστρέφεται αντίθετα από την κατεύθυνση τροφοδοσίας του τεμαχίου. Αλλά και ως ομόρροπο (down milling), το εργαλείο περιστρέφεται στην

ίδια κατεύθυνση με τον ρυθμό τροφοδοσίας. Ο τρόπος σχηματισμού των αποβλήτων είναι εντελώς διαφορετικός στις δύο περιπτώσεις. Στο αντίρροπο, το απόβλητο είναι πολύ λεπτό στην αρχή, όταν το δόντι έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας, και στη συνέχεια αυξάνεται σε πάχος, φτάνοντας στο μέγιστο όταν το δόντι αποχωρεί από το τεμάχιο. Το εργαλείο τείνει να σπρώχνει το τεμάχιο και να το σηκώνει από το τραπέζι. Αυτή η δράση τείνει να εξαλείφει κάθε χαλάρωση σύνδεσης του κοπτικού εργαλείου στην φρέζας, με αποτέλεσμα μια ομαλή κοπή. Ωστόσο, η δράση αυτή τείνει να χαλαρώσει το τεμάχιο από τη βάση στήριξής του. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες δυνάμεις σφιξίματος, με τον κίνδυνο να παραμορφωθεί το τεμάχιο. Επιπλέον, η ομαλότητα της επιφάνειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την οξύτητα των κοπτικών ακμών. Στο αντίρροπο, τα απόβλητα μπορούν να μεταφερθούν στην πρόσφατα κατεργασμένη επιφάνεια, επιδεινώνοντας το φινίρισμα (κάνοντάς το πιο τραχύ) και προκαλώντας φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Από την άλλη στο ομόρροπο φραιζάρισμα, το μέγιστο πάχος των αποβλήτων εμφανίζεται κοντά στο σημείο όπου το δόντι έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας. Επειδή η σχετική κίνηση τείνει να τραβήξει το τεμάχιο προς το εργαλείο, το κοπτικό δέχεται μεγάλες πιέσεις με κίνδυνο θράυσης. Δεν θα πρέπει ποτέ να επιχειρείται σε μηχανές που δεν είναι σχεδιασμένες για αυτόν τον τύπο φραιζαρίσματος. Σχεδόν όλες οι σύγχρονες φρέζες είναι ικανές να πραγματοποιούν τέτοιες κοπές, ενώ τα κοπτικά πλακίδια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως από κράματα καρβίδιου. Επειδή το υλικό αποδίδει σε μια σχεδόν εφαπτομενική κατεύθυνση στο τέλος της εμπλοκής του δοντιού, υπάρχει λιγότερη τάση για δημιουργία σημαδιών από τα δόντια στην επιφάνεια, και η διαδικασία κοπής είναι πιο ομαλή, με λιγότερους κραδασμούς. Ένα άλλο πλεονέκτημα του ομόρροπου είναι ότι η κοπτική δύναμη τείνει να κρατά το τεμάχιο σταθερό στο τραπέζι της μηχανής, επιτρέποντας τη χρήση μικρότερων δυνάμεων σφιξίματος. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα δόντια του κοπτικού εργαλείου χτυπούν την επιφάνεια του τεμαχίου στην αρχή κάθε αποβλήτου μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα αν το τεμάχιο έχει σκληρή επιφάνεια, όπως συμβαίνει μερικές φορές στα χυτά. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ταχεία φθορά των δοντιών. Τα μέταλλα που σκληρύνονται εύκολα κατά την κατεργασία πρέπει να κατεργάζονται με ομόρροπο φραιζάρισμα. [1],[2]



Σχήμα 3-5 Αντίρροπο και Ομόρροπο φραιζάρισμα. [1]

3.2.2. Κοπτικά Εργαλεία Φραιζαρίσματος

Υπάρχουν διάφορα είδη κοπτικών εργαλείων, όπως εργαλεία μίας κόψης, δίκοποι ή τρίκοποι κοπτήρες, και αυτά μπορεί να είναι ελαφρού ή βαρέως τύπου ανάλογα με την κατεργασία που απαιτείται.

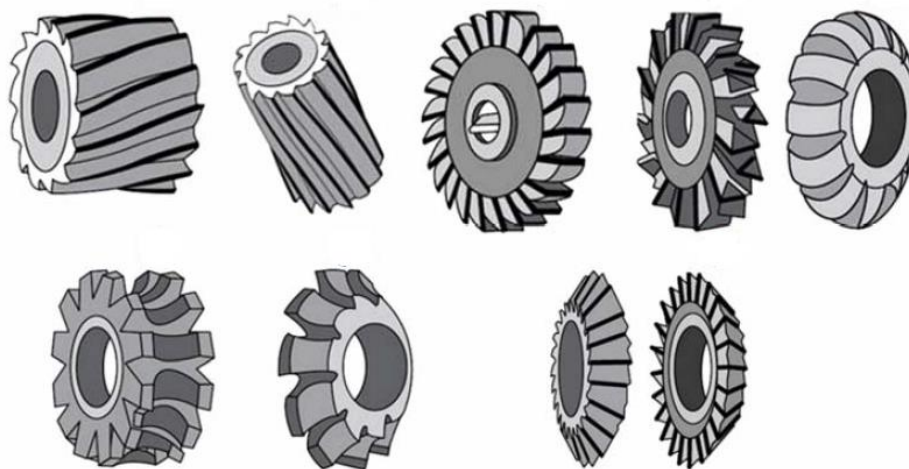
Οι περιφερικοί ή κυλινδρικοί κοπτήρες χρησιμοποιούνται ευρέως για γενικές κατεργασίες. Αυτοί οι κοπτήρες είναι σχεδιασμένοι με ελαφρώς ελικοειδή δόντια, που βελτιώνουν την απόδοση κοπής μειώνοντας την αντίσταση και παρέχοντας καλύτερη εκκένωση των ρινισμάτων. Οι κοπτήρες ελαφρού τύπου είναι ιδανικοί για εφαρμογές γενικής χρήσης, ενώ οι βαρέως τύπου με ελικοειδή δόντια 45° προσφέρουν υψηλή αφαίρεση υλικού και χρησιμοποιούνται για έντονες κατεργασίες με μεγάλη ταχύτητα και δύναμη.

Οι δισκοειδείς κοπτήρες διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τις κατεργασίες που προορίζονται να πραγματοποιήσουν. Οι απλοί τρίκοποι δισκοειδείς κοπτήρες με κοπτικές ακμές στο πλάι και περιφερικά χρησιμοποιούνται για την κατεργασία εγχοπών. Οι τρίκοποι κοπτήρες με δόντια εναλλασσόμενης κατεύθυνσης είναι ειδικά σχεδιασμένοι για πιο απαιτητικές και έντονες κατεργασίες εγχοπών, όπου χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια και αντοχή στις καταπονήσεις.

Οι *κοπτήρες μορφής* είναι εργαλεία ειδικής χρήσης, με γεωμετρία που επιτρέπει τη δημιουργία ειδικών διαμορφώσεων. Υπάρχουν κοπτήρες με κυρτές ακμές που δημιουργούν κοίλο αποτύπωμα, όπως στις αλυσίδες, και κοπτήρες με κοίλες ακμές που δημιουργούν κυρτό αποτύπωμα. Επιπλέον, οι κοπτήρες διαμόρφωσης οδόντωσης χρησιμοποιούνται για την κατεργασία και τη δημιουργία ειδικών προφίλ όπως τα γρανάζια.

Οι *μετωπικοί πρισματικοί* κοπτήρες διαθέτουν κοπτικές ακμές που είναι τοποθετημένες σε κώνο αντί για κύλινδρο. Χρησιμοποιούνται κυρίως για μετωπικό φραιζάρισμα, όπου η ακρίβεια είναι κρίσιμη και η κοπή επιτυγχάνεται με συγκεκριμένες γωνίες και διαμορφώσεις, εξασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

Τα *κονδυλοφόρα εργαλεία* ή *κονδύλια* αποτελούν βασικό εξάρτημα για κατεργασίες φραιζαρίσματος. Αποτελούνται από κυλινδρικό σώμα με κοπτικές ακμές που αναπτύσσονται κατά μήκος της επιφάνειάς τους με γωνίες ελίκωσης που κυμαίνονται μεταξύ 15° και 30°. Τα κονδύλια αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατεργασίες εκχόνδρισης, όπου απαιτείται ταχεία αφαίρεση υλικού, ενώ τα κονδύλια με σφαιρική απόληξη βρίσκουν εφαρμογή και στο φινιρίσμα, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτότητα στην επιφάνεια του υλικού. Η σφαιρική απόληξη στα κονδυλοφόρα εργαλεία είναι ένα χαρακτηριστικό που τα καθιστά ιδανικά για κατεργασίες επιφανειών με σύνθετες καμπύλες, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο και ευελιξία στις κινήσεις του εργαλείου. Στις κατεργασίες φινιρίσματος, το βάθος κοπής είναι συνήθως μικρότερο, και τα εργαλεία αυτά τοποθετούνται με συγκεκριμένη γωνία σε σχέση με την επιφάνεια που κατεργάζονται, επιτυγχάνοντας εξαιρετικά αποτελέσματα σε ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας.



Εικόνα 3-5 Διάφορα σχήματα των κοπτικών εργαλείων της φραιζας. [1]

Η γωνία ελίκωσης στα κοπτικά εργαλεία φραιζαρίσματος παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική απόδοση του εργαλείου. Μεγαλύτερες γωνίες ελίκωσης (π.χ. 45°) βοηθούν στην ομαλότερη κοπή, καθώς μειώνουν τη δύναμη που απαιτείται για την αφαίρεση υλικού και βελτιώνουν τη ροή των ρινισμάτων. Ωστόσο, σε περιπτώσεις σκληρότερων υλικών, η μικρότερη γωνία ελίκωσης μπορεί να είναι προτιμότερη, καθώς προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή στις δυνάμεις κοπής.[1]

Το φαινόμενο της διακοπτόμενης κοπής εξηγεί σε μεγάλο βαθμό γιατί οι γωνίες ελίκωσης των κοπτικών εργαλείων σχεδιάζονται να έχουν μικρές θετικές ή αρνητικές κλίσεις, ιδιαίτερα όταν το υλικό του εργαλείου είναι καρβίδιο ή κεραμικό. Αυτά τα εύθραυστα υλικά τείνουν να είναι πολύ ισχυρά σε συμπίεση, και η αρνητική κλίση έχει ως αποτέλεσμα οι κοπτικές ακμές να βρίσκονται σε κατάσταση συμπίεσης από τις κοπτικές δυνάμεις αντί για τάση. Τα κοπτικά εργαλεία που κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής ταχύτητας (HSS) κατασκευάζονται κυρίως με θετικές κλίσεις, αλλά πρέπει να λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες. Η θετική κλίση τείνει να σηκώνει το τεμάχιο εργασίας, ενώ οι αρνητικές κλίσεις συμπιέζουν το τεμάχιο εργασίας και επιτρέπουν την εκτέλεση βαρύτερων κοπών.[2]

TABLE 24.2

General Recommendations for Milling Operations (Note That These Values Are for a Particular Machining Geometry and Are Often Exceeded in Practice)

Material	Cutting tool	General-purpose starting conditions		Range of conditions	
		Feed, mm/tooth	Speed, m/min	Feed, mm/tooth	Speed, m/min
Low-carbon and free-machining steels	Uncoated carbide, coated carbide, cermets	0.13–0.20	100–472	0.085–0.38	90–425
Alloy steels					
Soft	Uncoated, coated, cermets	0.10–0.18	100–260	0.08–0.30	60–370
Hard	Cermets, PcBN	0.10–0.15	90–220	0.08–0.25	75–460
Cast iron, gray					
Soft	Uncoated, coated, cermets, SiN	0.10–0.20	160–440	0.08–0.38	90–1370
Hard	Cermets, SiN, PcBN	0.10–0.20	120–300	0.08–0.38	90–460
Stainless steel, Austenitic	Uncoated, coated, cermets	0.13–0.18	120–370	0.08–0.38	90–500
High-temperature alloys	Uncoated, coated, cermets, SiN, PcBN	0.10–0.18	30–370	0.08–0.38	30–550
Nickel based					
Titanium alloys	Uncoated, coated, cermets	0.13–0.15	50–60	0.08–0.38	40–140
Aluminum alloys					
Free machining	Uncoated, coated, PCD	0.13–0.23	1200–1460	0.08–0.46	300–3000
High silicon	PCD	0.13	610	0.08–0.38	370–910
Copper alloys	Uncoated, coated, PCD	0.13–0.23	300–760	0.08–0.46	90–1070
Plastics	Uncoated, coated, PCD	0.13–0.23	270–460	0.08–0.46	90–1370

Πίνακας 3-1 Υλικά που χρησιμοποιούνται για τα κοπτικά εργαλεία της φραιζας. [21]

3.2.3. Η Φραιζα

Σήμερα, ποικιλία φραιζών με διάφορα χαρακτηριστικά που εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες κατεργασίας υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία. Παρά την εκτεταμένη χρήση μηχανημάτων CNC (Computer Numerical Control), παραμένουν ευρέως διαδεδομένες και οι χειροκίνητες φραιζες, ιδιαίτερα για μικρές παραγωγές και για κατασκευή πρωτοτύπων. Οι σύγχρονες φραιζες είναι ιδιαίτερα ευέλικτες και ικανές να εκτελούν διεργασίες με υψηλή ακρίβεια και συχνότητα.[21]

Οι συμβατικές φραιζες είναι οι πιο συνηθισμένες και χρησιμοποιούνται για γενικής χρήσης κατεργασίες. Το κυρίως χαρακτηριστικό τους είναι η κινητή στήριξη του τραπεζιού εργασίας, που επιτρέπει την κατεργασία του τεμαχίου σε διαφορετικούς άξονες. Το κοπτικό εργαλείο μπορεί να είναι τοποθετημένο είτε οριζόντια, για περιφερειακό φραιζάρισμα, είτε κάθετα για μετωπικές διεργασίες φραιζαρίσματος καθώς και για διάτρηση και διεύρυνση οπών. Η κεφαλή (Head) Περιλαμβάνει τον άξονα και τους συγκρατητές του κοπτικού εργαλείου, και στις

κάθετες μηχανές μπορεί να περιστραφεί για κατεργασίες με κλίση. Μπορεί επίσης να έχουν περιστρεφόμενο τραπέζι και να είναι εξοπλισμένες με ένα ή περισσότερα κεφάλια για μετωπικές κατεργασίες φραιζαρίσματος. Το περιστρεφόμενο τραπέζι επιτρέπει την κατεργασία του τεμαχίου σε διάφορες γωνίες, καθιστώντας αυτές τις μηχανές κατάλληλες για φραιζάρισμα πολύπλοκων επιφανειών.[21]

Φραιζες τύπου κλίνης, είναι πιο στιβαρές και χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές υψηλής παραγωγικότητας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές, το τραπέζι εργασίας είναι τοποθετημένο άμεσα πάνω στην κλίνη, και η κίνησή του περιορίζεται μόνο κατά μήκος. Αυτές οι φραιζες μπορεί να διαθέτουν έναν ή περισσότερους άξονες, οριζόντιους ή κατακόρυφους, και χρησιμοποιούνται συχνά για την ταυτόχρονη κατεργασία δύο ή περισσότερων επιφανειών του τεμαχίου.[21]

Οι CNC φραιζες (ψηφιακής καθοδήγησης) οι οποίες διαθέτουν αυτόματη αλλαγή εργαλείου ονομάζονται κέντρα κατεργασίας και κατατάσσονται με βάση το πλήθος των αξόνων κίνησης. Σε περιπτώσεις όπου η καθοδήγηση του τραπεζιού πραγματοποιείται ταυτόχρονα και στους τρεις άξονες (δύο οριζόντιους και έναν κατακόρυφο), η φραιζα κατατάσσεται στις τριαξονικές (3-axis) φρέζες. Πέρα από τις φρέζες με τρεις άξονες, υπάρχουν και πιο σύνθετα κέντρα κατεργασίας που ενσωματώνουν περιστροφική κίνηση του τραπεζιού ή του άξονα εργαλείου. Ανάλογα με το πλήθος των πρόσθετων περιστροφικών αξόνων, μια φρέζα μπορεί να είναι τεσσάρων, πέντε ή και έξι αξόνων. [1]

Η πολυπλοκότητα και οι δυνατότητες των σύγχρονων κέντρων κατεργασίας τα καθιστούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης βιομηχανικής παραγωγής, προσφέροντας ευελιξία στην κατασκευή και τη δυνατότητα επεξεργασίας πολύπλοκων γεωμετριών με ακρίβεια και ταχύτητα. [2]

3.3 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η βιωσιμότητα στην βιομηχανία απασχολεί έντονα την σύγχρονη βιβλιογραφία τόσο για περιβαλλοντικούς αλλά και λόγους κόστους . Αφορούν κυρίως την κατανάλωση ενέργειας , τα ανανεώσιμα υλικά και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Όσον αφορά την ενέργεια, η επιδίωξη της ενεργειακής αποδοτικότητας στις κατεργασίες αποτελεί βασικό παράγοντα της βιώσιμης βιομηχανίας. Ο τομέας καταναλώνει ένα σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας ενέργειας και ευθύνεται για το 29% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια, επομένως η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στις διαδικασίες κατεργασίας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.[27] Ακόμη και με την συνεχώς αυξανόμενη λειτουργία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας η χρήση ορυκτών καυσίμων αναμένεται να αυξηθεί στα 35,4 GigaTons μέχρι το 2035.[28] Γενικά, καταναλώνεται σημαντική ποσότητα ενέργειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετατροπής των πρώτων υλών σε προϊόντα, ενώ παράγεται επίσης μεγάλο ποσό αποβλήτων. Οι διαδικασίες κατεργασίας καταναλώνουν σημαντική ενέργεια, συχνά με χαμηλή αποδοτικότητα. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μη κοπτικές διαδικασίες σε σύγχρονες εργαλειομηχανές καταναλώνουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας, ενώ η ίδια η κατεργασία συνεισφέρει μόνο περίπου το 15% στην συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται. [29] Έτσι οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας αποτελούν μια σημαντική λύση, αλλά οι οικονομικές προκλήσεις και οι περιορισμένες παγκόσμιες δυνατότητες περιορίζουν τις επιπτώσεις της, καθιστώντας τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας μια σημαντική στρατηγική. Γενικά, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των εργαλειομηχανών. Η μία αφορά το σχεδιασμό εργαλειομηχανών που είναι ενεργειακά αποδοτικές και χρησιμοποιούν τα υλικά με αποδοτικό τρόπο. Η άλλη επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της ίδιας της διαδικασίας κατεργασίας προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας. Με την λειτουργία αυτών των στρατηγικών μπορεί να επιτευχθεί μείωση μέχρι και 45% στην κατανάλωση ενέργειας . Πιο συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής μπορεί να οδηγήσει σε 40%, της κίνησης των κοπτικών εργαλείων στο 50% και των μη κοπτικών διαδικασιών στο 30% μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα σημαντική μείωση δείχνει να προσφέρει και η χρήση του AI στο 30%. [27] Με την αξιοποίηση τεχνικών λιτής διοίκησης (lean production) και εργαλεία όπως το SMED (Single Minute Exchange of Dies) μπορεί να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Με βάση πραγματικά δεδομένα , δημιουργήθηκε ένας χάρτης ροής αξίας (VSM) που ανέδειξε τόσο τους

χρόνους λειτουργίας όσο και τους χρόνους αδράνειας. Μετά τον εντοπισμό των πηγών σπατάλης, με την αξιοποίηση των τεχνικών λιτής διοίκησης επιλέχθηκε η αντικατάσταση συμβατικών τόνων SN320 με CNC, για την μείωση ανθρωπίνων λαθών και άσκοπων κινήσεων κατά την διάρκεια της παραγωγής για την κατασκευή των εξαρτημάτων. Η υλοποίηση της επιλεγμένης λύσης οδήγησε σε βελτίωση της αποδοτικότητας κατά 90,93%, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο παραγωγής.[30] Σε άλλες περιπτώσεις όπως στην παραγωγή στροφάλων και πτερυγίων τουρμπίνας. Οι μέθοδοι κατεργασίας απορρίπτουν έως και το 97% της πρώτης ύλης κατά τη διάρκεια των διαδικασιών σχηματισμού, οι οποίες μπορεί να διαρκέσουν ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες, ενώ καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας και πόρων και η συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα αυτών των διαδικασιών συνήθως παραμένει κάτω από το 30%. [31] Είναι σαφές λοιπόν, το πώς τεχνικές αύξησης της αποδοτικότητας των κατεργασιών μπορούν να συμβάλουν στην δημιουργία μίας πιο βιώσιμης βιομηχανίας μέσω της μείωσης κατανάλωσης ενέργειας πόρων και κατ' επέκταση και του οικολογικού αποτυπώματος.

Εκτός από την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μία άλλη βιώσιμη λύση προκύπτει από τα κοπτικά υγρά. Με την εξέλιξη τεχνικών λίπανσης, όπως τα λιπαντικά ελάχιστης ποσότητας (MQL), τα νανορευστά και η ξηρή κατεργασία, να προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις από τα γαλακτώματα κοπής. Αυτές οι μέθοδοι υπόσχονται μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, της ενεργειακής κατανάλωσης και βελτίωση της ασφάλειας. Με την χρήση των MQL, χρησιμοποιείται περιορισμένη ποσότητα υγρού κοπής (συνήθως 10-100 ml/h, σε αντίθεση με τα 30.000-60.000 ml/h που χρησιμοποιούνται στην ψύξη με πλημμυρισμό), η οποία εστιάζει στην επιφάνεια εργαλείου και τεμαχίου, με την προσθήκη συμπιεσμένου αέρα. [32] Τα MQL και ειδικότερα σε με την χρήση νανορευστών ως βασικό υγρό μπορούν να προσφέρουν χαμηλότερη απαγωγή θερμότητας, καλύτερη κατεργασμένη επιφάνεια και μειωμένη φθορά εργαλείων βελτιώνοντας την διάρκεια ζωής τους. [33] Λοιπόν, είναι σαφές τα οικολογικά πλεονεκτήματα από την μείωση της εξόρυξης μέχρι και την μείωση χρήσης κοπτικών εργαλείων ως αποτέλεσμα την αυξημένης διάρκειας ζωής τους.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε όλη την διαδικασία που έλαβε χώρα στο εργαστήριο μηχανουργικών κατεργασιών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα πειράματα αφορούν διαμήκη εξωτερικής τórνευσης με την απουσία κοπτικού υγρού, σταθερή ταχύτητα κοπής στα $V_c=200$ m/min και βάθος κοπής $A_p=2,5$ mm . Ο υπολογισμός της ταχύτητας κοπής εξαρτάται από τις στροφές και τη διάμετρο του δοκιμίου και δίνεται από τον τύπο :

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot N}{1000}$$

Σκοπός του πειράματος είναι η μέτρηση των συνιστωσών των δυνάμεων σε κάθε μία από τις περιπτώσεις .

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

Πείραμα 1 : Στο πείραμα 1 έλαβε χώρα δοκίμιο διαμέτρου $D=28,5$ mm με πρόωση $f=0,1$ mm και $N=2233$ rpm.

Πείραμα 2 : Στο πείραμα 2 έλαβε χώρα δοκίμιο διαμέτρου $D=28,5$ mm με πρόωση $f=0,2$ mm και $N=2233$ rpm.

Πείραμα 1 : Στο πείραμα 1 έλαβε χώρα δοκίμιο διαμέτρου $D=133$ mm με πρόωση $f=0,1$ mm και $N=478$ rpm.

Η μέτρηση των δυνάμεων στα πειράματα έγινε με την χρήση δυναμόμετρου και η διάρκεια σε όλες τις περιπτώσεις ήταν $t=10$ s . Το δυναμόμετρο προσαρμόστηκε στο εργαλειοφορείο του τόρνου αυτό που μετρούσε δηλαδή ήταν οι συνιστώσες των δυνάμεων που δέχτηκε το κοπτικό εργαλείο όχι το δοκίμιο, αν και οι δυνάμεις αυτές είναι σχεδόν ίσες.

4.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ

Το δυναμόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι το KISTLER type 9257B . Αποτελείται από μια επάνω πλάκα, όπου εφαρμόζεται η δύναμη που πρόκειται να μετρηθεί, η οποία στηρίζεται σε τέσσερις αισθητήρες δύναμης που ο

καθένας περιέχει τρία ζεύγη από πλάκες κρυστάλλου χαλαζία, ένα ζεύγος είναι ευαίσθητο στην πίεση στον άξονα z, τα άλλα δύο είναι ευαίσθητα στις διατμητικές δυνάμεις στους άξονες x και y αντίστοιχα. Οι κρύσταλλοι χαλαζία δημιουργούν ηλεκτρικό φορτίο όταν εφαρμόζεται μια τάση, που είναι ανάλογο με το μέγεθος και την κατεύθυνση της δύναμης. Οι αισθητήρες διασπούν τη δύναμη στις τρεις συνιστώσες F_x , F_y , και F_z .



Εικόνα 4-1 Δυναμόμετρο KISTLER.(9)

Τα ηλεκτρικά σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες μεταφέρονται μέσω καλωδίων στους ενισχυτές φορτίου, οι οποίοι μετατρέπουν αυτά τα σήματα σε μετρήσιμες τάσεις. Η πολικότητα των σημάτων υποδεικνύει την κατεύθυνση της δύναμης (θετική ή αρνητική).

4.3 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ

Τα πειράματα έγιναν στον τόρνο Colchester Triumph 2500 βρετανικής κατασκευής.



Εικόνα 4-2 Τόρνος Colchester Triumph 2500. (5)

Τεχνικά χαρακτηριστικά :	
Διαστάσεις	L=2500mm,H=1300mm, W=1100mm
Ύψος Κέντρου Chuck	1050mm
Απόσταση Μεταξύ Κέντρων	1250mm
Διάμετρος Κατεργασίας στο Κρεβάτι	400mm
Ισχύς	7,5 Kw (10Hp)
Πρόωση	0,036-1,2 mm
Ταχύτητα Περιστροφής	14-2500 rpm
Βάρος	1450 kg

Πίνακας 4-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου.

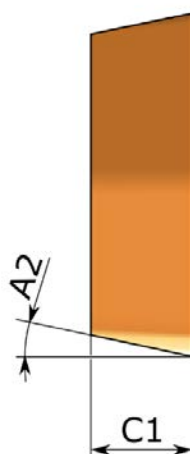
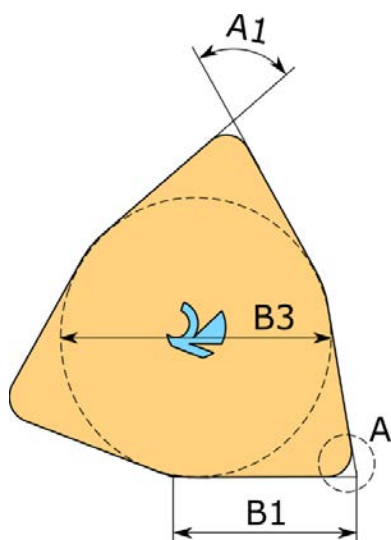
4.4 ΚΟΠΤΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ

Το κοπτικό πλακίδιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το WNMG 08 04 08-PM 4325, το όριο διαρροής τέτοιων υλικών είναι περίπου 3500 MPa. [40] Ενώ η μανέλα (εργαλειοδέτης) είναι η MWLNR 2525M08.



Εικόνα 4-3 Κοπτικά Εργαλεία. (6),(7)

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά :



A1	80°
A2	0°
B1	8,687mm
B3	12,7mm
C1	4,763mm
A	0,794 mm

Σχήμα 4-1 Κοπτικό πλακίδιο. (8)

Πίνακας 4-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά. (8)

Το κοπτικό πλακίδιο έχει επίστρωση CVD με $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, ενώ η μανέλα έχει γωνία κλίσης -6° . Τέτοιες επιστρώσεις εμφανίζουν σκληρότητα περίπου 2200-2300 HV [39] και εμπειρικά μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά το όριο διαρροής ως $(2250 \cdot 9,81)/3 = 7357,5 \text{ MPa}$.[15]

4.5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το δοκίμιο της κατεργασία είναι χάλυβας χρώμιου-μολυβδαίνιου ο 42CrMo4 σκληρυμένος που έχει υποστεί επαναφορά. Με χημική σύσταση :

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0.43	0.74	0.23	0.009	0.029	1.05	0,11	0.21	0.21	0.029

Πίνακας 4-3 Χημική σύσταση δοκιμίου.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ [34]:

Σκληρότητα Rockwell (HRC)	1,5-50mm/36,5 - 59
Σκληρότητα Brinell (HB)	217
Πυκνότητα	7,83 g/cm ³
Επιμήκυνση A5	19.6 %
Όριο διαρροής	> 550 MPa
Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού	800-950 MPa

Πίνακας 4-4 Ιδιότητες υλικού.

4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Οι τρεις συνιστώσες δύναμης είναι η κύρια δύναμη κοπής F_c , η δύναμη πρόωσης F_f , και η δύναμη απώθησης F_p . Ο χρόνος κατεργασίας είναι 10s η ταχύτητα κοπής 200ζm/min Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με της χρήση του excel.

Πείραμα 1 :

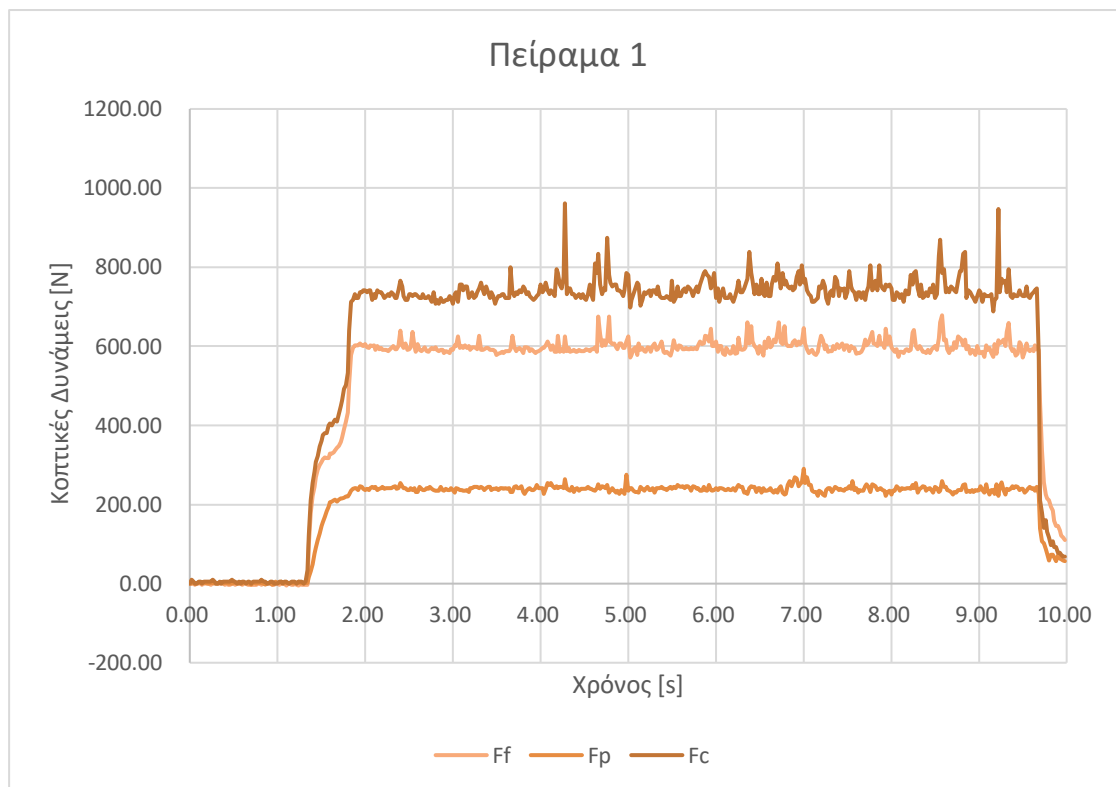
Ταχύτητα κοπής	Αριθμός στροφών	Πρόωση	Διάμετρος τεμαχίου	Χρόνος κοπής
200 (m/min)	2233 (rpm)	0,1 mm	28,5mm	10 s

Πίνακας 4-5 Μεταβλητές πειράματος.

Μέση συνιστώσα δυνάμεων κοπής :

Δύναμη κοπής F_c	Δύναμη πρόωσης F_f	Δύναμη απώθησης F_p
743,28 (N)	598,89 (N)	239,71 (N)

Πίνακας 4-6 Μέσες συνιστώσες δυνάμεων.



Διάγραμμα 4-1

Πείραμα 2:

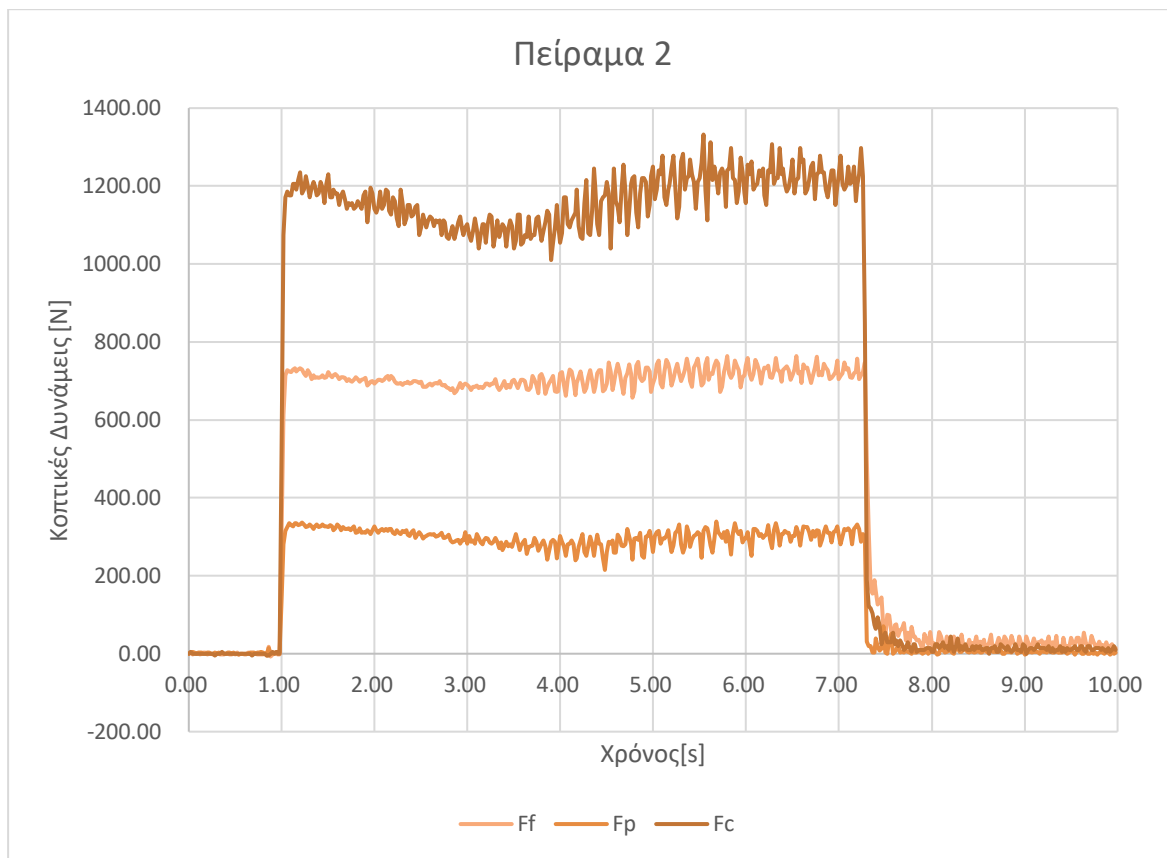
Ταχύτητα κοπής	Αριθμός στροφών	Πρόωση	Διάμετρος τεμαχίου	Χρόνος κοπής
200 (m/min)	2233 (rpm)	0,2 mm	28,5mm	10 s

Πίνακας 4-7 Μεταβλητές πειράματος.

Μέση συνιστώσα δυνάμεων κοπής :

Δύναμη κοπής F_c	Δύναμη πρόωσης F_f	Δύναμη απώθησης F_p
1165,63 (N)	708,67 (N)	299,59 (N)

Πίνακας 4-8 Μέσες συνιστώσες δυνάμεων.



Διάγραμμα 4-2

Πείραμα 3:

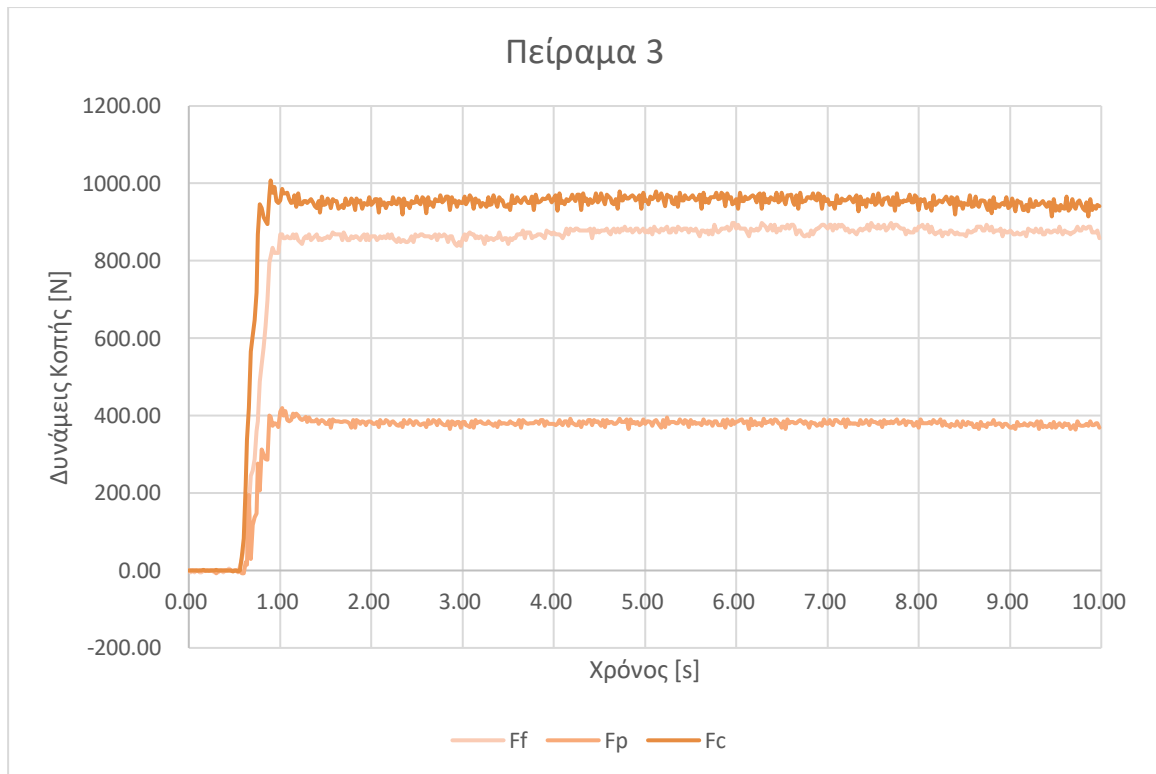
Ταχύτητα κοπής	Αριθμός στροφών	Πρόωση	Διάμετρος τεμαχίου	Χρόνος κοπής
200 (m/min)	478 (rpm)	0,1 mm	133 mm	10 s

Πίνακας 4-9 Μεταβλητές πειράματος.

Μέση συνιστώσα δυνάμεων κοπής :

Δύναμη κοπής Fc	Δύναμη πρόωσης Ff	Δύναμη απώθησης Fp
953,89 (N)	872,6 (N)	380,97 (N)

Πίνακας 4-10 Μέσες συνιστώσες δυνάμεων.



Διάγραμμα 4-3

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ANSYS

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι υπολογισμοί που αφορούν την παραμόρφωση και τις τάσεις που δέχεται το κοπτικό εργαλείο κατά την διάρκεια των κατεργασιών. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν με την χρήση το λογισμικού ANSYS student edition 2024R2. Δημιουργήθηκαν προσομοιώσεις για κάθε πείραμα που έλαβε χώρα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των δυνάμεων και των τεχνικών χαρακτηριστικών της κατεργασίας.

5.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ANSYS

Το ANSYS είναι ένα υπολογιστικό λογισμικό που χρησιμοποιεί μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (FEA/FEM) για την επίλυση προβλημάτων με σύνθετη γεωμετρία. Η μοντελοποίηση στο ANSYS απαιτεί τα εξής βήματα :

- Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (Engineering Data).
- Κατασκευή γεωμετρίας (Geometry).
- Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών (Mech).
- Ορισμός των συνοριακών συνθηκών και φορτίων (Setup)
- Επίλυση (Solutions)
- Αποτελέσματα (Results)

Το ANSYS μπορεί να προσομοιώσει ηλεκτρομαγνητικά μοντέλα, ροών (CFX), δυναμικά, στατικά , θερμοδυναμικά, μοντέλα ταλαντώσεων αλλά, και συνδυασμούς διαφορετικών μοντέλων. Τα πειράματα που διεξήχθησαν θα προσεγγισθούν με στατικά μοντέλα καθώς οι δυνάμεις που ασκούνται στο κοπτικό εργαλείο είναι κατά προσέγγιση σταθερές.

Ο ορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών ποικίλει με βάσει το μοντέλο διερεύνησης για το παρόν στατικό μοντέλο οι παράγοντες που παίζουν ρόλο είναι ο συντελεστής Young, ο λόγος Poisson και αν το υλικό είναι ισοεντροπικό.

Για την κατασκευή της γεωμετρίας υπάρχουν σχεδιαστικά εργαλεία CAD στο ANSYS στα οποία μπορεί κανείς να σχεδιάσει 2D ή 3D σχέδια και στην συνέχεια να τα χρησιμοποιήσει ως μοντέλα. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα εισαγωγής γεωμετρίας που έχει σχεδιαστεί σε άλλο λογισμικό σε μορφές *.stp, *.step, *.stl, *.igs, *.iges .

Εφ' όσον έχουν οριστεί οι ιδιότητες του υλικού και η γεωμετρία από εδώ και πέρα τα υπόλοιπα βήματα πραγματοποιούνται στο περιβάλλον του ANSYS mechanical, αρχικά ορίζεται το mesh. Οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων χωρίζουν μία γεωμετρία σε πεπερασμένα στοιχεία (Finite Elements), κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους (nodes). Ο αριθμός των κόμβων ανά στοιχείο εξαρτάται από το βαθμό του προβλήματος (Γραμμικό, 2^{ου} βαθμού, κτλ.). Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των στοιχείων τόσο ακριβέστερη θα είναι η προσομοίωση. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων και άρα και των κόμβων αυξάνεται και ο αριθμός των εξισώσεων που πρέπει να λύσει το λογισμικό . Η ακρίβεια εξαρτάται επίσης από το σχήμα των στοιχείων , αν είναι τετραγωνικής διατομής έχουν γενικά το μικρότερο σφάλμα, όταν στο mesh υπάρχει μεγάλος αριθμός στοιχείων τετράεδρων ή τριγωνικής διατομής η ακρίβεια είναι γενικά μικρότερη. Η απόκλιση αυτή μεταξύ της ποιότητας των στοιχείων ονομάζεται skewness (σκέδαση). Το skewness ενός στοιχείου μπορεί να είναι ένας αριθμός μεταξύ 0-1, όσο μικρότερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο το καλύτερο γενικά τα στοιχεία με μέτρο <0,25 θεωρούνται ιδανικά οι τιμές μεταξύ 0,25-0,5 είναι αποδεκτές ενώ μετά το 0,5 για ένα σημαντικό ποσοστό στοιχείων αρχίζει να αλλοιώνεται η ακρίβεια. Στο Ansys υπάρχει γράφημα σχετικά με την απόκλιση της ποιότητας των στοιχείων. Με το mesh λοιπόν , ορίζουμε όλες αυτές τις παραμέτρους το μέγεθος των στοιχείων (άρα και τον αριθμό), το σχήμα τους (έως ένα βαθμό) και το βαθμό (άρα και τον αριθμό των κόμβων ανά στοιχείο).

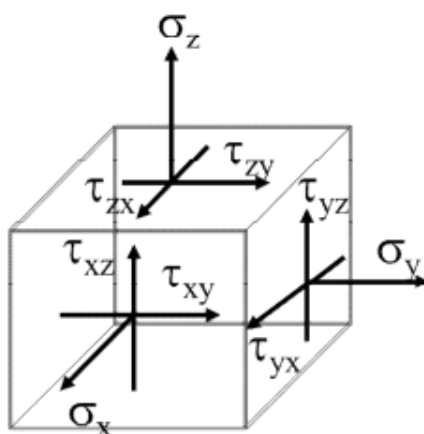
Το Setup , είναι ουσιαστικά ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών και η εισαγωγή των φορτίων που διέπουν το πρόβλημα.

Η λύση προκύπτει από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων του προβλήματος σε κάθε κόμβο και στην συνέχεια με την μέθοδο της παρεμβολής προκύπτουν οι ενδιάμεσες λύσεις.

Ακόμα και όταν το πρόβλημα έχει λυθεί ο χρήστης δεν έχει λάβει αποτελέσματα θα πρέπει μέσω του ANSYS mechanical να ζητήσει συγκεκριμένα αποτελέσματα , αυτά μπορεί να είναι γραφήματα ή προσομοιώσεις από τάσεις, παραμορφώσεις . Υπάρχει ακόμη και η δυνατότητα απεικόνισης αποτελεσμάτων σε συγκεκριμένο κομμάτι του δοκιμίου ή την μέγιστης/ελάχιστης τιμής κτλ. . [35]

5.2 ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Αν πάρουμε ένα απειροστό στοιχείο διαστάσεων $\Delta x, \Delta y, \Delta z$:



Σχήμα 5-1 Τάσεις απειροστού. [37]

Έχουμε εξισώσεις ισορροπίας στις τρεις κατευθύνσεις :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \cancel{f_x} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \cancel{f_y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \cancel{f_z} &= 0 \end{aligned}$$

Θεωρούμε τις δυνάμεις της βαρύτητας ασήμαντες στο πρόβλημα μας. Στη συνέχεια από το γενικευμένο νόμο του Hooke έχουμε :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad , \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad , \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad , \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}$$

Άρα προκύπτουν σε μητρική μορφή :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ & & & & 2(1+\nu) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}$$

Επιπρόσθετες εξισώσεις παραμορφώσεων :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned}$$

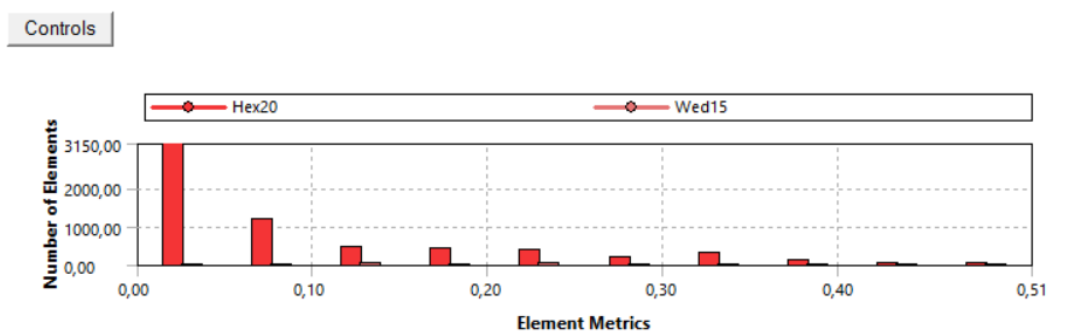
Έτσι καταλήγουμε με 3 εξισώσεις ισορροπίας, 6 εξισώσεις από τον γενικευμένο νόμο του Hooke και 6 εξισώσεις παραμορφώσεων. Ενώ έχουμε 6 άγνωστες τάσεις , 6 άγνωστες παραμορφώσεις και 3 άγνωστους μετατόπισης. Συνολικά 15 εξισώσεις και 15 άγνωστοι, δηλαδή το ANSYS έχει να λύσει σύστημα εξισώσεων 15x15 για κάθε κόμβο, αν το mesh έχει 2000 κόμβους θα πρέπει να λύσει σύστημα 30000x30000 εξισώσεων. [36],[37]

5.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήθηκε το WNMG 08 04 08-PM 4325 που αποτελείται από καρβίδιο του βολφραμίου με επίστρωση CVD TiCN+Al₂O₃+TiN και ISO 4325. Το μέτρο ελαστικότητας είναι περίπου 580 GPa , ενώ ο λόγος Poisson είναι 0.23 [1],[38] . Η γεωμετρία του είναι γνωστή από προηγούμενο κεφάλαιο.

Το μέγεθος των στοιχείων στο mesh ορίστηκε ως 0,5 mm με αποτέλεσμα να μας δώσει 29449 κόμβους και 6350 στοιχεία.

Με skewness :



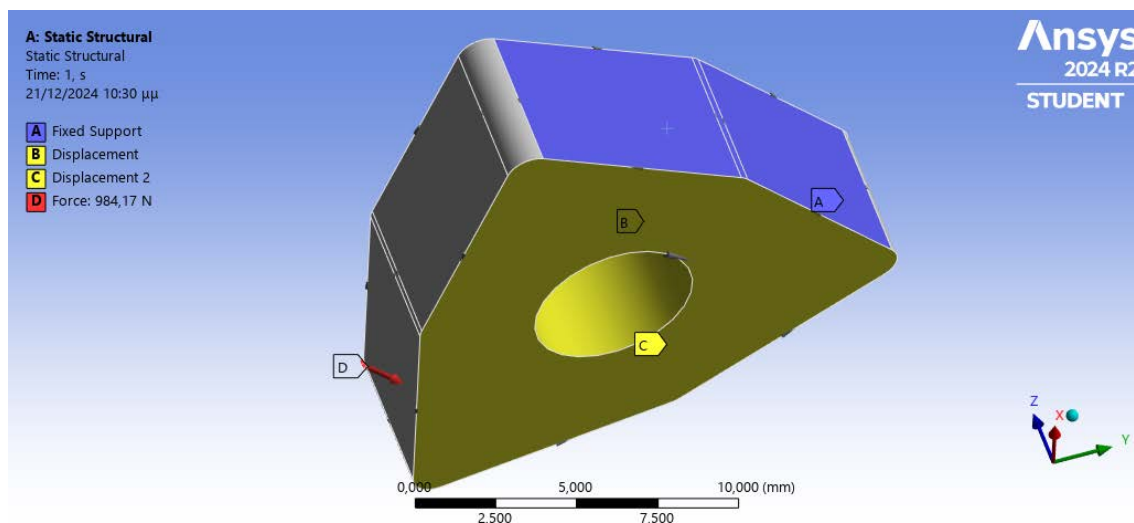
Διάγραμμα 5-1 Skewness.

Οι συνοριακές συνθήκες στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι τρεις. Ένα fixed support και δύο displacement supports στις κίτρινες επιφάνειες :

1. Fixed support (A): Στην μπλε επιφάνεια όπως φαίνεται στην εικόνα 5-1, που προκύπτει από την σύσφιξη του κοπτικού εργαλείου στον εργαλειοδέτη. Εφαρμόζεται συνθήκη μηδενικής μετατόπισης και περιστροφής, καθώς το πλακίδιο είναι σταθερά σφιγμένο.
2. Displacement support (B): Στην επιφάνεια της οπής που αποτρέπει την μετατόπιση στους άξονες x και y. Η συνθήκη αυτή προσομοιώνει την αποτροπή οριζόντιας κίνησης που προκύπτει από την επαφή της επιφάνειας με τον εργαλειοδέτη.
3. Displacement support δεύτερο (C): Στην κάτω επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον εργαλειοδέτη και απαγορεύει την κίνηση στον άξονα -z.

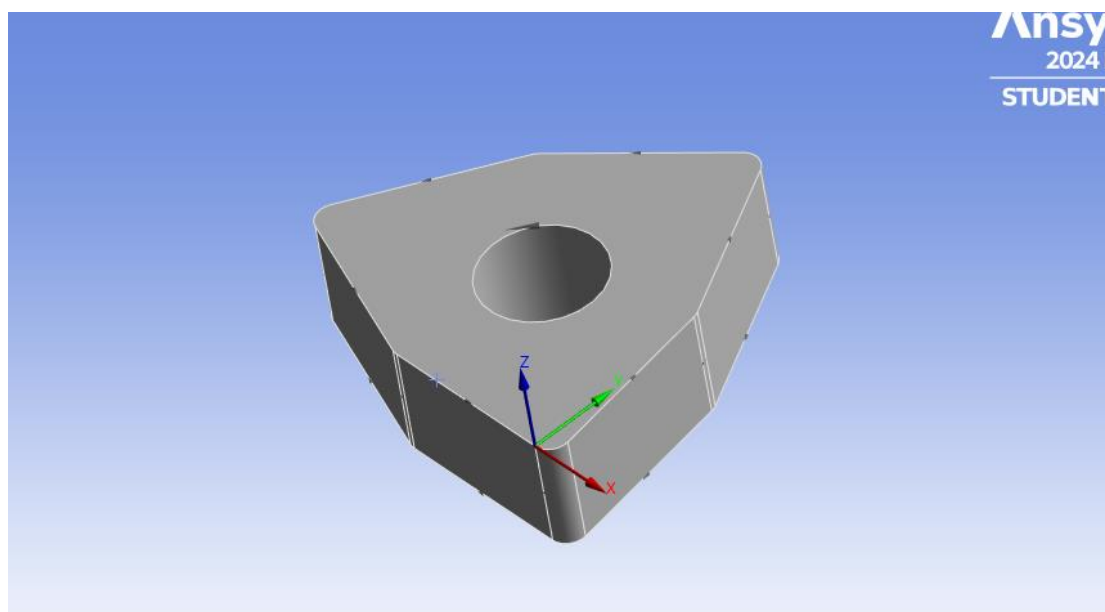
Οι δύο τελευταίες συνοριακές συνθήκες προκύπτουν από το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες επιφάνειες έρχονται σε επαφή με την μανέλα η οποία είναι στερεωμένη και άρα περιορίζονται οι κινήσεις τους. Οι παραπάνω συνθήκες

εξασφαλίζουν την πιστή αναπαράσταση των περιορισμών που υφίστανται το κοπτικό πλακίδιο κατά την διάρκεια της τórνευσης.



Εικόνα 5-1 Συνοριακές συνθήκες προβλήματος.

Για την εφαρμογή των τάσεων υπάρχουν τρεις παράμετροι, το σημείο εφαρμογής, η κατεύθυνση και το μέτρο. Το σημείο εφαρμογής είναι στην μύτη του κοπτικού εργαλείου που έχετε σε επαφή με το υλικό. Το μέτρο είναι οι μέσες τιμές των συνισταμένων των δυνάμεων που βρήκαμε στα πειράματα. Τέλος, οι κατευθύνσεις έχουν ως εξής το σύστημα συντεταγμένων τις εικόνες 5-2 αν ο άξονας z περιστραφεί 5° και ο $y -6^\circ$ θα προκύψει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων x', y', z' .



Εικόνα 5-2 Σύστημα συντεταγμένων.

Οι συνιστώσες των δυνάμεων θα είναι η F_c στην κατεύθυνση $-z'$, η F_f στην $-x'$ και η F_p στην y' . Αυτό συμβαίνει επειδή μεταξύ το κοπτικού εργαλείου και του δοκιμίου σχηματίζεται γωνία 5 μοιρών ενώ ο εργαλειοδέτης έχει -6 μοίρες κλίση.

5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

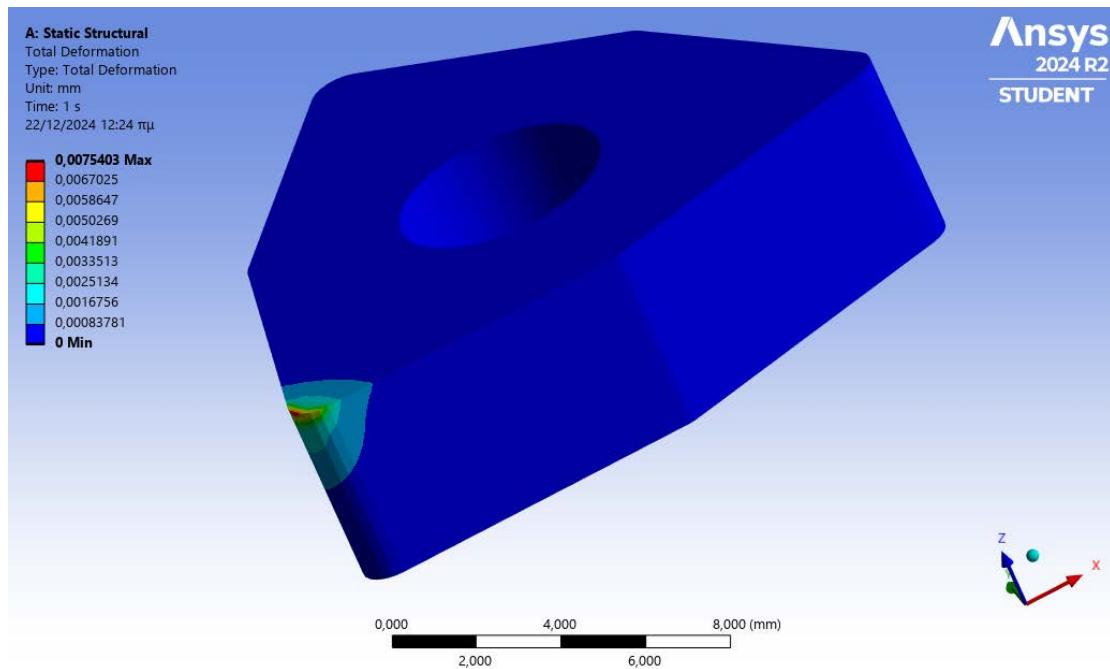
Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τις τρεις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ANSYS. Σκοπός των προσομοιώσεων αυτών είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς του μοντέλου υπό τις συνθήκες φόρτισης και συνοριακών συνθηκών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα επικεντρώνονται σε τρία βασικά σημεία: τη συνολική παραμόρφωση, τις αντιδράσεις των δυνάμεων στις συνοριακές συνθήκες και τις τάσεις, διατμητικές και ορθές. Για κάθε προσομοίωση, τα σχετικά αποτελέσματα αναλύονται και παρατίθενται σημαντικά γραφήματα και διαγράμματα για καλύτερη κατανόηση.

Πείραμα 1 :

Δύναμη κοπής F_c	Δύναμη πρόωσης F_f	Δύναμη απώθησης F_p
743,28 (N)	598,89 (N)	239,71 (N)

Πίνακας 5-1 Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής του Πειράματος 1.

Η συνολική παραμόρφωση της δομής υπό τις εφαρμοσμένες δυνάμεις στο πείραμα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3. Οι περιοχές με υψηλότερη παραμόρφωση τονίζονται με διαφορετικό χρώμα για να δείξουν τα σημεία όπου η δομή επηρεάζεται περισσότερο από τις δυνάμεις.



Εικόνα 5-3 Συνολική παραμόρφωση πειράματος 1.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα η μέγιστη μετατόπιση είναι 7,5403 μm εφαρμόζεται στην μύτη της επιφάνειας, αναμενόμενο αποτέλεσμα βάσει της άσκηση του φορτίου. Επίσης η τάση Von Mises υπολογίστηκε μέσω του Ansys στα 8740 MPa.

Οι αντιδράσεις στις συνοριακές συνθήκες έχουν ως εξής στην επιφάνεια fixed support με εμβαδόν 73,722 mm^2 και με το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας 5.2.:

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	44,048	-50,498	-6,464	67,32

Πίνακας 5-2 Αντιδράσεις στο fixed support.

Στο displacement support B (επιφάνεια οπής) με εμβαδόν 76,923 mm^2 :

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	492,75	-143,15	-0,219	513,12

Πίνακας 5-3 Αντιδράσεις στο πρώτο displacement (οπή).

Στο displacement support C (κάτω επιφάνεια σώματος) με εμβαδόν 144,23 mm² :

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	11,101	-5,1101	808,48	808,58

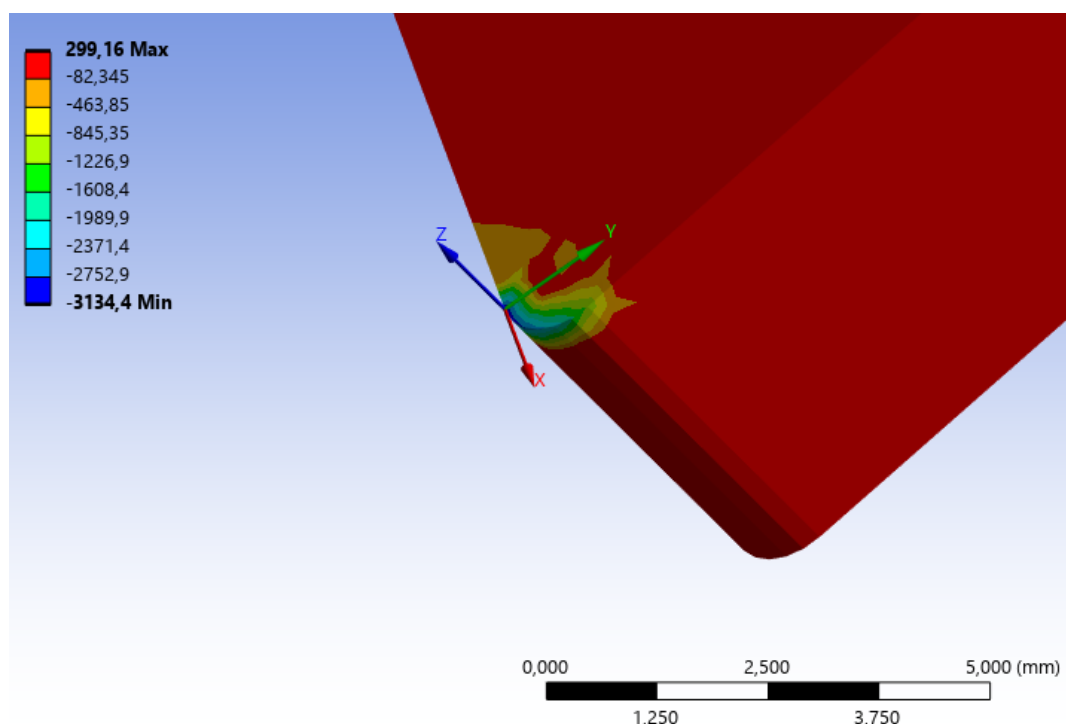
Πίνακας 5-4 Αντιδράσεις στο δεύτερο displacement (κάτω επιφάνεια).

Παρατηρείται λοιπόν ότι περισσότερο ρόλο παίζουν οι δύο displacement συνοριακές συνθήκες παρά το fixed support. Αυτό φαίνεται να συμβαίνει επειδή βρίσκονται κοντινότερα στην περιοχή επαφής της δύναμης.

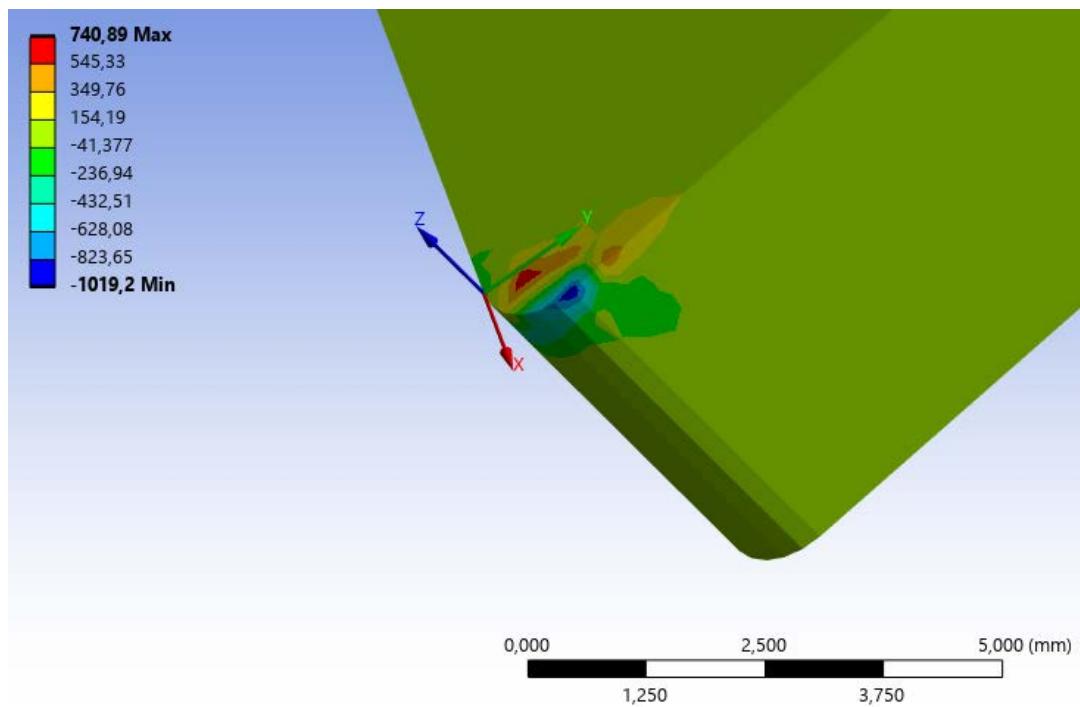
Παρακάτω αναφέρονται οι μέγιστες τιμές τόσο των διατμητικών αλλά και των ορθών τάσεων, επίσης με βάση τις κατευθύνσεις του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας 5.2 :

Ορθές Τάσεις				
Άξονας	X	Y	Z	
Max (MPa)	299,16	740,89	2156,7	
Min (MPa)	-3134,4	-1019,2	-5789,9	
Avg (MPa)	6,5057	-0,76414	-7,666	

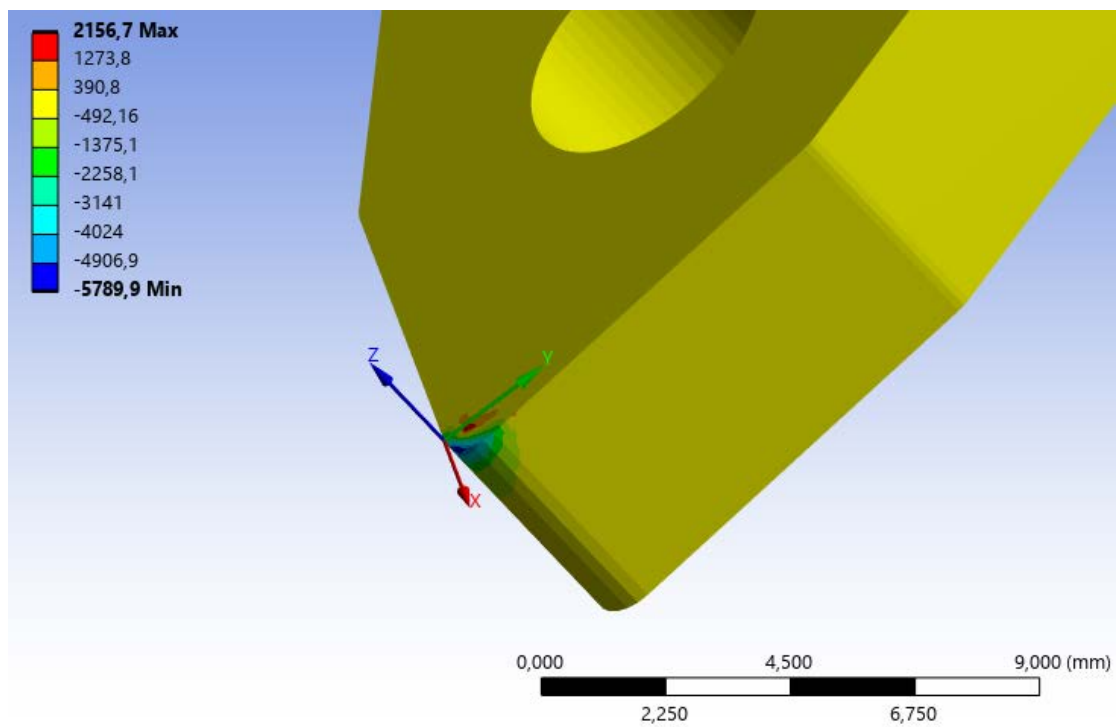
Πίνακας 5-5 Ορθές τάσεις.



Εικόνα 5-4 Ορθές τάσεις στην κατεύθυνση x.



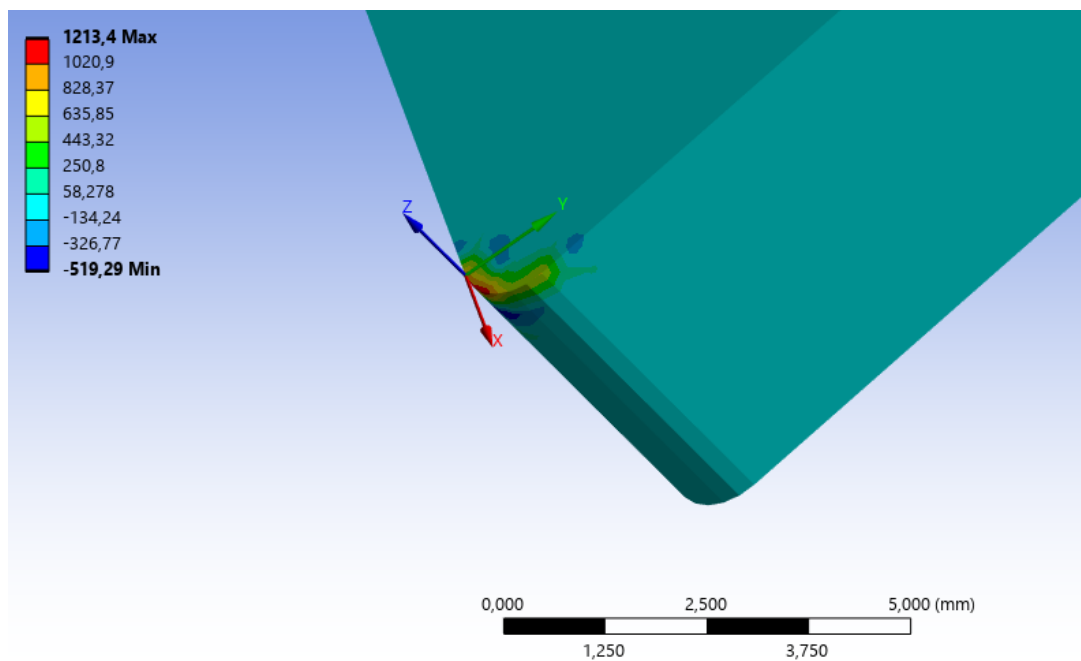
Εικόνα 5-5 Ορθές τάσεις στην κατεύθυνση y .



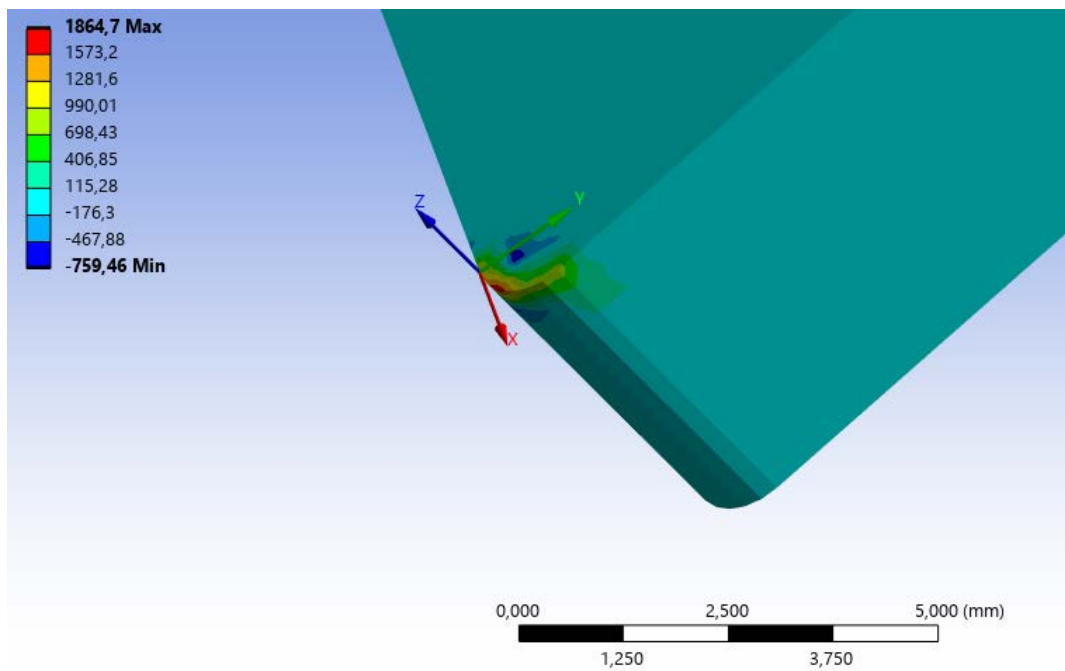
Εικόνα 5-6 Ορθές τάσεις στην κατεύθυνση z .

Διατμητικές Τάσεις			
Άξονας	XY	YZ	XZ
Max (MPa)	1213,4	1864,7	1073,2
Min (MPa)	-519,19	-759,46	-3379
Avg (MPa)	2,7707	1,169	2,8064

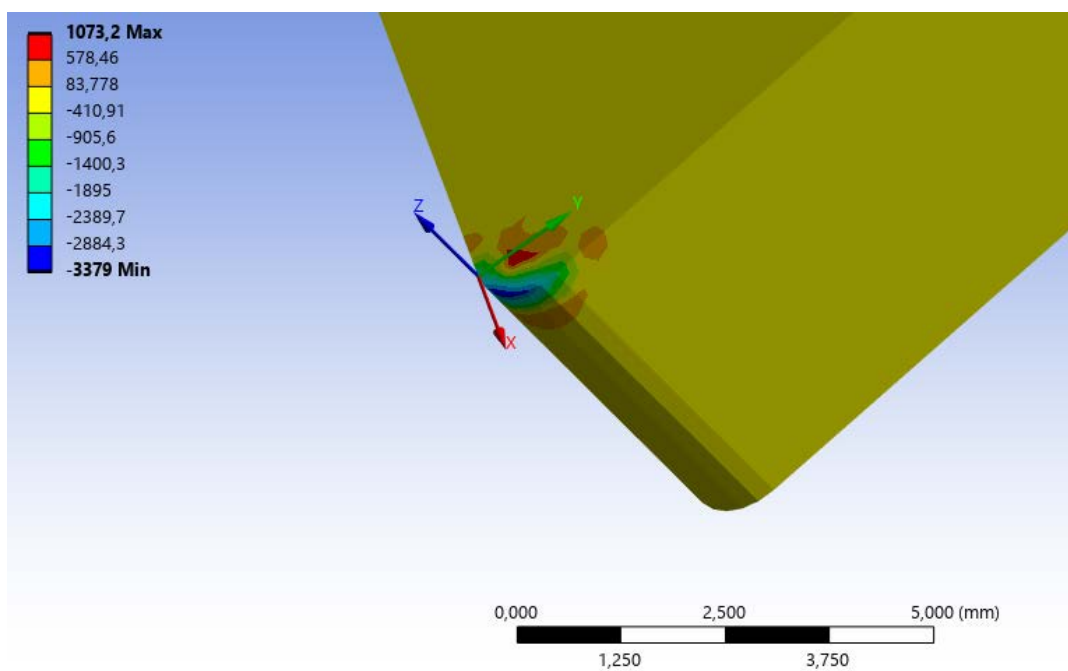
Πίνακας 5-6 Διατμητικές τάσεις.



Εικόνα 5-7 Διατμητικές τάσεις στο επίπεδο xy.



Εικόνα 5-8 Διατμητικές τάσεις στο επίπεδο yz.



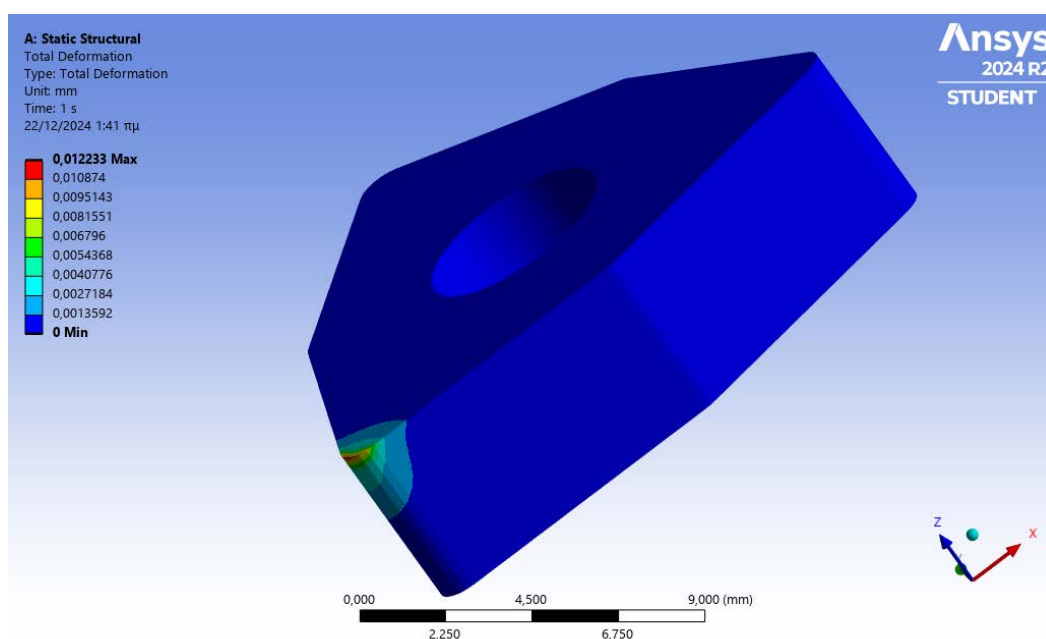
Εικόνα 5-9 Διατμητικές τάσεις στο επίπεδο xz.

Πείραμα 2:

Δύναμη κοπής F_c	Δύναμη πρόωσης F_f	Δύναμη απώθησης F_p
1165,63 (N)	708,67 (N)	299,59 (N)

Πίνακας 5-7 Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής του Πειράματος 2.

Η συνολική παραμόρφωση της δομής υπό τις εφαρμοσμένες δυνάμεις στο πείραμα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.10. Οι περιοχές με υψηλότερη παραμόρφωση τονίζονται με διαφορετικό χρώμα για να δείξουν τα σημεία όπου η δομή επηρεάζεται περισσότερο από τις δυνάμεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα η μέγιστη μετατόπιση είναι 12,233 μm εφαρμόζεται στην μύτη της επιφάνειας, αναμενόμενο αποτέλεσμα βάσει της άσκηση του φορτίου. Επίσης η τάση Von Mises υπολογίστηκε μέσω του Ansys στα 12643 MPa. Τόσο η παραμόρφωση όσο και η τάση Von Mises είναι μεγαλύτερες στο πείραμα 2 κάτι που συνέβη λόγω την αύξησης της τιμής της πρόωσης.



Εικόνα 5-10 Συνολική παραμόρφωση πειράματος 2.

Οι αντιδράσεις στις συνοριακές συνθήκες έχουν ως εξής στην επιφάνεια fixed support με εμβαδόν 73,722 mm^2 και με το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας 5.2.:

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	52,472	-57,815	-7,761	78,461

Πίνακας 5-8 Αντιδράσεις στο fixed support.

Στο πρώτο displacement support (επιφάνεια οπής) με εμβαδόν 76,923 mm² :

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	554,32	-189,81	-1,4068	585,92

Πίνακας 5-9 Αντιδράσεις στο πρώτο displacement (οπή).

Στο δεύτερο displacement support (κάτω επιφάνεια σώματος) με εμβαδόν 144,23 mm² :

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	14,407	-7,8057	1241,3	1241,4

Πίνακας 5-10 Αντιδράσεις στο δεύτερο displacement (κάτω επιφάνεια).

Παρακάτω αναφέρονται οι μέγιστες τιμές τόσο των διατμητικών αλλά και των ορθών τάσεων, επίσης με βάση τις κατευθύνσεις του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας 5.2 :

Ορθές Τάσεις				
Άξονας	X	Y	Z	
Max (MPa)	853,01	1573,5	3621,5	
Min (MPa)	-292,2	-1161,6	-9259	
Avg (MPa)	6,9668	-1,0099	-12,091	

Πίνακας 5-11 Ορθές τάσεις.

Διατμητικές Τάσεις			
Άξονας	XY	YZ	XZ
Max (MPa)	1163,1	3017,3	1526
Min (MPa)	-627,33	-1290,4	-4265,3
Avg (MPa)	3,116	1,7875	-3,5543

Πίνακας 5-12 Διατμητικές τάσεις.

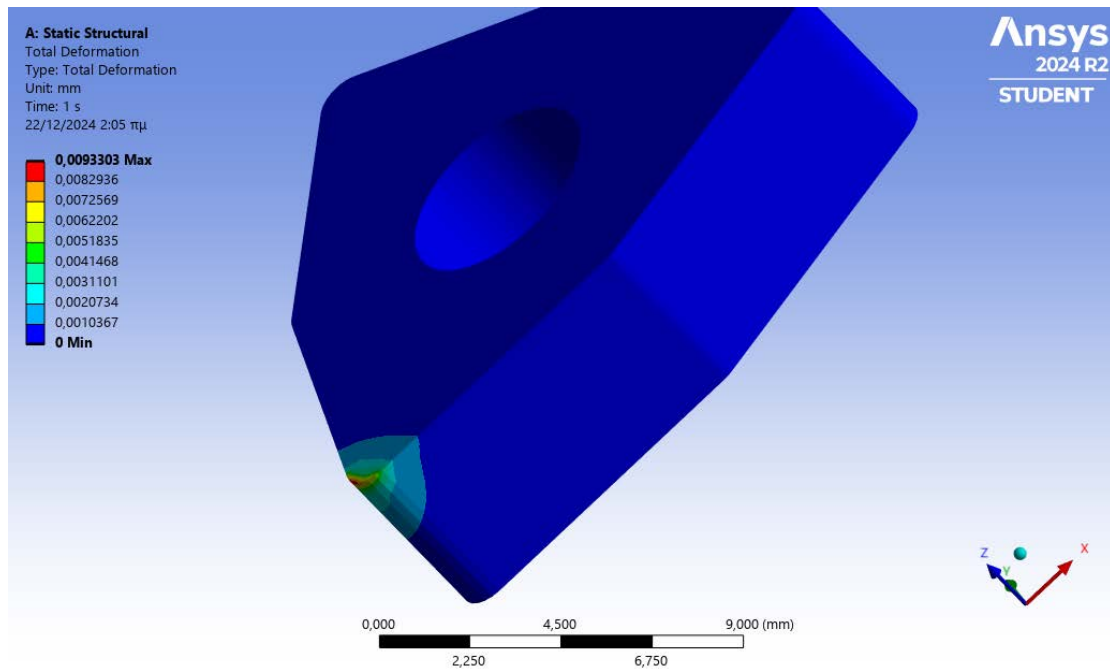
Δεν είναι απαραίτητα τα διαγράμματα θερμότητας καθώς το μόνο που αλλάζει από προσομοίωση σε προσομοίωση είναι οι τιμές και όχι οι κατευθύνσεις και τα πεδία των τάσεων.

Πείραμα 3:

Δύναμη κοπής Fc	Δύναμη πρόωσης Ff	Δύναμη απώθησης Fp
953,89 (N)	872,6 (N)	380,97 (N)

Πίνακας 5-13 Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής του Πειράματος 3.

Η συνολική παραμόρφωση της δομής υπό τις εφαρμοσμένες δυνάμεις στο πείραμα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.11. Οι περιοχές με υψηλότερη παραμόρφωση τονίζονται με διαφορετικό χρώμα για να δείξουν τα σημεία όπου η δομή επηρεάζεται περισσότερο από τις δυνάμεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα η μέγιστη μετατόπιση είναι 9,3303 μm εφαρμόζεται στην μύτη της επιφάνειας, αναμενόμενο αποτέλεσμα βάση της άσκηση του φορτίου. Επίσης η τάση Von Mises υπολογίστηκε μέσο του Ansys στα 11702 MPa. Μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το πείραμα 1 αλλά μικρότερες από το πείραμα 2.



Εικόνα 5-11 Συνολική παραμόρφωση πειράματος 3.

Οι αντιδράσεις στις συνοριακές συνθήκες έχουν ως εξής στην επιφάνεια fixed support με εμβαδόν 73,722 mm² και με το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας 5.2.:

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	67,53	-75,499	-9,6677	101,75

Πίνακας 5-14 Αντιδράσεις στο fixed support.

Στο πρώτο displacement support (επιφάνεια οπής) με εμβαδόν 76,923 mm² :

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	730,8	-237,05	0,34639	768,29

Πίνακας 5-15 Αντιδράσεις στο πρώτο displacement (οπή).

Στο δεύτερο displacement support (κάτω επιφάνεια σώματος) με εμβαδόν 144,23 mm² :

Κατεύθυνση	X	Y	Z	Σύνολο
Μέτρο (N)	15,531	-7,1807	1049,9	1050

Πίνακας 5-16 Αντιδράσεις στο δεύτερο displacement (κάτω επιφάνεια).

Παρακάτω αναφέρονται οι μέγιστες τιμές τόσο των διατμητικών αλλά και των ορθών τάσεων, επίσης με βάση τις κατευθύνσεις του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας 5.2 :

Ορθές Τάσεις			
Άξονας	X	Y	Z
Max (MPa)	549,44	637,49	2595,3
Min (MPa)	-4767,1	-1746,8	-7262,1
Avg (MPa)	-9,7433	-1,5839	-9,7696

Πίνακας 5-17 Ορθές τάσεις.

Διατμητικές Τάσεις			
Άξονας	XY	YZ	XZ
Max (MPa)	1949,2	2475,2	1421,8
Min (MPa)	-754,46	-941,84	-4753,8
Avg (MPa)	4,3581	1,6743	-3,9645

Πίνακας 5-18 Διατμητικές τάσεις.

Δεν είναι απαραίτητα τα διαγράμματα θερμότητας καθώς το μόνο που αλλάζει από προσομοίωση σε προσομοίωση είναι οι τιμές και όχι οι κατευθύνσεις και τα πεδία των τάσεων.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με αυτό το κεφάλαιο ολοκληρώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία και συγκεκριμένα με αναφορά στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα αυτής. Πιο συγκεκριμένα από την μελέτη δυνάμεων στο κεφάλαιο 4 και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Ansys από το κεφάλαιο 5 προκύπτουν τα εξής :

- Αρχικά η συσχέτιση μεταξύ δυνάμεων των πειραμάτων και τις σχέσης αυτών με τις τάσεις και τις παραμορφώσεις . Η δυνάμεις κοπής φαίνεται να είναι οι πιο σημαντικές όσον αφορά την παραμόρφωση και τις τάσεις καθώς όσο μεγαλύτερη ήταν η δύναμη κοπής τόσο μεγαλύτερες και οι τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων στο Ansys . Το ίδιο δεν ισχύει για τις δυνάμεις πρόωσης και άπωσης.
- Η σχέση μεταξύ της πρόωσης αλλά και άλλων μεταβλητών στις δυνάμεις κοπής και κατ' επέκταση στα υπόλοιπα στοιχεία. Από το πείραμα 1 στο πείραμα 2 με την αύξηση της πρόωση από 0,1 σε 0,2 παρατηρήθηκε αύξηση όλων των συνιστωσών των δυνάμεων κάτι που είναι αναμενόμενο. Στο πείραμα 3 ωστόσο , παρατηρείτε αύξηση όλων των συνιστωσών δυνάμεων σε σχέση με το 1 παρ' όλο που η πρόωση και η ταχύτητα κοπής παραμένουν σταθερές απλά και μόνο από το γεγονός ότι το υλικό έχει μεγαλύτερη διάμετρο. Άρα τόσο η πρόωση όσο και η διάμετρος του υλικού είναι ανάλογα των δυνάμεων.
- Τέλος, παρά το γεγονός ότι οι μέγιστες ελαστικές παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές και στις τρεις περιπτώσεις , της τάξης των 10 μm , οι τάσεις Von Mises είναι πολύ υψηλές , ξεπερνούν το όριο διαρροής του κυρίως υλικού αλλά και του υλικού επίστρωσης και στα τρία πειράματα και άρα το κοπτικό εργαλείο θα δεχθεί πλαστική παραμόρφωση είτε κάποια μικρό-θραύση στην επίστρωση.

Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψιν μελλοντικές μελέτες μπορούν να λάβουν μέρος με σκοπό την συσχέτιση μεταξύ άλλων μεταβλητών κοπής όπως, η ταχύτητα κοπής ή το βάθος κοπής , σε σχέση με τις συνιστώσες δυνάμεων και κατ' επέκταση των τάσεων και των παραμορφώσεων του κοπτικού εργαλείου. Επίσης, θα ήταν

ενδιαφέρον η πειραματική μελέτη διαφορετικών υλικών και πως το υλικό μπορεί να επηρεάσει τις δυνάμεις κοπής σε ένα πείραμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΥΡΙΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Θ. Αντωνιάδης, *Μηχανουργική Τεχνολογία*, 3η Έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα. (2017)
- [2] J. Black και R. A. Kohser, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*, 11η Έκδοση, John Wiley and Sons. (2012)
- [3] Mechanical and Metal Trades Handbook, 2nd edition. (2008)
- [4] Fritz Klocke, *manufacturing processes 1, cutting*. (2011)
- [5] Π. Γ. Πετρόπουλος. *Μηχανουργική Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων*, Εκδόσεις Ζήτη (1998)
- [6] Μανταλία, Γ. (2009). *Μελέτη των δυνάμεων κοπής στις κατεργασίες υψηλών Ταχυτήτων*. Διπλωματική Εργασία.
https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2930/mantaliag_forces.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [7] Χαραλάμπους, Π. (2013). *Πειραματική αναλυτική προσέγγιση της ευθραυστότητας και ικανότητας κοπής πολυστρωματικών PVD επικαλυμμένων κοπτικών πλακιδίων σκληρομετάλλου*. Πτυχιακή Εργασία. <https://ikee.lib.auth.gr/record/133193>
- [8] D. A. Stephenson και J. S. Agapiou, *Metal cutting Theory and Practice*, 3η Έκδοση, CRC Press Taylor and Francis Group. (2016)
- [9] Tao Chen, Lixing Song, Suyan Li and Xianli Liu, *Experimental Study on Wear Characteristics of PCBN Tool with Variable Chamfered Edge*. (2019)
<https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-019-0351-9>
- [10] Μιχαλακόπουλος, Θ. (2014). *Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων*. Παρουσίαση.
<https://slideplayer.gr/slide/2017379/>
- [11] Kessai, I. Benammar, S. Doghmane, M. (2022). *Dynamic failure analysis and lifetime estimation of Tool-string in rotary drilling system under Torsional-Axial coupled vibrations*. Engineering Failure Analysis. Volume 134.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630722000115>
- [12] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa και Y. Yamane, *Metal Machining Theory and Applications*, Arnold. (2000)
- [13] <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges?fbclid=IwAR0k4YME3CQfp-qEnxPvrdELCPI1N0DbclnDvJcMQRQmJnJ7PgIAnQas2DE>

- [14] Dwivedi, K. *Tool Life, Taylor's Tool Life Equation, Calculation, Factor*. Site.Mechanical, (2022)<https://www.mechical.com/2022/01/tool-life-taylors-tool-life-equation.html>
- [15] William D. Callister Jr., David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering 9th Edition*. (2014)
- [16] Λαζάρου Ε. Λαζαρίδη. Μηχανουργική τεχνολογία. (1990)
- [17] G. S. Vasilash, Inside ford sharonville transmission: Producing 19 million gears a year, Mod. Mach.Shop, July 29, (2014)
- [18] Wang, C., Gao, X., & Zhang, H. (2019). Recent advances in machining of hard materials with coated cutting tools. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 24, 97-113.<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ab3e7f/meta>
- [19] William D. Callister Jr. and David G. Rethwisch. Materials Science and Engineering (2016) <https://anupturnedworld.files.wordpress.com/2016/06/callister-materials-science-and-engineering.pdf>
- [20] Davim, J. P. (2008). Machining: Fundamentals and Recent Advances. Springer Science & Business Media.
- [21] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing engineering and technology. Pearson Education.
- [22] "Machine Tool Metrology: An Industrial Handbook" by Graham T. Smith. (2016)
- [23] Alan Overby. CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation 1st Edition. (2010)
- [24] Evaluation of Nano Fluids with Minimum Quantity Lubrication in Turning of Ni-Base Superalloy UDIMET 720. (2023) <https://www.mdpi.com/2075-4442/11/4/159>
- [25] State-of-the-art hybrid lubrication (Cryo-MQL) supply systems, performance evaluation, and optimization studies in various machining processes.(2024) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302400344X>
- [26] A review on sustainable machining: Technological advancements, health and safety considerations, and related environmental impacts. (2024) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024012970>
- [27] A Review on Recent Advances in the Energy Efficiency of Machining Processes for Sustainability. (2024) <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/15/3659>
- [28] Optimal Workpiece Orientation to Reduce the Energy Consumption of a Milling Process. (2015) https://www.researchgate.net/publication/273346534_Optimal_Workpiece_Orientation_to_Reduce_the_Energy_Consumption_of_a_Milling_Process

- [29] Zhao, G.Y.; Liu, Z.Y.; He, Y.; Cao, H.J.; Guo, Y.B. Energy Consumption in Machining: Classification, Prediction, and Reduction Strategy. *Energy* (2017), 133, 142–157. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217308666>
- [30] Waste reduction by implementation of CNC machining center and Lean Manufacturing.(2020)https://www.researchgate.net/publication/343860956_Waste_reduction_by_implementation_of_CNC_machining_center_and_Lean_Manufacturing
- [31] Lu, F.; Zhou, G.; Zhang, C.; Liu, Y.; Chang, F.; Xiao, Z. Energy-Efficient Multi-Pass Cutting Parameters Optimisation for Aviation Parts in Flank Milling with Deep Reinforcement Learning. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* (2023), 81, 102488. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584522001703>
- [32]Machining with Minimum Quantity Lubrication and Nano-Fluid MQL: A Review. (2024) https://www.researchgate.net/publication/381032930_Machining_with_Minimum_Quantity_Lubrication_and_Nano-Fluid_MQL_A_Review
- [33] MQL Machining with nano fluid: a review Pralhad B. Patole^{1*}, Vivek V. Kulkarni² and Sudhir G. Bhatwadekar. (2021) https://www.researchgate.net/publication/351148801_MQL_Machining_with_nano_fluid_a_review
- [34] <https://www.astmsteel.com/product/42crmo4-alloy-steel/>
- [35] <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2023/december/quick-request/ansys-education-resources-23q4-part-1/basics-of-fea-tutorial-tutfeameen24.pdf>
- [36]https://www.caee.utexas.edu/prof/kallivokas/teaching/ANSYS_examples/ansys56theory.pdf
- [37] <https://learning.edx.org/course/course-v1: CornellX+ENGR2000X+1T2018/home>
- [38] An investigation of multilayer coated (TiCN/Al₂O₃-TiN) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique . (2011) [https://www.researchgate.net/publication/270622379_An_investigation_of_multilayer_coated_TiCNAl₂O₃-TiN_tungsten_carbide_tools_in_high_speed_cutting_using_a_hybrid_finite_element_and_experimental_technique](https://www.researchgate.net/publication/270622379_An_investigation_of_multilayer_coated_TiCNAl2O3-TiN_tungsten_carbide_tools_in_high_speed_cutting_using_a_hybrid_finite_element_and_experimental_technique)
- [39] Microstructure and Properties of TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN Coating Enhanced by High-Current Pulsed Electron Beam. (2024) <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/4/378>
- [40] Influence of WC and Co in cutting cemented carbides with PCD and CBN tools. (2009) https://www.researchgate.net/publication/250328668_Influence_of_WC_and_Co_in_cutting_cemented_carbides_with_PCD_and_CBN_tools

ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

- (1) https://www.mastrogiannis.gr/eshop/index.php?route=product/product&product_id=6058
- (2) <https://www.haascnc.com/el/productivity/workholding/mts.html>
- (3) <https://www.electromed.gr/ilektrika-ergaleia/tornoi/alfa-tornos-mhxanoyrgikos-wm250v-fx750-43201>
- (4) <https://www.ergomac.gr/p/77/70/%CE%A6%CF%81%CE%B5%CE%B6%CE%B1+Universal+%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CE%B7+-+%CE%A6%CF%81%CE%B5%CE%B6%CE%B5%CF%82+%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CF%85+%CE%B5%CF%85%CF%81%CE%B5%CE%AF%CE%B1%CF%82+%CE%B3%CE%BA%CE%AC%CE%BC%CE%B1%CF%82>
- (5) <https://www.colchester.co.uk/products/turning/manual-centre-lathes/colchester-triumph-vs-2500-harrison-v390/>
- (6) <https://toolcentre.co.za/sandvik/insert/iso-defined-insert/wnmg-08-04-08-pm-4325>
- (7) <https://baydarlar.com/mwlnr-25x25-m08-mwlnr-005-iso>
- (8) <https://toolsunited.com/EN/Article/Details/191125115757113?SearchMode=toolsUnited&classificationType=GTC>
- (9) <https://www.kistler.com/INT/en/cp/multicomponent-dynamometers-9257b/P0000675>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1-1 Συνεχές γρέζι (αριστερά), ασυνεχές γρέζι (δεξιά) [1]	13
Εικόνα 1-2 Συνεχές απόβλιττο με ψευδοκόψη. [1]	15
Εικόνα 1-3 Κατανομή θερμοκρασιών στο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο.[1]	22
Εικόνα 1-4 Φθορά κρατήρα (αριστερά) και ελεύθερης επιφάνειας(δεξιά).[9].....	27
Εικόνα 1-5 Απολέπιση κοπτικού εργαλείου αριστερά, Build-up Edge δεξιά. [13]	28
Εικόνα 1-6 Πλαστική παραμόρφωση αριστερά, θερμικές ρωγμές δεξιά.[13]	28
Εικόνα 3-1 Φρέζα (αριστερά), Τόρνος (δεξιά). (3)(4)	56
Εικόνα 3-2 Τα μέρη του τόρνου. (5).....	64
Εικόνα 3-3 Κοπτικά εργαλεία τόννευσης α)Εκχόνδρισης, b)Πλευρικά, c)Σπειρωμάτοσης, d)Απότμησης, e)Εσωτερικής τόννευσης. [2]	69
Εικόνα 3-4 Μετωπικό και περιφερικό φραιζάρισμα. [1]	73
Εικόνα 3-5 Διάφορα σχήματα των κοπτικών εργαλείων της φραιζας. [1]	77
Εικόνα 4-1 Δυναμόμετρο KISTLER.(9)	83
Εικόνα 4-2 Τόρνος Colchester Triumph 2500. (5).....	84
Εικόνα 4-3 Κοπτικά Εργαλεία. (6),(7)	85
Εικόνα 5-1 Συνοριακές συνθήκες προβλήματος.	95
Εικόνα 5-2 Σύστημα συντεταγμένων.	95
Εικόνα 5-3 Συνολική παραμόρφωση πειράματος 1.	97
Εικόνα 5-4 Ορθές τάσεις στην κατεύθυνση x.....	98
Εικόνα 5-5 Ορθές τάσεις στην κατεύθυνση γ.....	99
Εικόνα 5-6 Ορθές τάσεις στην κατεύθυνση z.	99
Εικόνα 5-7 Διατμητικές τάσεις στο επίπεδο xy.	100
Εικόνα 5-8 Διατμητικές τάσεις στο επίπεδο yz.	101
Εικόνα 5-9 Διατμητικές τάσεις στο επίπεδο xz.	101
Εικόνα 5-10 Συνολική παραμόρφωση πειράματος 2.	102
Εικόνα 5-11 Συνολική παραμόρφωση πειράματος 3.	105

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1-1 Ορθογωνική και Λοξή κοπή.[1]	8
Σχήμα 1-2 Κύρια και δευτερεύουσα κόψη.[2]	9
Σχήμα 1-3 Επιφάνειες και γωνίες κατά την κόψη.[5]	11
Σχήμα 1-4 Ακτίνα καμπυλότητας r [1].....	11
Σχήμα 1-5 Μορφές αποβλίττου [1].....	14
Σχήμα 1-6 Κοπή με γρεζοθραύστη. [1].....	14
Σχήμα 1-7 Φάσεις της ψευδοκόψης. [1]	16
Σχήμα 1-8 Δυνάμεις κοπής [6]	18

Σχήμα 1-9 Βασικά είδη φθοράς κοπτικού εργαλείου. [9].....	27
Σχήμα 1-10 Δράσεις του κοπτικού υγρού.[5]	32
Σχήμα 1-11. Εφαρμογή του κοπτικού υγρού.....	36
Σχήμα 1-12 Αστάθεια στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.[1]	49
Σχήμα 3-1 Κατεργασίες Τόρνευσης [2].....	60
Σχήμα 3-2 Κατεργασίες τόρνευσης, α) Απλήτόρνευση, b) Τόρνευση προσώπου, c) Τόρνευση μορφής , d) Boring, e) Διάτρηση, f) Απότμηση, g) Σπειρωτόμηση, h) Τόρνευση ρίκνωσης. [1]	60
Σχήμα 3-3 Μορφές Τόρνευσης, ξεκινώντας από πάνω αριστερά εγκάρσια και εξωτερική, εγκάρσια και εσωτερική, κωνική και εξωτερική και κωνική και εσωτερική. [1]	61
Σχήμα 3-4 Γωνίες κοπτικού εργαλείου -τεμαχίου κατά την διάρκεια της τόρνευσης. [1]	68
Σχήμα 3-5 Αντίρροπο και Ομόρροπο φραιζάρισμα. [1].....	75
Σχήμα 4-1 Κοπτικό πλακίδιο. (8)	85
Σχήμα 5-1 Τάσεις απειρωστού. [37]	92

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3-1 Υλικά που χρησιμοποιούνται για τα κοπτικά εργαλεία της φραιζας. [21]	78
Πίνακας 4-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά τόρνου.	84
Πίνακας 4-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά. (8)	85
Πίνακας 4-3 Χημική σύσταση δοκιμίου.	86
Πίνακας 4-4 Ιδιότητες υλικού.	86
Πίνακας 4-5 Μεταβλητές πειράματος.	86
Πίνακας 4-6 Μέσες συνιστώσες δυνάμεων.	87
Πίνακας 4-7 Μεταβλητές πειράματος.	87
Πίνακας 4-8 Μέσες συνιστώσες δυνάμεων.	87
Πίνακας 4-9 Μεταβλητές πειράματος.	88
Πίνακας 4-10 Μέσες συνιστώσες δυνάμεων.	88
Πίνακας 5-1 Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής του Πειράματος 1.	96
Πίνακας 5-2 Αντιδράσεις στο fixed support.	97
Πίνακας 5-3 Αντιδράσεις στο πρώτο displacement (οπή).	97
Πίνακας 5-4 Αντιδράσεις στο δεύτερο displacement (κάτω επιφάνεια).	98
Πίνακας 5-5 Ορθές τάσεις.	98
Πίνακας 5-6 Διατμητικές τάσεις.	100
Πίνακας 5-7 Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής του Πειράματος 2.	102
Πίνακας 5-8 Αντιδράσεις στο fixed support.	103
Πίνακας 5-9 Αντιδράσεις στο πρώτο displacement (οπή).	103
Πίνακας 5-10 Αντιδράσεις στο δεύτερο displacement (κάτω επιφάνεια).	103

Πίνακας 5-11 Ορθές τάσεις.	103
Πίνακας 5-12 Διατμητικές τάσεις.	104
Πίνακας 5-13 Μέσες τιμές δυνάμεων κοπής του Πειράματος 3.	104
Πίνακας 5-14 Αντιδράσεις στο fixed support.	105
Πίνακας 5-15 Αντιδράσεις στο πρώτο displacement (οπή).	105
Πίνακας 5-16 Αντιδράσεις στο δεύτερο displacement (κάτω επιφάνεια).	105
Πίνακας 5-17 Ορθές τάσεις.	106
Πίνακας 5-18 Διατμητικές τάσεις.	106

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 4-1	87
Διάγραμμα 4-2	88
Διάγραμμα 4-3	89
Διάγραμμα 5-1 Skewness.	94