

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧ/ΤΙΑΣ.

Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

**745
Μ/Χ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΥΨΗΛΗΣ
ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΚΑΦΙΔΑΣ ΗΛΙΑΣ
Α.Μ 31890

ΔΗΜΟΥ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
Α.Μ 26545

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ. Κωνσταντίνος Ι. Γιαννακόπουλος

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

-	Περίληψη.....
1.	Εισαγωγή.....
2.	Κατεργασίες κοπής.....
2.1	Γενικά.....
2.2	Κοπή ..(κατεργασίες αποβολής του υλικού).....
2.2.1	Περιγραφή.....
2.2.2	Δύναμης κοπής.....
2.2.3	Θερμότητα και θερμοκρασία κοπής.....
2.2.4	Λοξή κοπή.....
2.2.5	Ορθογωνική κοπή.....
2.2.6	Βασικές παράμετροι της κοπής των μετάλλων.....
2.3	Συμβατικές εργαλειομηχανες κοπής.....
2.3.1	Τόρνος.....
2.3.2	Φρέζα.....

2.4 Κοπτικά εργαλεία.....	
2.4.1 Περιγραφή - Γεωμετρία	
2.4.2 Υλικά κατασκευής.....	
2.4.3 Επικαλύψεις.....	
2.4.2 Φθορά – Χρόνος ζωής	
2.5 Εξέλιξη.....	
3. Κατεργασίες υψηλής ταχύτητας (HSM).....	
3.1 Γενική περιγραφή	
3.1.1 Πλεονεκτήματα κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων.....	
3.2 Υγρή /Ξηρή κατεργασία.....	
3.2.1 Υγρό κοπής	
3.2.2 Κατεργασία χωρίς υγρό κοπής (Dry Machining)	
3.3 Απόβλητα & Γρέζια	
3.4 Συνθήκες κοπής.....	
3.4.1 Παράγοντες.....	
3.4.2 Τόρνευση	

3.4.3 Φρεζάρισμα.....	
3.5 Βελτιστοποίηση.....	
4 Υπολογιστική Προσομοίωση με το Advant Edge.....	
4.1 Μοντελοποίηση Κατεργασιών.....	
4.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	
5 Συμπεράσματα.....	
6 Περίληψη.....	

Σκοπός Πτυχιακής Εργασίας

Ο σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι να γίνει αναφορά στη μελέτη των κατεργασιών κοπής υψηλής ταχύτητας, των παραγόντων που τις επηρεάζουν, καθώς και των μεθόδων βελτιστοποιήσεως και μοντελοποιήσεως. Ο χρόνος κατεργασίας αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας στην παραγωγή. Γενικά είναι γνωστό ότι εφαρμόζοντας υψηλότερες ταχύτητες κοπής από τις παραδοσιακές, η παραγωγικότητα των κατεργασιών έχει διαρκώς τάσεις ανάπτυξης αλλά και η ποιότητα των προϊόντων παρουσιάζει δυνατότητες βελτίωσης. Τα διαρκώς αναπτυσσόμενα κοπτικά εργαλεία, τα υλικά κατεργασίας και οι εργαλειομηχανές έχουν οδηγήσει και έχουν καταστήσει δυνατή τη διάδοση της τεχνολογίας "High Speed Machining". Ειδικά για τις κατεργασίες αποβολής υλικού, καθοριστικό ρόλο στη μείωση του χρόνου παραγωγής έχει η επιλογή των κατάλληλων παραγόντων κοπής που θα επιτρέψουν στην ταχύτητα κοπής να μεγιστοποιηθεί. Οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν σε απόλυτο βαθμό τη μορφή του αποβλήτου, τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, τις δυνάμεις κοπής και τελικά τον χρόνο παραγωγής, με αποτέλεσμα η βελτιστοποίηση των κατεργασιών κοπής να απαιτεί τη μελέτη των μηχανισμών της και την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κατεργασία, στην ευρύτερη της έννοια, είναι η διαδικασία με την οποία τα ακατέργαστα υλικά μετατρέπονται τελικά σε προϊόντα. Η έννοια της κατεργασίας καλύπτει τόσο την καθεαυτού κατασκευή όσο και τα σχέδια των προς κατασκευή προϊόντων χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους κατεργασιών και τεχνικών παραγωγής. Η ιδέα της κατεργασίας πρωτοεμφανίστηκε περίπου το 5000 με 4000 π.Χ. με την παραγωγή προϊόντων από διάφορα είδη ξύλου, κεραμικών, πέτρας, και μετάλλου. Σύμφωνα με την σύγχρονη μορφή της είναι η διαδικασία παραγωγής προϊόντων από ακατέργαστα υλικά, με βάση διάφορες διαδικασίες και μηχανήματα οι οποίες ακολουθούν ένα οργανωμένο σχέδιο και κάθε βήμα που απαιτείται.

Τα κατεργασμένα προϊόντα χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή άλλων προϊόντων. Επειδή ένα κατασκευασμένο αντικείμενο έχει υποβληθεί σε διάφορες αλλαγές μετά τις οποίες το ακατέργαστο υλικό έχει γίνει πλέον ένα χρήσιμο προϊόν, λαμβάνεται υπόψη η προστιθέμενη αξία, ως νομισματική αξία όσον αφορά την τιμή του προϊόντος. Με την βοήθεια της κατεργασίας μπορούμε να παράγουμε και ιδιαίτερα προϊόντα, δηλαδή είτε μεμονωμένα μέρη των κομματιών, είτε συνεχή προϊόντα. Η κατεργασία είναι γενικά μια σύνθετη δραστηριότητα στην οποία συμμετέχουν άνθρωποι που έχουν μια ευρεία σειρά πειθαρχιών και ικανοτήτων αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και μια ευρεία ποικιλία μηχανημάτων, εξοπλισμού, και εργαλείων διαφόρων επιπέδων αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών, των ρομποτικών μηχανισμών και του υλικού εξοπλισμού χειρισμού. Οι μέθοδοι κατεργασίας θα πρέπει να ανταποκρίνονται σε διάφορες ζητήσεις και τάσεις:

- ^ Το προϊόν πρέπει να ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του σχεδίου αλλά και τις απαραίτητες προδιαγραφές.
- ^ Το προϊόν πρέπει να κατασκευαστεί με βάση τις πιο οικονομικές μεθόδους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής.
- ^ Η ποιότητα θα πρέπει να εξετάζεται σε κάθε στάδιο παραγωγής του προϊόντος, από το σχέδιο έως και το τελικό προϊόν, και όχι απλά να ελέγχεται αφότου κατασκευαστεί αυτό.
- ^ Σε ένα ιδιαίτερα ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι μέθοδοι παραγωγής πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτες για να αποκριθούν στις μεταβαλλόμενες ζητήσεις της αγοράς, στους τύπους των προϊόντων, τα ποσοστά παραγωγής, τις ποσότητες παραγωγής, και στην εντός χρόνου παράδοση στον πελάτη.
- ^ Οι νέες εξελίξεις της τεχνολογίας στα υλικά, τις μεθόδους παραγωγής, τους υπολογιστές, τόσο στις τεχνολογικές όσο και στις διευθυντικές δραστηριότητες σε ένα κατασκευαστικό οργανισμό πρέπει να αξιολογηθούν άμεσα για να επιτευχθεί η έγκαιρη και οικονομική εφαρμογή τους.
- ^ Ο κατασκευαστής πρέπει να εργαστεί με τον πελάτη για να πάρει την έγκαιρη ανατροφοδότηση που απαιτείται για τη συνεχή βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων.

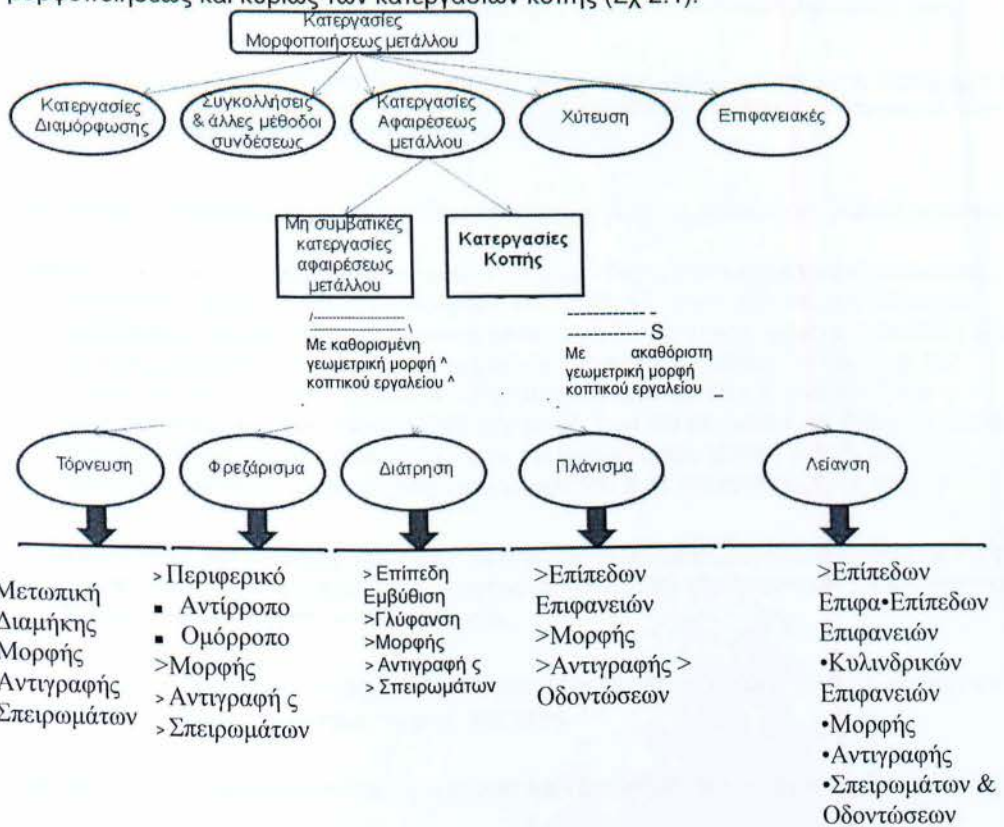
Η κατεργασία ενός προϊόντος στη βιομηχανία επηρεάζει άμεσα κατά 15 με 20% το κόστος παραγωγής του, ενώ εκτιμάται ότι με έμμεσο τρόπο φτάνει να καθορίζει πάνω από το 80% την αξία του. Με τον όρο κατεργασία καλούμε κάθε μεταβολή και διαμόρφωση που γίνεται στην πρώτη ύλη για την παραγωγή ενός προϊόντος. Η αξία του προϊόντος καθορίζεται από το κόστος, τον χρόνο και την ποιότητα παραγωγής τα οποία αποτελούν το άλφα και το ωμέγα της βιομηχανικής παραγωγής, με τις κατεργασίες να μην αποτελούν εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα. Παράλληλα όλο και μεγαλύτερο ρόλο παίζουν σήμερα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε εφαρμογής στην βιομηχανία, με αποτέλεσμα η περιβαλλοντική επίπτωση να συνδέεται πλέον άμεσα με την αξία του προϊόντος.

Σε όλους τους τομείς της αγοράς σήμερα, η ταχύτητα έχει καθοριστική σημασία για την ανάπτυξη ενός προϊόντος. Ο χρόνος κατεργασίας αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας στην παραγωγή. Ειδικά για τις κατεργασίες αποβολής υλικού, καθοριστικό ρόλο στη μείωση του χρόνου παραγωγής έχει η επιλογή των κατάλληλων παραγόντων κοπής που θα επιτρέψουν στην ταχύτητα κοπής να μεγιστοποιηθεί. Οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν σε απόλυτο βαθμό τη μορφή του αποβλήτου, τις ανεπτυσσόμενες θερμοκρασίες δυνάμεις κοπής και τελικά τον χρόνο παραγωγής, με αποτέλεσμα η βελτιστοποίηση των κατεργασιών κοπής να απαιτεί τη μελέτη των μηχανισμών της και την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών. Έτσι έχουν γίνει αξιοσημείωτες προσπάθειες για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων και προσομοιώσεων των κατεργασιών κοπής, όπου σε συνδυασμό με τις εργαλειομηχανές CNC και τα νέα αποδοτικά και σχετικά χαμηλού κόστους υλικά για τα εργαλεία κοπής, έχουν δώσει τεράστια ώθηση στην ανάπτυξη των κατεργασιών κοπής υψηλής ταχύτητας.

Όμως η χρήση υψηλών ταχυτήτων κατά την κοπή παρουσιάζει πολλές δυσχέρειες, αρκετούς ιδιόμορφους μηχανισμούς και παράξενα φαινόμενα που με μια πρώτη ανάλυση φαίνονται παράλογα. Όλα αυτά, αν δεν μελετηθούν επαρκώς, είναι σίγουρο ότι μπορούν να οδηγήσουν σε δύσκολες καταστάσεις ολόκληρες βιομηχανίες. Αυτό συνέβη σε μια μεγάλη αεροναυπηγική εταιρεία η οποία με ελλειπείς υποθέσεις και υπολογισμούς συμβατικών κατεργασιών κοπής συμπεράνε πως μπορούσε να αυξήσει σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα κοπής των μετάλλων, με έλεγχο μόνο των θερμοκρασιών και των δυνάμεων κοπής. Το αποτέλεσμα ήταν μακροπρόθεσμα να βγει σημαντικά ζημιωμένη από το να χρησιμοποιούσε συνηθισμένες ταχύτητες κοπής, καθώς οι μηχανισμοί φθοράς και ελέγχου του αποβλήτου είχαν παραμεληθεί.

2. Κατεργασίες Κοπής

2.1 Οι κατεργασίες κοπής, από την βιομηχανική επανάσταση και μετά όπου πήραν μορφή που μοιάζει πολύ με τη σημερινή, ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των κατεργασιών μορφοποιήσεως μεταλλικών προϊόντων και ειδικότερα, στις κατεργασίες αφαίρεσεως μετάλλου. Με τις κατεργασίες κοπής δίνουμε σε ένα μεταλλικό κομμάτι την επιθυμητή μορφή, μέσω μηχανικής αφαίρεσης του πλεονάζοντος υλικού με τη βοήθεια του κοπτικού εργαλείου. Η ευρεία χρήση των κατεργασιών κοπής στην βιομηχανία μέχρι σήμερα έγκειται καθαρά στο συγκριτικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν προς τις άλλες κατεργασίες μορφοποίησης, ειδικά με την εμφάνιση των εργαλειομηχανών CNC . Αυτό το πλεονέκτημα αφορά την ακρίβεια των διαστάσεων, την δυνατότητα απόδοσης μορφής υψηλής στάθμης και την καλύτερη τραχύτητα επιφάνειας στο κατεργαζόμενο κομμάτι, με το ανάλογο βέβαια παραγωγικό κόστος. Αξίζει όμως να δούμε σχηματικά την κατηγοριοποίηση των κατεργασιών μορφοποιήσεως και κυρίως των κατεργασιών κοπής (Σχ 2.1):



Σχίμα 2.1 Κατηγοριοποίηση Κατεργασιών Μορφοποιήσεως Μετάλλου

Όπως βλέπουμε οι κατεργασίες κοπής ομαδοποιούνται ανάλογα με τη μορφή του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή αν έχει γεωμετρικώς καθορισμένη μορφή ή μη. Στη συνέχεια διακρίνονται οι κατεργασίες απλής σημειακής επαφής (στην αποβολή υλικού μετέχει μόνο μία κόψη του κοπτικού εργαλείου) όπως η τόννευση και το πλάνισμα και αυτές με πολλαπλή σημειακή επαφή όπως το φρεζάρισμα και η διάτρηση..

Τέλος η κάθε κατεργασία χωρίζεται επίσης σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των τεχνικών επιφανειών των τεμαχίων που αναφέρεται (επιπέδων, κυλινδρικών, ειδικής μορφής κλπ). Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην **Τόννευση (Turning)** και το **Φρεζάρισμα (Milling)**, αλλά πριν προχωρήσουμε στην περαιτέρω μελέτη αυτών των κατεργασιών, είναι απαραίτητο να αναλύσουμε τους μηχανισμούς γύρω από την κοπή.

-Επίσης οι κατεργασίες διακρίνονται κατά DIN σε:

^ **Αρχέγονες κατεργασίες:** το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία κλπ).

^ **Διαμορφώσεις:** Χαρακτηριστικό τους είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού. Διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή κλπ.) Και σε

κατεργασίες διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθεία κοίλανση

^ **Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού:** Η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόννευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κλπ.). Στις κατεργασίες αποβολής υλικού, μόνο μία στρώση υλικού της κατεργασμένης επιφάνειας σε μικρό ή σε μεγαλύτερο βάθος, ανάλογα με την περίπτωση κατεργασίας, υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και αλλαγές ή και μετασχηματισμούς στην κρυσταλλική του δομή, άρα και σε ορισμένες ιδιότητες του σε πλήρη αντίθεση με τις κατεργασίες διαμορφώσεως, όπου τέτοιες μεταβολές πραγματοποιούνται στην όλη μάζα του κομματιού ή σε σημαντικό μέρος του.

^ **Επιφανειακές κατεργασίες:** Δεν επιφέρουν αλλαγή σχήματος στο τεμάχιο αλλά μεταβολή στις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας (ενίσχυση και προστασία). Διακρίνονται σε θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις.

^ **Κατεργασίες σύνδεσης:** Διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις κλπ).

Με κριτήριο την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό, οι κατεργασίες διακρίνονται σε:

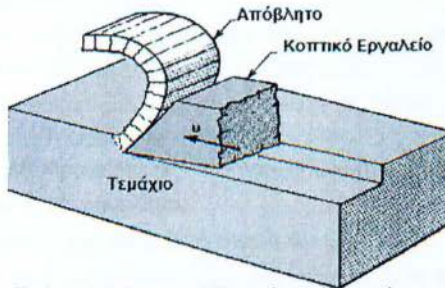
^ **Συμβατικές:** χρησιμοποιείται μηχανική ενέργεια και συμβατικός εξοπλισμός (μηχανουργικές κατεργασίες).

^ **Μη συμβατικές:** ως βασική ενέργεια κατεργασίας χρησιμοποιείται κάποια άλλη μορφή ενεργείας πέραν της μηχανικής, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι μη συμβατικός, προσαρμοζόμενος στις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας (μαγνητική διαμόρφωση, εκρηκτική συμπίεση, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με laser, εκρηκτική συγκόλληση).

2.2 Κοπή

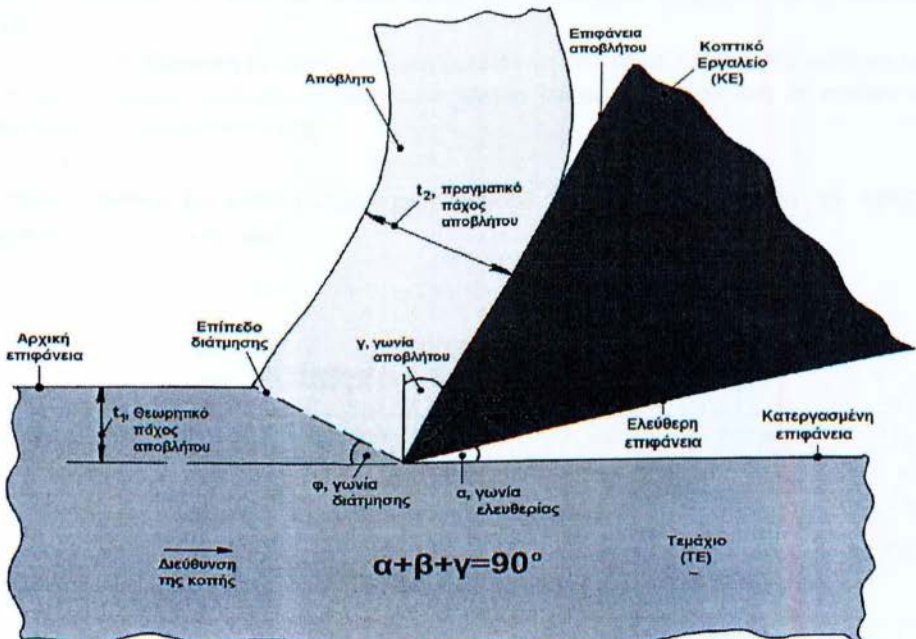
Οι βασικοί συντελεστές κατά την κοπή είναι το Κατεργαζόμενο Τεμάχιο, το Κοπτικό Εργαλείο και το Απόβλητο. Η κίνηση του Κοπτικού Εργαλείου (η προσομοιάζεται με σφήνα) ως προς το Τεμάχιο σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα u προκαλεί τον σχηματισμό του αποβλήτου, λόγω της ισχυρής πλαστικής παραμόρφωσης του Τεμαχίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

(Σχ 2.2):



Σχήμα 2.2 Βασικοί Συντελεστές κοπής και σχηματισμός αποβλήτου

Ακολουθεί σχηματική αναπαράσταση των κυριότερων εννοιών και γωνιών της κοπής (Σχ 2.3):



Σχήμα 2.3 Κυριότερες έννοιες και γωνίες κοπής

Η γωνία αποβλήτου « γ » είναι η σημαντικότερη απ' όλες. Όσο μεγαλώνει, τόσο μικραίνει η δύναμη Η γωνία αποβλήτου « γ » είναι η σημαντικότερη απ' όλες. Όσο μεγαλώνει, τόσο μικραίνει η δύναμη κοπής αλλά εξασθενίζει η ακμή και επέρχεται γρηγορότερα στόμωση του εργαλείου. Όσο σκληρότερο είναι το υλικό λοιπόν, τόσο η γωνία αποβλήτου πρέπει να είναι μικρότερη. Παράλληλα πρέπει να αναφέρουμε και τη ζώνη διάτμησης, η οποία είναι μια στενή περιοχή όπου το υλικό υφίσταται εφελκυσμό και παραμορφώνεται πλαστικά.

Κατά την κοπή συναντάμε δύο κινήσεις:

Η Πρωτεύουσα ή Κύρια κίνηση παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο τεμάχιο ή το εργαλείο και εξασφαλίζει τοπική σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης, κατά την οποία απορροφάται και το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής, είναι είτε η προσέγγισή τεμαχίου και εργαλείου, είτε η αφαίρεση υλικού.

Η Δευτερεύουσα ή κίνηση Πρόωσης σε συνδυασμό με την κύρια αποδίδει σε ορισμένο μήκος του τεμαχίου την κατεργασμένη επιφάνειά του.

Οι κινήσεις αυτές ποικίλουν στις διάφορες εργαλειομηχανές. Για παράδειγμα κατά την τόννευση η κύρια κίνηση παρέχεται στο τεμάχιο που περιστρέφεται ενώ το εργαλείο εκτελεί την δευτερεύουσα. Καθώς μετατίθεται ευθύγραμμα.

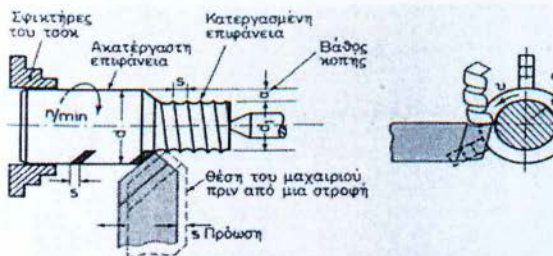
Για την κατεργασία ενός τεμαχίου σε μία εργαλειομηχανή, οφείλουμε να έχουμε υπόψιν **τρία χαρακτηριστικά στοιχεία**, τα οποία παρατίθενται παρακάτω:

i. **Η Ταχύτητα Κοπής (u)** είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της κόψης (ακμής) του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την πρωτεύουσα κίνηση και συνήθως μετράται σε m/min

ii. **Η Πρόωση (s)** είναι η σχετική μετατόπιση (συνήθως κάθετη) του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την δευτερεύουσα κίνηση και μετράται συνήθως σε mm/rev κατά την κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης.

iii.

Το Βάθος Κοπής (a) είναι η υψομετρική διαφορά της ακατέργαστης από την κατεργασμένη επιφάνεια και μετράται σε mm.



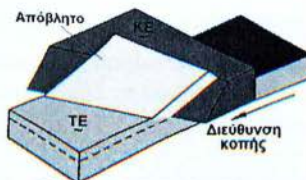
d = Διάμετρος ακατέργαστου
 d_1 = Διάμετρος κατεργασμένου
 u = Ταχύτητα κοπής = $\frac{d \cdot n}{1000}$
 s = Πρόωση
 a = Βάθος κοπής = $\frac{d - d_1}{2}$

Περαιτέρω για τα χαρακτηριστικά στοιχεία της κοπής που αποτελούν και της συνθήκες της κατεργασίας θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Τα είδη της κοπής διακρίνονται ανάλογα με την σχετική θέση της ακμής του εργαλείου ως προς τη διεύθυνση κοπής. Έτσι έχουμε την ορθογωνική (Σχ 2.5) και την



Σχήμα 2.5 Ορθογωνική Κοπή



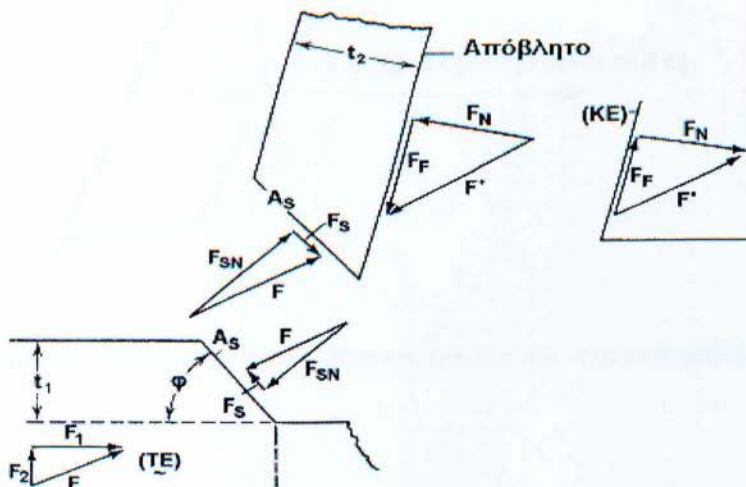
Σχήμα 2.6 Λοξή Κοπή
λοξή (ή πλάγια) κοπή (Σχ 2.6):

Η μελέτη της μορφής του αποβλήτου βάσει της κοπής θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2.2. Δυνάμεις Κοπής

Αρχικά θα μελετήσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή στην απλοποιημένη -διδιάστατη- περίπτωση της ορθογωνικής κοπής. Το απόβλητο θεωρείται ένα σώμα απολύτως στερεό που βρίσκεται σε οριακή ισορροπία και σε αλληλεπίδραση με το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο. Οι δυνάμεις φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχ 2.7) και ακολουθεί η ανάλυσή τους:

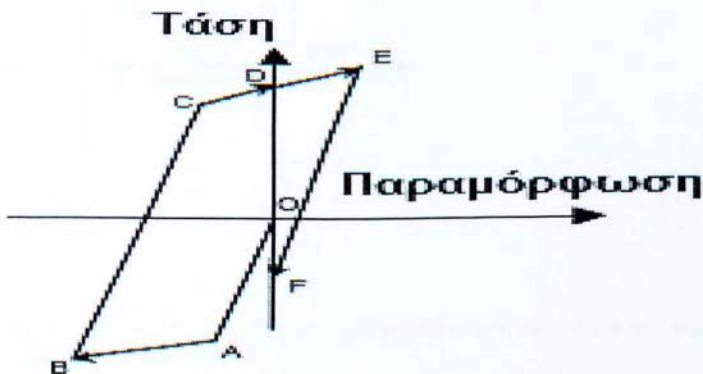
Σχήμα 2.7 Διανυσματική αναπαράσταση των δυνάμεων διδιάστατης κοπής



- > F_{Si} Η αντίσταση του υλικού του τεμαχίου σε διάτμηση.
- > F_{SN} : Η κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης, δηλαδή κάθετη στην F_S .
- > F_F : Η δύναμη τριβής στην διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου και αποβλήτου η οποία αντίκειται στην κίνηση του αποβλήτου.
- > F_N : Η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και αποβλήτου.

Η F ορίζεται ως η συνισταμένη των F_S και F_{SN} , ενώ η F' ως η συνισταμένη των F_F και F_N . Εφόσον το απόβλητο θεωρήσαμε ότι βρίσκεται σε ισορροπία, πρέπει $F=F'$. Η δύναμη αυτή καλείται δύναμη κοπής και μπορεί να αναλυθεί στο επίπεδο στην οριζόντια F_1 (κύρια δύναμη κοπής) και κάθετη F_2 (δύναμη άπωσης) συνιστώσα της.

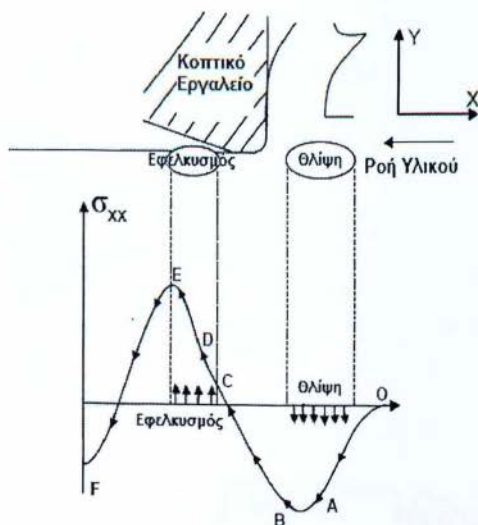
Κατά την λοξή κοπή -η οποία κυρίως μας ενδιαφέρει- οι δυνάμεις αναλύονται τρισδιάστατα και έτσι έχουμε τρεις συνιστώσες της δύναμης F : F_1 , F_2 και F_3 οι οποίες μετριούνται εύκολα με δυναμόμετρο κατά την κοπή. Στις κατεργασίες κοπής παρουσιάζονται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις του υλικού και ιδιαίτερα στις κοπές υψηλής ταχύτητας όπου τα θερμικά φαινόμενα παίζουν σημαντικότερο ρόλο από τα μηχανικά. Όπως βλέπουμε και στα σχήματα (Σχ 2.8 & 2.9), κατά την τόννευση (σε διδιάστατη ανάλυση), το τεμάχιο παραμορφώνεται πλαστικά από την επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου και την ακμή του. Μπροστά από το εργαλείο έχουμε ανάπτυξη θλιπτικής τάσης στο τεμάχιο και εφελκυστικής (παραμένουσας) πίσω από το εργαλείο



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα Τάσεων - Παραμορφώσεων από μηχανική καταπόνηση

2.2.3 Θερμότητα και Θερμοκρασία Κοπής

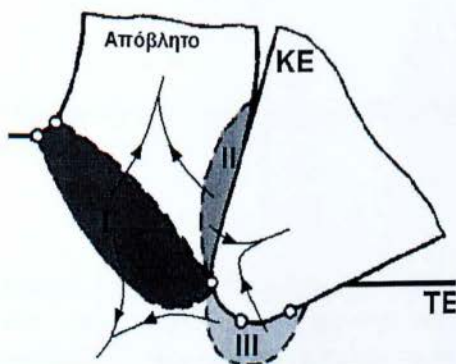
Στις κατεργασίες κοπής παρουσιάζονται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις του υλικού και ιδιαίτερα στις κοπές υψηλής ταχύτητας όπου τα θερμικά φαινόμενα παίζουν σημαντικότερο ρόλο από τα μηχανικά. Όπως βλέπουμε και στα σχήμα (Σχ 2.9), κατά την τόννευση (σε διδιάστατη ανάλυση), το τεμάχιο παραμορφώνεται πλαστικά από την επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου και την ακμή του. Μπροστά από το εργαλείο έχουμε ανάπτυξη θλιπτικής τάσης στο τεμάχιο και εφελκυστικής (παραμένουσας) πίσω από το εργαλείο



Σχήμα 2.9 Οι εξελίξεις των τασιών φορτίων στη επιφάνεια του τεμαχίου μόνο από μηχανική καταπόνηση

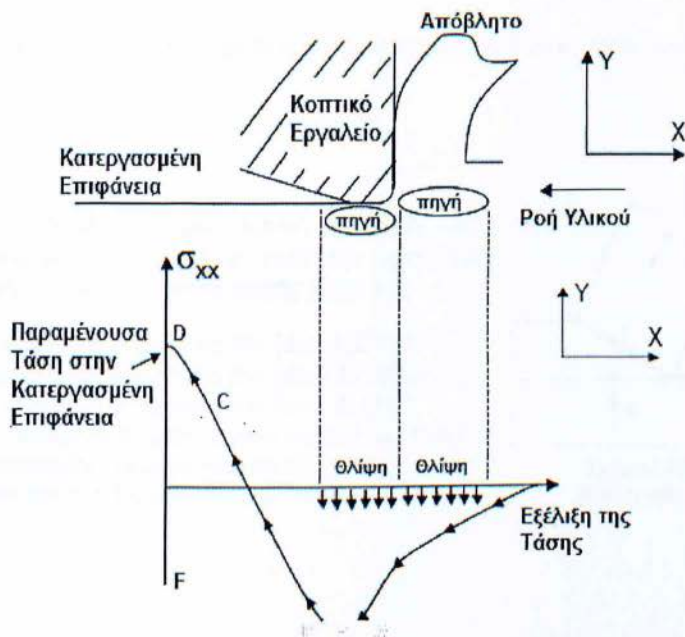
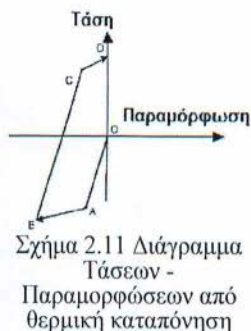
Η επίδραση των θερμικών φαινομένων από την άλλη είναι εντελώς διαφορετική. Στην γενική περίπτωση κοπτικού εργαλείου με στρογγυλεμένη ακμή, έχουμε τρεις περιοχές που λειτουργούν ως πηγές θερμότητας κατά την κοπή:

- I. Η πρωτεύουσα ζώνη με το έργο διάτμησης.
- II. Η δευτερεύουσα ζώνη με το έργο τριβής.
- III. Η περιοχή τριβής με το καμπύλο τμήμα του κοπτικού εργαλείου (ακμή)



Σχήμα 2.10 Ζώνες εκπομπής θερμότητας στο τεμάχιο

Η επιφάνεια που ακόμη δεν έχει κατεργαστεί και βρίσκεται στις τρεις αυτές ζώνες ή κοντά σε αυτές υπόκειται σε έντονη θερμική ροή και έτσι προκαλείται τοπική πλαστική παραμόρφωση λόγω της ανάπτυξης υψηλής θερμοκρασίας. Αν αγνοηθούν τα φαινόμενα της μηχανικής και της μικροδομής του υλικού, μελετώντας μόνο τα θερμικά φαινόμενα, βλέπουμε στα σχήματα (Σχ 2.11 & 2.12) ότι η κατεργασμένη επιφάνεια στη συνέχεια έχει παραμένουσες τάσεις, θλιπτικές ή εφελκυστικές ανάλογα με τον συντελεστή διαστολής (εφελκυστικές για μέταλλα)



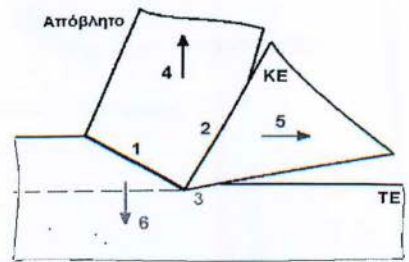
Σχήμα 2.12 Η εξέλιξη της των τασικών φορτίων στην επιφάνεια του τεμαχίου μόνο από θερμική καταπόνηση

Για τον υπολογισμό μιας μέσης θερμοκρασίας στο επίπεδο διάτμησης και στο κοπτικό εργαλείο, είναι απαραίτητο να θεσπιστεί ένα κριτήριο επιμερισμού της συνολικής παραγόμενης θερμότητας στο εργαλείο, το τεμάχιο και το απόβλητο και έτσι κάνουμε και τις παρακάτω παραδοχές:

- Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, η κοπή θεωρείται ισόθερμη αφού ο ρυθμός απαγωγής της παραγομένης θερμότητας είναι περίπου ίσος με το ρυθμό έκλυσής της.
- Η αύξηση της ταχύτητας κοπής συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας τεμαχίου και εργαλείου αφού ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας υπολείπεται του ρυθμού έκλυσης.
- Σε πολύ υψηλές ταχύτητες κοπής, η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως αδιαβατική.

Ακολουθεί μια τυπική διανομή της παραγομένης θερμότητας κατά την κοπή για μικρή έως μέση ταχύτητα κοπής (Σχ 2.13):

- 1: Εκλυόμενη θερμότητα στη ζώνη I (80%)
- 2: Εκλυόμενη θερμότητα στη ζώνη II (18%)
- 3: Εκλυόμενη θερμότητα στη ζώνη III (2%)
- 4: Απαγόμενη θερμότητα από απόβλητο (75%)
- 5: Απαγόμενη θερμότητα από ΚΕ (17%)
- 6: Απαγόμενη θερμότητα από ΤΕ (8%)



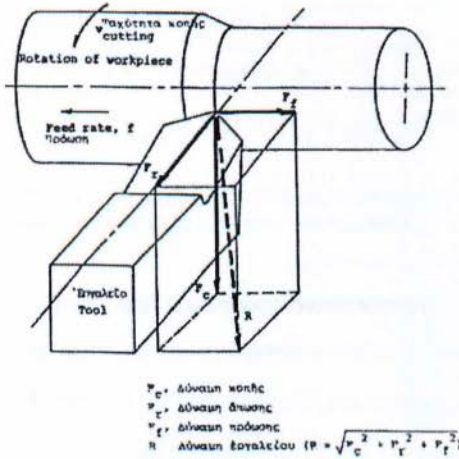
Σχήμα 2.13 Διανομή της θερμότητας κατά την κοπή

Τέλος πρέπει να σημειωθεί επιγραμματικά ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο κοπτικό εργαλείο -κυρίως στην ακμή του- αυξάνεται κυρίως με:

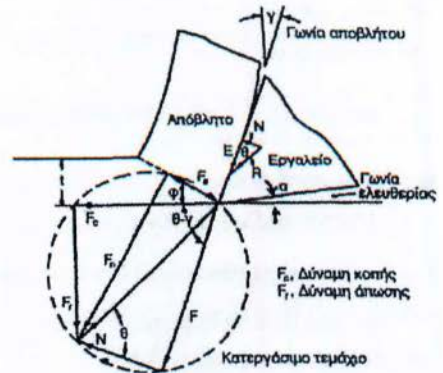
- Αύξηση της ταχύτητας κοπής (όπως αναλύθηκε προηγουμένως).
- Αύξηση της σκληρότητας του υλικού του τεμαχίου.
- Αύξηση του βάθους κοπής.
- Αύξηση του βάθους προώσεως.

2.2.4 Λοξή κοπή

Πρόκειται για την γενική μορφή της κοπής. Όπως και στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής, που αναφέρεται αμέσως μετά, χρησιμοποιείται ένα κοπτικό εργαλείο με σχήμα σφήνας για την αφαίρεση του μετάλλου. Στο παρακάτω σχήμα 1.2 φαίνεται το κοπτικό εργαλείο καθώς και η δύναμη του εργαλείου μαζί με τις δυνάμεις κοπής, άπωσης και πρόωσης για την περίπτωση της λοξής κοπής.



ΣΧΗΜΑ 1.2 λοξή κοπή



ΣΧΗΜΑ 1.3 Ορθογωνική

2.2.5 Ορθογωνική κοπή

Στην ορθογωνική κοπή η τέμνουσα άκρη του εργαλείου είναι ευθεία και κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης. Εδώ το επίπεδο της κοπής είναι παράλληλο προς την επιφάνεια του προς κατεργασία τεμαχίου, δηλαδή θεωρείται ότι η ροή του υλικού είναι δισδιάστατη και η κατεργασία είναι επίπεδη παραμορφωσιακή με την προϋπόθεση ότι το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του αποβλήτου. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής.

Στο προηγούμενο σχήμα 1.3 η f είναι η δύναμη τριβής ενώ η v είναι η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής αποβλήτου και εργαλείου. Οι N και F_s είναι η κάθετη και η εφαπτομενική συνιστώσα αντίστοιχα στο επίπεδο διάτμησης SS .

2.2.6 Βασικές παράμετροι της κοπής των μετάλλων

Οι βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές (αυτές δηλαδή που μπορούν να αλλάξουν άμεσα) στην διαδικασία κοπής είναι οι παρακάτω:

^ Το υλικό του κοπτικού εργαλείου.

^ Το σχήμα του κοπτικού εργαλείου, η ποιότητα της επιφάνειας του, καθώς και η οξύτητα του.

^ Το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου καθώς και η θερμοκρασία. ^

Οι συνθήκες κοπής, όπως η ταχύτητα, το βάθος κοπής και η πρόωση. ^

Η χρήση υγρών κοπής.

^ Τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, όπως η στιβαρότητα κλπ. ^ Οι μηχανισμοί συγκράτησης του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι αυτές που επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Τέτοιες είναι:

^ Ο τύπος του αποβλήτου που παράγεται.

^ Οι δυνάμεις και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διαδικασία της κοπής.

^ Η αύξηση της θερμοκρασίας στο ως προς κατεργασία τεμάχιο, στο απόβλητο, και το κοπτικό εργαλείο.

^ Η φθορά και η καταστροφή του κοπτικού εργαλείου.

^ Η ποιότητα της επιφάνειας που προκύπτει μετά την κατεργασία.

Από τις βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι σημαντικότερες στην κατεργασία της κοπής είναι:

Η ταχύτητα κοπής: είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής.

Το βάθος κοπής: είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου στο προς κατεργασία τεμάχιο.

Η πρόωση: είναι η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου που προσφέρει με σταθερό ρυθμό στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή. Η κίνηση της πρόωσης στον τόρνο

γίνεται από το κοπτικό εργαλείο, αλλά σε άλλες περιπτώσεις είναι δυνατό να γίνει και από το προς κατεργασία τεμάχιο. Στον τόρνο, ειδικότερα, μπορούμε να πούμε πως η πρόωση είναι η κατά την έννοια του άξονα περιστροφής μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του αντικείμενου.

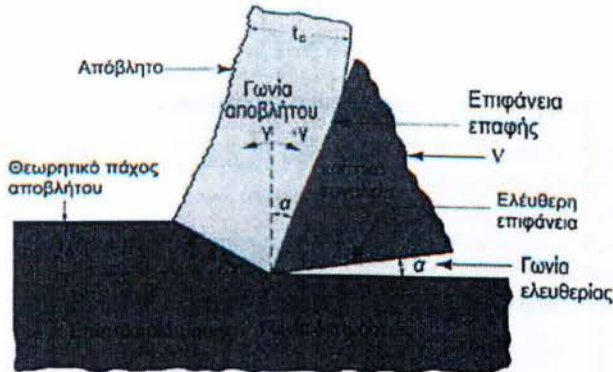
Δύο βασικοί παράγοντες της κατεργασίας κοπής είναι η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιείται αλλά και το κοπτικό εργαλείο. Όσον αφορά την εργαλειομηχανή αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως, ειδικά στην περίπτωση της κοπής με απλή σημειακή επαφή, είναι ο τόρνος στον οποίο και θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην επόμενη παράγραφο. Ιδιαίτερη σημασία αποτελεί επίσης και η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου. Όσον αφορά το κοπτικό εργαλείο, οι κυριότερες γωνίες του είναι (σχήμα 1.4):

Η γωνία ελευθερίας α : επιτρέπει την μείωση της τριβής μεταξύ του προς κατεργασία τεμαχίου και του εργαλείου στις περιοχές του εργαλείου που πρόσκεινται στις δύο κόψεις του επηρεάζοντας την φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η γωνία αποβλήτου γ : είναι η γωνία μεταξύ του μετώπου του κοπτικού εργαλείου και της καθέτου που διέρχεται από το σημείο κοπής. Παίρνει μέρος στον σχηματισμό του αποβλήτου και ελέγχει αποτελεσματικά την κοπή, ενώ πιθανή αύξηση της γωνίας αποβλήτου οδηγεί στην μείωση των δυνάμεων κοπής. Σε μεγάλες όμως γωνίες αποβλήτου το κοπτικό εργαλείο γίνεται πιο αιχμηρό και είναι πιθανή η υπερθέρμανση του καθώς και ελάττωση της αντοχής του. Γενικά μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν. Τέλος σε μεγάλες ταχύτητες κοπής και μικρή διατομή αποβλήτου η γωνία αποβλήτου λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Η γωνία διατμήσεως ϕ : το υλικό παραμορφώνεται συνεχώς με πλαστική διάτμηση κατά μήκος του λεγόμενου επιπέδου διατμήσεως με αποτέλεσμα το σχηματισμό του αποβλήτου (με πάχος t_c). Το επίπεδο διατμήσεως κλίνει προς την διεύθυνση κοπής κατά μια γωνία ϕ .

Το θεωρητικό (t_0) και πραγματικό (t) πάχος αποβλήτου: το t_0 είναι το πάχος του στρώματος του μετάλλου που αφαιρείται με τη βοήθεια του εργαλείου ενώ το πάχος t_c είναι αυτό που αποκτά το απόβλητο μετά την κοπή και ονομάζεται πραγματικό πάχος αποβλήτου .



Σχήμα 1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη κατά την ορθογωνική κοπή (kalpakjian)

<p>Μεταβλητές</p> <p>(εξαρτημένες και ανεξάρτητες)</p>	<p>Επιρροή και συσχετισμός</p>
<p>Ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής, πρόωση, υγρά κοπής</p>	<p>Δυνάμεις, ισχύς, αύξηση θερμοκρασίας, ζωή κοπτικού εργαλείου, είδος αποβλήτου, ποιότητα κατεργασμένης</p>
<p>Γωνία κοπτικού εργαλείου</p>	<p>Όπως παραπάνω, επιρροή στην κατεύθυνση αντίσταση στην φθορά του κοπτικού εργαλείου (φθορά λόγω μηχανικών τριβών που οδηγεί σε απόξεση ή απόσπαση υλικού (tool chipping))</p>
<p>Συνεχές απόβλητο</p>	<p>Καλή ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας, σταθερές δυνάμεις κοπής. (Ανεπιθύμητο στις αυτοματοποιημένες κατεργασίες.)</p>
<p>Σχηματισμός αποβλήτου με ψευδοκοπή</p>	<p>Μικρής ποιότητας κατεργασμένη επιφάνειας. Λεπτή σταθερή κόψη που προστατεύει τις επιφάνειες κοπτικού εργαλείου.</p>
<p>Ασυνεχές απόβλητο</p>	<p>Επιθυμητό για την εύκολη απομάκρυνση του μικρού μεγέθους αποβλήτων. Η αυξομείωση των δυνάμεων κοπής μπορεί να επιδράσει στην ποιότητα επιφάνειας και να προκαλέσει δονήσεις και αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις (chatter).</p>

Αύξηση θερμοκρασίας	Επηρεάζει την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, συμβάλει στην ανάπτυξη φθοράς κρατήρα, την διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου, προκαλεί θερμικές βλάβες στην επιφάνεια του τεμαχίου.
Φθορά κοπτικού εργαλείου	Επιδρά στην ποιότητα επιφάνειας, στην διαστατική ακρίβεια της κατεργασίας, στην άνοδος θερμοκρασίας, στις δυνάμεις και την ισχύ.
Κατεργασιμότητα	Σχετίζεται με την ζωή κοπτικού εργαλείου, την ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας, τις δυνάμεις και την ισχύ

2.3. Συμβατικές εργαλειομηχανές κοπής

Η εργαλειομηχανή, δηλαδή το σύνολο των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μιας κατεργασίας, έχει ως σκοπό την παροχή της αναγκαίας ισχύος, την εξασφάλιση συγκράτησης του τεμαχίου, την εκτέλεση των σχετικών κινήσεων τεμαχίου και εργαλείου και τον έλεγχο της ορθής εξέλιξης της διαδικασίας. Οι εργαλειομηχανές των συμβατικών κατεργασιών εκμεταλλεύονται τον μηχανισμό διάτμησης του υλικού στη ζώνη κοπής και οι βασικές κινήσεις τους -κύριες ή βοηθητικές- ανταποκρίνονται στις κινήσεις κοπής που αναλύθηκαν παραπάνω (ενότητα 2.2.1). Οι συμβατικές εργαλειομηχανές κοπής χρησιμεύουν για διάνοιξη οπών, κοπή πρώτης ύλης, δημιουργία διαφόρων σχημάτων επιφανειών, οδοντοτροχών, ελικώσεων κ.ά. και σε αυτές συμπεριλαμβάνονται τόννοι, φρέζες, δράπανα, πλάνες, γριναζοκόπτες, πριόνια και λειαντικά.

Η παρούσα εργασία έχει επικεντρωθεί στην τόννευση και το φρεζάρισμα, γι' αυτό αναλύονται παρακάτω ο τόννος και η φρέζα, από τις πολλές εργαλειομηχανές των συμβατικών κατεργασιών που χρησιμοποιούνται.

Με τις κατεργασίες κοπής, ως μεθόδου παραγωγής μεταλλικών προϊόντων, αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου σε σχήμα σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλήτων (γρεζιών) σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλλουν κατά περίπτωση κατεργασίας. Έτσι, με τις κατεργασίες κοπής προσδίδεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο την επιθυμητή (προδιαγεγραμμένη) μορφή και διαστάσεις μέσα σε επιτρεπόμενα όρια ανοχών και ακόμη την απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών του τεμαχίου, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά τη χρήση του, για την οποία και προορίζεται. Η κοπή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου εκάστοτε κοπτικού εργαλείου (απλούστερα εργαλείου ή κοπτικού), οπωσδήποτε αρκετά σκληρότερου από το υλικό που κατεργαζόμαστε και της συναφούς εργαλείου μηχανής, που προσδίδει την απαιτούμενη για την κοπή ισχύ και εκτελεί τις αναγκαίες για την μορφοποίηση του κομματιού κινήσεις τόσο του κομματιού, όσο και του εργαλείου.

2.3.1. Τόρνος

Ο τόρνος είναι από τις πιο παλιές μηχανές που επινόησε ο άνθρωπος και σήμερα είναι αναπόσπαστο κομμάτι κάθε μικρού ή μεγάλου μηχανουργείου. Η εξωτερική μορφή του τόρνου έχει αλλάξει σημαντικά τα τελευταία χρόνια ώστε να ανταποκριθεί στις καινούριες απαιτήσεις σε ταχύτητα, ακρίβεια και αυτοματισμό.

Τα βασικά μέρη του τόρνου είναι:

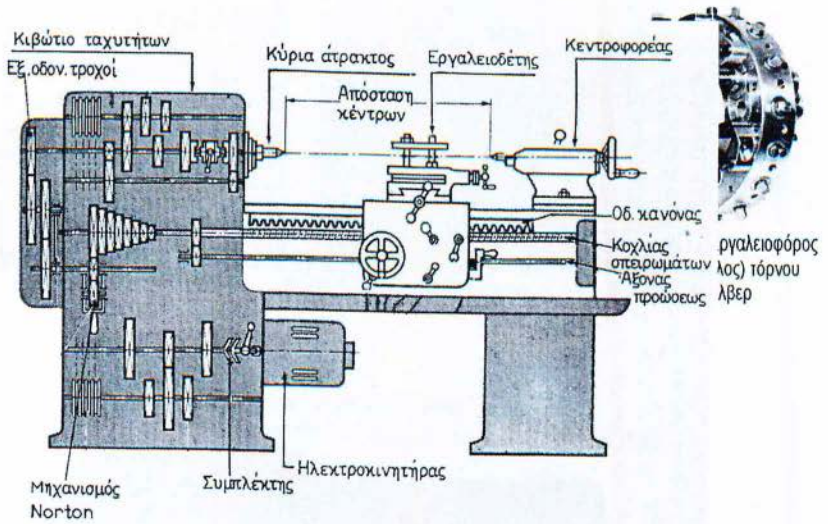
Το σώμα, είναι το τμήμα στο οποίο προσαρμόζονται όλα τα υπόλοιπα μέρη του τόρνου και είναι κατά κανόνα φτιαγμένο από χυτοσίδηρο.

- **Το κιβώτιο ταχυτήτων**, που έχει ως σκοπό την μετάδοση της κίνησης (με τραπεζοειδή λουριά ή γρανάζια) από τον ηλεκτροκινητήρα στην κύρια άτρακτο, στην άκρη της οποίας βρίσκεται η πλάκα-φορέας του τσοκ που προσδένεται το τεμάχιο.

- **Το κιβώτιο προώσεων**, το οποίο παρέχει κίνηση στο εργαλειοφορείο και περιέχει έναν ενδιάμεσο μηχανισμό μεταξύ αυτού και του κιβωτίου ταχυτήτων.

- **Το Εργαλειοφορείο (σεπόρτι)**, που φέρει το κοπτικό εργαλείο και εκτελεί διαμίκη και εγκάρσια κίνηση με δικό του κιβώτιο μετάδοσης κίνησης.

- **Ο Κεντροφορέας (κουκουβάγια)**, χρησιμεύει σαν στήριγμα του ελεύθερου άκρου του κομματιού μεγάλου μήκους ή ως υποδοχέας τρυπανιού σε



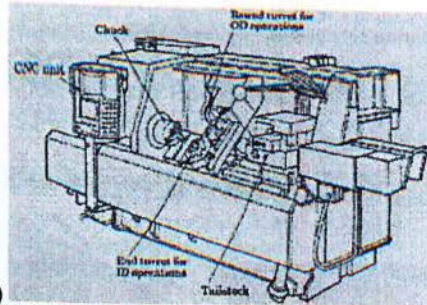
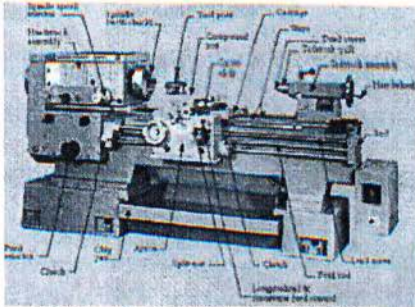
Σχήμα 2.14 Ο Συμβατικός Τόρνος και τα κυριότερα μέρη του

Στην ταξινόμηση των τόρνων ανάλογα με τον βαθμό αυτοματισμού έχουμε:

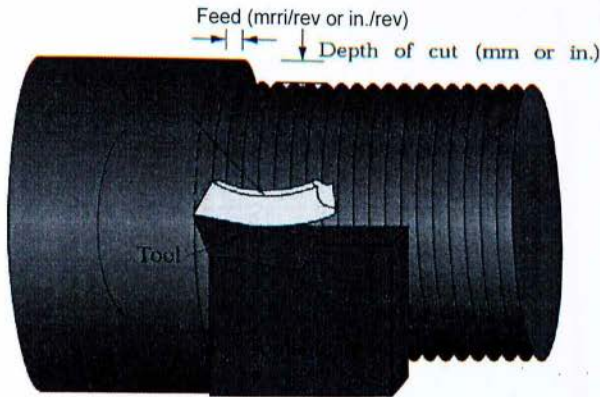
- Απλός τόρνος, στον οποίο οι βοηθητικές κινήσεις δίνονται με το χέρι.
- Αυτόματος τόρνος, μηχανικού προγραμματισμού.
- Αυτόματος τόρνος με αριθμητικό προγραμματισμό μέσω Η/Υ (CNC).
- Ημιαυτόματος (ή πλέον σήμερα αυτόματος) τόρνος, γνωστός ως ρεβόλβερ

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στον τόρνο ρεβόλβερ, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως στις περιπτώσεις μεγάλης σε σειρά παραγωγής χάρη στην δυνατότητα γρήγορης αλλαγής εργαλείου και ταυτόχρονης κοπής με πολλά εργαλεία που παρέχει. Τα εργαλεία είναι συγκρατημένα με τη σειρά που πρέπει, πάνω σε μια περιστροφική εργαλειοφόρο κεφαλή, ονομαζόμενη ως «πύργος» ή «μύλος». Ο μύλος αυτός μοιάζει με μύλο περιστρόφου και έτσι προκύπτει ο χαρακτηρισμός «ρεβόλβερ».

Εκτός του συμβατικού τόρνου έχουμε και τόρνο (CNC) όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.16 (α) Συμβατικός τόννος και (β)Μηχανή τόννευσης CNC (Kalpakjian) (a) (b)



Είδη τόννευσης

Βάσει του άξονα περιστροφής του τεμαχίου ή άξονα τόννευσης διακρίνουμε την τόννευση ως οριζόντια ή ως κατακόρυφη. Γενικά, μπορούν να τόννευτούν επιφάνειες εκ περιστροφής εξωτερικές όσο και εσωτερικές. Έτσι τα είδη τόννευσης ταξινομούνται (σχήμα 1.11 και 1.12) όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

^ Ανάλογα με τη διάταξη του άξονα τόννευσης:

- Οριζόντια (οριζόντιος άξονας)
- Κατακόρυφη (κατακόρυφος άξονας).

^ Ανάλογα με τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας:

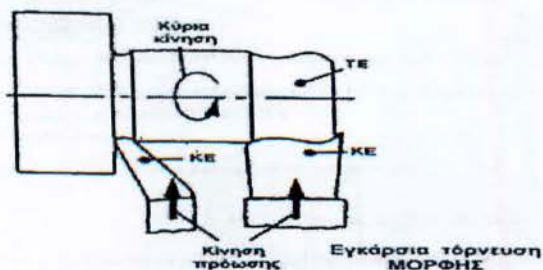
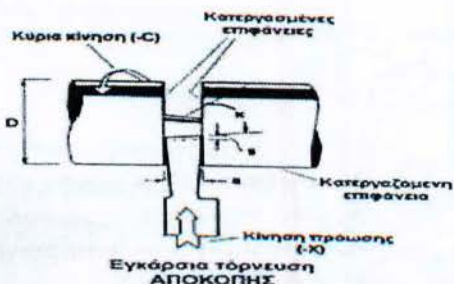
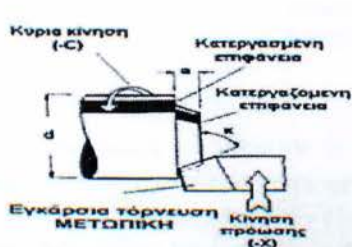
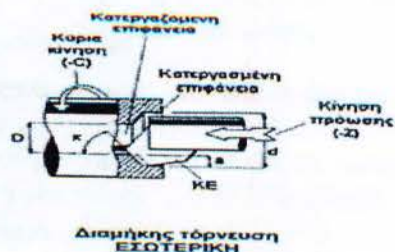
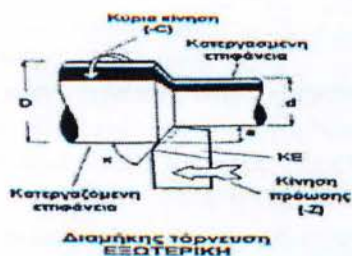
- Εξωτερική
- Εσωτερική.

^ Ανάλογα με την αμοιβαία σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης:

- Διαμήκης τórνευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τórνευσης.
- Εγκάρσια τórνευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τórνευσης, η οποία διακρίνεται με τη σειρά της σε:
 - Μετωπική
 - Ακτινική (τόρνευση αποκοπής και τórνευση μορφής).
 - Κωνική τórνευση, με την διεύθυνση της κίνησης πρόωσης να τέμνει τον άξονα τórνευσης.

^ Ειδικές τórνεύσεις:

- Σπειροτόμηση (εξωτερική ή εσωτερική),
- Τórνευση με πολλά ΚΕ, είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής.



Διάφορα είδη τόννευσης - Διαμήκης και εγκάρσια τόννευση Σχήματα 2.18-2.19

2.3.2. Φρέζα

Η φρεζομηχανή ή φρέζα είναι εργαλειομηχανή κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφική, όπως και ο τόρνος. Όμως η κίνηση αυτή μεταφέρεται στο εργαλείο και έχει ακόμη τρεις βοηθητικές κινήσεις, σε αντίθεση με τον τόρνο που έχει δύο. Η φρέζα έχει κι αυτή εξελιχθεί και αλλάξει μορφή τα τελευταία χρόνια, ενώ προσαρμόστηκε άμογα στις νέες διατάξεις εργαλειομηχανής, τις CNC.

Η απλή φρεζομηχανή χωρίζεται σε τρεις τύπους ανάλογα με τη θέση της κυρίας ατράκτου και τη γενική διαμόρφωσή τους: Την Οριζόντια, την Κατακόρυφη ή Κάθετη και τις Ειδικές Φρεζομηχανές (φρεζοπλάνη, φρεζοδράπανο, γρναζοκόπτης κ.ά.). Τα βασικά μέρη μιας τυπικής φρέζας δεν αλλάζουν σημαντικά από είδος σε είδος.

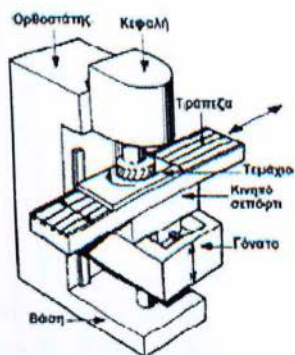
Σε μια κάθετη φρέζα για παράδειγμα έχουμε:

ο **Το σώμα (ορθοστάτης)**, είναι τοποθετημένα όλα τα μέρη της μηχανής και φέρει στο εσωτερικό του το κιβώτιο ταχυτήτων και τον ηλεκτροκινητήρα. Συνήθως είναι ενοποιημένο με τη βάση.

ο **Η κύρια άτρακτος**, είναι ο εργαλειοφόρος άξονας και είναι διάτρητος σε όλο του το μήκος. Βρίσκεται στην Κεφαλή (ή στον πρόβολο για οριζόντια φρέζα).

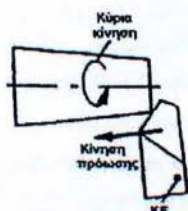
ο **Το συγκρότημα τράπεζας**, εξασφαλίζει τις κινήσεις σε όλα τα επίπεδα του τεμαχίου που είναι προσδεδμενο σε αυτό με το γόνατο (κατακόρυφη), το σεπόρτι (εγκάρσια) και την τράπεζα που μπορεί συνήθως να περιστρέφεται.

Σχήμα 2.19 Κύρια Μέρη Κατακόρυφης Φρεζομηχανής

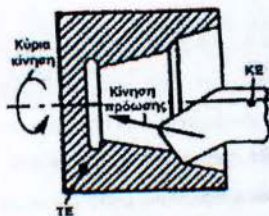


Η Φρέζα, ανάλογα με τη διάταξη του εργαλειοφόρου άξονα, μπορεί να εκτελέσει τα παρακάτω είδη φρεζαρίσματος:

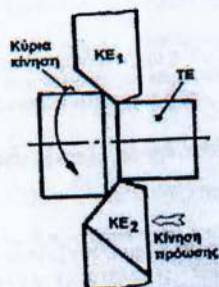
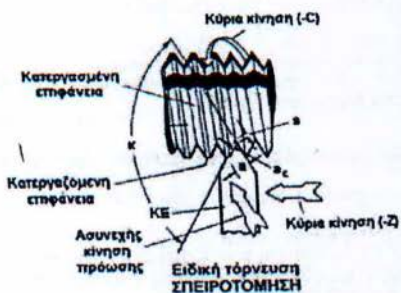
1. Περιφερικό, με τον άξονα του κοπτικού εργαλείου να είναι παράλληλος προς την τράπεζα. Η κίνηση προώσεως (του τεμαχίου) μπορεί να είναι α)αντίρροπη (up milling) ή β)ομόρροπη (down milling) προς την πρωτεύουσα κίνηση.



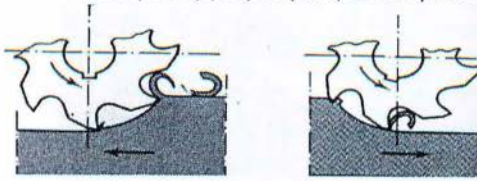
Κωνική τόνρευση ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ



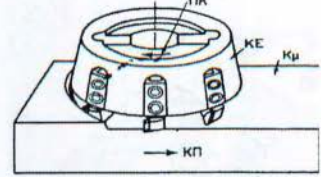
Κωνική τόνρευση ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ



2. Μετωπικό, με τον άξονα του κοπτικού εργαλείου να είναι κάθετος προς την τράπεζα, έτσι η κατεργασμένη επιφάνεια προκύπτει κάθετη στον άξονα της φρέζας.



Σχήμα 2.20 Περιφερικό Φρεζάρισμα:
α) Αντίρροπο (up) και β) Ομόρροπο (down)



Σχήμα 2.21 Μετωπικό Φρεζάρισμα

2.4. Κοπτικά Εργαλεία

2.4.1. Περιγραφή - Γεωμετρία

Η επιτυχία σε κάθε κατεργασία αποβολής υλικού καθορίζεται από το τι συμβαίνει στο σημείο επαφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου με το κοπτικό εργαλείο. Η αξία της παγκόσμιας βιομηχανίας κατεργασιών με αποβολή υλικού είναι πάνω από \$40 δισεκατομμύρια, από τα οποία τα \$10 δισεκατομμύρια αποτελούν τα κοπτικά εργαλεία [1]. Η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου ανάλογα με την κατεργασία και το υλικό του τεμαχίου, γίνεται με γνώμονα τη γεωμετρία και το υλικό του εργαλείου. Γι' αυτό τα κοπτικά εργαλεία καθορισμένης γεωμετρίας οφείλουν να έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από αυτή του τεμαχίου, να διατηρούν της ιδιότητές τους σε υψηλές θερμοκρασίες, να παρουσιάζουν μικρή φθορά κατά τη λειτουργία και να είναι εργονομικά κατά την τοποθέτησή τους.



Τα σύγχρονα κεραμικά υλικά επιτρέπουν την κατασκευή κοπτικών εργαλείων ιδανικών σε κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων χωρίς τη χρήση υγρών κοπής.

Τα βήματα κλειδιά κατά την παραγωγή των κοπτικών εργαλείων είναι

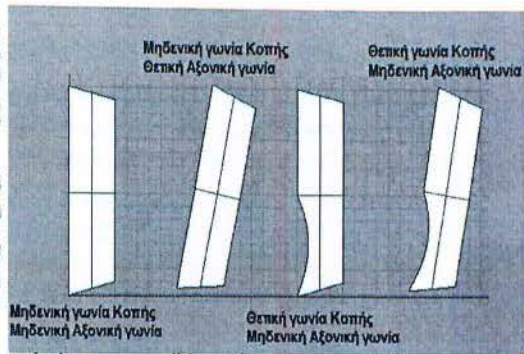
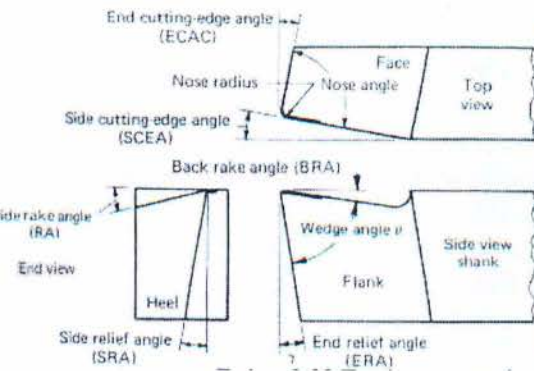
- * η κονιομεταλλουργία (καθορισμός αναλογιών, άλεση υλικών και ξήρανση)
- * η προεπεξεργασία των γεωμετρικών και σύντηξη : οξειδωτική σύντηξη, σύντηξη με αέρια και συμπίεση και τέλος
- * την κατεργασία υψηλών απαιτήσεων (ανοχών).

Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα κεραμικά υλικά, επιτρέπουν υψηλές ταχύτητες κοπής και κατεργασίας καθώς και κοπή χωρίς την χρήση

υγρών, διότι δεν υπάρχει η ανάγκη μείωσης των θερμοκρασιών που εμφανίζονται στην ακμή κοπής.

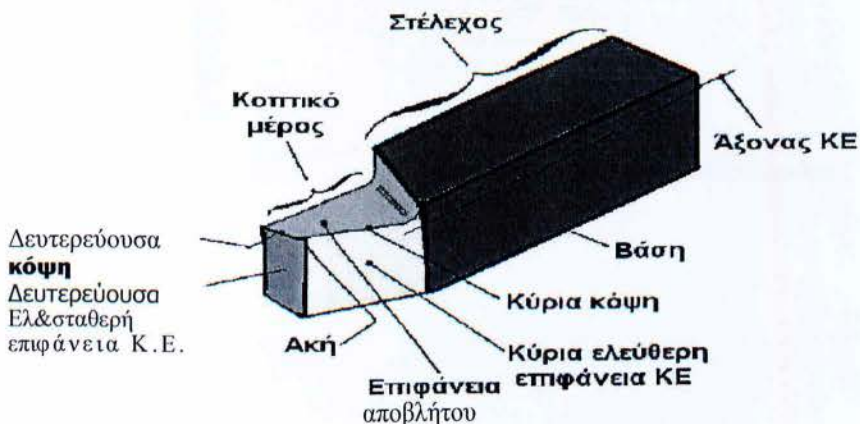
Η γεωμετρία στην ορθογωνική κοπή μπορεί να προσομοιωθεί διδιάστατα και παρουσιάστηκε κατά τη μελέτη της κοπής (2.2.1). Κατά την λοξή κοπή όμως δεν έχουμε μόνο 3 γωνίες (ελευθερίας, σφήνας, αποβλήτου), εκτός της ακτίνας καμπυλότητας της ακμής, που να καθορίζουν τη γεωμετρία αλλά 6. Αυτές είναι:

Οπίσθια γωνία αποβλήτου	(back rake angle)
Πλευρική γωνία αποβλήτου	(side rake angle)
Ακραία γωνία ελευθερίας	(end relief angle)
Πλευρική γωνία ελευθερίας	(side relief angle)
Ακραία γωνία κοπής	(end cutting edge angle)
Πλευρική γωνία κοπής	(side cutting edge angle)



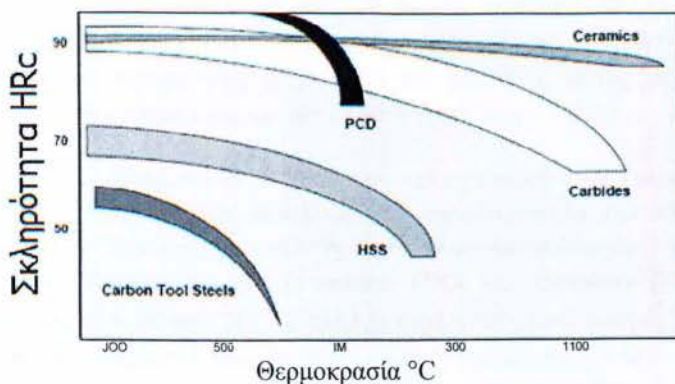
Η πίσω γωνία αποβλήτου καθορίζει τη διεύθυνση ροής του αποβλήτου, ενώ η πλευρική γωνία αποβλήτου είναι σημαντική για την κατανάλωση ισχύος. Οι γωνίες ελευθερίας ελέγχουν την «παρεμβολή» εργαλείου-τεμαχίου ενώ οι γωνίες κοπής επηρεάζουν άμεσα την δύναμη κοπής και την σταθερότητα της κατεργασίας. Οι γωνίες γενικά παίζουν σημαντικό ρόλο στην διάρκεια ζωής του εργαλείου, κάτι το οποίο θα εξεταστεί σε επόμενη ενότητα. Εκτός από τις γωνίες του εργαλείου, σημασία έχει και η τοποθέτηση της μανέλας (του στελέχους πάνω στο οποίο τοποθετείται το εργαλείο και αυτό με τη σειρά του στον εργαλειοδέτη).

Σε ακόμη ένα σχήμα παρατηρούμε την τυποποιημένη μορφή του κοπτικού εργαλείου τórνευσης.

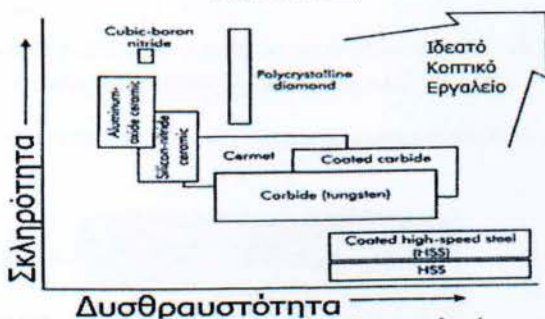


2.4.2. Υλικά Κατασκευής

Σε μια κατεργασία είναι άκρως σημαντικό να γίνει σωστή επιλογή εργαλείου και σε αυτό συντελεί κυρίως το υλικό κατασκευής του κοπτικού εργαλείου. Τρεις είναι οι ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν την επιλογή μας: **σκληρότητα (hardness)**, **δυσθραυστότητα (toughness)** και **αντοχή στη φθορά (wear resistance)**. Εκτός από τις δυνάμεις που πρέπει να αντέχει κατά την κοπή το υλικό, οφείλει και να μην χάνει την σκληρότητά του όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία του κατά την κατεργασία. Παρακάτω βλέπουμε δύο συγκριτικά διαγράμματα (Σχ 2.23 & 2.24) των κυριότερων υλικών όσον αφορά την σκληρότητα και την δυσθραυστότητα.



Σχήμα 2.23 Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας



Σχήμα 2.24 Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας υλικών συναρτήσει της δυσθραυστότητας

Φυσικά στην τελική επιλογή μας, σημασία έχει και το κόστος του υλικού. Τα κυριότερα υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων είναι τα ακόλουθα:

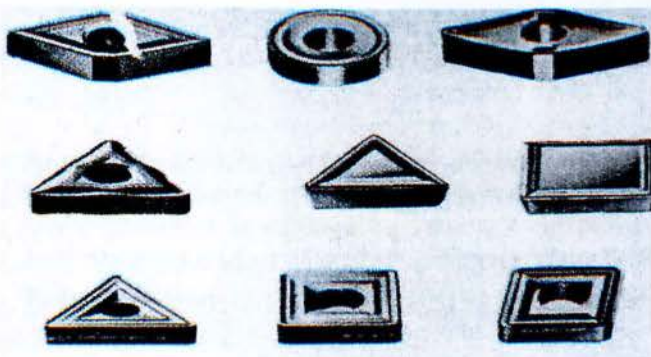
❖ **Ανθρακούχοι χάλυβες:** Με περιεκτικότητα σε άνθρακα $\pi(\hat{=})0,6 - 1,5\%$ και μικρή περιεκτικότητα σε άλλα στοιχεία (μαγγάνιο, πυρίτιο, χρώμιο κλπ) είναι το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή εργαλείων κοπής. Η χρήση τους στην βιομηχανία είναι πλέον ασήμαντη, αφού η σκληρότητά τους μειώνεται σημαντικά μετά τους 200°C . Το μόνο τους πλεονέκτημα είναι ίσως το κόστος τους.

❖ **Ταχυχάλυβες (HSS):** Είναι ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες που περιέχουν βολφράμιο και χρώμιο, ενώ το πρώτο συνθετικό του ονόματός τους προήλθε από την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και άρα ταχύτητες κοπής. Για θερμοκρασίες κατεργασίας μέχρι 600°C και ταχύτητες κοπής μέχρι 50m/min αποτελούν την φθηνότερη λύση και μια αξιόπιστη επιλογή.

❖ **Σκληρομέταλλα:** Η εφεύρεση και εφαρμογή τους έφερε ουσιαστική επανάσταση στην κοπή των μετάλλων. Τα σκληρομέταλλα δεν είναι κράματα μετάλλων, αλλά προκύπτουν σαν προϊόντα κωνιομεταλλουργίας από μίγματα καρβιδίων του βολφραμίου (WC), τιτανίου (TiC) και τανταλίου (TaC) κ.ά. με συνδετικό υλικό το κοβάλτιο (Co). Τα πλεονεκτήματά τους είναι πολλά:

- Διατηρούν τη σκληρότητά τους σε θερμοκρασίες κοντά στους 1000°C και μπορούν να φτάσουν μέχρι τους 1500°C με τις κατάλληλες επικαλύψεις (θα αναφερθούμε σε αυτές αργότερα). Έτσι οι ταχύτητες κοπής κυμαίνονται μεταξύ 150 και 600m/min , ενώ με μικρότερες μπορούν να κατεργαστούν χωρίς προβλήματα βαμμένο χάλυβα.
- Έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και έτσι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κοπή είναι η μικρότερη από τα υπόλοιπα υλικά με ίδια ταχύτητα κοπής.
- Έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και όριο διαρροής, είναι δηλαδή πολύ στιβαρά και με μεγάλη αντοχή στην φθορά.
- Εργάζονται βασικά χωρίς υγρό κοπής, αν αυτό βέβαια χρειαστεί, πρέπει να είναι άφθονο, γιατί είναι πολύ ευαίσθητα σε θερμοκρασίες και μεταβολές.

Σχήμα 2.25 Κοπτικά εργαλεία τόνρευσης κατασκευασμένα από σκληρομέταλλα (Καρβίδια).



Έτσι περνάμε στα μειονεκτήματα, καθώς τα σκληρομέταλλα δεν αποτελούν πανάκεια:

- Είναι ευαίσθητα σε κραδασμούς και απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και φορτίων, γι' αυτό δεν χρησιμοποιούνται σκληρομέταλλα σε διακοπτόμενες κοπές.
- Το τρόχισμα των ακμών τους απαιτεί μεγάλη προσοχή, γι' αυτό κατασκευάζονται με άνω της μίας ακμής, ώστε να αποφεύγεται το τρόχισμα και απλώς να αλλάζει η κορυφή του κοπτικού εργαλείου.

Κεραμικά Υλικά

Είναι ιδανικά για την παρασκευή κοπτικών εργαλείων, κυρίως λόγω των εξής πλεονεκτημάτων: έχουν υψηλή σκληρότητα και είναι χημικά αδρανή. Η μεγάλη σκληρότητα, ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με τη χημική αδράνεια δίνουν στα κεραμικά υλικά τη δυνατότητα να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα εμφανίζοντας παράλληλα χαμηλότερα επίπεδα κόπωσης και φθοράς σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά. Παρουσιάζουν ακόμα μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές ταχύτητες κοπής με μεγάλους ρυθμούς αποκοπής υλικού τεμαχίου στην επιθυμητή κατεργασία.



Ενισχυμένες ίνες από καρβίδιο πυριτίου (αριστερά) βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες της αλούμινας εισχωρώντας σημαντικά στο κεραμικό πλέγμα και καθιστώντας εξαιρετικά δύσκολη την απομάκρυνσή τους από αυτό με οποιαδήποτε μέθοδο.

Τα κεραμικά κοπτικά εργαλεία έχουν αποδειχθεί αξιόπιστα στην τórνευση και το φρεζάρισμα χυτοχαλυβων και υπερκραματων, καθώς και στο φινίρισμα σκληροχαλυβων. Σε κατεργασίες όπως οι ανωτέρω, τα κεραμικά υλικά βασίζονται στην αλουμίνα ή το νιτρίδιο του πυριτίου, έχουν το εμφανή πλεονέκτημα έναντι των σκληρομετάλλων.

Πάντως, το μυστικό της επιτυχίας όσον αφορά τα κεραμικά υλικά είναι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Η υπερθέρμανση της πλειοψηφίας των υλικών αυτών εμφανίζεται στη ζώνη των 2200°C έναντι των 870°C που ισχύει για τα σκληρομέταλλα. Έτσι τα κεραμικά υλικά καθιστούν και τα πλέον σκληρά υλικά κατεργάσιμα, δουλεύοντας σε υψηλές ταχύτητες ώστε να παράγεται αρκετή θερμότητα, ικανή να ανεβάσει την θερμοκρασία του τεμαχίου στη γειτονιά των 1800^Α. Με άλλα λόγια, οι υψηλές ταχύτητες κοπής αποτελούν και τον μηχανισμό με τον οποίο παράγεται η απαιτούμενη θερμότητα για τη σωστή λειτουργία των κεραμικών.

Τα κεραμικά κοπτικά εργαλεία με βάση την αλουμίνα περιλαμβάνουν συνήθως ζirkονία, καρβίδιο ή νιτρίδιο τιτανίου καθώς και καρβίδιο πυριτίου. Τα αποκαλούμενα επίσης και «λευκά κεραμικά» αποτελούν μια κατηγορία υλικών από αλουμίνα με περιεκτικότητα σε ζirkονία μέχρι και 10% προς αύξηση της σκληρότητας.

Τα λευκά κεραμικά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε κατεργασίες φινιρίσματος χαλύβων. Αλουμίνα με περιεκτικότητα μέχρι και 40% σε καρβίδιο του τιτανίου παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε φθορά και χρησιμοποιείται σε κατεργασίες χυτοσιδήρων και ταχυχάλυβων.

Επίσης, αλουμίνα ενισχυμένη με ίνες από καρβίδιο του πυριτίου καταλαμβάνει την κορυφή στην οικογένεια των κεραμικών που έχουν βάση την αλουμίνα όσον αφορά την σκληρότητα και την αντοχή σε θερμικά σοκ. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υλικά της κατηγορίας, το υλικό αυτό μπορεί να λειτουργήσει και με παρουσία ψυκτικού υγρού. Μια τυπική κατεργασία στην οποία κοπτικά από κεραμικά με ενίσχυση τέτοιων ινών, είναι το φινίρισμα νικελούχων κραμάτων σε υψηλές στροφές.

Η χρήση προσθετικών βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών καθώς με τη μορφή λεπτών σωματιδίων ή ινών (whiskers) καταλαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις στο κεραμικό πλέγμα. Τα κεραμικά υλικά αποκτούν επίσης μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και πολλαπλάσια αντοχή σε θλίψη (μέχρι και 6,9GPa) κατά τον προσανατολισμό διευθέτησης των ινών στο κεραμικό πλέγμα.

SiAlONs

Κοπτικά υλικά που παρασκευάζονται με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου, περιλαμβάνουν προϊόντα υψηλής περιεκτικότητας σε νιτρίδιο του πυριτίου καθώς και τα περίφημα υλικά αποκαλούμενα ως SiAlONs τα οποία αποτελούν στερεά διαλύματα αλουμίνας σε νιτρίδιο του πυριτίου, υπο κρυσταλλική μορφή μέσα σε υαλώδη φάση που αποτελείται κυρίως από Y_2O_3 . Η πρώτη κατηγορία κεραμικών εμφανίζει μεγάλη συνοχή πλέγματος, παρόμοια με εκείνη των σκληρομετάλλων, όπως επίσης υψηλή αντοχή και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, παρέχοντας υψηλή αντοχή σε θερμικά σοκ. Τα κοπτικά εργαλεία που παρασκευάζονται με αυτά τα υλικά εμφανίζουν άριστη συμπεριφορά στην τórνευση φαιών χυτοσιδήρων-όπου είναι δυνατή ακόμα και η χρήση υγρών κοπής- καθώς επίσης στο φρεζάρισμα και σε άλλες διακοπτόμενες κατεργασίες.

Στη δεύτερη κατηγορία συναντάμε τα SiAlON που είναι υλικά μεγαλύτερης χημικής σταθερότητας αλλά χαμηλότερης αντοχής σε θερμικά σοκ. Η χρήση τους περιορίζεται κυρίως σε σκληρές κατεργασίες υπερκραμάτων νικελίου.

Το SiAlON αποτελεί τον κύριο εκπρόσωπο της οικογένειας των SiMON κεραμικών, η ονομασία των οποίων προέρχεται από τη χημική τους σύσταση :

Si+Me+O+N. Η υαλώδης φάση των υλικών αυτών, με την κατάλληλη θερμική κατεργασία κρυσταλλώνεται βελτιώνοντας τη συμπεριφορά τους σε ερπυσμό.

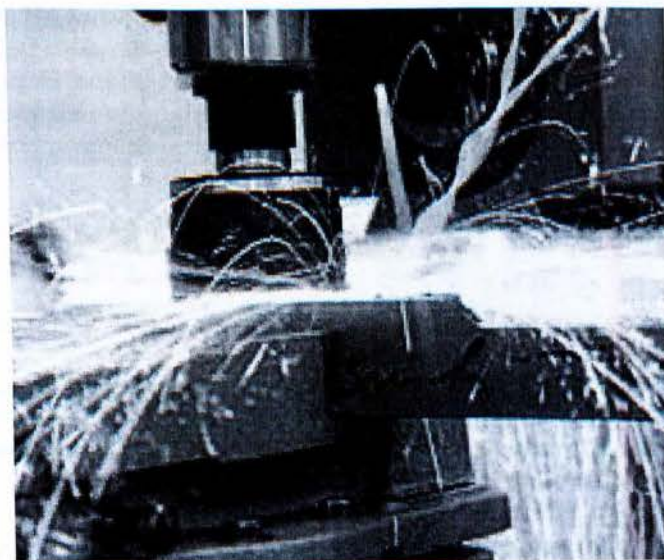
Το προϊόν είναι σχετικά ελαφρύ με χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και πολύ καλή αντοχή σε θραύση, συγκρινόμενη μ'αυτή άλλων προηγμένων κεραμικών. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξαρτημάτων κινητήρων που λειτουργούν σε χαμηλές και ενδιάμεσες θερμοκρασίες και υφίστανται τριβή, καθώς επίσης και για ακροφύσια συγκόλλησης, ρουλεμάν και εργαλεία κοπής. Η συνεχής έκθεσή του σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1000° Α προκαλεί την μαλάκυνση της υαλώδους φάσης μεταξύ των κόκκων.

Τα SiAlON όπως επίσης και τα κεραμικά με ενισχυτικές ίνες, εμφανίζουν περιπτώσεις χημικής αντίδρασης με τα κατεργαζόμενα τεμάχια. Το φαινόμενο αυτό ελαχιστοποιείται με επικαλύψεις από νιτρίδιο του τιτανίου ή άλλο υλικό. Τα πλεονεκτήματα των SiAlON είναι τα εξής :

- Εξαιρετική αντοχή σε θερμικά σοκ
- Υψηλή αντοχή σε κόπωση
- Μεγάλη δυσθραυστότητα
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής
- Αντοχή σε οξείδωση

Sialon		
Μηχανικές ιδιότητες	SI/Metric	SI/Metric
Πυκνότητα	gm/cc	3.24
Πορώδες	%	<1%
Χρώμα	-	gray
Αντοχή εφελκυσμού	MPa	760
Μέτρο Ελαστικότητας	GPa	288
Shear Modulus	GPa	120
Bulk Modulus	GPa	220
Λόγος Poisson	-	0.25
Αντοχή σε θλίψη	MPa	-
Σκληρότητα	Kg/mm ²	1430-1850
Παράγων Έντασης Τάσεως K _{IC}	MPaW ^{1/2}	6.0-7.5
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας (άνευ φορτίου)	°C	1200
Θερμικές Ιδιότητες		
Θερμική Αγωγιμότητα	W/m ² °K	15-20
Συντελεστής θερμικής διαστολής	10 ⁻⁶ /°C	3
Ειδική Θερμότητα	J/Kg°K	-

Πίνακας Ιδιοτήτων των SiALON



Σχήμα 2.8 Φρεζάρισμα υψηλών ταχυτήτων.

Αδαμάντινα κοπτικά εργαλεία

Η ανάπτυξη κοπτικών εργαλείων από υπέρσκληρα υλικά ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '70 με την εμφάνιση κοπτικών εργαλείων κατασκευασμένα από πολυκρυσταλλικό διαμάντι γνωστό ως PCD (polycrystalline diamond). Τα κοπτικά εργαλεία από PCD αποτελούνται από πολύ μικρούς κόκκους διαμαντιού σε ανθρακικό υπόστρωμα. Η υψηλή αντιτριβική ιδιότητα του διαμαντιού σε συνδυασμό με τον άνθρακα, παράγει ένα υλικό με εξαιρετικές επιδόσεις, ιδίως στην κατεργασία χαλκού, παράγει ένα υλικό με εξαιρετικές επιδόσεις, ιδίως στην κατεργασία χαλκού, αλουμινίου, σύνθετων υλικών καθώς και μη μεταλλικών υλικών. Το PCD εξομοιώνει την υψηλή δυσθραυστότητα ορισμένων κοπτικών από WC και έτσι αποδεικνύεται κατάλληλο σε κατεργασίες φρεζαρίσματος και άλλες διακοπτόμενες κατεργασίες.

Σήμερα έχει αναπτυχθεί μια γκάμα υλικών από διαμάντι που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή κοπτικών εργαλείων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και υλικά με ειδικές επικαλύψεις οι οποίες και εναποτίθενται με ποικίλες μεθόδους, καθώς και διαμάντια σε μορφή φιλμ με συνήθη πάχη από 250 μm μέχρι και 1mm που αποτελούν στρώμα καθαρού διαμαντιού επάνω σε υπόστρωμα καρβιδίου. Μια από τις πιο σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους παρασκευής τέτοιων υλικών είναι η τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) κατά την οποία γίνεται απόθεση φιλμ αερίου άμορφου άνθρακα και υδρογόνου υπο πολύ υψηλές θερμοκρασίες, πάνω σε ειδικό υπόστρωμα. Το τελικό προϊόν εμφανίζει ιδιότητες που προσεγγίζουν πολύ εκείνες του φυσικού διαμαντιού.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες υλικών που παρασκευάζονται με τη μέθοδο CVD. Στην πρώτη κατηγορία, το υλικό αποτελεί μια λεπτή επικάλυψη επάνω σε ένα υπόστρωμα καρβιδίου. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν υλικά όπου η επικάλυψη διαμαντιού είναι μεγαλύτερη, με πάχη που φτάνουν το ένα χιλιοστό.

Τα υλικά αυτά συναγωνίζονται τα κοπτικά από PCD σε όλες τις βασικές κατεργασίες, λόγω της μεγάλης καθαρότητάς τους η οποία τους παρέχει ιδιότητες εφάμιλλες του διαμαντιού, όπως είναι η μεγάλη σκληρότητα, η πυριμαχικότητα και η αντοχή σε φθορά. Η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων που παρασκευάζονται από τα υλικά αυτά, εμφανίζουν σε ορισμένες κατεργασίες διπλάσια με τριπλάσια τιμή από την αντίστοιχη των κοπτικών από PCD.

Κυβικός Βοριονιτρίτης (CBN)

Πάντως είτε πρόκειται για τα υλικά χημικής εναπόθεσης χοντρού φιλμ είτε για τα διαμάντια της κατηγορίας PCD, το κυριότερο μειονέκτημα των υλικών αυτής της κατηγορίας αποτελεί η αδυναμία κατεργασίας φερίτικων κραμάτων. Εξ αιτίας χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στη διεπιφάνεια του κοπτικού με το κατεργάσιμο υλικό, τα ανωτέρω υλικά έχουν σήμερα περιορισμένες εφαρμογές. Το μειονέκτημα αυτό, οδήγησε στην εξέλιξη της έτερης οικογένειας υπέρσκληρων υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία για την παραγωγή κοπτικών εργαλείων υψηλών απαιτήσεων. Πρόκειται για τον κυβικό βοριονιτρίτη^{^^^} boron nitride (CBN).

Η χρήση των υλικών αυτών παρουσιάζει μια συνεχή αύξηση, με ποσοστό 10-15% ετησίως, παρασυρόμενη περισσότερο από την αυξητική τάση στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων.

Τα πολυκρυσταλλικά κυβικά νιτρίδια του βορίου ή αλλιώς λεγόμενα και ως κυβικός βοριονιτρίτης (CBN, Borazon κατά General Electric) υπερέχουν στη σκληρότητα, την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και την αντοχή σε υψηλές πιέσεις. Οι ίνες των CBN παράγονται με ειδικές κατεργασίες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών (μέγιστη πίεση 5-7 GPa και 1500-2100 °C). Έν συνεχεία, οι ίνες αυτές συντηκονται με χρήση είτε ενός συνθετικού υλικού αποκαλούμενου δεσμός (solid CBN) είτε με βάση το καρβίδιο του βολφραμίου.

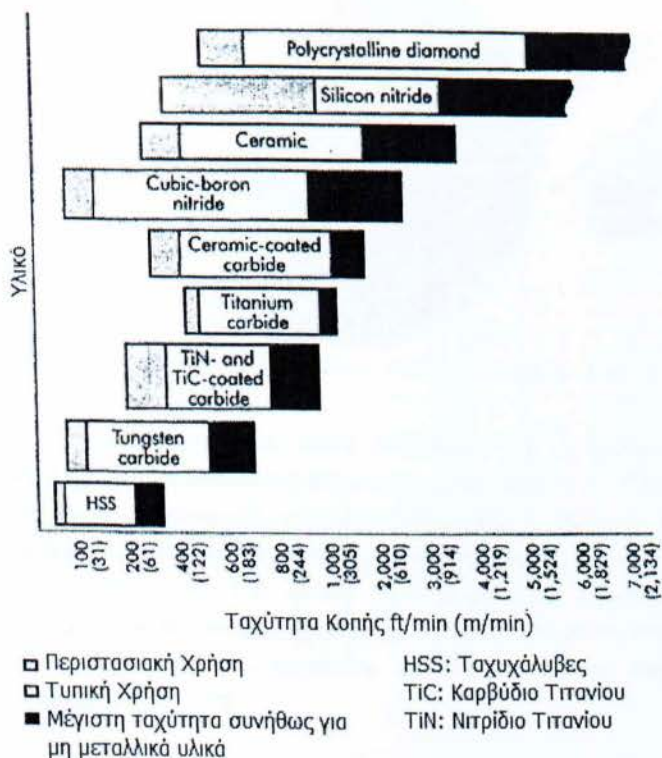
Από τη μορφή αυτή, το υλικό στη συνέχεια παίρνει τη βασική γεωμετρία του τελικού κοπτικού που επιθυμούμε και της κοπτικής ακμής. Το υλικό κόβεται και κασσιτεροκολλείται σε μεταλλική βάση. Η γεωμετρία της κοπτικής αιχμής προσδίδεται τελικά μέσω λείανσης και λοξής κοπής. Περεταίρω φινιρίσμα του κοπτικού δίνει τελικά την επιθυμητή γεωμετρία.

Πρωταρχικό ρόλο στις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα ποικίλα κοπτικά που παράγονται από CBN παίζουν η σύνθεσή τους, η κρυσταλλική τους δομή και το συνδετικό που περιέχουν. Κοπτικά με περιεκτικότητα σε CBN μεταξύ 50-65% προσφέρουν υψηλή αντοχή σε πίεση και χημική σταθερότητα. Αυτά τα κοπτικά χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατεργασίες υψηλών απαιτήσεων.

Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα ενός κοπτικού σε CBN, τόσο μεγαλύτερη αντιτριβική ικανότητα και σκληρότητα παρουσιάζουν αυτά. Έτσι χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατεργασία ψυχρού χυτοσιδήρου, συντηκόμενων μετάλλων, υλικών με επικαλύψεις υψηλής αντοχής και περλιτικού χυτοσιδήρου. Ο παρακάτω πίνακας που ακολουθεί μας δείχνει τις ιδιότητες και τις εφαρμογές των μετάλλων.

Βασικές Ομάδες	Συμβολισμός	Υλικά	Είδος και συνθήκες καταργασίας		↑	↓
P	P01	Χάλυβας, χυτοχάλυβας	Λεπτή τόνρευση και διάτρηση Μεγάλες ταχύτητες κοπής Μικρές προώσεις	Μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων Πολύ καλή ποιότητα επιφανείας Κατεργασία χωρίς δονήσεις	αυξάνομενη ταχύτητα κοπής αυξανόμενη αντοχή σκληρομετάλλου σε εφθόρα	αυξάνομενη ταχύτητα κοπής αυξανόμενη αντοχή σκληρομετάλλου σε εφθόρα
	P10	Χάλυβας, χυτοχάλυβας	Τόνρευση συνήθης και αντιγραφής, σπειρωτόμηση, φρεζάρισμα Μεγάλες ταχύτητες κοπής, μικρές μέχρι μεσαίες προώσεις			
	P20	Χάλυβας, χυτοχάλυβας μαλαξιμω με συνεχές αποβλήτο	Τόνρευση συνήθης και αντιγραφής, σπειρωτόμηση, φρεζάρισμα Μέσες ταχύτητες κοπής, πλάνισμα με μικρές μέχρι μεσαίες προώσεις			
	P30	Χάλυβας, χυτοχάλυβας μαλαξιμω με συνεχές αποβλήτο	Τόνρευση, πλάνισμα, φρεζάρισμα Μέσες μέχρι χαμηλές ταχύτητες κοπής, μέσες μέχρι μεγάλες προώσεις ακόμα και κάτω από λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες κοπής ☺			
	P40	Χάλυβας, χυτοχάλυβας με εγκλεισμένα ψήγματα άμμου και κενά συστολής	Τόνρευση, πλάνισμα, εργασίες αυτομάτων Χαμηλές ταχύτητες κοπής, μεγάλες προώσεις Δυνατή εφαρμογή μεγάλης γωνίας αποβλήτων από μη ευνοϊκές συνθήκες εργασίας ☺			
	P50	Χάλυβας Χυτοχάλυβας μέσης και χαμηλής αντοχής επίσης με εγκλεισμένα ψήγματα άμμου και κενά συστολής	Τόνρευση, πλάνισμα, εργασίες αυτομάτων Χαμηλές ταχύτητες κοπής Μεγάλες προώσεις	Δυνατή χρήση μεγάλης γωνίας αποβλήτου από μη ευνοϊκές συνθήκες εργασίας ☺ και με μεγάλες απαιτήσεις για τη συνεκτικότητα του σκληρομετάλλου		
M	M10	Χάλυβας Μαγνησιούχος χάλυβας Χυτοχάλυβας Χυτοσίδηρος και κράματά του	Τόνρευση Μέσες μέχρι υψηλές ταχύτητες κοπής Μικρές μέχρι μέσες προώσεις		αυξάνομενη ταχύτητα κοπής αυξανόμενη αντοχή σκληρομετάλλου σε εφθόρα	αυξάνομενη ταχύτητα κοπής αυξανόμενη αντοχή σκληρομετάλλου σε εφθόρα
	M20	Χάλυβας ωστενιτικός Χάλυβας μαγνησιούχος	Χυτοσίδηρος, χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη χυτοσί- δηρος μαλαξιμω	Τόνρευση, φρεζάρισμα Μέσες ταχύτητες κοπής Μέσες προώσεις		
	M30	Χάλυβας, Ωστενιτικοί χάλυβες Κράματα αντοχής σε υψηλή θέρμανση χυτοχάλυβας Χυτοσίδηρος		Τόνρευση, πλάνισμα, φρεζάρισμα Μέσες ταχύτητες κοπής Μέσες μέχρι μεγάλες προώσεις		
	M40	Χάλυβες μικρής αντοχής Χάλυβας αυτομάτων Μη σιδηρούχα μέταλλα		Τόνρευση συνήθης, τόνρευση με εργαλεία μορφής, αποκοπής		
K	K01	Βαμμένους χάλυβας Σκληρός χυτοσίδηρος κοκιλών με HRC < 60 Χυτοσίδηρος μεγάλης συγκρότητος Κράματα αλουμινίου με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο Σκληρά τεχνητά υλικά, χάρτιμορντ Κεραμικά υλικά		Τόνρευση,λεπτή τόνρευση,λεπτή διάτρηση Λεπτό φρεζάρισμα, στρώσιμο επίπεδης επιφάνειας	αυξάνομενη ταχύτητα κοπής αυξανόμενη αντοχή σκληρομετάλλου σε εφθόρα	αυξάνομενη ταχύτητα κοπής αυξανόμενη αντοχή σκληρομετάλλου σε εφθόρα
	K10	Βαμμένους χάλυβας χυτοσίδηρος με HB > 220 Χυτοσίδηρος μαλαξιμω με διακεκομμένο αποβλήτο Κράματα χαλκού, πυριτωχά κράματα αλουμινίου Τεχνητά υλικά γυαλί, σκληρό ελαστικό πορσελάνη, χάρτιμορντ, πετρώματα		Τόνρευση διάτρηση, φρεζάρισμα κόνου Αλεξονάριασμα, κατασκευή αυλακώσεων Στρώσιμο επίπεδης επιφάνειας		
	K20	Χυτοσίδηρος με HB < 220 χαλκός Ορειχάλκος, αλουμινίου και συναφή μη σιδηρούχα μέταλλα, σκληρή ξυλεία		Τόνρευση, πλάνισμα, φρεζάρισμα κόνου αλεξονάριασμα Κατασκευή αυλακώσεων με υψηλότερες απαιτήσεις Για τη συνεκτικότητα του σκληρομετάλλου		
	K30	Χάλυβας μικρής αντοχής Χυτοσίδηρος χαμηλής σκληρότητας		Τόνρευση, πλάνισμα, φρεζάρισμα Δυνατή χρήση μεγάλης γωνίας αποβλήτου υπό μη ευνοϊκές συνθήκες καταργασίας ☺		
	K40	Μη σιδηρούχα μέταλλα, μιλακή και σκληρή φυσική ξυλεία		Τόνρευση, φρεζάρισμα δυνατή χρήση μεγάλης γωνίας αποβλήτου υπό μη ευνοϊκές συνθήκες καταργασίας ☺		

Ακολουθεί τέλος ένα συγκριτικό διάγραμμα (Σχ 2.26) των υλικών συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και είναι αντιπροσωπευτικό της εξέλιξης της βιομηχανίας των υλικών στον τομέα των κατεργασιών

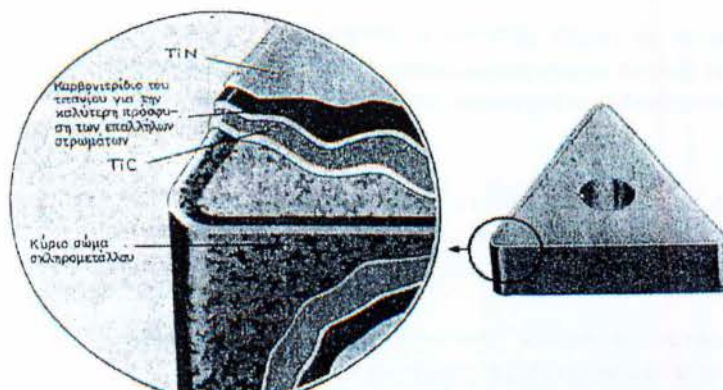


Σχήμα 2.26 Συγκριτικό διάγραμμα υλικών εργαλείων ανάλογα με το εύρος της ταχύτητας κοπής που χρησιμοποιούνται σήμερα

2.4.3. Επικαλύψεις

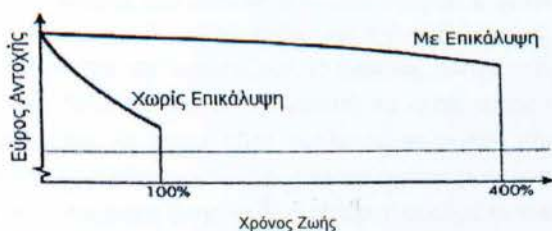
Ίσως την σημαντικότερη αλλαγή των τελευταίων 40 χρόνων έφερε στην τεχνολογία των κατεργασιών η εφαρμογή επικαλύψεων/επενδύσεων σε κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβες και σκληρομέταλλα. Τα υλικά των επικαλύψεων ποικίλουν αλλά συνήθως είναι είτε κεραμικά (Al_2O_3) είτε καρβίδια ή νιτρίδια του τιτανίου (TiC), αναμειγμένα πολλές φορές με αλουμίνιο ($TiAlN$) ή και μεταξύ τους (TiCN) ($TiAlCN$). Η επικάλυψη μπορεί να γίνει από πολλές στρώσεις, κάθε μία με ένα υλικό, ενώ τελευταία χρησιμοποιείται και το διαμάντι ως υλικό επικάλυψης.

Φυσικά η αλληλουχία και το ακριβές πάχος της κάθε στρώσης αποτελεί τις περισσότερες φορές μυστικό για την κάθε εταιρεία κατασκευής αυτών των εργαλείων. Πάντως το εξωτερικό στρώμα συνήθως είναι TiC χάριν της καλής θερμικής του αγωγιμότητας



Σχήμα 2.27 Στρώσεις επένδυσης κοπτικού εργαλείου τόνου

Οι επικαλύψεις αυτές μπορεί να μην ξεπερνούν συνήθως τα 10μm σε πάχος, όμως συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της διάρκειας ζωής, της αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία, της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά πάσης φύσεως. Ακόμη μειώνουν την δύναμη κοπής και την θερμότητα που παράγεται από την τριβή με το απόβλητο. Για όλους τους παραπάνω λόγους, η ταχύτητα κοπής με σκληρομέταλλο μπορεί μέχρι και να διπλασιαστεί με την επικάλυψη, ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος ζωής του εργαλείου να αυξηθεί επίσης σημαντικά όπως βλέπουμε παρακάτω (Σχ 2.28):



Σχήμα 2.28 Διάγραμμα εύρους αντοχής του εργαλείου με ή χωρίς επένδυση συναρτήσει του χρόνου

2.4.4. Φθορά - Χρόνος Ζωής

Η αστοχία του κοπτικού εργαλείου μπορεί να προκληθεί είτε από φθορά του ίδιου του σώματος του εργαλείου είτε από πρόβλημα στο σύστημα πρόσδεσης (τσοκ) και στην μανέλα. Με την πρόοδο της τεχνολογίας όμως στην κατασκευή πολύ αξιόπιστων συστημάτων πρόσδεσης, η αστοχία συνδέεται άμεσα με την φθορά του υλικού του κοπτικού εργαλείου.

Γενικά, η φθορά αυτή επηρεάζεται από τα υλικά εργαλείου και κατεργαζομένου τεμαχίου, τη γεωμετρία του εργαλείου, τα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής και τη χρήση ψυκτικών-λιπαντικών υγρών. Πριν δούμε αναλυτικά τους παράγοντες της φθοράς, αξίζει να αναφερθούμε στους μηχανισμούς της.

Η φθορά εμφανίζεται προοδευτικά με απώλεια υλικού σε συγκεκριμένα σημεία του εργαλείου, μέχρι να φτάσει στην καταστροφική φθορά, δηλαδή τη θραύση ή την πλαστική παραμόρφωση του εργαλείου. Οι μηχανισμοί της φθοράς ανάλογα με τη ζώνη που αυτή παρουσιάζεται είναι:

- **Το πεδίο φθοράς**, εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία ελευθερίας και οφείλεται στην τριβή του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα να μειώνεται σταδιακά το βάθος κοπής.

- **Η φθορά κρατήρα**, εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει η γωνία αποβλήτου και οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτή την ζώνη, με αποτέλεσμα να σχετίζεται άμεσα με την μείωση της σκληρότητας του εργαλείου και ενδεχόμενη θραύση του. Παρατηρείται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες κοπής, ενώ μελέτες [20] έχουν δείξει ότι η φθορά κρατήρα εμφανίζεται ως λεία επιφάνεια πάνω στο κοπτικό εργαλείο, σε αντίθεση με το πεδίο φθοράς που προκαλεί τραχιά επιφάνεια.

- **Οι αποκολλήσεις**, παρουσιάζονται συνήθως στην κοπτική ακμή και οφείλονται σε μεγάλες μηχανικές ή θερμικές διακυμάνσεις (σοκ), με αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών.

Για τη μέτρηση της φθοράς στο κοπτικό εργαλείο υπάρχει ο άμεσος τρόπος με τη χρήση ειδικού μηχανουργικού μικροσκοπίου και ο έμμεσος, με το συσχετισμό της φθοράς με τα μεγέθη που την επηρεάζουν. Ο έμμεσος τρόπος προφανώς και είναι λιγότερο αξιόπιστος, αλλά δεν απαιτεί τη διακοπή της κατεργασίας και άρα συμφέρει κατά την εφαρμογή του. Ας δούμε τώρα αναλυτικά τα μεγέθη που επηρεάζουν τη φθορά του κοπτικού εργαλείου και συνεπώς και τον χρόνο ζωής του.

Με τον όρο χρόνο (ή διάρκεια) ζωής του εργαλείου, εννοούμε το συνολικό ωφέλιμο χρόνο που το εργαλείο είναι σε θέση να κόβει, μέχρι να καταστραφεί ή να στομώσει. Μετριέται συνήθως σε λεπτά και επηρεάζεται όπως είπαμε από:

Υλικά τεμαχίου και εργαλείου

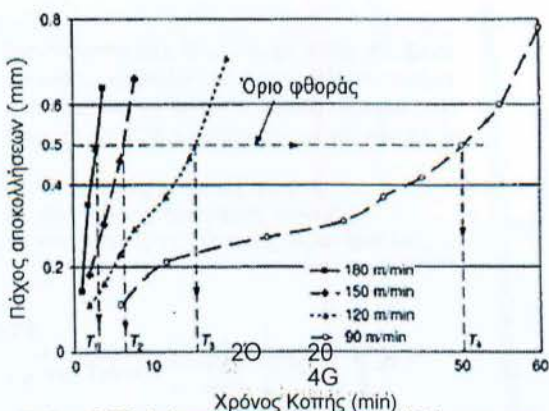
Η σκληρότητα του εργαλείου σε σχέση με αυτήν του τεμαχίου έχει τον καθοριστικότερο ρόλο. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερη και η διάρκεια ζωής. Γι' αυτό μεγάλη σημασία παίζει και η θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου, ώστε να απάγεται ευκολότερα η θερμότητα και να μην αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες μειώνεται η σκληρότητα του εργαλείου και άρα και ο χρόνος ζωής του.

Τέλος, για αυξημένο χρόνο ζωής του εργαλείου είναι ανάγκη να αποφεύγεται η τάση για «συγκόλληση» μεταξύ των υλικών εργαλείου και τεμαχίου με φυσικοχημικούς μηχανισμούς, η οποία συνδέεται με τη δημιουργία ψευδοακμής στην κορυφή του κοπτικού εργαλείου και παρουσιάζεται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες κοπής. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με σωστή επιλογή υλικών που δεν αντιδρούν μεταξύ τους.

Χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής

Αρχικά πρέπει να πούμε ότι η διακοπτόμενη κοπή προκαλεί ταλαντώσεις, κόπωση του υλικού και θερμικές διακυμάνσεις που μειώνουν σημαντικά το χρόνο ζωής του εργαλείου. Στην συνεχόμενη κοπή τώρα, τα χαρακτηριστικά στοιχεία της κοπής που αναφέραμε και προηγούμενα (ενότητα 2.2.1) είναι η ταχύτητα κοπής (V_c), το βάθος κοπής (a) και η πρόωση (s).

Η ταχύτητα κοπής επηρεάζει δραστικότερα από τις υπόλοιπες συνθήκες τον χρόνο ζωής του εργαλείου. Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής και αυτό γιατί παρόλο που οι δυνάμεις κοπής είναι μικρότερες, η θερμότητα δεν διαχέεται με τους ίδιους ρυθμούς στις υψηλές ταχύτητες κοπής και έτσι η σκληρότητα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 2.2.3.

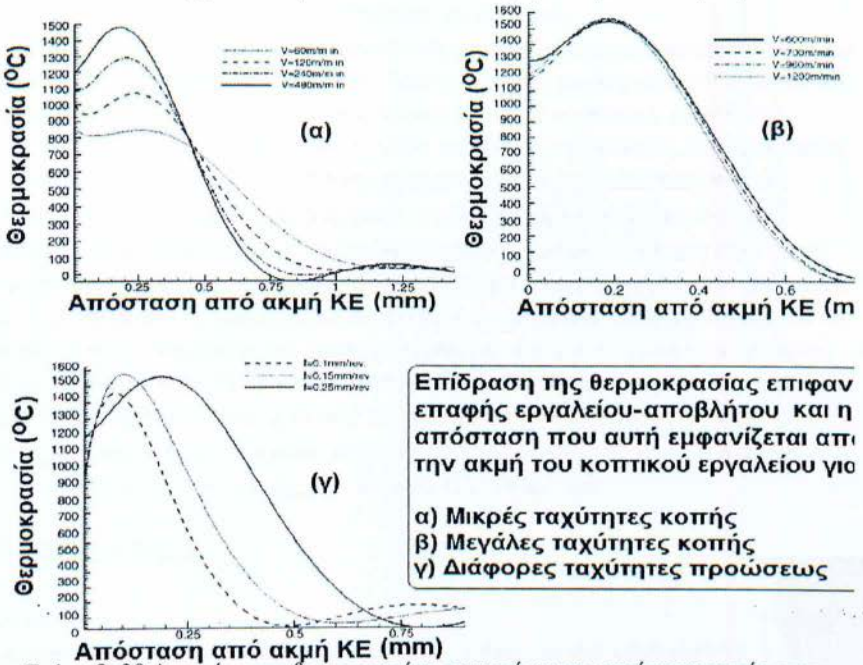


Σχήμα 2.29 Διάγραμμα πάχους αποκολλήσεων στο εργαλείο συναρτήσει της ταχύτητας και του χρόνου κοπής

Το βάθος κοπής επίσης όταν αυξηθεί μειώνει τον χρόνο ζωής του εργαλείου, εφόσον το εργαλείο έρχεται σε επαφή με περισσότερο υλικό στον ίδιο χρόνο και οι δυνάμεις που του ασκούνται είναι μεγαλύτερες, άρα έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κοπής. Η ταχύτητα πρόωσης αυξανόμενη οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής του εργαλείου και μάλιστα πειραματικά έχει αναφερθεί ότι αύξηση κατά 50% της ταχύτητας πρόωσης μειώνει κατά 100% (υποδιπλασιάζει) τον χρόνο ζωής. Η αιτία είναι η ίδια με το

βάθος κοπής. Η φθορά που προκαλείται είναι συνήθως κρατήρα εφόσον η επιφάνεια επαφής εργαλείου-αποβλήτου δέχεται μεγαλύτερες δυνάμεις με μεγαλύτερο απόβλητο.

Τέλος, ο χρόνος ζωής εξαρτάται και από την κατεργασία που χρησιμοποιείται το κοπτικό εργαλείο, αφού υπόκειται σε διαφορετικές καταπονήσεις.



Σχήμα 2.30 Διαγράμματα θερμοκρασίας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής στην επιφάνεια του εργαλείου

Γεωμετρική μορφή εργαλείου

Οι γωνίες κοπής επηρεάζουν πιο σημαντικά από τις υπόλοιπες τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, καθώς με μείωση τους, αυξάνεται το ενεργό μέρος του εργαλείου (η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο στην ακμή του εργαλείου), το πάχος του αποβλήτου μεγαλώνει και έτσι απάγεται ευκολότερα η θερμότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής.

Έχει μελετηθεί πειραματικά ότι η διαφορά στον χρόνο ζωής μπορεί και να πενταπλασιασθεί αν η γωνία κοπής από 45° γίνει 30° , ειδικά όταν κόβονται πολύ σκληρά υλικά. Φυσικά δεν είναι δυνατό να έχουμε πάντα μικρή γωνία κοπής, καθώς μπορεί να ωφελούμαστε ως προς τον χρόνο ζωής του εργαλείου, αλλά χάνουμε σε σταθερότητα κατά την κοπή και ακρίβεια.

Οι γωνίες αποβλήτου που μπορούν να πάρουν θετικές και αρνητικές τιμές. Με θετικές τιμές μειώνεται η κατανάλωση ενέργεια κατά την κοπή και έτσι μειώνεται η δύναμη και η θερμοκρασία κοπής.

Όμως ενώ θα ήταν εύλογο να χρησιμοποιούμε μεγάλες γωνίες αποβλήτου, η πράξη στην βιομηχανία δείχνει ότι αυτό δεν είναι πάντα επιθυμητό. Με μεγάλη γωνία αποβλήτου, η ακμή του κοπτικού εργαλείου

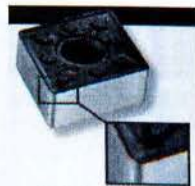
δέχεται όλο και πιο συγκεντρωμένα φορτία και λογικό είναι ευκολότερο να φθαρεί. Σε αρνητική γωνία όμως, τα φορτία αυτά από καπτικά γίνονται θλίψης, τα οποία αντέχει περισσότερο το υλικό του εργαλείου, αν και είναι μεγαλύτερα. Έτσι βλέπουμε ότι η διάρκεια ζωής δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την μείωση ή όχι της γωνίας αποβλήτου, αλλά σημαντικό ρόλο στην επιλογή μας θα έχουν οι συνθήκες κοπής που θα καθορίσουν τις δυνάμεις στην ακμή του εργαλείου.

Οι γωνίες ελευθερίας είναι συμπληρωματικές με το άθροισμα των γωνιών αποβλήτου και γωνιών της σφήνας του εργαλείου. Άρα αν θέλουμε μεγάλη γωνία αποβλήτου θα έχουμε αναγκαστικά είτε μικρή γωνία σφήνας (που δεν το θέλουμε εφόσον έτσι μειώνεται η ενεργή περιοχή της ακμής), είτε μικρή γωνία ελευθερίας. Όμως οι γωνίες ελευθερίας σχετίζονται με την επαφή εργαλείου - κατεργασμένου τεμαχίου, με αποτέλεσμα μικρές γωνίες να επιφέρουν μεγάλες δυνάμεις τριβής και αύξηση θερμοκρασίας και άρα μείωση του χρόνου ζωής του εργαλείου. Έτσι πρέπει πάντα να βρίσκεται το μέγιστο της γωνίας ελευθερίας ώστε να μην επηρεάζονται σημαντικά οι συμπληρωματικές γωνίες και να αυξάνεται έτσι η διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η καμπυλότητα της ακμής του κοπτικού εργαλείου τέλος με γνώμονα τον χρόνο ζωής οφείλει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Με βάση τις συμβατικές ταχύτητες κοπής, προτιμούνται υψηλές ακτίνες καμπυλότητας για καλή ποιότητα επιφανείας και άρα μικρή τραχύτητα επιφανείας, όπως προκύπτει και από τον τύπο (S η πρόωση, R η ακτίνα καμπυλότητας και R_{max} η τραχύτητα επιφάνειας)

$$S^2 / 8 * R \leq R_{max}$$

Όμως για

τις υψηλές ταχύτητες κοπής όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου, τόσο χειρότερη ακρίβεια επιφανείας έχουμε, λόγω των ταλαντώσεων που δημιουργούνται και της αύξησης της δύναμης κοπής. Φυσικά υπάρχει ένα ελάχιστο όριο για την ακτίνα καμπυλότητας ανάλογα και με το υλικό που κατεργαζόμαστε, πέρα από το οποίο η ποιότητα επιφανείας χειροτερεύει. Έτσι βλέπουμε ότι ο μηχανισμός στις υψηλές ταχύτητες κοπής διαφέρει σημαντικά και καλό είναι να επιλέγονται μικρές ή μεσαίες ακτίνες καμπυλότητας.



Σχήμα 2.31
Ακτίνα
καμπυλότητας
ακμής κοπτικού
εργαλείου

Υγρό κοπής

Γενικά τα υγρά κοπής μπορούμε να πούμε ότι όταν χρησιμοποιούνται αυξάνουν τον χρόνο ζωής του εργαλείου αφού απάγουν σημαντικό μέρος της θερμότητας. Αυτό στην περίπτωση βέβαια που η ροή τους είναι επαρκής και συνεχόμενη, ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία κοπής.

Παράλληλα όμως η χρήση υγρών κοπής παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα, τα οποία θα μελετηθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Υπολογισμός χρόνου ζωής

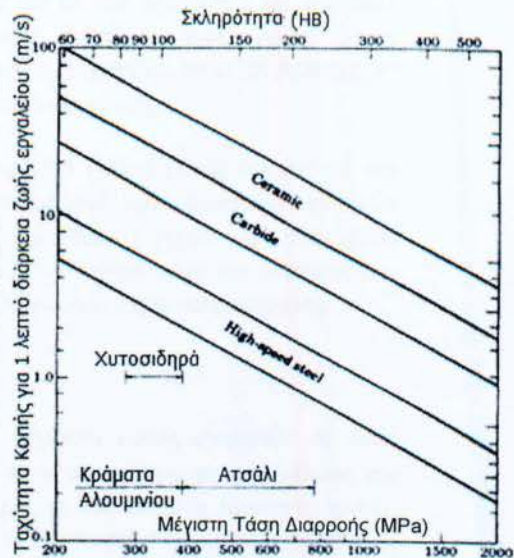
Όπως είδαμε ο χρόνος ζωής ενός εργαλείου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και μάλιστα πολλοί από αυτούς τον επηρεάζουν θετικά ή αρνητικά ανάλογα με τις συνθήκες κοπής. Γι' αυτό ο μόνος τρόπος να καθορίσουμε με σχετική αξιοπιστία τον χρόνο ζωής του εργαλείου εμπεριέχει και πειραματικά δεδομένα. Συνήθως η διάρκεια ζωής του εργαλείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο όριο μέσου πεδίου φθοράς v_{B0} (πχ για σκληρομέταλλο αυτό είναι $v_{B0}=0,8\text{mm}$ για εκχόνδριση).

Ο πιο απλός τρόπος καθορισμού του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου δίνεται από την εξίσωση του Taylor: $V_c \cdot T^n = C$ όπου V_c είναι η ταχύτητα κοπής, T ο χρόνος ζωής, n είναι συντελεστής που εξαρτάται κυρίως το υλικό του εργαλείου και C μια σταθερά. Οι τιμές των n και C καθορίζονται πειραματικά ενώ το n ισούται με 0,2-0,5 για τα καρβίδια.

Για να περιληφθούν και οι άλλες συνθήκες της κατεργασίας πλην της ταχύτητας κοπής, η εξίσωση του Taylor παίρνει την μορφή $V_c \cdot T^n \cdot f^a \cdot d^b = C$ όπου f είναι η ταχύτητα πρόωσης (feed) και d το βάθος κοπής (depth of cut), με τα a και b να είναι συντελεστές που καθορίζονται κυρίως από το υλικό.

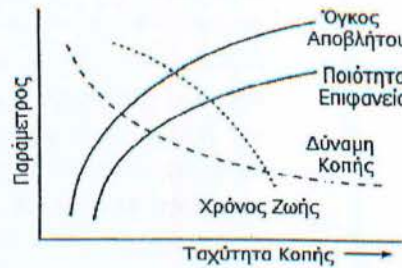
Σχήμα 2.3.2 Διάγραμμα μέγιστης τάσης διάφορων κριτήριο για την διάρκεια ζωής υλικών εργαλείων συναρτήσει ταχύτητας κοπής ανά λεπτό διάρκειας ζωής

Προφανώς εκτός από τις συνθήκες κοπής, σημαντικό ρόλο όπως είδαμε παίζουν και πολλοί άλλοι παράγοντες, με αποτέλεσμα η εύρεση μιας εξίσωσης που να περιλαμβάνει οτιδήποτε επηρεάζει τον χρόνο ζωής να είναι σχεδόν αδύνατο. Και παρόλο που η απλή εξίσωση του Taylor χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα από τις βιομηχανίες, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι αυτός ο τύπος εισήχθη το 1907, πολύ πριν την εφεύρεση των σκληρομετάλλων και των υπολοίπων ανθεκτικότερων υλικών. Παράλληλα να τονίσουμε ότι ο χρόνος ζωής καθορίζεται και από τα όρια μέσης φθοράς και την οριακή αποτελεσματικότητα και ακρίβεια του εργαλείου που θέτουμε, ενώ η δύναμη κοπής δεν αποτελεί από μόνη της Σχήμα



2.5. Εξέλιξη

Όπως είδαμε προηγουμένως, τα χαρακτηριστικά στοιχεία της κοπής επηρεάζουν πολύ τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, αλλά ταυτόχρονα είναι επιτακτική η ανάγκη στη βιομηχανία για μείωση του κόστους παραγωγής και των εργατικών και άρα του χρόνου κατεργασίας. Σε αυτό συντελούν τα νέα υλικά που εφευρίσκονται, των οποίων οι κόκκοι που τα αποτελούν έχουν αρχίσει να υπόκεινται και σε νανοκατεργασία (μικρόκοκκοι καρβιδίου), για να διατηρούν την σκληρότητά τους σε ακόμη μεγαλύτερες θερμοκρασίες, υποσχόμενα ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για το εργαλείο, γιατί ακόμη και η κατανομή των κόκκων κοβαλτίου μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή του σκληρομετάλλου. Οι επικαλύψεις δεν έχουν εξερευνηθεί ακόμη πλήρως και συνεχώς νέοι συνδυασμοί και υλικά βελτιώνουν την ποιότητα των κοπτικών εργαλείων.



Σχήμα 2.33. Διάγραμμα επηρεασμού διάφορων παραγόντων από την ταχύτητα κοπής

Ταυτόχρονα τα εργαλεία σχεδιάζονται με όλο μεγαλύτερη ακρίβεια επιφανείας και συμμετρίας, μικρότερη δυνατή μάζα, καθώς και με πιο αξιόπιστες και γρήγορες μεθόδους προσαρμογής στην εργαλειομηχανή. Επιπλέον, αναζητούνται τρόποι κατασκευής εργαλείων, όχι μόνο για τις υψηλές ταχύτητες, αλλά συγχρόνως να ανταποκρίνονται επαρκώς και στις χαμηλές ταχύτητες κοπής.

Όμως η πρόοδος της τεχνολογίας των υλικών δεν είναι ο μόνος δρόμος για την εξέλιξη της βιομηχανίας αποβολής υλικού. Η επιλογή των καλύτερων συνθηκών κοπής αλλά και γεωμετρίας του εργαλείου όπως είδαμε μπορούν να αποδειχθούν καθοριστικοί παράγοντες για την βελτίωση της κατεργασίας και της ακρίβειας του τεμαχίου, καθώς και της αποδοτικότερης εκμετάλλευσης της εργαλειομηχανής.

Συμπεραίνουμε τέλος πως παρόλο που η ταχύτητα κοπής επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον χρόνο ζωής του υλικού, είναι απαραίτητο για την μείωση του χρόνου παραγωγής να καταφεύγουμε συνεχώς σε πιο μεγάλες ταχύτητες κοπής, αλλά και με μεγαλύτερο βάθος και πρόωση. Γι' αυτό οφείλουμε να μελετήσουμε τις κατεργασίες κοπής υψηλής ταχύτητας.

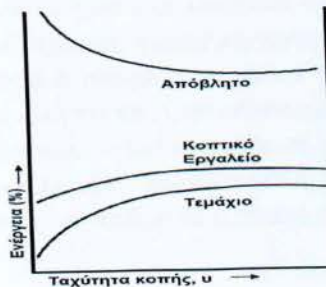
3. Κατεργασίες Υψηλής Ταχύτητας (HSM)

3.1. Γενική περιγραφή

Οι κατεργασίες υψηλής ταχύτητας (High-Speed ή High-Velocity Machining) αναφέρονται στην υψηλή ταχύτητα που μπορούν να αναπτύξουν οι άξονες της μηχανής κατά την κοπή. Με τη βοήθεια νέων υλικών για τα κοπτικά εργαλεία, ξεκίνησαν αρχικά για την κατεργασία αμέταλλων υλικών, ενώ σήμερα ακόμη δοκιμάζονται τα όρια των δυνατοτήτων τους για τα μεταλλικά υλικά. Η σκληρότητα, η αλλαγή της δομής σε υψηλές θερμοκρασίες και η μικρή θερμική αγωγιμότητα ορισμένων μετάλλων, κάνει την μελέτη της κατεργασίας τους σε υψηλές ταχύτητες ιδιαίτερος ελκυστική, εφόσον εκτός από υψηλή παραγωγικότητα που εγγυάται η υψηλή ταχύτητα, προσφέρει και την απαιτούμενη ακρίβεια σε λογικό κόστος. Την ίδια στιγμή κάνει δυνατή την κατασκευή τεμαχίων λεπτών τοιχωμάτων με κατεργασίες κοπής, αφού μπορεί να αφαιρεθεί με μικρό κόστος και χρόνο έως και το 85% του υλικού με την άριστη ποιότητα που προφέρει έναντι άλλων ειδών κατεργασιών.

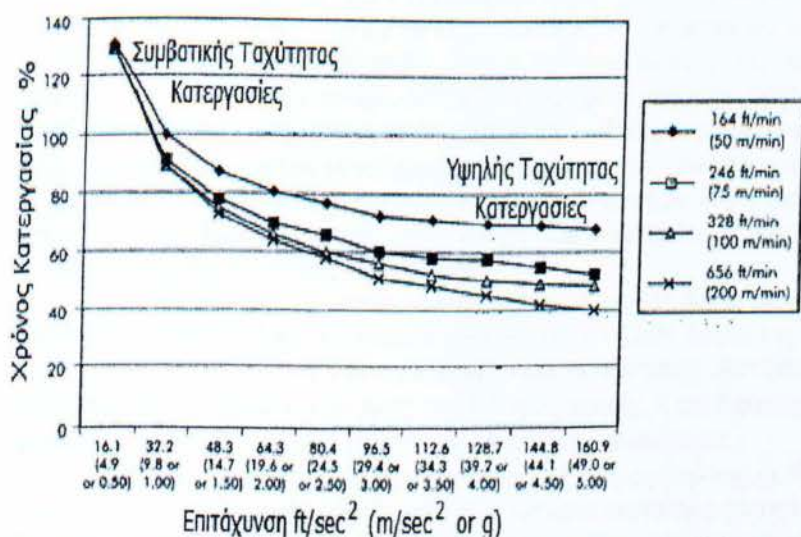
Σήμερα, η υψηλή ταχύτητα ορίζεται από την περιστροφική κίνηση του άξονα της εργαλειομηχανής από 15.000-25.000 rpm. Αυτή η περιστροφική ταχύτητα όμως δεν αναφέρεται στην ταχύτητα κοπής, έτσι ο όρος «υψηλή ταχύτητα κοπής» είναι πιο πρακτικός και σήμερα για μεταλλικά υλικά κατεργασίας κυμαίνεται από 100 έως 500 m/min. Αυτές οι ταχύτητες πριν λίγα χρόνια φάνταζαν απαγορευτικές, όμως με την μελέτη των μηχανισμών της υψηλής ταχύτητας κοπής, φάνηκε ότι μεγάλο μέρος της θερμότητας που αναπτύσσεται, βοηθάει στην πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου (με αποτέλεσμα η κατεργασία του να γίνεται ευκολότερη και με μικρότερες δυνάμεις).

Παράλληλα μετά από μια ταχύτητα κοπής, το απόβλητο δέχεται σταθερό (αν όχι και λίγο αυξημένο) ποσοστό αυτής της θερμότητας και έτσι το κοπτικό εργαλείο δέχεται σχεδόν σταθερό ποσοστό της θερμότητας, σε αντίθεση με τις μικρές ταχύτητες κοπής που όσο αυξάνονται, τόσο περισσότερο καταπονείται θερμικά το εργαλείο σε ποσοστό. (Σχ 3.1).



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ενέργειας ανά στοιχείο κοπής συνάρτησης της ταχύτητας κοπής

Ένα άλλο πρόβλημα της κοπής υψηλών ταχυτήτων ήταν οι εργαλειομηχανές, η ακριβειά τους αλλά και η ικανότητά τους να τις χειριστούν. Με τη χρήση εργαλειομηχανών CNC, όπου ο έλεγχος γίνεται με αριθμητικά δεδομένα, παρέχεται η απαιτούμενη ακρίβεια, ακόμα και της τάξης μικρομέτρου. Όσο για την στιβαρότητα, η χρήση υδροστατικών/υδροδυναμικών μηχανισμών (ακόμη και στα ρουλεμάν) προσέφερε μία (έστω και με υψηλό κόστος) λύση. Παράλληλα, οι γραμμικοί ηλεκτροκινητήρες μπορούν να δώσουν τις απαιτούμενες υψηλές επιταχύνσεις (μέχρι 30m/sec^2 ή $3g$) για αυτού του είδους τις κατεργασίες με πολύ καλή απόκριση. Η υψηλή επιτάχυνση σε μια κατεργασία μπορεί να είναι εξίσου σημαντική με την υψηλή ταχύτητα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ 3.2).



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα επιτάχυνσης μιας εργαλειομηχανής για διάφορες κατεργασίες και επηρεασμός του χρόνου κατεργασίας συναρτήσει και της ταχύτητας κοπής

Μια κατεργασία κρίνεται επιτυχημένη όταν ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις που θέτουμε. Εκτός λοιπόν από την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο, σήμερα τίθεται όλο και πιο επιτακτικά η απαίτηση για κατεργασίες φιλικότερες προς το περιβάλλον, πράγμα που είχε παραμεληθεί τα προηγούμενα χρόνια. Οι κατεργασίες κοπής υψηλής ταχύτητας δίνουν και σε αυτή την απαίτηση ώθηση για βελτίωση, καθώς με τις συνθήκες κοπής που προσφέρει μπορεί να μειώσει τη χρήση των υγρών κοπής, τα οποία αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα μόλυνσης του περιβάλλοντος κατά την κατεργασία και αυτό ακριβώς θα εξεταστεί παρακάτω.

3.1.1 Πλεονεκτήματα κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων

Το κατασκευαστικό κόστος μειώνεται σημαντικά στην τόννευση υψηλών ταχυτήτων από ότι στη λείανση ανάλογα βέβαια και με τη γεωμετρία που θέλουμε να αποδώσουμε στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η τόννευση υψηλών ταχυτήτων προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων όπως μικρός χρόνος κατεργασίας, μεγαλύτερη ελαστικότητα ως προς την απόδοση της επιθυμητής γεωμετρίας, δυνατότητα φινιρίσματος του τεμαχίου σε ένα πάσο ακόμα και σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας, λιγότερα βήματα/πάσα από το αρχικό μέχρι το τελικό στάδιο κατεργασίας και τέλος αποφυγή εμφάνισης ατελειών και εκδορών στην κατεργάσιμη επιφάνεια, όπως και του κόστους επιδιόρθωσης αυτών.

Η κατεργασία υψηλών ταχυτήτων απαιτεί μεγάλη αποτελεσματικότητα από το κοπτικό εργαλείο, το σύστημα συγκράτησης, το εργαλείο κοπής και την κοπτική ακμή. Ολόκληρο το σύστημα πρέπει να υπακούει στις γενικές προδιαγραφές οι οποίες θα προσφέρουν την υψηλή ακρίβεια κοπής και την ευστάθεια που απαιτείται για την επίτευξη μικρών ανοχών.

Οι κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων συνεπάγονται ανάπτυξη μεγάλων τασικών πεδίων. Ως εκ τούτου, τα κοπτικά εργαλεία πρέπει να προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα στο επίπεδο κοπής. Επίσης, οι κοπτικές λεπίδες θα πρέπει να προσφέρουν υψηλή αντοχή σε θερμικά σοκ και υψηλή χημική σταθερότητα διότι στις κατεργασίες αυτού του είδους παράγονται υψηλές θερμοκρασίες και ακόμα μεγαλύτερης θερμοκρασίας απόβλιπτα, σχεδόν πυρωμένα. Η τελική ποιότητα επιφανείας των τεμαχίων και η διαστασιολογική τους ακρίβεια, εξαρτώνται από την αντοχή των κοπτικών σε φθορά και την σταθερότητα της κοπτικής τους ακμής.

Σε περιπτώσεις συνεχής κοπής και για συνήθη βάθη κοπής, τα σύνθετα κεραμικά υλικά προτιμούνται έναντι των CBN λόγω της καλύτερης τιμής που παρουσιάζουν στη σχέση κόστους/απόδοσης. Αντίθετα σε περιπτώσεις μεγάλης εναλλαγής του βάθους κοπής ή σε διακοπτόμενες κοπές τα κοπτικά εργαλεία από CBN αποδίδουν καλύτερα.

Ανάλογα τη φθορά του κοπτικού και τις παραμέτρους κοπής, η οριακή ζώνη κοντά στην επιφάνεια κατεργασίας μπορεί να επηρεαστεί κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων σε μικρομετρική κλίμακα (η αποκαλούμενη και ως λευκή ζώνη). Σήμερα έρευνες γίνονται πάνω στους ένσφαιρους τριβείς, οι οποίοι υπόκεινται σε έντονη καταπόνηση, με σκοπό να διερευνηθεί το κατά πόσο οι κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής αυτών των εξαρτημάτων. Σήμερα η τόννευση υψηλών ταχυτήτων έχει αντικαταστήσει περιπτώσεις λείανσης μεγάλου βάθους αφήνοντας τη λείανση ως κατεργασία σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων όπως σε ρουλεμάν μεγάλων διαμέτρων και ειδικά στις καλούμενες 'ενεργές ζώνες' τους που είναι οι οδηγοί. Οι αποκαλούμενες ως 'μη ενεργές ζώνες' των ρουλεμάν όπως οι εξωτερικές διαμέτροι και οι παράπλευρες επιφάνειες κατεργάζονται αποκλειστικά σε υψηλές ταχύτητες χωρίς την ανάγκη περαιτέρω κατεργασίας.

Στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων οι παράμετροι κοπής είναι συνήθως κοινοί για σύνθετα κεραμικά αλλά και για κοπτικά από CBN. Η ταχύτητα κοπής και το πάχος αποβλίπτου επιλέγονται με βάση τη σκληρότητα του κατεργαζόμενου υλικού.

Στις κατεργασίες χυτοσιδήρων οι υψηλές ταχύτητες αποτελούν πλέον σύνθετες φαινόμενα καθώς δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερα προβλήματα. Οι ταχύτητες κοπής κυμαίνονται από 600 μέχρι και 1200m/min χωρίς όμως και πάλι να περιορίζονται από το υλικό του κοπτικού αλλά από τους περιορισμούς που συνήθως βάζει η ίδια η συσκευή κοπής και η επιθυμητή γεωμετρία.

Για δύσκολες κατεργασίες χρησιμοποιούνται ως επι τω πλείστων τα νιτρίδια του πυριτίου, ενώ τα οξειδία χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις διάνοιξης αυλάκων με προφίλ σχήματος ν, δημιουργία σπειρωμάτων και άλλων προφίλ ακόμα πιο πολύπλοκης γεωμετρίας. Τα σύνθετα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται σε φάσεις φινιρίσματος υψηλών ταχυτήτων.

Στο κεφάλαιο των χυτοσιδήρων, η χρήση κοπτικών από νιτρίδια του πυριτίου δεν εξασφαλίζει αυτόματα και την χρήση των CBN. Συχνά είναι δύσκολη η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των Si_3N_4 ανάλογα με την αύξηση της ταχύτητας κοπής και της μείωσης του χρόνου κατεργασίας. Σε πρώτο επίπεδο πρέπει ο όλος μηχανισμός, συμπεριλαμβανομένου του μηχανήματος κοπής και του μηχανισμού πρόσδεσης του τεμαχίου, να ταιριάζουν στις απαιτήσεις. Αυτό απαιτεί μηχανές κοπής μεγάλης ισχύος ώστε να έχουμε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής του άξονα. Κάτι τέτοιο όμως είναι συνήθως αδύνατο. Έτσι πολλές φορές είμαστε αναγκασμένοι να ελαττώσουμε την πρόωση καθώς η περιστροφή της ατράκτου αυξάνει.

Στα πλεονεκτήματα όλων αυτών των υλικών είναι σαφώς η μεγάλη διάρκεια ζωής (ΔΖ) τους. Έτσι παράγονται περισσότερα τεμάχια ανα κοπτικό εργαλείο και μειώνεται αισθητά ο χρόνος ακινησίας της μηχανής που απαιτείται για την αντικατάσταση του κοπτικού όταν πλέον αυτό έχει φθαρεί. Η χρήση των CBN απαιτεί μεγάλη προσοχή και φροντίδα ώστε να αξιοποιηθούν πλήρως και από οικονομικής άποψης. Έχει παρατηρηθεί ότι το κόστος αξιοποίησης για κάθε κοπτική ακμή των υλικών αυτών είναι περίπου δεκαπλάσιος από αυτόν των υλικών από νιτρίδια του πυριτίου.

Τα οξειδία αποδίδουν ικανοποιητικά στο αποπεράτωμα και στην κοπή σπειρωμάτων, ενώ τα σύνθετα κεραμικά κάνουν καλή δουλειά στο φινιρίσμα. Κεραμικά από Si_3N_4 με επικάλυψη διαδοχικών στρωμάτων από TiN και αλουμίνας αποτελούν την καλύτερη επιλογή για κατεργασίες υψηλών απαιτήσεων, διάνοιξης οπών και διακοπτόμενης τórνευσης. Εδώ οι ταχύτητες κοπής είναι συνήθως χαμηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται στις κατεργασίες χυτοχάλυβων. Για συνεχή τórνευση κυμαίνονται στις 300 με 600 m/min και ενίοτε αγγίζουν τις 800m/min για διακοπτόμενη τórνευση.

Τα νιτρίδια του πυριτίου όταν χρησιμοποιούνται με μηχανές κοπής υψηλής ισχύος, προσφέρουν υψηλές ταχύτητες κοπής (πάνω από τις 800m/min) και τιμές πρόωσης (0.2-0.3 mm/m) σε περιπτώσεις διάνοιξης οπών σε χυτοσίδηρο.

Οι κατεργασίες φρεζαρίσματος υποβάλλουν τα κοπτικά εργαλεία σε μεγάλα εναλλασσόμενα μηχανικά και θερμικά φορτία. Έτσι, τα νιτρίδια του πυριτίου με την υψηλή τους σκληρότητα και την αντοχή στα θερμικά σοκ αποτελούν ιδανική λύση για αυτές τις κατεργασίες. Δημιουργούνται επίσης και απόβλιπτα μεγάλης διατομής ακόμα και με θετική γωνία αποβλίπτου.

Το φρεζάρισμα χυτοσιδήρου γίνεται συνήθως σε ταχύτητες 500-800m/min αλλά είναι δυνατόν να ξεπεράσουν και τις 1000m/min. Η πρόωση κυμαίνεται μεταξύ 0.10 και 0.30 mm/rev. Κεραμικά κοπτικά εργαλεία διάτρησης από νιτρίδιο του πυριτίου αποτελούν μία από τις τελευταίες προόδους στο χώρο της κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων. Για τη χρήση των εργαλείων αυτών απαιτούνται δράπανα υψηλής ισχύος. Για την πλήρη τους αξιοποίηση απαιτείται ισχύς στην άτρακτο μεγαλύτερη των 10kW και ταχύτητες περιστροφής της τάξης των 10.000 rpm.

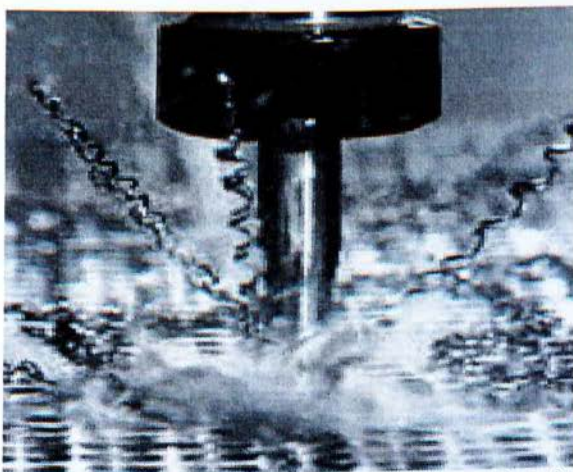
Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν αυτές οι μηχανές είναι :υψηλές αποδόσεις, κοπές χωρίς υγρά και επομένως φιλικές προς το περιβάλλον, μικροί χρόνοι κατεργασίας, υψηλή παραγωγικότητα ακόμα και με δράπανα μονής άτρακτου καθώς και μεγαλύτερη ευελιξία του συστήματος.

Η χρήση των κεραμικών στη κατεργασία χυτοσιδήρου υψηλών ταχυτήτων είναι πλέον καθιερωμένη. Στην τόννευση η επιπλέον αύξηση των ταχυτήτων κοπής είναι μάλλον απίθανη στο προσεχές μέλλον.

Αντίθετα, σε κατεργασίες όπως το φρεζάρισμα και η διάτρηση, η αύξηση των ταχυτήτων κοπής έχει ακόμα μεγάλα περιθώρια. Για τον λόγο αυτόν όμως απαιτούνται μηχανήματα υψηλής ισχύος και μεγάλων αριθμών περιστροφής καθώς και προηγμένα συστήματα τροφοδότησης και πρόσδεσης, ώστε τα πλεονεκτήματα που έρχονται από τον χώρο των προηγμένων κεραμικών υλικών να αξιοποιηθούν στο έπακρο.

Όσον αφορά τη διάτρηση χυτοσιδήρου με κοπτικά από Si_3N_4 , πρόκειται για μια μέθοδο κατεργασίας η οποία θα λέγαμε ότι βρίσκεται ακόμα σε νηπιακό στάδιο. Στον τομέα αυτό, νέα κοπτικά μηχανήματα και μέθοδοι παραγωγής θα προσφέρουν ακόμα περισσότερα πλεονεκτήματα.

Τεράστιες δυνατότητες προβάλλουν στην ανάπτυξη κάθε κοπτικού που θα αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά ειδικά τα κεραμικά και τα CBN με τις κατεργασίες άνευ υγρών κοπής κλέβουν προς το παρόν τις εντυπώσεις. Τέλος η αντικατάσταση της λειάνσης από κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων θα αποτελέσουν χώρο τεχνολογικών δοκιμών και νέων προσδοκιών.



Κατεργασία διάτρησης υψηλών ταχυτήτων με χρήση κοπτικού εργαλείου από σκληρομετάλλου

3.2. Υγρή ή Ξηρή Κατεργασία

Η επιλογή για Υγρή ή Ξηρή Κατεργασία, δηλαδή για χρήση ή όχι ψυκτικού και λιπαντικού υγρού κατά την κατεργασία, δεν ετίθετο καν σαν ερώτημα λίγες δεκαετίες πριν. Τα οφέλη της χρήσης του και από την άλλη μεριά τα προβλήματα της απουσίας του δεν μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με άλλο τρόπο. Σήμερα όμως, ειδικά με κατά της κοπές υψηλής ταχύτητας, η χρήση του ψυκτικού μέσου είναι συζητήσιμη και σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτική.

Παράλληλα, έχει παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια και η «σχεδόν ξηρή» κατεργασία, που συνδυάζει πλεονεκτήματα και από τα δύο είδη κατεργασίας, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα λιπαντικού (για περισσότερες πληροφορίες {[2] σελ 200-221}). Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις συνθήκες κατά τις οποίες μπορούμε να έχουμε υγρή ή ξηρή κοπή, είναι καλό να αναλύσουμε και τους δύο τρόπους

3.2.1. Υγρό Κοπής

Οι βασικές λειτουργίες του ψυκτικού υγρού κατά την κοπή μετάλλων είναι κυρίως να προσφέρει ψύξη και λίπανση στις επιφάνειες κατεργασίας (κυρίως του εργαλείου) και δευτερευόντως να απομακρύνει τα απόβλητα. Έτσι επηρεάζει άμεσα τις συνθήκες τριβής, την θερμοκρασία και τις τάσεις, άρα τον χρόνο ζωής του εργαλείου και την ποιότητα της επιφανείας του τεμαχίου. Ο όρος που χρησιμοποιείται είναι υγρά κοπής μετάλλου (metal working fluids - MWF).

Μέχρι τον 19^ο αιώνα, το νερό αποτελούσε το μόνο ψυκτικό μέσο, αλλά εγκαταλείφθηκε σταδιακά, γιατί παρόλο που είχε εξαιρετική θερμική χωρητικότητα και ήταν ευκόλως διαθέσιμο, δημιουργούσε γρήγορα φθορά και διάβρωση στα εργαλεία ενώ παράλληλα δεν προσέφερε ικανοποιητική λίπανση. Παρόλα αυτά, έδινε τη δυνατότητα να αυξηθεί η ταχύτητα κοπής κατά 30-40%. Τα ορυκτέλαια χρησιμοποιήθηκαν από την αρχή του 20^{ου} αιώνα και μέχρι σήμερα, ελάχιστα έχει αλλάξει η δομή του, με εισαγωγή προσθέτων και παραγωγής συνθετικών.

Η σημασία τους στις κατεργασίες κοπής είναι αδιαμφισβήτητη, όμως αυτό δεν σημαίνει ότι είναι πάντοτε σωστό να «πλημμυρίζει» η επιφάνεια κατεργασίας με λιπαντικό, ανεξαρτήτως των συνθηκών κοπής ή της κατεργασίας. Έτσι σπαταλούνται μεγάλες ποσότητες λιπαντικών, τα οποία ούτε ιδιαίτερος φθηνά είναι, ούτε χωρίς άλλα προβλήματα που θα αναλυθούν παρακάτω:

> Το κόστος του όλου συστήματος λίπανσης αλλά και η συντήρηση του δεν είναι διόλου άνευ σημασίας. Υπολογίζεται ότι κοστίζει 15-20% της όλης κατεργασίας (έρευνα που έγινε στην Mazda υπολόγισε ότι το κόστος ψύξης και λίπανσης κατά την κατεργασία φτάνει μέχρι και το 30%), ενώ ο καθαρισμός του λιπαντικού μετά την χρήση δεν είναι πάντοτε αποτελεσματικός, εξαιτίας της συνεχόμενης μείωσης του μεγέθους των αποβλήτων (φτάνουν μέχρι και το μm , μέγεθος που δεν κρατάει κανένα φίλτρο), μετά από κάθε επαναχρησιμοποίηση.

Το αποτέλεσμα είναι είτε να ανανεώνεται συχνότερα το υγρό κοπής (αύξηση του κόστους) είτε τα απόβλητα αυτά να επηρεάζουν την ακρίβεια της κοπής (μείωση ποιότητας)

> Τα ορυκτέλαια αυτά μετά τις κατεργασίες, είναι άκρως βλαβερά για το περιβάλλον αλλά και τους εργάτες που έρχονται σε επαφή μαζί τους. Με την οικολογική συνείδηση συνεχώς να μεγαλώνει, το πρόβλημα διαχείρισης των τοξικών αποβλήτων ίσως είναι και το πλέον σημαντικό πρόβλημα και έχει και οικονομικό αντίκτυπο, εφόσον πλέον όποιος ρυπαίνει, πληρώνει. Και όταν η κατανάλωση υγρών κοπής στην Αμερική σε ετήσια βάση ξεπερνάει τα 400.000.000 λίτρα, γίνεται αντιληπτό το μέγεθος της οικολογικής καταστροφής, ενώ οι εργάτες που έρχονται καθημερινά σε επαφή με αυτά ξεπερνούν το ένα εκατομμύριο.

> Το ψυκτικό υγρό προσφέρει πολύ καλύτερες συνθήκες κατά την κοπή, αλλά κυρίως για τις χαμηλές ταχύτητες κοπής. Μετά τα 100m/min, η λίπανση και η ψύξη δεν είναι πλέον το ίδιο αποτελεσματική ενώ για ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες (σε αυτές που αναφέρονται οι κοπές υψηλής ταχύτητας), η αποτελεσματικότητα των υγρών κοπής είναι αμφισβητήσιμη και καθορίζεται από τις συνθήκες κοπής. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την κοπή μετάλλου και ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες, η επαφή αποβλήτου και εργαλείου στην επιφάνεια αποβλήτου φτάνει το 100%, με αποτέλεσμα το υγρό να μην μπορεί να εισχωρήσει ανάμεσα στις δύο επιφάνειες.

Είναι βέβαια προφανές, ότι παρόλα τα προβλήματα που παρουσιάζουν τα υγρά κοπής, σε πολλές κατεργασίες δεν έχει βρεθεί ακόμη τρόπος να αντικατασταθούν χωρίς να προκύψουν σημαντικότερα προβλήματα. Γιατί ο χρόνος ζωής του εργαλείου, ειδικά κατά τις κοπές μεσαίων ταχυτήτων θα μειωνόταν δραστικά χωρίς λιπαντικό. Γι' αυτό η ροή του υγρού κοπής κατά την κατεργασία πιθανόν δεν πρόκειται ποτέ να εγκαταλειφθεί. Κατεργασία χωρίς λιπαντικό είναι σήμερα εφαρμόσιμη σε κατεργασίες υψηλής ταχύτητας και είναι πολλά υποσχόμενη για κατεργασίες με γεωμετρικά καθορισμένο κοπτικό εργαλείο

3.2.2. Κατεργασία Χωρίς Υγρό Κοπής (Dry Machining) Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η ξηρή κοπή είναι δυνατή και αξιόπιστη μόνο για κοπή με υψηλές ταχύτητες, καθώς η συγκέντρωση θερμικών φορτίων θα ήταν μη αντιμετωπίσιμη, αφού στις υψηλές ταχύτητες, η επαφή εργαλείου και τεμαχίου ελαχιστοποιείται. Κατά την ξηρή κατεργασία, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν επαρκώς οι λειτουργίες που προσφέρει το υγρό κοπής, δηλαδή η ψύξη, η λίπανση και η απομάκρυνση των αποβλήτων. Οι θερμικές καταπονήσεις και η συσσώρευση των αποβλήτων μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορους τρόπους και επιλογές. Κατεργαζόμενο Τεμάχιο

Τα χαρακτηριστικά και το υλικό του καθορίζουν αρχικά αν μπορεί να υποστεί κατεργασία υψηλής ταχύτητας χωρίς υγρό κοπή. Η επιθυμητή ποιότητα επίσης είναι σημαντική καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ υψηλές και έτσι, παρόλο που η πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου εννοεί την ευκολία της κοπής, η ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου χειροτερεύει. Σκοπός λοιπόν είναι να μεταφέρεται όσο το δυνατόν λιγότερη θερμότητα στο τεμάχιο ή τουλάχιστον να μην μένει συγκεντρωμένη στην επιφάνεια αυτού. Γι' αυτό είναι λογικό να προτιμάται η ξηρή κοπή σε κομμάτια με καλή θερμική αγωγιμότητα και με μεγάλη μάζα για την ευκολότερη απαγωγή της θερμότητας.

Κοπτικό Εργαλείο

Αυτό οφείλει να έχει την βέλτιστη γεωμετρική μορφή (όπως είδαμε στην ενότητα 2.4.4.) για την μείωση της δύναμης κοπής (και άρα της θερμοκρασίας) με την αύξηση των γωνιών ελευθερίας, και για την καλύτερη απομάκρυνση του αποβλήτου. Η απομάκρυνση αυτή διευκολύνεται όταν το απόβλητο είναι διακοπτόμενο και άρα συμφέρει η γωνία αποβλήτου να είναι αρνητική και να «σπάει» το απόβλητο, η οποία μορφή του αποβλήτου θα μελετηθεί στην επόμενη ενότητα.

Η ξηρή κοπή απαιτεί επίσης κοπτικά εργαλεία με όσο το δυνατό μεγαλύτερη σκληρότητα και θερμική αντοχή και έτσι τα καρβίδια, τα κεραμικά και το διαμάντι αποτελούν τα μόνα υλικά κατασκευής εργαλείων για τις υψηλές ταχύτητες κοπής. Ειδικά το διαμάντι, είτε σαν υλικό κατασκευής είτε σαν υλικό επικάλυψης είναι το πλέον ενδεδειγμένο, αφού προσφέρει την μικρότερη τριβή και την καλύτερη αντοχή.

Εργαλειομηχανή

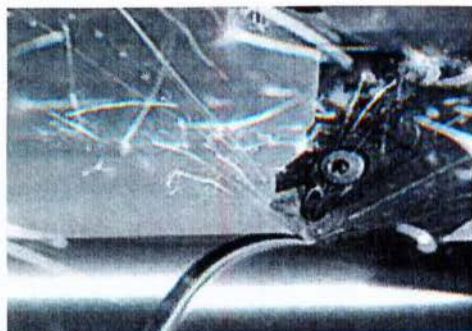
Το κυριότερο που μπορούν να προσφέρουν οι μηχανισμοί μιας εργαλειομηχανής είναι ένα σύστημα απομάκρυνσης αποβλήτων, με ειδική διαμόρφωση του θαλάμου κοπής (καλό θα ήταν να είναι να διατηρείται ο χώρος της κοπής υπό πίεση) και πρωτίστως με σύστημα ψεκασμού αέρα υψηλής πίεσης (flush-fine machining) στο σημείο κοπής.

Συνθήκες Κοπής

Εκτός της ταχύτητας κοπής, είναι σημαντικό επίσης να έχουμε υψηλές ταχύτητες πρόωσης και μεγάλο βάθος κοπής, καθώς παρόλο που αυξάνουν την θερμοκρασία κατεργασίας, μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας απάγεται από τα μεγάλο μεγέθους απόβλητα και έτσι μένει λιγότερη θερμοκρασία στην κατεργασμένη επιφάνεια, βελτιώνοντας την ποιότητα της τελικής επιφάνειας.

Το είδος της κατεργασίας επίσης καθορίζει το κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοπή υψηλής ταχύτητας χωρίς υγρό κοπή. Για τις κατεργασίες τόνρευσης και φρεζαρίσματος το κυριότερο πρόβλημα εντοπίζεται στα υπερκράματα ενώ όλα τα υπόλοιπα υλικά έχουν τη δυνατότητα να κατεργαστούν.

Η επιλογή των καταλλήλων συνθηκών κοπής δεν είναι καθόλου εύκολη και όλοι οι παραπάνω παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο, γι 'αυτό και θα αναλυθεί σε επόμενη



Σχήμα 3.3 Φωτογραφία από ξηρή τórνευση ενόττητα.

Ο χρόνος ζωής του εργαλείου και με την βέλτιστη επιλογή όλων των παραπάνω παραγόντων σίγουρα θα είναι σημαντικά μειωμένος κατά την ξηρή κοπή. Όμως, ενώ το η μελέτη αυτού του είδους κοπής ξεκίνησε αρχικά μόνο εξαιτίας της περιβαλλοντικής καταστροφής και του αυξημένου κόστους των υγρών κοπής, σύντομα έγινε αντιληπτό ότι οι μηχανισμοί που διέπουν την ξηρή κοπή δεν προσφέρουν μόνο αυτά τα οφέλη, ενώ η ξηρή κοπή μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό παραγωγής καθώς είναι καλύτερα αξιοποιήσιμη στις κοπές υψηλής ταχύτητας. Ειδικά η απόδοση κατά την ξηρή κοπή χαλύβων είναι τόσο υψηλή, που η κατεργασία του γίνεται σχεδόν αποκλειστικά πλέον με αυτή τη μέθοδο (όταν υπάρχουν τα κατάλληλα μέσα) και είναι γνωστή ως κόκκινο μισοφέγγαρο (red crescent), από τη κόκκινη καμπύλη που σχηματίζεται μπροστά από το εργαλείο λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται (άνω των 700°C).



Σχήμα 3.5 Διάφορες μορφές αποβλήτων ανάλογα με την ταχύτητα προώσεως και το βάθος κοπής

Βλέπουμε ότι με αύξηση του βάθους κοπής ή/και της ταχύτητας προώσεως για τον χάλυβα και γενικά για τα περισσότερα μέταλλα έχουμε διακοπτόμενο απόβλητο. Αυτό εξηγείται από την ταυτόχρονη αύξηση θερμοκρασίας και δυνάμεων κοπής, όπως είδαμε στην ενότητα 2.2.3, το υλικό του τεμαχίου στην επιφάνεια της κατεργασίας και το απόβλητο με αυτό τον τρόπο γίνεται πιο μαλακό και έτσι κόβεται ευκολότερα συναρτήσει και των μεγαλύτερων δυνάμεων. Όσον αφορά την ταχύτητα κοπής, τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα:

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι για τα όλκιμα μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το διακοπτόμενο απόβλητο εμφανίζεται μετά από μια συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής, συνήθως πολύ υψηλή, ενώ για πιο φαθυρά μέταλλα οι υψηλές ταχύτητες ευνοούν το σχηματισμό συνεχόμενου αποβλήτου. Η ταχύτητα κοπής δεν επηρεάζει σε απόλυτο βαθμό το σχήμα του αποβλήτου, καθώς η θερμοκρασία αυξάνει αλλά οι δυνάμεις κοπής ελλατώνονται, γεγονός που ίσως εξηγεί την αβεβαιότητα μορφής του αποβλήτου.

Στις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας, συνήθως επιδιώκουμε να έχουμε ασυνεχές απόβλητο για να είναι μικρότερη η επιφάνεια επαφής του αποβλήτου με το εργαλείο πριν αυτό απορριφθεί και άρα να έχουμε μικρότερες δυνάμεις κοπής, χωρίς βέβαια να παραλείπουμε τις ταλαντώσεις στην δύναμη κοπής από την ασυνέχεια της ροής που επηρεάζουν την ποιότητα επιφανείας του κατεργασμένου κομματιού. Έτσι ο έλεγχος του αποβλήτου, ειδικά σε κατεργασίες όπως η τόνρευση και το φρεζάρισμα γίνεται επιτακτική ανάγκη.

3.3. Απόβλητα & Γρέζια

Η μορφή του αποβλήτου είναι ένα αρκετά σημαντικό θέμα προς εξέταση, καθώς από αυτή και μόνο μπορούμε να αξιολογήσουμε την απόδοση της κατεργασίας, ειδικά στις κατεργασίες υψηλής απόδοσης και ταχύτητας. Το απόβλητο δημιουργείται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλεί διάτμηση στο υλικό του τεμαχίου. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έρχεται σε επαφή το εργαλείο με το απόβλητο είναι ακραίες όπως είδαμε σε προηγούμενες ενότητες, με υψηλή θερμοκρασία, πίεση, τριβή και ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ τους. Η μορφή του αποβλήτου λοιπόν μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, τη θερμοκρασία κοπής, το εργαλείο και το υλικό, αλλά ακόμη δεν έχει μελετηθεί πλήρως ο βαθμός επίδρασης του κάθε παράγοντα και έτσι η τελική μορφή που θα έχει το απόβλητο βασίζεται κυρίως σε πειραματικά δεδομένα.

Οι μορφές που ενδέχεται να πάρει το απόβλητο κατά την τόννευση είναι τρεις, συνεχόμενη δηλαδή αποβάλλεται το υλικό σε μεγάλου μήκους κομμάτια, διακοπτόμενη (ασυνεχής) δηλαδή σε κομμάτια και πριονωτή δηλαδή μια ενδιάμεση μορφή των δύο προηγούμενων με μεταβαλλόμενο πάχος του αποβλήτου. Η ομοιομορφία η όχι του αποβλήτου σχετίζεται με το πάχος, την επαναληψιμότητα στο σχήμα και τη μορφή που αυτό σχηματίζει μετά την κοπή. Για το φρεζάρισμα το απόβλητο λογικά είναι διακοπτόμενο, όμως ενδέχεται να έχει ορθογωνική ή μορφή πετάλου.

Μερικές τέτοιες μορφές για απόβλητο τόννευσης φαίνονται παρακάτω (Σχ 3.5):



Σχήμα 3.4 Σχηματισμός αποβλήτου κατά τόννευση

Ασυνέχεια στο απόβλητο, εκτός από το υψηλό βάθος κοπής και ταχύτητα προώσεως, μπορεί να επιτευχθεί επίσης με το ψυκτικό υγρό (αν χρησιμοποιείται βοηθά στην θραύση του αποβλήτου), με τη κατάλληλη σύσταση του υλικού προς κατεργασία (για παράδειγμα αν ο χάλυβας περιέχει πρόσθετες ποσότητες φωσφόρου, το απόβλητο γίνεται πιο συνεχές), με τις κατάλληλες διατάξεις στο εργαλείο (όπως οι γρεζοθραύστες στο σχήμα δίπλα (Σχ 3.6), οι οποίες κόβουν) ή τέλος με επιλογή των καταλλήλων γωνιών κοπής και αποβλήτου (οι αρνητικές γωνίες λειτουργούν όπως οι κατάλληλες διατάξεις και σπάνε το απόβλητο). Πάντως ακόμη δεν έχει ανακαλυφθεί μοντέλο υπολογισμού της μορφής του αποβλήτου.



Σχήμα 3.6 Εργαλείο με γρεζοθραύστη

Η σκληρότητα του αποβλήτου μας δίνει και μια εκτίμηση για την θερμοκρασία κοπής. Όσο μεγαλύτερη σκληρότητα έχει το απόβλητο, τόσο μικρότερες θερμοκρασίες αναπτύχθηκαν κατά την κοπή, εφόσον η πλαστική παραμόρφωση κατά τις υψηλές θερμοκρασίες μειώνει την σκληρότητα, όπως βλέπουμε και παρακάτω με την γωνία αποβλήτου.

Η γωνία αποβλήτου στην ενότητα 2.2.4 είδαμε ότι όσο μικρότερη είναι, τόσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχουμε, πράμα που αποδεικνύεται και με την σκληρότητα στο διπλανό σχήμα (Σχ 3.7).

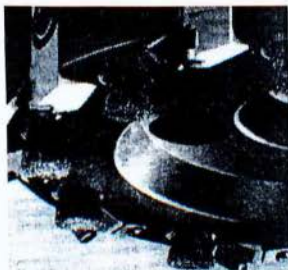


Σχήμα 3.7 Διάγραμμα μεταβολής της σκληρότητας του εργαλείου συνάρτησε της ταχυτήτας κοπής και της γωνίας του αποβλήτου.

Τα γρέζια, δηλαδή τα ανεπιθύμητα προεξέχοντα κομμάτια μετάλλου που μένουν στην κατεργασμένη επιφάνεια, προκαλούν πολλά προβλήματα στην ποιότητα επιφανείας του τεμαχίου και μπορεί να αποδειχθούν βλαβερά ακόμη και για τους εργάτες των κατεργασιών. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει επαρκής ακαδημαϊκή μελέτη για τον σχηματισμό των γρεζιών, και έτσι δεν υπάρχουν ακόμη αξιόπιστοι μηχανισμοί που θα αποτρέπουν τη δημιουργία τους. Άρα μένει μονάχα η λύση της απομάκρυνσής τους.

Το πρόβλημα για την απομάκρυνσή τους δεν είναι τεχνικό ή τεχνολογικό, αλλά καθαρά το κόστος των επιπροσθέτων κατεργασιών που απαιτείται. Γι' αυτό οι απαιτήσεις των βιομηχανιών είναι η εύρεση τρόπων απομάκρυνσής τους με το λιγότερο κόστος, πράγμα που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διατάξεων καθαρισμού γρεζιών στην ίδια την κατεργασία του υλικού, χωρίς να χρειάζεται ειδική διάταξη για αυτόν το σκοπό.

Μια αρκετά φθηνή και αξιόλογη λύση για παράδειγμα κατά το φρεζάρισμα παρουσιάζεται στο διπλανό σχήμα (Σχ 3.8) και αποτελείται από μια φρεζοκεφαλή αλουμινίου με κυλινδρικά περιβλήματα που εκτός των κοπτικών εργαλείων περιέχουν και βούρτσες για τον καθαρισμό των γρεζιών. Το περίβλημα με τις βούρτσες είναι ψηλότερα κατά την κατεργασία (και άρα δεν έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο) ενώ αφού αυτή ολοκληρωθεί, το περίβλημα με τα εργαλεία μαζεύεται και οι βούρτσες περιστρέφονται με αντίθετη φορά από αυτήν που έγινε η κατεργασία. Με αυτόν τον τρόπο τα γρέζια καθαρίζονται αποτελεσματικά, γρήγορα και χωρίς μεγάλο κόστος.



Σχήμα 3.8 Κεφαλή φρέζας με καθαριστή γρεζιών

3.4. Συνθήκες Κοπής

Οι συνθήκες κοπής στις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας παρουσιάζουν αρκετές ιδιαιτερότητες, λόγω της υπερβολικά αυξημένης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την κοπή. Αν και έχουν ήδη αναφερθεί οι βασικές συνθήκες κοπής, όπως τα χαρακτηριστικά στοιχεία, οι γωνίες και τα εργαλεία, αξίζει να δούμε συγκεντρωτικά τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή τους σε μια τέτοια κατεργασία.

3.4.1. Παράγοντες

Θερμοκρασία κοπής

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κοπή παίζει σημαντικό ρόλο την όλη κατεργασία, όχι μόνο βέβαια η μέγιστη τιμή της αλλά και πως αυτή κατανέμεται στο εργαλείο, στο απόβλητο και στην κατεργασμένη επιφάνεια. Αυτά αναλύθηκαν εκτενώς στην ενότητα 2.2.3. Υψηλή θερμοκρασία αναπτύσσεται από:

- Μεγάλα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωσης και βάθος κοπής), αφού το εργαλείο κόβει μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου σε μικρό χρόνο και η θερμότητα δεν διαχέεται επαρκώς.

- Υψηλή σκληρότητα του τεμαχίου, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται και παραμορφώνει το υλικό του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη.

- Υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα ή με μικρή μάζα, γι' αυτό κατά τις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας επεξεργαζόμαστε συνήθως μεγάλα τεμάχια και με καλή θερμική αγωγιμότητα.

Παράλληλα, η αγωγιμότητα επηρεάζεται και από της επικαλύψεις των κοπτικών εργαλείων, με αυτές να είναι πλέον απαραίτητες για καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας.

- Μη χρήση ψυκτικού υγρού.

- Μεγάλη γωνία κοπής ενώ αντίθετα όταν οι γωνίες ελευθερίας και αποβλήτου είναι μικρότερες τότε η θερμοκρασία αυξάνεται, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.4.4.

- Μικρή ακτίνα καμπυλότητας, ίσως γιατί συγκεντρώνεται η θερμότητα σε μικρότερη επιφάνεια εφόσον η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη.

Δύναμη κοπής

Παρόλο που αναπτύσσονται 3 κύριες δυνάμεις κατά την κατεργασία όπως είδαμε στην ενότητα 2.2.2, η βασική δύναμη που μας ενδιαφέρει είναι η δύναμη κοπής που είναι παράλληλη στην πρωτεύουσα κίνηση. Αυτή μεγαλώνει όσο:

- Μειώνεται η ταχύτητα κοπής, όταν όμως αναφερόμαστε σε υψηλές ταχύτητες κατεργασίας, λόγω της αύξησης θερμοκρασίας και της πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου.

- Αυξάνεται η πρόωση και το βάθος κοπής, εφόσον κόβεται μεγαλύτερο μέρος υλικού στον ίδιο χρόνο. Η δύναμη κοπής αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με το βάθος κοπής, ενώ κατά την πρόωση δεν σημειώνεται τόσο σημαντική μεταβολή, ίσως γιατί η κοπή εξαρτάται περισσότερο από την περιοχή της ακμής του εργαλείου.

- Μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του κατεργαζόμενου υλικού.
- Μικρότερες είναι οι γωνίες κοπής και αποβλήτου, ενώ η γωνία ελευθερίας δεν παίζει σημαντικό ρόλο ως προς τη δύναμη κοπής.
- Αυξάνεται η ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του κοπτικού εργαλείου, ίσως γιατί δυσχεραίνεται η παραμόρφωση του τεμαχίου και η θερμοκρασία είναι μικρότερη.

Η θερμοκρασία και η δύναμη κοπής καθορίζουν και τον χρόνο ζωής του εργαλείου, γιατί η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να κάνει την κατεργασία ευκολότερη, η θερμική καταπόνηση που ασκείται στο εργαλείο όμως είναι μεγαλύτερη, ενώ η δύναμη κοπής θέλουμε να είναι όσο το δυνατό μικρότερη.

Λογικό είναι λοιπόν σε κάθε κατεργασία να θέλουμε όσο το δυνατό μικρότερη θερμοκρασία και δύναμη, αλλά αν κοιτάξουμε παραπάνω βλέπουμε ότι οι περισσότερες συνθήκες κοπής που αποφέρουν μείωση της δύναμης, αποφέρουν και αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ συγχρόνως γνωρίσαμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας αποφέρει μείωση της δύναμης κοπής. Παράλληλα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η ακρίβεια της επιφανείας. Λόγω της σημασίας που έχει για την όλη κατεργασία, εξετάζεται ξεχωριστά παρακάτω.

Ακρίβεια της κατεργασίας

Η ποιότητα της επιφανείας του κατεργασμένου τεμαχίου και η ακρίβεια της κατεργασίας θα λέγαμε γενικά ότι επηρεάζεται δυσχερώς από αύξηση της θερμοκρασίας. Όμως αυτό συμβαίνει συνήθως σε υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα, όπου η θερμότητα παραμένει στην κατεργασμένη επιφάνεια και δημιουργεί ανωμαλίες. Σε υλικά με καλή θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χάλυβας, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει δυσχερώς, ίσα ίσα που επειδή με υψηλή θερμοκρασία μειώνεται η δύναμη κοπής, η επιφάνεια παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια. Όμως η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας για κάθε υλικό έχει και τα όριά της.

Και ενώ θα μπορούσαμε να πούμε ότι για τους καλούς αγωγούς της θερμότητας η υψηλή ταχύτητα βελτιώνει την ποιότητα επιφανείας, αυτό συμβαίνει μέχρι κάποιο όριο, όχι μόνο λόγω της θερμοκρασίας, αλλά και για μηχανικούς λόγους. Ειδικά για το φρεζάρισμα κατά το οποίο περιστρέφεται το εργαλείο, ενώ θα περιμέναμε με μείωση της δύναμης κοπής που προκαλείται από αύξηση της ταχύτητας να μειώνονται και οι ταλαντώσεις στο κοπτικό εργαλείο και στην μανέλα του, στην πραγματικότητα όσο μεγαλύτερη είναι ταχύτητα περιστροφής των εργαλείων μας, τόσο περισσότεροι κραδασμοί δημιουργούνται. Μάλιστα οι δυνάμεις που προκαλούν αυτές τις ταλαντώσεις αυξάνονται συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής και μαζί με αυτές, μειώνεται η ποιότητα επιφανείας και η ακρίβεια της

κατεργασίας. Για την τόννευση προφανώς δεν παρουσιάζεται αυτό το πρόβλημα με το εργαλείο αλλά με τις ταλαντώσεις του τεμαχίου. Το πρόβλημα ακρίβειας αυτό λόγω υψηλής ταχύτητας περιστροφής λύνεται βέβαια με σωστή και ακριβή πρόσδεση των περιστρεφόμενων μερών ή με καλύτερης ποιότητας εργαλειομηχανή, αλλά στις πολύ υψηλές ταχύτητες (άνω των 20.000 rpm) ακόμη παρουσιάζονται μηχανικά προβλήματα.

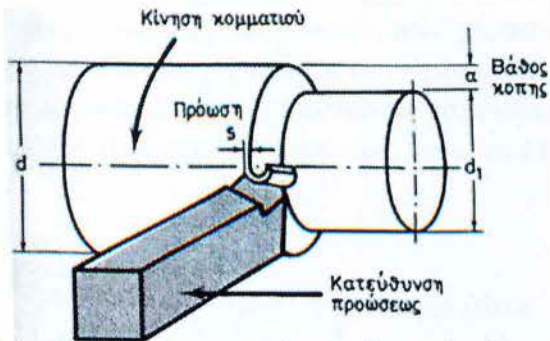
Η αύξηση του βάθους κοπής και περισσότερο της ταχύτητας προώσεως από την άλλη έχουν σαφή συνέπεια την μείωση της ακρίβειας της κατεργασίας, καθώς αυξάνουν τις δυνάμεις κοπής και αποσταθεροποίησης του εργαλείου. Εμφανές είναι επίσης ότι όσο μεγαλύτερη σκληρότητα παρουσιάζει το υλικό του τεμαχίου, τόσο μεγαλύτερες δυνάμεις αναπτύσσονται και άρα τόσο χειρότερη ακρίβεια. Τέλος, οι μεγαλύτερες γωνίες κοπής, αποβλήτου και ελευθερίας δίνουν καλύτερη ποιότητα επιφανείας, ενώ με την ακτίνα καμπυλότητας στις υψηλές ταχύτητες κοπής είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται μικρές ή μεσαίες ακτίνες, αντίθετα με ότι συμβαίνει κατά τις συμβατικές ταχύτητες κοπής.

Αν κατά την επιλογή των συνθηκών κοπής εκτός της θερμοκρασίας, της δύναμης κοπής και της ακρίβειας, προστεθεί και ο χρόνος ζωής του εργαλείου (ενότητα 2.4.4) ως παράγοντας, γίνεται κατανοητό πόσο δύσκολο είναι πολλές φορές να επιλεγούν οι καλύτερες συνθήκες κοπής για μια κατεργασία υψηλής ακρίβειας. Παρακάτω θα δούμε λίγο πιο αναλυτικά τις δύο συμβατικές κατεργασίες κοπής που αναφέρονται σε αυτή την εργασία.

3.4.2. Τόννευση

Για την Τόννευση υψηλής ταχύτητας ισχύουν τα κλασσικά χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής:

- Η ταχύτητα κοπής είναι η περιφερειακή ταχύτητα του κομματιού που τρονεύεται και προκύπτει από τον τύπο $v_k = \pi \cdot d \cdot n$ (m/min) όπου d είναι η αρχική διάμετρος του κομματιού σε μέτρα (m) και n ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό (rpm).
- Η πρόωση είναι η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου κατά την κατεύθυνση του νοητού άξονα τρονεύσεως για κάθε στροφή του κομματιού ενώ σημειώνεται ότι στον τόρνο ο μηχανισμός προώσεως συνδέεται και παίρνει κίνηση από την κύρια άτρακτο.



Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής τórνευσης

Συμβολίζεται με το γράμμα s και εκφράζεται σε χιλιοστά ανά στροφή (mm/rev). Παράλληλα πολλές φορές χρησιμοποιείται και ο όρος ταχύτητα προώσεως που δεν είναι άλλη από τη συνολική μετατόπιση του εργαλείου παράλληλα προς τον νοητό άξονα του σε ένα λεπτό. Συμβολίζεται με το S και υπολογίζεται ως $S = s \cdot n$ (mm/min)

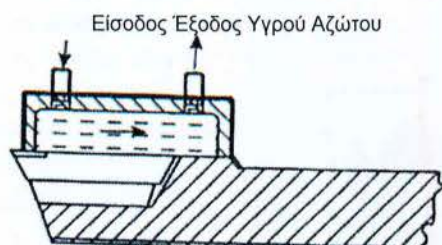
Το βάθος κοπής είναι το βάθος διεύθυνσης του εργαλείου στο κομμάτι προς επεξεργασία κατά την ακτίνα του τεμαχίου και ισχύει ότι $\alpha = (d - d^1) / 2$. Προφανώς κατά την εσωτερική τórνευση (grooving) το βάθος κοπής καθορίζεται από το πάχος του εργαλείου.

Ο χρόνος κατεργασίας ορίζεται ως $t = l / (s \cdot n) = l / S$ όπου l το μήκος του τεμαχίου προς κατεργασία. Αυτός ο χρόνος προφανώς είναι για ένα πέρασμα μόνο και φυσικά ο πραγματικός χρόνος κατεργασίας είναι κατά πολύ μεγαλύτερος, αφού περιλαμβάνει και τους βοηθητικούς χρόνους για να στηθεί όλη η διάταξη. $t = l / S$ για όλες της κατεργασίες με πρόωση, άρα και για το φρεζάρισμα.

Στην τórνευση υψηλής ταχύτητας, ειδικά όταν κατεργάζεται μέτριας σκληρότητας χάλυβας (πχ C45), οι πιο σημαντικές συνθήκες κοπής φαίνεται να είναι η ταχύτητα κοπής και η πρόωση, τουλάχιστον όσο αφορά την ακρίβεια επιφάνειας. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα και η πρόωση οι παραμένουσες δυνάμεις γίνονται όλο και πιο εφελκυστικές, ενώ το πάχος της επιφάνειας που αυτές επηρεάζουν μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας και μείωση της πρόωσης. Το βάθος κοπής από την άλλη δεν επηρεάζει καθόλου της παραμένουσες τάσεις, ενώ η χρήση υγρού κοπής φαίνεται τελικά να δυσχεραίνει την παραμένουσα κατάσταση επιφάνειας.

Η σκληρή τόννευση (hard turning) αναφέρεται στην τόννευση σκληρών υλικών ($HRc > 55$) σε υψηλές ταχύτητες χωρίς υγρό κοπής και γίνεται χρήση μόνο εργαλείων CBN, με μόνο αρνητικές γωνίες αποβλήτου. Οι θερμικές καταπονήσεις και οι υψηλές δυνάμεις κοπής είναι προφανώς τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν αυτή την κατεργασία. Όμως η σκληρή αυτή τόννευση τείνει να αντικαταστήσει πολλές φορές την διάτρηση σπών με δράπανο, με την επιφάνεια του κατεργασμένου κομματιού να έχει πολύ καλή ποιότητα. Περισσότερες πληροφορίες για το hard turning στο [9].

Η εξέλιξη στις συνθήκες τόννευσης έρχεται και από πρωτοπόρες ιδέες, οι οποίες βέβαια ακόμη χρησιμοποιούνται σε μικρό βαθμό. Τα πολύ σκληρά υλικά και μάλιστα με μικρή θερμική αγωγιμότητα (όπως



Σχήμα 3.10 Μηχανισμός κρυογονικής τόννευσης

κράματα Ti και Al) που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική βιομηχανία είχαν σπάταλη και χρονοβόρα κατεργασία. Μια εφεύρεση που βελτιώνει κάπως την κατάσταση είναι η κρυογονικώς ψυχρή τόννευση (Cryogenically Cooled Turning). Η διαδικασία είναι σχετικά απλή και ουσιαστικά διοχετεύεται υγρό άζωτο κοντά στην ακμή του κοπτικού εργαλείου με κατάλληλη διαμόρφωση της μανέλας (Σχ 3.10). Έτσι αυξάνεται ο χρόνος ζωής του εργαλείου, το οποίο προφανώς μπορεί να είναι μόνο CBN.

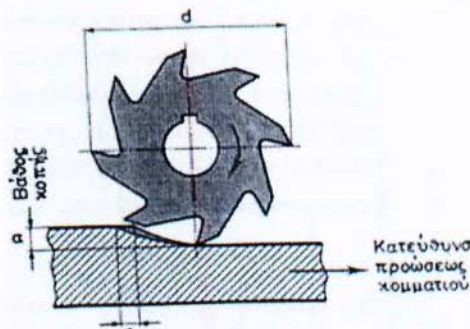
Μια ακόμη πρωτοπόρα ιδέα για την κατεργασία σκληρών υλικών ήταν να αυξάνεται η θερμοκρασία στην επιφάνεια του τεμαχίου προς κατεργασία ακριβώς τη στιγμή πριν την κοπή της για ευκολότερη παραμόρφωση. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση δεσμίδας λέιζερ και κατά την τόννευση (laser-assisted turning) και η θερμοκρασία του υλικού προς αποβολή μπορεί να φτάσει και τους 3000°C . Έτσι έχουμε πολύ μικρότερες δυνάμεις κοπής ενώ συγχρόνως το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας είναι συγκεντρωμένο στην επιφάνεια που θα αποβληθεί και έτσι περνάει στο απόβλητο και μόνο ένα μικρό μέρος στο εργαλείο, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διάρκεια ζωής του. Παρόμοιες πρακτικές γίνεται προσπάθεια να προσαρμοστούν και στις υπόλοιπες κατεργασίες, αλλά στην τόννευση έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα τα καλύτερα αποτελέσματα, με μείωση της δύναμης κοπής κατά 50%-70% και αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου κατά 80%.

Παρόμοια αποτελέσματα, έστω και λίγο μειωμένα παρουσιάζονται και κατά τη χρήση του λέιζερ στο φρεζάρισμα. Τέλος, υπάρχουν και άλλες τέτοιες «υβριδικές» κατεργασίες με χρήση υπερήχων, ηλεκτροχημικών, μικροκυμάτων και δέσμης νερού, όμως βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και χρησιμοποιούνται μόνο σε πολύ ειδικές κατεργασίες κοπής.

3.4.3. Φρεζάρισμα

Για το Φρεζάρισμα υψηλής ταχύτητας ισχύουν πάλι τα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής που ισχύουν για κάθε ταχύτητα κοπής.

Η ταχύτητα κοπής της φρέζας έχει τον ίδιο τύπο με του τόννου $v_k = \pi \cdot d \cdot n$ (m/min), μόνο που d εδώ είναι η διάμετρος της οπής που δημιουργεί το κοπτικό εργαλείο και n η περιστροφική ταχύτητά του σε rpm.



Σχήμα 3.11 Χαρακτηριστικά στοιχεία φρεζαρίσματος

Η πρόωση στο φρεζάρισμα ορίζεται αν οδόντα και ορίζεται ως η μετατόπιση του κομματιού προς το εργαλείο (η κίνηση μπορεί να γίνεται από το κομμάτι ή από το εργαλείο) από τη στιγμή που θα ακουμπήσει ένα δόντι στο κομμάτι μέχρι τη στιγμή που θα ακουμπήσει το επόμενο (ή το ίδιο θα κάνει μια στροφή και θα ακουμπήσει ξανά στην περίπτωση που το εργαλείο μας έχει μόνο ένα δόντι). Συμβολίζεται με s_1 και μετριέται σε mm/δόντι. Παράλληλα στο φρεζάρισμα χρησιμοποιούμε πολλές φορές την πρόωση ανά λεπτό, δηλαδή η ολική μετατόπιση του κομματιού σε σχέση με το εργαλείο κοπής. Αν η κίνηση δίνεται από την τράπεζα στο κομμάτι, τότε να σημειώσουμε ότι η κίνηση αυτή είναι εντελώς ανεξάρτητη από την κίνηση της κυρίας ατράκτου. Η πρόωση ανά λεπτό υπολογίζεται ως: $S = s_1 \cdot n \cdot Z$ (mm/min) όπου Z ο αριθμός των δοντιών του εργαλείου. Το βάθος κοπής συμβολίζεται με το γράμμα a και είναι πάλι η απόσταση της ακατέργαστης από την κατεργασμένη επιφάνεια.

Το φρεζάρισμα υψηλών ταχυτήτων δεν έχει μελετηθεί στον ίδιο βαθμό όπως ο τόννευση και οι προσπάθειες βελτίωσής του (εκτός της χρήσης λέιζερ που αναφέρθηκε προηγουμένως) επικεντρώνονται στη χρήση ειδικών εργαλείων που τελειώνουν όλη την κατεργασία που απαιτείται χωρίς να χρειάζεται να αλλάζουν συνεχώς τα εργαλεία ή να χρειάζονται περαιτέρω κατεργασίες για ικανοποιητική ποιότητα επιφανείας. Για την ακρίβεια επιφανείας αυτή, έχει μελετηθεί ότι οι παραμένουσες τάσεις παράλληλα της προώσεως είναι εφελκυστικές, ενώ κάθετα είναι θλιπτικές.

Οι παραμένουσες τάσεις που δυσχεράνουν την ποιότητα και αυξάνονται με αύξηση της ταχύτητας κοπής και προώσεως, με το βάθος κοπής να μην έχει σημαντική επίδραση. Πάντως το πάχος της επιφανείας που επηρεάζεται από τις παραμένουσες τάσεις παραμένει μικρό, ακόμα και για πολύ μεγάλες ταχύτητες κοπής και προώσεως.

Η χρήση ενός και μόνου ειδικού κοπτικού εργαλείου κατά την κατεργασία (one pass/step machining) ή κατεργασία ενός σταδίου βρίσκει τέλεια εφαρμογή κατά το φρεζάρισμα με την εφεύρεση των σφαιρικής ακμής φρεζών, με μορφή πλησιάζει τα δράπανα. Έτσι παρατηρείται εφαρμογή φρεζαρίσματος για διάνοιξη οπών όλο και περισσότερο, παράλληλα με την υπόλοιπη κατεργασία που μπορεί να γίνει από το ίδιο εργαλείο, ιδιαίτερα με τη χρήση εργαλειομηχανών ακριβείας και αριθμητικού ελέγχου (CNC). Παρόλα αυτά μέχρι σήμερα για αξιόπιστη κατεργασία με αυτόν τον τρόπο οι ταχύτητες κοπής δεν ξεπερνούν τις 12.000 rpm και η επίτευξη της επιθυμητής ακριβείας κατά την κατεργασία έχει απασχολήσει αρκετά τους ερευνητές, χωρίς να έχουν καταλήξει στον καλύτερο τρόπο εύρεσης των συνθηκών κοπής για το φρεζάρισμα ενός σταδίου. Οι παράγοντες είναι πολλοί, από την ταχύτητα κοπής μέχρι το πάχος του αποβλήτου, και τα προτεινόμενα μοντέλα ακόμη περισσότερα (περισσότερες πληροφορίες στο [15]).

Παράλληλα, τα ειδικά εργαλεία σφαιρικής ακμής βρίσκουν πολύ καλή εφαρμογή και στο σκληρό φρεζάρισμα (hard milling), χάριν των εργαλείων και επικαλύψεων CBN.

Συγχρόνως η μεγάλη ροπή που δημιουργείται κατά την κοπή σκληρών υλικών δεν επηρεάζει σημαντικά την κατεργασία στις υψηλής ακριβείας εργαλειομηχανές.

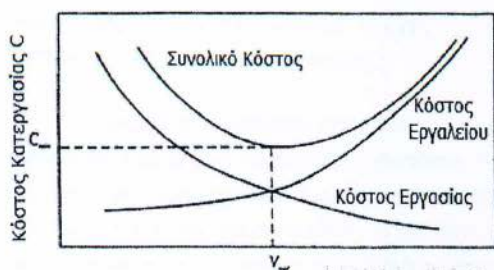
Σχήμα 3.12
σφαιρικής
φρεζά



Τα CBN εργαλεία αυτής της μορφής (που βλέπουμε και δίπλα στο Σχήμα 3.12) παρέχουν μέχρι και διπλασιασμό της διάρκειας ζωής του εργαλείου, υψηλές ταχύτητες συνεχόμενης κοπής που αγγίζουν και τα 1.000 m/min για σκληρά υλικά, με σχετικά βέβαια μικρή πρόωση (μέχρι 0,1 mm/tool) και βάθος κοπής που δεν ξεπερνά τα 3mm.

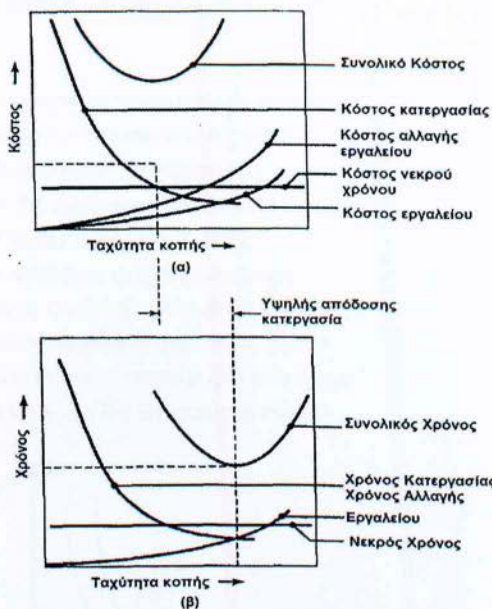
3.5. Βελτιστοποίηση

Προφανώς ο στόχος για βελτιστοποίηση της κατεργασίας θα ήταν να κατεργαζόμαστε με τις υψηλότερες ταχύτητες κοπής και πρόωσης, όπως και με μεγάλο βάθος κοπής. Αυτό όμως, όσο καλή επιλογή γωνιών και λοιπών συνθηκών κοπής να κάνουμε, οδηγεί σε γρήγορη φθορά του εργαλείου, με αποτέλεσμα τη συχνή αντικατάσταση του υπάρχοντος εργαλείου ή την προμήθεια καλύτερου. Και οι δυο λύσεις όμως αυτές αυξάνουν το κόστος και ενδεχομένως και τον χρόνο της κατεργασίας. Γι' αυτό επιλέγουμε συνήθως την βέλτιστη λύση με τρόπο που φαίνεται από το παρακάτω σχήμα (Σχ 3.13):



Ταχύτητα Κοπής V_w Σχήμά 3.13 Τυπικό διάγραμμα κόστους

Παράλληλα, ο χρόνος και το κόστος είναι αλληλένδετα μεγέθη για μια κατεργασία και θα μπορούσαμε να πούμε πως με τα σημερινά δεδομένα της βιομηχανίας ταυτίζονται, όπως είναι εμφανές στα διπλανά σχήματα (Σχ 3.14). Όμως το σημείο που έχουμε το ελάχιστο συνολικό κόστος δεν συμπίπτει σχεδόν ποτέ και με το σημείο ελαχίστου χρόνου.



Σχήμα 3.14 Διάγραμμα (α) Κόστους και (β) Χρόνου κατεργασίας

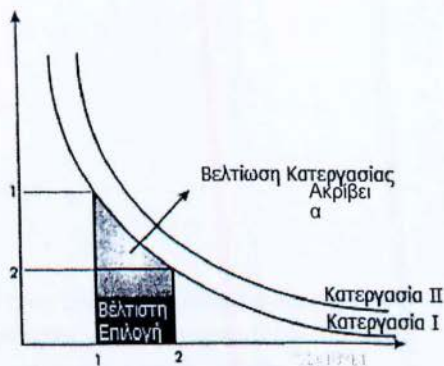
Ανάμεσα στο εύρος που καθορίζουν οι δύο αυτές τιμές έρχεται ο μηχανικός να επιλέξει τις συνθήκες κοπής ανταποκρίνονται καλύτερα στην κατεργασία, αν και αυτή η τεχνολογική - οικονομική ανάλυση δεν είναι πάντα τόσο εύστοχη στην πράξη.

Οι περιορισμοί στην επιλογή συνθηκών δεν σταματούν φυσικά στο χρόνο ζωής του εργαλείου και κατεργασίας. Η εργαλειομηχανή που διαθέτουμε είναι πολύ πιθανό να θέτει περιορισμό στις ταχύτητες κοπής και προώσεως, όχι μόνο λόγω των ταχυτήτων περιστροφών των αξόνων, αλλά και λόγω περιορισμένης ισχύος, αφού η ισχύς της κοπής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P > \frac{4500 \cdot v \cdot \gamma}{\eta} \quad (\text{HP})$$

όπου d το βάθος κοπής σε mm, s η πρόωση σε mm/rev, v η ταχύτητα κοπής σε m/min, γ η ειδική αντίσταση κοπής (καθορίζεται από το υλικό) σε kr/mm², α και β συντελεστές κοντά στη μονάδα. Συγχρόνως η ακρίβεια επιφανείας θέτει και αυτή περιορισμούς στις πρόωση κυρίως

Ακρίβεια, αξιοπιστία, αναπτυσσόμενη θερμοκρασία και χρόνος ζωής του εργαλείου καθορίζουν τις βασικές απαιτήσεις που θέτει ο κατασκευαστής για το τεμάχιο προς κατεργασία και με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι διαδικασίες βελτιώνονται όπως περίπου φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Βλέπουμε παράλληλα ότι είναι ανέφικτο να πετύχουμε πολύ καλή ποιότητα με μια κατεργασία καλής απόδοσης. Καλής απόδοσης κατεργασία καλείται αυτή που γίνεται σε Απόδοση συμφέροντα χρόνο και με χαμηλό κόστος. Γι' αυτό το κλειδί της επιτυχίας επιλογής των συνθηκών και παραγόντων κοπής είναι να αποφεύγονται οι ακρότητες. Πολύ ακριβά εργαλεία και μεγάλες ταχύτητες κατεργασίας δεν είναι απαραίτητο να φέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών φαίνεται πόσο σημαντική είναι, αν αναλογιστούμε πως το 75% των λαθών που γίνονται σε μια κατεργασία οφείλονται στον σχεδιασμό της.



Σχήμα 3.15 Διάγραμμα βελτίωσης κατεργασίας αναλόγως της ακρίβειας και της απόδοσής της

Την ίδια στιγμή είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ακρίβεια σε μια κατεργασία καθορίζεται από τον χειρότερη ποιότητα παράγοντα. Γι' αυτό οφείλει κάθε στοιχείο της κατεργασίας, δηλαδή το κοπτικό εργαλείο, η εργαλειομηχανή και τα περιφερειακά μηχανήματα να είναι ανάλογης ποιότητας, ακρίβειας και τεχνολογίας. Η βελτιστοποίηση της κατεργασίας μπορεί να έρθει βέβαια και από εξωγενείς παράγοντες, δηλαδή να συμφέρει να κατεργαστεί μόνο ένα μέρος στα μέσα τα οποία διαθέτουμε και το υπόλοιπο να γίνει ή να το προμηθευτούμε από αλλού.

Η Βελτιστοποίηση είναι προφανές ότι έρχεται και με την πρόοδο της τεχνολογίας των υλικών. Όμως όπως είδαμε στην ενότητα 3.4, η εφεύρεση πρωτοποριακών εργαλείων και χρήση καινοτόμων τεχνολογιών στις κατεργασίες δίνει επίσης εκπληκτικά αποτελέσματα, οι οποίες καινοτόμες ιδέες μπορεί σύντομα να αποτελούν τις απλές και συμβατικές κατεργασίες. Η κατεργασία σε ένα στάδιο από ειδικά εργαλεία, η αυξανόμενη σταθερότητα και η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών είναι πιο εύκολο να επιτευχθεί από την αναμονή των τεχνολογίας των υλικών, η οποία μπορεί να έχει ικανοποιητικούς ρυθμούς εξέλιξης, αλλά εκτός του ότι αυτοί οι ρυθμοί δεν είναι ραγδαίοι, έχει και το μειονέκτημα -όταν σκοπός είναι η επικράτηση στον ανταγωνισμό της αγοράς- ότι η τεχνολογία τους είναι προσβάσιμη σχεδόν σε όλους.

Βλέπουμε συμπερασματικά ότι ο χρόνος και το χρήμα που επενδύονται για την βελτιστοποίηση των κατεργασιών υψηλής ταχύτητας, μόνο χαμένα δεν πάνε, καθώς μέχρι σήμερα αυτές παρέχουν αξιόπιστα και με ακρίβεια:

- Μεγαλύτερους κατά 5 φορές ρυθμούς αποβολής υλικού.
- Μέχρι και 70% μείωση του χρόνου κατεργασίας.
- Μείωση 25-50% στο κόστος της κατεργασίας.
- Εκθετική αύξηση της παραγωγικότητας.

4. Υπολογιστική Προσομοίωση με το Advant Edge

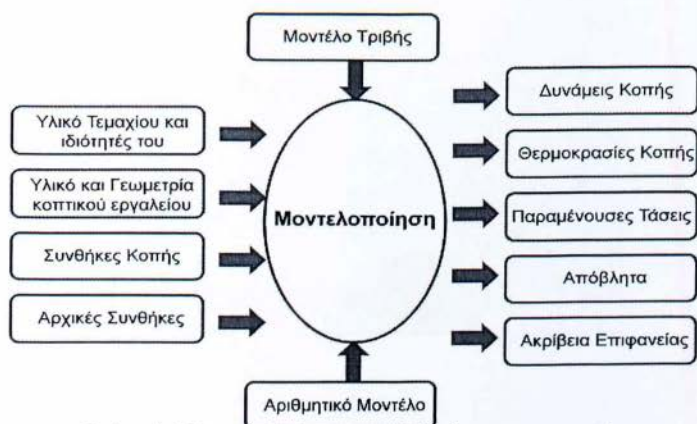
4.1. Μοντελοποίηση Κατεργασιών

Η εξέλιξη της μοντελοποίησης των κατεργασιών ήταν επιτακτική ανάγκη καθώς η εξαγωγή συμπερασμάτων από αναλυτικά και εμπειρικά μοντέλα περιοριζόταν σε πολύ απλά προβλήματα με πολλές παραδοχές και η πειραματική μέθοδος ήταν χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος για την εξαγωγή επαρκών συμπερασμάτων. Έτσι από τη δεκαετία του '50 και μετά, όπου και με τη βοήθεια των υπολογιστών οι μαθηματικές πράξεις μπορούσαν να γίνουν γρηγορότερα, παρουσιάστηκαν οι

πρώτες αριθμητικές μέθοδοι μοντελοποίησης των κατεργασιών και τα τελευταία χρόνια άρχισε να χρησιμοποιείται και η μοντελοποίηση με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Με τον όρο μοντελοποίηση καλούμε την διαδικασία κατά την οποία προβλέπουμε τις φυσικές συμπεριφορές ενός προβλήματος με την εισαγωγή κάποιων γνωστών συνθηκών και με χρήση κάποιων μαθηματικών σχέσεων. Στις κατεργασίες, η μοντελοποίηση αρχικά περιορίστηκε από τη μικρή ισχύ της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) του υπολογιστή και την πληθώρα των πράξεων που απαιτούνται σε απλές εφαρμογές, διδιάστατες και με πολλές οριακές συνθήκες. Έτσι μόνο τα τελευταία χρόνια έγινε δυνατό να προσομοιωθεί τρισδιάστατη κοπή. Χάριν της μοντελοποίησης μπορούμε όχι μόνο να αναπαραστήσουμε μια κατεργασία και την ελέγχουμε, αλλά -με δοκιμές που κοστίζουν πλέον μόνο χρόνο επεξεργασίας σε υπολογιστή- να την βελτιστοποιήσουμε.

Στις κατεργασίες λοιπόν τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται προσπαθούν να συνδέσουν το αίτιο, δηλαδή τους παράγοντες και τις συνθήκες κοπής μιας κατεργασίας, με το αποτέλεσμα, δηλαδή τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που θα αναπτυχθούν, τα απόβλητα, τις παραμένουσες τάσεις, την ακρίβεια επιφανείας και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Ένα εμπειρικό μοντέλο που αναφέρθηκε στην ενότητα 2.4.4, είναι του Taylor και όπως είδαμε συνδέει την ταχύτητα κοπής με το χρόνο ζωής του εργαλείου. Η λύση είναι γρήγορη αλλά το αποτέλεσμα απλώς προσεγγίζεται, πράμα το οποίο συμβαίνει και με τα περισσότερα μοντέλα μέχρι τη χρήση των αριθμητικών μοντέλων. Υπάρχουν αρκετά αριθμητικά μοντέλα, όπως των συνοριακών στοιχείων, των πεπερασμένων διαφορών και φυσικά των πεπερασμένων στοιχείων.



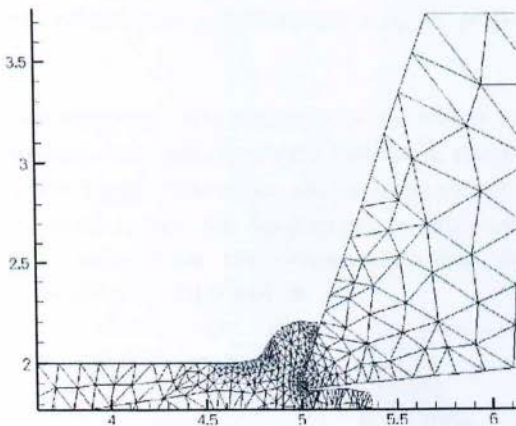
Σχήμα 4.1 Τυπικός τρόπος μοντελοποίησης κατεργασίας

4.2. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Το αριθμητικό μοντέλο που συναντάται κυρίως στις κατεργασίες είναι των πεπερασμένων στοιχείων, για την μοντελοποίηση συνεχών μέσων που συναντούνται σε αυτές (τεμάχια, εργαλεία κλπ). Η μέθοδος αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για επίλυση τασικών πεδίων σε προβλήματα μηχανικής, εξελίχθηκε και πλέον αναλύει προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ρευστομηχανικής κ.ά. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προοδευτικά βρήκε εφαρμογή στις κοπές μετάλλων, ξεκινώντας με μοντελοποίηση ορθογωνικής κοπής και φτάνοντας σήμερα να προσομοιώνει με ακρίβεια κάθε κατεργασία κοπής. Παρόλη την πρόοδο στην υπολογιστική δύναμη και τον υπολογισμό αλγορίθμων (στους οποίους στηρίζεται η FEM), αυτή η πρόοδος δεν συνοδεύτηκε από αντίστοιχες εξελίξεις στην θεωρία κοπής και έτσι ακόμη και σήμερα δεν έχουν μοντελοποιηθεί επακριβώς τα μοντέλα τριβής και δημιουργίας αποβλήτου και τα αποτελέσματα που σχετίζονται με αυτά τα θέματα να μην είναι πάντοτε αξιόπιστα.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα ή σε τρίγωνα (σε διδιάστατο πρόβλημα, στο τρισδιάστατο έχουμε ανάλογο πλέγμα) και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Οι κόμβοι μας δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος ή τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και ο βαθμός ελευθερίας τους προσδιορίζεται από τον αριθμό των μεγεθών που αναφέρονται σε αυτούς, δηλαδή των αγνώστων. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο.

Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρού ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων.



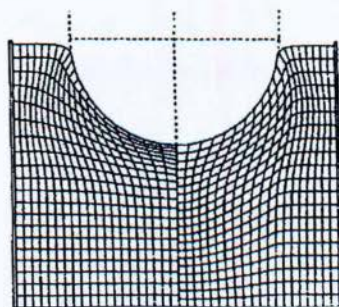
Σχήμα 4.2 Τρόπος μοντελοποίησης εργαλείου και τεμαχίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και δίνονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρική μορφή, και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας. Προφανώς όσο περισσότερους κόμβους έχουμε, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους (θεωρητικά). Βέβαια ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε υπερβολικά τον αριθμό των κόμβων αν θέλουμε να έχουμε αποτέλεσμα σε λογικό χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με τη FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών, μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας, καθώς κυκλοφορούν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες που είναι συμβατοί με προσωπικούς υπολογιστές. Ο γενικός τρόπος λειτουργίας τους περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του προβλήματος ανάλογα με τις απλοποιήσεις, τις οριακές συνθήκες και τα μεγέθη προς μοντελοποίηση (αυτά που αφορούν τον χρήστη, όπως η θερμοκρασία), ακολουθεί η μοντελοποίηση του προβλήματος με διακριτοποίηση του χώρου και των μέσων (τεμάχιο, εργαλείο κλπ) ανάλογα με τις ιδιότητες και τις αρχικές συνθήκες και τέλος κατασκευάζονται τα απαραίτητα μητρώα που θα επιλυθούν με τις παραμέτρους που επιθυμεί ο χρήστης.

Το παραπάνω κομμάτι συνήθως αναφέρεται ως προεπεξεργασία (pre-processing). Η επίλυση των μητρώων αναφέρεται συνήθως ως solver και η προβολή των αποτελεσμάτων και ενδεχομένως η επεξεργασία τους ως μετεπεξεργασία (post-processing).

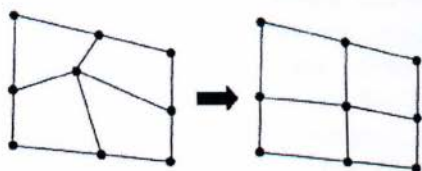
Για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση των μέσων μεταξύ τους και που υπολογίζουν τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν, εφαρμόζονται συνήθως δύο αριθμητικοί τρόποι: Οι μοντελοποιήσεις του Lagrange και του Euler. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιείται κυρίως στα προβλήματα με μηχανικά στερεά και έτσι προτιμάται για την μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής, όπου τα κομμάτια πλεγματοποιούνται ακριβώς στα όριά τους, με το μοντέλο του υλικού να είναι ελαστοπλαστικό, πλαστικό ή ρευστοπλαστικό και εξηγεί επαρκώς τα θερμικά φαινόμενα, όπως η μόνωση, όταν έχουμε επικαλύψεις στα εργαλεία κοπής. Η μέθοδος Euler μοντελοποιεί καλύτερα περιπτώσεις που έχουμε ροή ρευστού σε μεγάλο χώρο -γενικά για



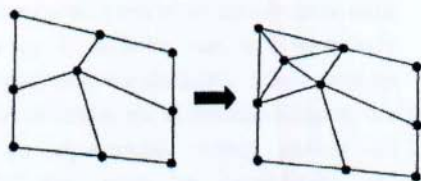
Σχήμα 4.3 Σύγκριση πλέγματος με τη μέθοδο Lagrange (αριστερά) και τη μέθοδο ALE (δεξιά)

κατεργασίες διαμόρφωσης- καθώς πλεγματοποιείται όλος ο χώρος. Φυσικά, παρόλο που με τη μέθοδο Lagrange έχουμε ακριβέστερη εικόνα της μορφής του αποβλήτου (κάτι πολύ σημαντικό για την μελέτη της κατεργασίας και κάτι που δεν προσφέρει η μέθοδος Euler, ειδικά για το διακοπτόμενο απόβλητο), παρουσιάζεται πρόβλημα από την μεγάλη πλαστική παραμόρφωση (η οποία παραμορφώνει υπερβολικά το πλέγμα) και έτσι απαιτείται συνεχούς επαναπροσδιορισμού του πλέγματος. Παράλληλα πολλές φορές στην περιοχή επαφής τεμαχίου εργαλείου παρατηρείται μη επαρκής διαχωρισμός των κόμβων, γεγονός που καθιστά απαραίτητο το πυκνό πλέγμα στις επιφάνειες επαφής. Μία άλλη λύση λοιπόν που μελετάται είναι η χρήση το μεγαλύτερο μέρος και Euler για την επιφάνεια επαφής της κοπτικής ακμής, το μοντέλο Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), με το πλέγμα να κινείται στο χώρο, κάτι που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και χρόνο υπολογισμών. Σήμερα πάντως χρησιμοποιείται κυρίως η βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου Lagrange, κατά την οποία το πλέγμα κινείται μαζί με το τεμάχιο και το εργαλείο και σε αυτήν θα αναφερόμαστε από εδώ και μπρος.

Όλες οι προσπάθειες μοντελοποίησης της μορφής του αποβλήτου στηρίζονται στον τρόπο διαχωρισμού αυτού από το τεμάχιο. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιεί συνήθως για την περιοχή αποκόλλησης του αποβλήτου από το τεμάχιο την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής, όπου όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει κοντύτερα από μία απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι (θερμοκρασίας και τάσεων), αυτός χωρίζεται σε δύο κόμβους. Επίσης, όπως είπαμε, η μέθοδος Lagrange έχει το μειονέκτημα της υπερβολικής παραμόρφωσης του πλέγματος και έτσι απαιτείται ο συνεχής επαναπροσδιορισμός πλέγματος (remeshing) και η ομαλοποίησή του (smoothing). Και οι δύο τεχνικές υπολογιστικά στοιχίζουν πολύ, ενώ παράλληλα απαιτείται και τοπική πύκνωση του πλέγματος (refinement) του πλέγματος του τεμαχίου στο σημείο κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο. Σχηματικά φαίνεται παρακάτω (Σχ 4.4 και 4.5) πως λειτουργούν αυτές οι τεχνικές «προσαρμοσισμού» πλέγματος για τη μέθοδο Lagrange και ALE.



Σχήμα 4.4 Ομαλοποίηση πλέγματος



Σχήμα 4.5 Πύκνωση πλέγματος

Η αριθμητική επίλυση σε όλες τις μεθόδους λύνει ουσιαστικά την παρακάτω εξίσωση: $M \cdot u = P - I$, όπου M το μητρώο μάζας, u η επιτάχυνση του κάθε κόμβου, P η εξωτερικές και I οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν. Για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων δεν χρησιμοποιείται πλέον η μέθοδος των συνεχών επαναλήψεων γραμμικών εξισώσεων, αλλά η λύση βρίσκεται με τη χρήση κεντρικής διαφοράς για τη λύση των εξισώσεων κίνησης που δεν είναι γραμμικές και η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως άμεση (explicit). Αυτό συμβαίνει διότι για τις επαφές των πλεγμάτων στις κατεργασίες κοπής το πρόβλημα είναι δυναμικό και θα απαιτούνταν πολλές επαναλήψεις.

Το κυριότερο πρόβλημα που προκύπτει με τη μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής προκύπτει από τις συνθήκες επαφής εργαλείου με τεμάχιο ή απόβλητο. Τις περισσότερες φορές γίνεται χρήση της απλής συνθήκης Coulomb για την τριβή $F = \mu N$, με F τη δύναμη τριβής, N την κάθετη δύναμη αντίδρασης που σχετίζεται με το βάρος και ο συντελεστής τριβής μ λαμβάνεται σταθερός για μικρές τάσεις που όμως σπάνια συναντούνται στις κατεργασίες κοπής. Σε αυτές ο συντελεστής τριβής δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από την ταχύτητα, τη θερμοκρασία και τις δυνάμεις κοπής, σε άγνωστο βαθμό μέχρι στιγμής, αν και έχει μελετηθεί ενδελεχώς. Κάθε μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί τη δική της τεχνική υπολογισμού του συντελεστή τριβής και μόνο το αποτέλεσμα καθορίζει την ορθότητα των απλοποιήσεων και οριακών συνθηκών που γίνονται. Και όμως, παρόλο που ο μηχανισμός της τριβής κατά την κοπή δεν είναι πλήρως αναλυμένος, από την τριβή καθορίζονται κυρίως οι παραμένουσες τάσεις.

Τα εμπορικά πακέτα που διατίθενται σήμερα μπορεί να απλοποιούν κατά πολύ τη μοντελοποίηση των κατεργασιών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εφόσον μπορούν να λύσουν μη-γραμμικά προβλήματα, όπως είναι τα θερμοδυναμικά. Όμως οι παραδοχές που κάνουν καθώς και οι τρόποι επίλυσης δεν είναι εύκολο τις περισσότερες φορές να ξεταστούν, πόσο μάλλον να διαφοροποιηθούν, από τον χρήστη, κάτι που κάνει το αποτέλεσμα του προγράμματος αρκετά αμφισβητήσιμο. Οι πηγές αυτών των ενδεχομένων λαθών κατά την μοντελοποίηση μια κατεργασίας κοπής μπορεί να προκύψουν από:

- Ανεπαρκή καταχώρηση δεδομένων.
- Υπερβολικές απλοποιήσεις και παραδοχές.
- Λανθασμένες οριακές συνθήκες.
- Αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις.
- Προβληματική προσαρμογή του πλέγματος.

Ένα πρόγραμμα που παρουσιάζει ίσως τα λιγότερα λάθη και προβλήματα κατά την εφαρμογή του στις κατεργασίες κοπής και ειδικά για τρισδιάστατη κοπή υψηλής ταχύτητας που εμφανίζονται κυρίως μη-γραμμικά φαινόμενα, είναι το Advant Edge της Third Wave Systems, το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.

4.3. Γενικά για το Πακέτο

Το AdvantEdge της Third Wave Systems είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης και προσομοίωσης κατεργασιών κοπής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αναπτύχθηκε ως εμπορικό πακέτο το 1995 από τον T.D. Marusich, ενώ η τελευταία έκδοσή του που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η V5.2, παρουσιάστηκε το 2008. Είναι ίσως το πιο φιλικό προς τον χρήστη εμπορικό πακέτο κατεργασιών κοπής, καθώς αυτός οφείλει να εισάγει μόνο τα δεδομένα του τεμαχίου, του κοπτικού εργαλείου και των συνθηκών κοπής, μέσα από φιλικούς και εύκολους στη χρήση καταλόγους επιλογής και το πρόγραμμα μετά υπολογίζει και παρουσιάζει τα αποτελέσματα. Η χρήση του στη σύγχρονη βιομηχανία κρίνεται σχεδόν ως απαραίτητη, αφού παρέχει πληροφορίες για διάφορα μεγέθη κατά την κοπή που είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθούν και να μελετηθούν πειραματικά.

Το AdvantEdge χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lagrange για τη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων και κάνει χρήση των αναγκαίων τεχνικών που χρειάζονται για αξιόπιστα αποτελέσματα σε αυτήν τη μέθοδο όπως αναλύθηκε στο 4.2, επαναπροσδιορισμού και ομαλοποίησης πλέγματος με τοπική πύκνωση, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της κατεργασίας. Έτσι απομακρύνονται οι έντονες παραμορφώσεις στα στοιχεία τα οποία είναι τριγωνικά κατασκευασμένα με τη μέθοδο Delaunay. Ο επαναπροσδιορισμός της γεωμετρίας ενός στοιχείου γίνεται όταν ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο όριο πλαστικής ισχύος και ο έλεγχος γίνεται ανά συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, ενώ όταν μετά τον επαναπροσδιορισμό του πλέγματος παρατηρείται ακόμη υπέρβαση των επιτρεπτών παραμορφώσεων, ακολουθεί η ομαλοποίηση.

Το απόβλητο δεν διαχωρίζεται από το τεμάχιο με κάποιο κριτήριο διαχωρισμού του υλικού αλλά σχηματίζεται από την πλαστική ροή του υλικού του κομματιού γύρω από την ακμή του κοπτικού εργαλείου και τη διάδοση της ρωγμής. Το κριτήριο διάδοσης της ρωγμής καθορίζει ότι η τροχιά της ρωγμής διαδίδεται προς τη γωνία κατά την οποία η τάση παίρνει μια σχετική μέγιστη τιμή. Όταν η μέγιστη αυτή τιμή ξεπεραστεί, γίνεται διπλασιασμός των κόμβων στην άκρη της ρωγμής και έτσι σχηματίζεται το απόβλητο. Η μορφή που θα έχει το απόβλητο, το αν θα είναι διακοπτόμενο ή όχι, καθώς και το σημείο που αυτό θα σπάσει το οποίο καθορίζεται από αυτήν την υπέρβαση της τάσης διαρροής στο σημείο κοπής ή στο απόβλητο. Η παραπάνω διαδικασία, σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό του πλέγματος κατά την επίλυση του προβλήματος της κοπής αποτελεί το βασικότερο πλεονέκτημα του προγράμματος.



Σχήμα 4.6 Μοντέλο θραύσης αποβλήτου μετά την περιοχή κοπής βάσει της εφελκυστικής τάσης

Μοντελοποίηση Υλικού Κατεργαζόμενου Κομματιού

Το υλικό του τεμαχίου μοντελοποιείται ως ιστροπικό ελαστοπλαστικό και με ιστροπική μηχανική παραμόρφωση, η οποία στις κατεργασίες κοπής προκύπτει ανάλογα με τις τάσεις και την θερμοκρασία. Το AdvantEdge υπολογίζει την αύξηση της τάσης ροής συναρτήσει του βαθμού καταπόνησης με τους παρακάτω τύπους:

$$\left(1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p} \right) = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_f(\varepsilon^p)} \right)$$

$$\sigma^f = \sigma_0 \Theta(T) \left(1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p} \right)^{1/n}$$

όπου (τ η ένταση κατά von Mises, σ_t η τάση ροή, σ_0 η οριακή τάση για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία, ε^n η συσσώρευση πλαστικής έντασης, $\dot{\varepsilon}$ ο ρυθμός συσσώρευσης

πλαστικής έντασης, ε^A ένας ρυθμός αναφοράς πλαστικής έντασης, n ο δείκτης σκληρότητας και $\Theta(T)$ ο θερμικός παράγων ευκαμψίας που παίρνει τιμή από 1 ως 0 (όταν το υλικό έχει λιώσει). Το πακέτο περιέχει μεγάλη βιβλιοθήκη υλικών με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του καθενός και ο χρήστης μπορεί απλά να επιλέξει το υλικό.

Μοντελοποίηση Μεταφοράς Θερμότητας

Κατά τις κατεργασίες κοπής είναι γνωστό ότι έχουμε 2 κύριες πηγές θερμότητας, το έργο πλαστικοποίησης και το έργο τριβής κατά την επαφή εργαλείου και τεμαχίου. Συνήθως το ποσοστό της κοπτικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα λαμβάνεται ίσο με 90% και θεωρούμε πως όλο το έργο τριβής μετατρέπεται αποκλειστικά σε θερμότητα. Οι επικαλύψεις του εργαλείου επηρεάζουν άμεσα τη μεταφορά θερμότητας και τη μορφή του αποβλήτου, γι' αυτό παρόλο που έχουν γραμμικές ελαστικές μηχανικές ιδιότητες, οι θερμικές τους ιδιότητες είναι μη γραμμικές και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Το μοντέλο της τριβής που ακολουθείται είναι βασισμένο στο νόμο του Coulomb ($\tau = \mu \cdot \sigma_n$) με ορισμένες τροποποιήσεις για τις μεγάλες τάσεις ενώ στην περιοχή των μικρών τάσεων χρησιμοποιείται αυτούσιο. Γενικά το πακέτο κάνει χρήση του κριτηρίου:όπου

$$\tau = \min \left(\mu \sigma_n, \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\text{όπου} \rightarrow \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

συγχρόνως ελαστικές (μέτρο Young, λόγος Poisson) και θερμοφυσικές (αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα, πυκνότητα) σταθερές τοποθετούνται για να περιληφθεί η εξάρτηση της θερμοκρασίας από την αγωγή θερμότητας μεταξύ των κομματιών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλειδί μιας επιτυχημένης κατεργασίας δεν είναι η τελειοποίηση μεμονωμένων παραμέτρων όπως τα κοπτικά εργαλεία, αλλά ολόκληρου του «φακέλου» της κατεργασίας με εκμετάλλευση κάθε τεχνολογικής δυνατότητας και εξέταση κάθε πλευράς της εφαρμογής. Οδηγός της προόδου των εργαλειομηχανών θα είναι σίγουρα η ευελιξία και η ακρίβεια που θα μπορούν να παρέχουν, καθώς με νέα πολύ-εργαλεία και πολλαπλούς άξονες περιστροφής και κίνησης θα είναι ικανές να κάνουν οποιαδήποτε κατεργασία κοπής, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο κατεργασίας. Ειδικά για τα εργαλεία κοπής, αυτά αναμένεται να «προσαρμόζονται» στο είδος της κατεργασίας και στις συνθήκες κοπής, παρέχοντας την μέγιστη δυνατή ταχύτητα κοπής, διάρκεια ζωής, ακρίβεια κοπής και όλα αυτά με χαμηλό λειτουργικό κόστος. Τέλος, οι συνθήκες κοπής στις κατεργασίες αποβολής υλικού οφείλουν να στοχεύουν στην υψηλή παραγωγικότητα με την επιθυμητή ακρίβεια, το μικρό κόστος και χρόνο κατεργασίας. Επειδή η υψηλή ταχύτητα συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας που αποτελεί το κυριότερο πρόβλημα φθοράς για το εργαλείο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε μέσω της προσομοίωσης πού και πώς αυτή αναπτύσσεται ώστε με επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κοπής να διαχέεται καλύτερα η θερμότητα, να μειωθεί η θερμοκρασία και με αυτόν τον τρόπο να βελτιστοποιηθεί η κατεργασία. Έτσι οι κατεργασίες κοπής με υψηλή ταχύτητα έχουν ήδη διεισδύσει στην (μεταλλουργική κυρίως) βιομηχανία και χάριν των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν και του ρυθμού βελτιστοποιήσεως που παρουσιάζουν αναμένεται σύντομα να θεωρείται περιττός ο όρος «υψηλή ταχύτητα».

6 Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελείται από τρία βασικά κεφάλαια. Μετά από σύντομη παράθεση του στόχου της εργασίας, ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο όπου γίνεται ανάλυση των κατεργασιών κοπής, των δυνάμεων που ασκούνται και των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της. Επίσης γίνεται αναφορά σε κοπτικά εργαλεία, τα υλικά κατασκευής και το χρόνο φθοράς και ζωής τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα πλεονεκτήματα των κατεργασιών υψηλής ταχύτητας. Ακόμη εξετάζονται τα είδη κατεργασίας (υγρή – ξηρή, με ή χωρίς υγρό κοπής), τα απόβλητα που προκύπτουν καθώς και η διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Προχωρώντας στο τέταρτο κεφάλαιο συναντάμε μια συνοπτική παρουσίαση της υπολογιστικής προσομοίωσης με Advant Edge, τη μοντελοποίηση των κατεργασιών και μια συνοπτική αναφορά στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας όπως αυτά προκύπτουν από τα υπό μελέτη στοιχεία.

Βιβλιογραφία

1. Αθανασίου Γ. Μάμαλη, "Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά", Φοίβος, Αθήνα 1996
2. Λαζάρου Ε. Λαζαρίδη, "Μηχανουργική Τεχνολογία", Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997
3. Πέτρος Γ. Πετρόπουλος, "Μηχανουργική Τεχνολογία-Τεχνολογία κατεργασιών κοπής των μετάλλων", τόμος ΙΙ-1 Εκδόσεις Ζήση-Θεσσαλονίκη 1998
4. Πέτρου Γ. Πετροπούλου, "Μηχανουργική Τεχνολογία", Ίδρυμα Ευγενίδου, 1998
5. ΑΘΑΝ.Γ.ΜΑΜΑΛΗ : Κατεργασίες των υλικών ΙΙ, Αθήνα 1999
6. Ε.ΦΤΙΚΟΣ : Επιστήμη και τεχνική των κεραμικών, 2003
7. Αγγέλου Μαρκοπούλου, "Κατεργασίες Αποβολής Υλικού Λίαν Υψηλής Ακριβείας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006
8. Bert P. Erdel, "High-Speed Machining", Society of Manufacturing Engineers, 2003
9. Μηχανουργική Τεχνολογία ΙΙ Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων Τόμος ΙΙ - Ι (κατεργασίες κοπής) , Τ.Ε.Ε 1^{ος} Κύκλος – Β Τάξη Ο.Ε.Β.Δ ΑΘΗΝΑ 2000
10. V.D. Calatoru, M. Balazinski, J.R.R. Mayer, H. Paris, G.L'Esperance, "Diffusion wear mechanism during high-speed machining of 7475-T7351 aluminum alloy with carbide end mills", Journal of Wear, Elsevier, 2007, pages 1793-1800
11. J. Paulo Davim, "Machining: Fundamentals and Recent Advances", Springer, Αθήνα 2008
12. Li Qian, Mohammad Robiul Hossan, "Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts", Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 2007, pages 274-278
13. C.E. Campbell, L.A. Bendersky, W.J. Boenttinger, R. Ivester, "Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining", Journal of Materials Science & Engineering, Elsevier, 2006, pages 15-26

14. T.H.C. Childs, "Numerical experiments on the influence of material and other variables on plane strain continuous chip formation in metal machining", *International Journal of Mechanical Science*, Elsevier, 2005, pages 307-322
15. T.H.C. Childs, "Friction modeling in metal cutting", *Journal of Wear*, Elsevier, 2004, pages 310-318
16. A.K. Balaji, R. Ghosh, X.D. Fang, R. Stevenson, I.S. Jawahir, "Performance-Based Predictive Models and Optimization Methods for Turning Operations and Applications: Assessment of Chip Forms/Chip Breakability", *Journal of Manufacturing Processes*, 2006, pages 144-158
17. M. Nouari, A. Molinari, "Experimental verification of a diffusion tool wear model using a 42CrMo4 steel with an uncoated cemented tungsten carbide at various cutting speeds", *Journal of Wear*, Elsevier, 2004, pages 1151-1159
18. G. List, M. Nouari, D. Gehin, S. Gomez, J.P. Manaud, Y. Le Petitcorps, F. Girod, "Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminum alloy", *Journal of Wear*, Elsevier, 2004, pages 1177-1189
19. W. Grzesik, M. Bartoszek, P. Nieslony, "Finite element modeling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools", *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, 2005, pages 1204-1211
20. T.D. Marusich, M. Ortiz, "Modelling and Simulation of High-Speed Machining", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*
21. T.D. Marusich, E. Askari, "Modeling Residual Stress and Workpiece Quality in Machined Surfaces", *Journal at Third Wave Systems*
22. Troy D. Marurich, Jeffrey D. Thiele, Christopher J. Brand, "Simulation and Analysis of Chip Breakage in Turning Processes", *Journal at Third Wave Systems*, 2001
23. Wassila Bouzid, "Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning", *Journal of Materials Processing Technology* 161 (2005) 388-395
24. D. Dudzinski, A. Molinari, H. Schulz, "Metal cutting and high speed machining", Kluwer Academic-Plenum Publishers, New York (2002)
25. Milton C. Shaw, "Metal cutting principles" Oxford science publications, 1968. E. M. Trent, P. K. Wright, "Metal Cutting", Butterworth-Heinemann
26. R.S. Pawade, Suhas S. Joshi, P.K. Brahmkar, M. Rahmanc, "An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007) 139-146
27. G. Sutter, A. Molinari, "Analysis of the Cutting Force Components and Friction in High Speed Machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 127, May 2005
28. Dr. Sinan Badrawy, "Cutting Dynamics of High Speed Machining", *WolfTracks* Vol. 8, Issue 1 – 2001
29. H.K. Tonshoff, T. Friemuth, P. Andrae, C. Lapp, "High-speed cutting fundamentals and machine tool development", University of Hannover