

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	3
1.2 Στόχοι της εργασίας	3
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	4
2.1 Τόρνευση	4
2.2 Γεωμετρία κοπής	8
2.3 Φθορά κοπτικού εργαλείου	10
2.4 Διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων	16
2.5 Μέθοδοι έλεγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων	17
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΑΚΑΣΙΑ	19
3.1 Εργαλειομηχανή	19
3.2 Υλικά πειράματος	21
3.3 Οπτικό στερεομικροσκόπιο	24
3.4 Προγραμματισμός πειραμάτων	25
3.5 Εκτέλεση Πειραμάτων	26
4.Ανάλυση αποτελεσμάτων	41
5. ΣΥΝΟΨΗ	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	45

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη των συνθηκών κοπής με σκοπό την ελαχιστοποίηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας καθώς το 3%-12% του συνολικού κόστους παραγωγής των βιομηχανικών προϊόντων άφορα το κόστος των κοπτικών εργαλείων. Ταυτόχρονα το 20% του μη παραγωγικού χρόνου των εργαλειομηχανών έχει να κάνει με την αστοχία των κοπτικών εργαλείων. Έτσι, η διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κοπής στην ανάπτυξη φθοράς στα κοπτικά εργαλεία, είναι αναγκαία για την ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου παραγωγής με τη βέλτιστη παραγωγικότητα και διάρκεια ζωής των εργαλείων.

Η φθορά των κοπτικών εργαλείων επηρεάζει δραματικά τη διάρκεια ζωής τους όταν κατά τη κατεργασία δεν επικρατούν οι κατάλληλες συνθήκες κοπής. Βασικό κριτήριο αστοχίας των κοπτικών εργαλείων αποτελεί το πλάτος ζώνης φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια, αφού όταν ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή το εργαλείο κρίνεται ακατάλληλο για περαιτέρω χρήση και αποσύρεται.

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιούνται πειράματα φθοράς καρβιδίων βολφραμίου-κοβαλτίου κατά τη τόννευση κράματος αλουμινίου Al 7075. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διαφορές ταχύτητες κοπής υπό σταθερή πρόωση, βάθος κοπής και χρόνο κατεργασίας, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της ταχύτητας κοπής στην ανάπτυξη του πλάτους ζώνης φθοράς στην επιφάνεια ελευθερίας.

Η φθορά για κάθε κοπτικό εργαλείο μετρήθηκε μέσω στερεομικροσκοπίου και από τα αποτελέσματα δημιουργήθηκε διάγραμμα για την ανάπτυξη του πλάτους ζώνης φθοράς καθώς η ταχύτητα αυξάνεται. Στόχος η επιβεβαίωση προτύπων πειραμάτων που συμπεραίνουν ότι το πλάτος ζώνης φθοράς δε μεταβάλλεται γραμμικά κατά την αύξηση της ταχυτητας λόγω των μηχανισμών φθοράς που ενεργοποιούνται κάθε φορά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

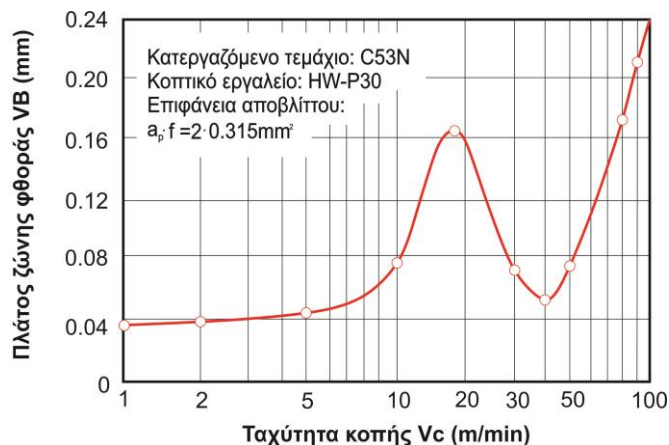
1.1 Αντικείμενο εργασίας

Ένα από τα βασικότερα κριτήρια αστοχίας των κοπτικών εργαλείων, στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, είναι η τιμή του πλάτους ζώνης φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια ή του βάθους κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίπτου ή και συνδυασμός των δυο. Ξεπερνώντας την ανώτερη επιτρεπτή τιμή το πλακίδιο κρίνεται ακατάλληλο για περαιτέρω χρήση και αποσύρεται. Γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση των συνθηκών που επικρατούν κατά τη κατεργασία έτσι ώστε το κοπτικό εργαλείο να έχει τη μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής σε συνδυασμό με υψηλή παραγωγικότητα. Καθοριστικοί παράγοντες της ανάπτυξης φθοράς αποτελούν η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής και η γεωμετρία του πλακιδίου. Έτσι οι έρευνες πάνω στη φθορά των κοπτικών εργαλείων αναζητούν τον βέλτιστο συνδυασμό τους ανάλογα με τη κατεργασία και το υλικό κοπτικού εργαλείου, κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιούνται πειράματα φθοράς κοπτικού πλακιδίου κατά τη τόννευση κράματος αλουμινίου Al 7075. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα είναι καρβίδια βολφραμίου-κοβαλτίου χωρίς επικάλυψη και κατεργάστηκαν το υλικό υπό σταθερή ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής, χρόνο κατεργασίας και με χρήση λιπαντικού υγρού ώστε να μελετηθεί η ανάπτυξη του πλάτους ζώνης φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας για διαφορές ταχύτητες κοπής. Μετά το πέρας των πειραμάτων μέσω οπτικού στερεομικροσκοπίου εξετάστηκε η τιμή του πλάτους ζώνης φθοράς κάθε πλακιδίου με σκοπό την εξαγωγή διαγράμματος ανάπτυξης φθοράς σε σχέση με τη ταχύτητα κοπής.

1.2 Στόχοι εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι η επιβεβαίωση, μέσω του διαγράμματος που θα προκύψει, προτύπων πειραμάτων πάνω στη τόννευση ποικίλων υλικών (χαλύβων, σιδηρούχων υλικών και άλλων κραμάτων). Που όσον αφορά τη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας δείχνουν ότι στις χαμηλές ταχύτητες, λόγω των φαινομένων της ψευδόκοψης και των αποξέσεων από την έντονη τριβή, είναι αρκετά μεγάλη σε αντίθεση με τη φθορά από ταχύτητες σχετικά υψηλότερες (σχήμα 1.1). Αφού σε αυτές σταδιακά απαλείφονται τα φαινόμενα των συναφειακών μικροσυγκολλήσεων και των αποξέσεων με τη φθορά να μειώνετε ως ένα σημείο. Με το σημείο αυτό να χαρακτηρίζεται ως βέλτιστο για τις συγκεκριμένες συνθήκες αφού το κοπτικό αναπτύσσει το ελάχιστο δυνατό πλάτος ζώνης φθοράς με σχετικά ικανοποιητικό βαθμό αφαίρεσης υλικού. Από το σημείο αυτό και έπειτα το πλάτος ζώνης φθοράς αυξάνεται ραγδαία, μέχρι την αστοχία του λόγω της διάχυσης στερεάς κατάστασης, της οξείδωσης αλλά και τις έντονες καταπονήσεις.



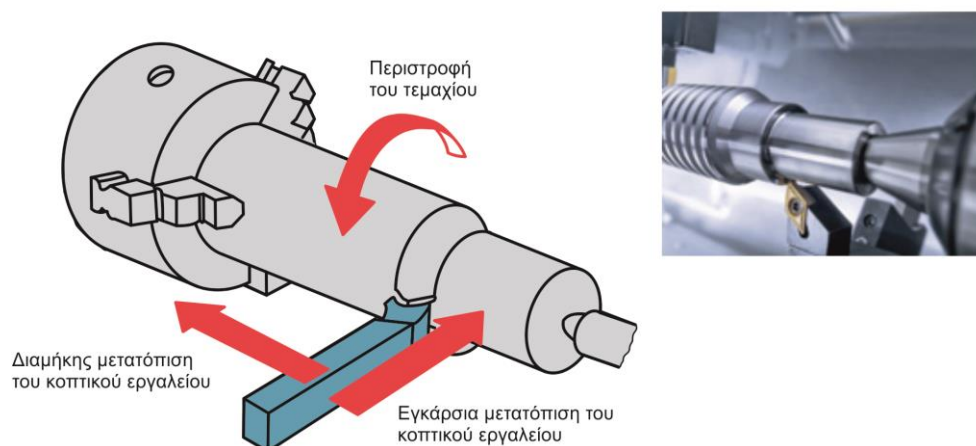
Σχήμα 1.1: Πρότυπο πείραμα

2. Στάθμη γνώσεων

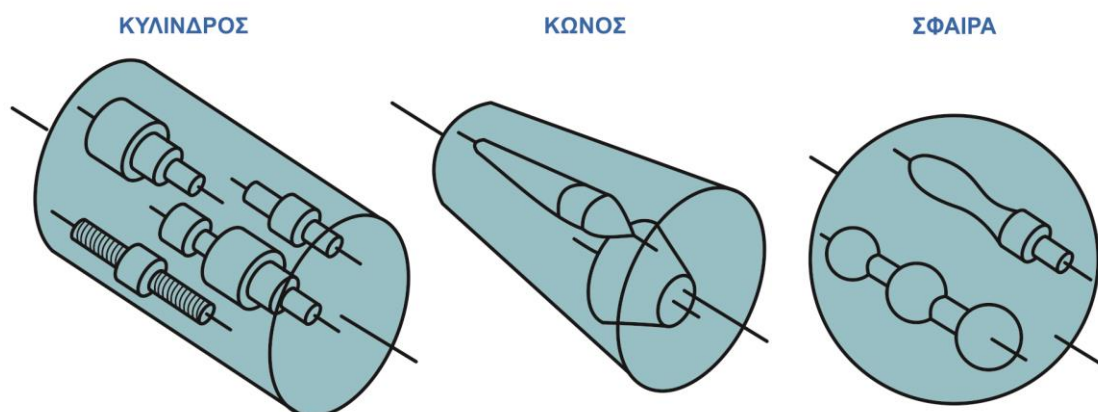
2.1 Τόρνευση

Κατά τη τόρνευση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, ο σφιγκτήρας που συγκρατεί το δοκίμιο πραγματοποιεί περιστροφική κίνηση η οποία αποτελεί τη πρωτεύουσα κίνηση της συγκεκριμένης κατεργασίας, ενώ το εργαλείο εκτελεί τη κίνηση πρόωσης μέσω της εγκάρσιας και διαμήκης κίνησης του. Είναι προφανές λοιπόν ότι με τη τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια κατά κανόνα συμμετρικά εκ περιστροφής όπως τις γεωμετρίες που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2.

Ως κινηματική της κοπής ορίζονται λοιπόν οι κινήσεις που κάνουν το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι δυνατές κινήσεις διακρίνονται στη πρωτεύουσα κίνηση και τη κίνηση προώσεως με το συνδυασμός τους να είναι απαραίτητος για τη μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού. Η κύρια κίνηση κοπής είναι η αύτη της περιστροφής του εργαλείου, επιδρά στην ισχύ που απαιτείται για τη κατεργασία και απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της. Για να πραγματοποιείται συνεχώς η κοπή απαιτείται ο συνδυασμός της με τη κίνηση προώσεως που δίνει τη δυνατότητα συνεχούς επαφής τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου. Οι παραπάνω κινήσεις ορίζουν τις συνθήκες κοπής και επιδρούν σημαντικά στη κατεργαζόμενη επιφάνεια και τη μορφή του αποβλήτου.



Σχήμα 2.1: Κινηματική της τόρνευσης- Στιγμιότυπο από κατεργασία τόρνευσης



Σχήμα 2.2: Γεωμετρίες που διαμορφώνονται κατά τη τόρνευση

Οι βασικές συνθήκες κοπής κατά τη τόννευση είναι :

- Η **ταχύτητα κοπής** v_c που εκφράζει το ρυθμό κοπής στη κύρια κίνηση, που είναι η περιστροφή του τεμαχίου και υπολογίζεται ως το πηλίκο του διαστήματος που διανύεται δια τον χρόνο, από τον παρακάτω τύπο:

$$V_c = \frac{(\pi \times D \times n)}{1000} \quad (2.1)$$

όπου $\pi=3.14$, D η διάμετρος του τεμαχίου [mm] και n [rpm] οι στροφές της ατράκτου ανά λεπτό. Ο παρονομαστής 1000 εισάγεται για την αναγωγή των χιλιοστών που μετρείται η διάμετρος του τεμαχίου σε μέτρα οπότε η ταχύτητα εκφράζεται σε m/min. Η ταχύτητα κοπής αποτελεί ένα πολύ βασικό μέγεθος αφού καθορίζει τη παραγωγικότητα της κοπής, τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και θερμοκρασίες και κατ' επέκταση την ενδεχόμενη φθορά του κοπτικού εργαλείου μετά το τέλος της κοπής. Είναι λοιπόν σημαντικό να υπολογίζεται ακριβώς βάση του παραπάνω τύπου ανάλογα με τα υλικά τεμαχίου, κοπτικού και το είδος της κατεργασίας.

Μελέτες πάνω στη φθορά των κοπτικών εργαλείων δίνουν μεγάλη σημασία στο ποια είναι η βέλτιστη ταχύτητα για κάθε κατεργασία αφού επηρεάζει κατά πολύ την ανάπτυξη φθοράς στο κοπτικό εργαλείο. Στις χαμηλές ταχύτητες κοπής λόγω μηχανισμών, που θα αναλυθούν σε άλλο κεφάλαιο, υπάρχει χαμηλή παραγωγικότητα αλλά και μεγάλο πλάτος ζώνης φθοράς. Στις αρκετά υψηλές λόγω των υψηλών θερμοκρασιών αυξάνονται κατά πολύ οι καταπονήσεις που ασκούνται στο κοπτικό με αποτέλεσμα τη ραγδαία ανάπτυξη της φθοράς κατά τη κατεργασία παρά την υψηλή παραγωγικότητα

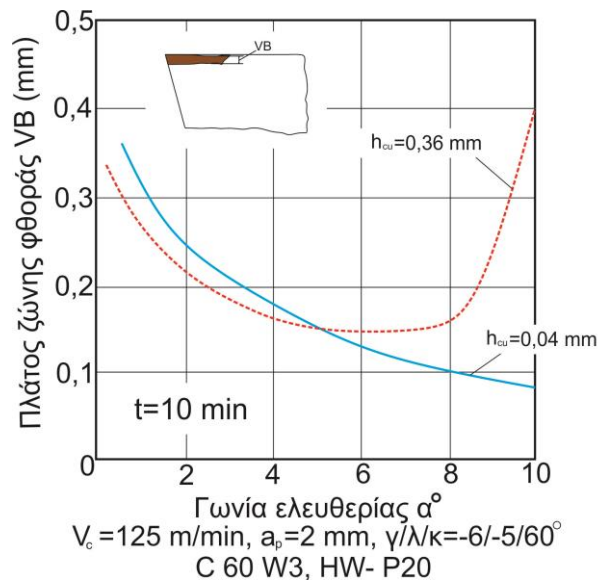
- Η **πρόωση** f_{min} , η οποία είναι η ταχύτητα κίνησης του κοπτικού εργαλείου, εγκάρσια ή διαμήκης προς το περιστρεφόμενο τεμάχιο, εκφράζεται σε χιλιοστά ανά λεπτό [mm/min] ή σε χιλιοστά ανά περιστροφή του τεμαχίου [mm/rev] με την εξίσωση 2.2 να περιγράφει τη μεταξύ τους σχέση.

$$f_{min} = f \cdot n \quad (2.2)$$

όπου n οι στροφές της ατράκτου.

Η πρόωση είναι εξίσου σημαντική παράμετρος όπως η ταχύτητα κοπής και πρέπει να επιλέγεται βάση των συνεργαζόμενων υλικών αλλά και των άλλων συνθηκών κοπής. Έρευνες πάνω στη βελτιστοποίηση της κατεργασιμότητας χαλύβων, σιδηρούχων υλικών και άλλων κραμάτων (όπως αλουμινίου, τιτανίου, νικελίου) επιβεβαιώνουν τη σημασία της πρόωσης σε συνδυασμό με τη ταχύτητα κοπής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αλληλεπίδραση τους πάνω στη κατεργασία αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τις δυνάμεις κοπής, τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, τη φθορά, τη διάρκεια ζωής του κοπτικού αλλά και τη τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας [6][7][8]. Τέλος η πρόωση είναι ένα μέγεθος καθοριστικό για το πάχος του αποβλίπτου αφού αυτό υπολογίζεται ως το γινόμενο της πρόωσης για μια περιστροφή με το ημίτονο της γωνίας τοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου (εξίσωση 2.3). Έρευνες πάνω στην ανάπτυξη φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια δείχνουν τη σημασία του πάχους αποβλίπτου στην ανάπτυξη της καθώς μερική αύξηση του μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση του πλάτους της φθοράς όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3[2].

$$h_{cu} = f \cdot \sin \alpha \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.3: Επίδραση γωνίας ελευθερίας και πάχους αποβλίπτου επί της φθοράς τη ελεύθερης επιφάνειας

Το **βάθος κοπής** (a_p) που καθορίζει το βάθος αφαίρεσης υλικού από το τεμάχιο και πιο συγκεκριμένα στη τórνευση, αφού η κατεργασία γίνεται εκ περιστροφής του τεμαχίου, καθορίζει το ακτινικό βάθος. Έχει καθοριστικό ρολό στη παραγωγικότητα της κατεργασίας δηλαδή στη διάρκεια της σε σχέση με τον συνολικό όγκο αποβλίπτου. Ένας διπλασιασμός του βάθους κοπής θα μείωνε στο μισό το χρόνο κοπής για τον ίδιο όγκο αποβλίπτου όμως λόγω αύξησης της ακτινικής δύναμης θα δημιουργούσε αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις με αρνητικές συνέπειες ως προς τη κατεργασμένη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο. Τέλος η επιλογή του γίνεται βάση του είδους του κοπτικού, της γεωμετρίας του, του κατεργαζόμενου υλικού και του είδους της κατεργασίας. Ενδεικτικά στη διεθνή έρευνα, όσον αφορά τον συνδυασμό των τριών προαναφερθέντων συνθηκών για καλύτερη τελική επιφάνεια και την ελάχιστη δυνατή φθορά προτείνονται σχετικά υψηλές ταχύτητες κοπής, χαμηλές ταχύτητες πρόωσης και μικρό βάθος κοπής [6].

- Ο **χρόνος κοπής** που δίνεται από το πηλίκο του μήκους (L) κατεργασίας προς τη πρόωση είτε ανά λεπτό είτε ανά περιστροφή.

$$t = \frac{L}{f_{min}} = \frac{L}{f \cdot n} \quad (2.4)$$

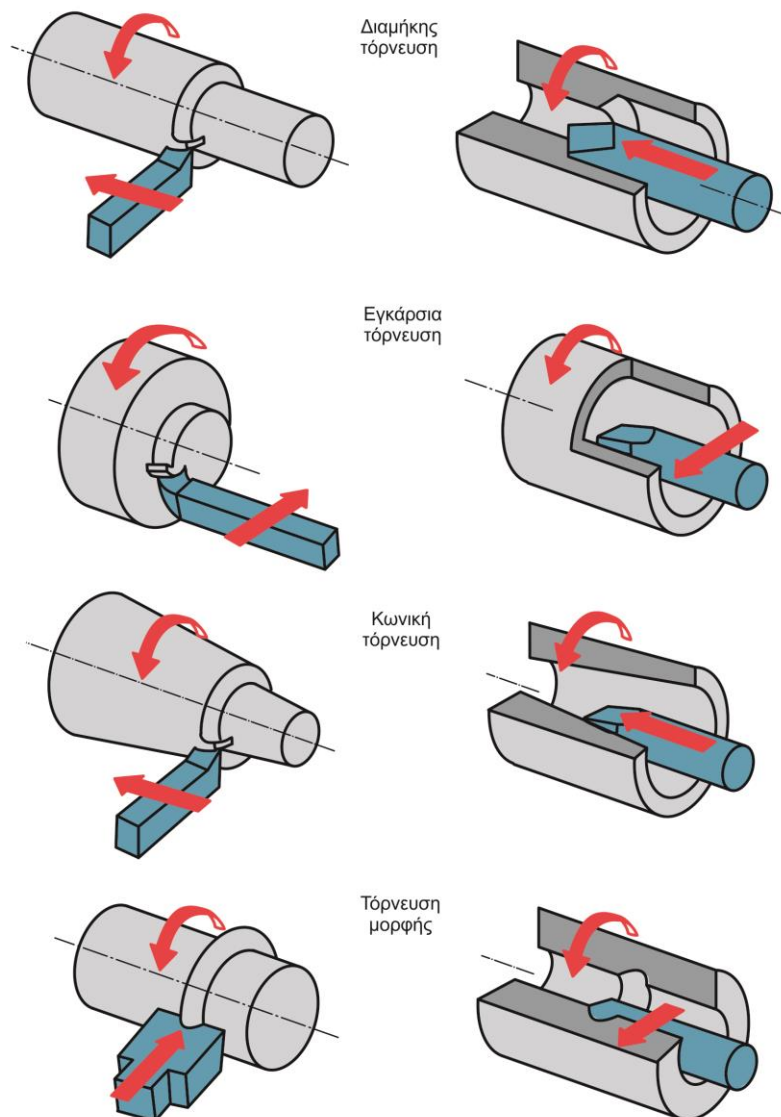
- Και ο **ρυθμός αφαίρεσης υλικού** που προκύπτει από το γινόμενο της ταχύτητας κοπής με το βάθος κοπής και της πρόωσης και υπολογίζει τον αφαιρούμενο όγκο ανά λεπτό κατεργασίας.

$$MRR = V_c \cdot f \cdot a_p \cdot 1000 \quad (2.5)$$

Γενικά οι κατεργασίες τórνευσης διακρίνονται στις εσωτερικές και στις εξωτερικές συμφώνα με το ποια επιφάνεια του τεμαχίου κατεργάζεται το εργαλείο, όσον αφορά τη κίνηση του διακρίνονται η διαμήκης, εγκάρσια, κωνική τórνευση και τórνευση μορφής όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Είναι προφανές ότι για κάθε είδος τórνευσης είναι απαραίτητη η επιλογή του ιδανικού κοπτικού, με τη κατάλληλη γεωμετρία ώστε να επιτευχτεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Επίσης κάποιες ακόμα ειδικές μορφές τórνευσης που πραγματοποιούνται με τα κατάλληλα κοπτικά παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω:

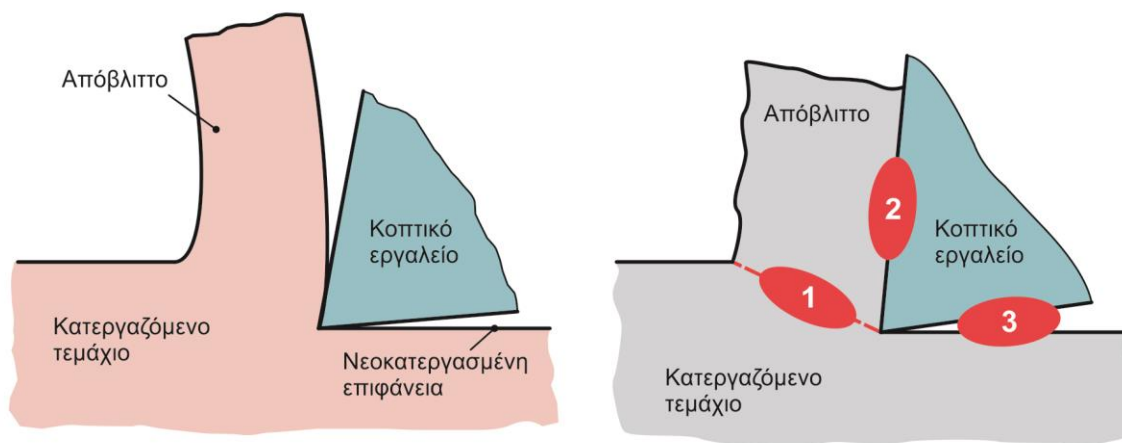
- **Διάτρηση** κατά την οποία ακίνητο τρυπάνι πλησιάζει με αρκετά χαμηλή πρόωση το περιστρεφόμενο τεμάχιο για τη διάνοιξη οπών, σε απλούς τórνους μόνο στην οριζόντια διεύθυνση.
- **Απότμηση** δηλαδή αποκοπή του έτοιμου τεμαχίου από το υπόλοιπο μέσω ειδικού κοπτικού με δυνατότητα κοπής κυρίως στον κάθετο άξονα (εγκάρσια κίνηση)
- **Σπειρωτόμηση** με κοπτικά κατάλληλα για τη δημιουργία εσωτερικού ή εξωτερικού σπειρώματος
- **Τórνευση ρίκνωσης** που χρησιμοποιείται για δημιουργία μη λειών επιφανειών για αποφυγή ολίσθησης για παράδειγμα σε λαβή εργαλείου.



Σχήμα 2.4: Είδη εσωτερικής και εξωτερικής τórνευσης

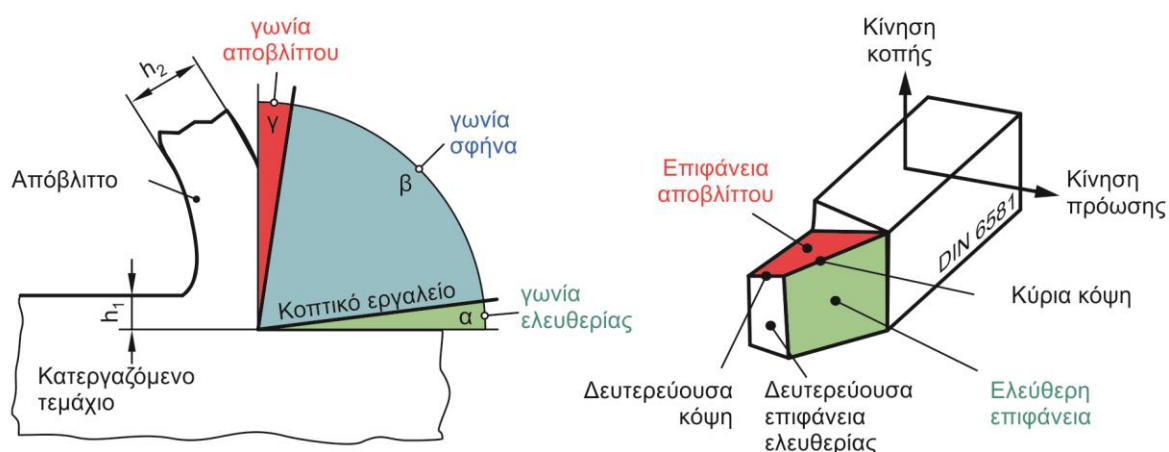
2.2 Γεωμετρία κοπής

Για την ευκολότερη μελέτη των φαινομένων που δημιουργούνται κατά τη μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού η κοπή προσεγγίζεται απλουστευμένα ως ορθογωνική κοπή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5 το κοπτικό έχει σφηνοειδή μορφή και είναι κάθετο στη διεύθυνση της κοπής. Με την αφαίρεση υλικού να οφείλεται στη σχετική κίνηση σφήνας και τεμαχίου. Τα αποτελέσματα της κοπής όπως η δημιουργία αποβλήτου και η νέο κατεργασμένη επιφάνεια παρουσιάζονται επίσης στο σχήμα 2.5 μαζί με τις χαρακτηριστικές περιοχές ενδιαφέροντος.



Σχήμα 2.5: Απλοποιημένη έκφραση της κοπής και χαρακτηριστικές περιοχές ενδιαφέροντος

Οι περιοχές διακρίνονται σε αυτή μεταξύ παραμορφωμένου και απαραμόρφωτου υλικού (ζώνη 1), αυτή μεταξύ αποβλήτου και κοπτικού εργαλείου (ζώνη 2) και τέλος στη περιοχή της κατεργαζόμενης επιφάνειας (ζώνη 3). Κάθε μια από τις χαρακτηριστικές περιοχές παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των διαφορετικών φαινομένων που πραγματοποιούνται στη κάθε μια, με τη ζώνη 1 να παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς τα χαρακτηριστικά της πλαστικής παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού, τη δεύτερη ως προς τη τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ κοπτικού και τεμαχίου με αποτέλεσμα τη σταδιακή φθορά του κοπτικού και στη τελευταία ζώνη τα ποιότητα χαρακτηριστικά στη κατεργασμένη επιφάνειας.



Σχήμα 2.6: Γεωμετρία κοπτικής σφήνας

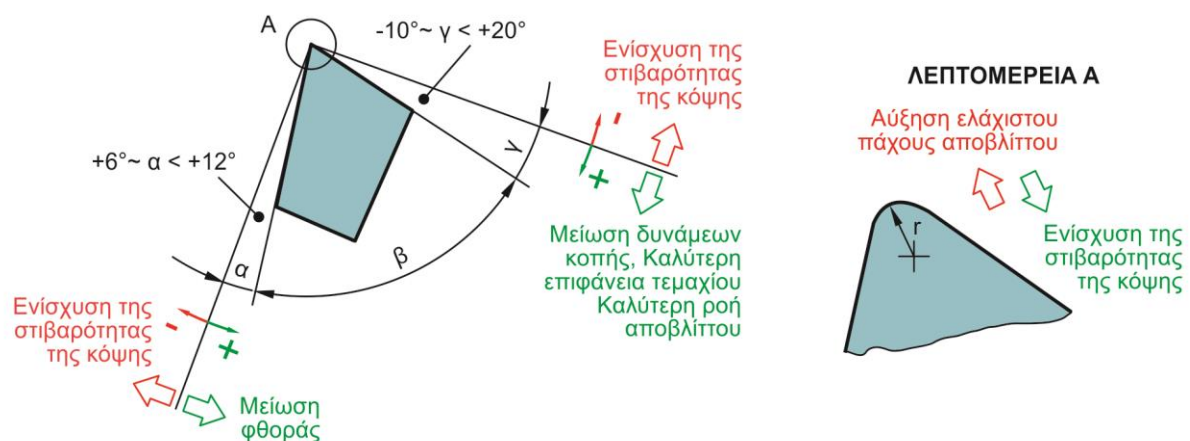
Είναι προφανές ότι η γεωμετρία της κοπτικής σφήνας έχει καθοριστικό ρολό στα φαινόμενα που προαναφέρθηκαν πάνω στις χαρακτηριστικές περιοχές και πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά πάντα σε σχέση με το είδος της κατεργασίας (εκχονδριση, φινίρισμα) και τις ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η γεωμετρία της κοπτικής σφήνας και οι κύριες επιφάνειες της, με εκείνη που ρέει το απόβλιττο να ονομάζεται επιφάνεια αποβλίττου και

εκείνη προς τη νεοκατεργασμένη επιφάνεια να ονομάζεται επιφάνεια ελευθερίας. Όσον αφορά της γωνίες της σφήνας είναι η γωνία ελευθερίας (γωνία α) που σχηματίζεται μεταξύ επιφάνειας ελευθερίας και νέο κατεργαζόμενης επιφάνειας έπειτα είναι η γωνία σφήνας (γωνία β) μεταξύ των κυριών επιφανειών (ελευθερίας και αποβλίπτου) και τέλος η γωνία αποβλίπτου (γωνία γ) μεταξύ επιφάνειας αποβλίπτου και τη κάθετο στη κατεύθυνση της κοπής. Όπως είναι εμφανές και στο σχήμα οι γωνίες της κοπής έχουν αλληλεπίδραση μεταξύ τους και συνδέονται με τη παρακάτω σχέση:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (2.5)$$

Εξαιτίας λοιπόν της αλληλεπίδρασης αυτής οι γωνίες πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά και συμφώνα με το είδος της εκάστοτε κατεργασίας και του, προς μορφοποίηση υλικού. Ενδεικτικό παράδειγμα από τη βιβλιογραφία είναι ότι όσο πιο μαλακό το υλικό τόσο μειώνεται η γωνία σφήνας με την αντίστοιχη αύξηση των άλλων δυο γωνιών[5]. Γενικότερα ο κάθε συνδυασμός των τριών γωνιών της σφήνας προσδίδει διαφορετικά χαρακτηριστικά στη κόψη, επηρεάζει τη δημιουργία αποβλίπτου και την ανάπτυξη φθοράς

Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές των γωνιών κοπής οι συνακόλουθες επιπτώσεις τους στη κατεργασία αλλά και ένα ακόμα μέγεθος που χαρακτηρίζει τη κοπή, η **καμπυλότητα της κόψης (R)** όπως ενδεικτικά φαίνεται στη λεπτομέρεια Α.



Σχήμα 2.7: Ενδεικτικές τιμές για τις γωνίες κοπής και επίδραση τους στη κατεργασία

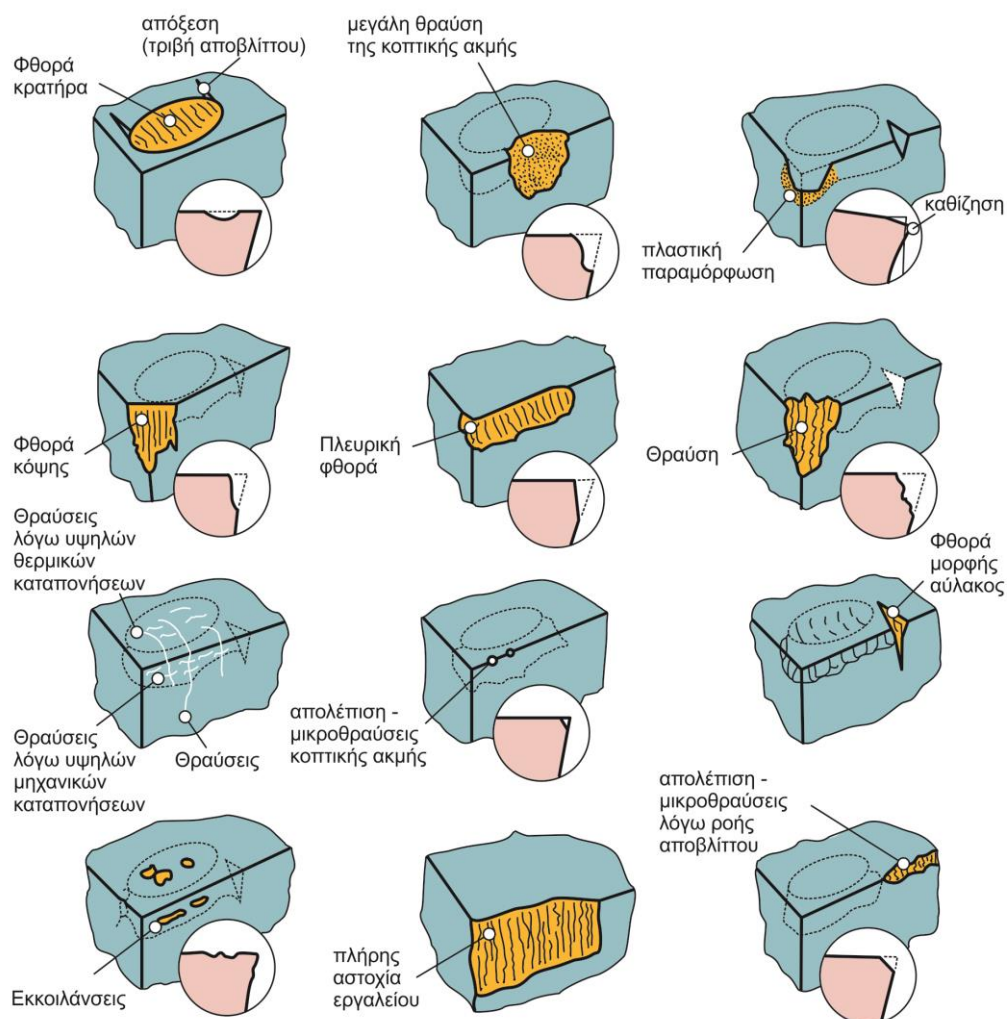
Η καμπυλότητα της κόψης είναι ένα σημαντικό μέγεθος καθώς επηρεάζει το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου και τη στιβαρότητα της κόψης, έτσι όσο η καμπυλότητα μεγαλώνει το ελάχιστο πάχος αποβλίπτου μειώνεται και το κοπτικό έχει πιο στιβαρή κόψη αφού η μεγάλη καμπυλότητα προσφέρει αντοχή στο σημείο ένωσης της κυρίας και δευτερεύουσας κοπτικής ακμής με σχετική αύξηση της διάρκειας ζωής του κοπτικού. Όταν όμως κοπτικά με υψηλές τιμές καμπυλότητας κατεργάζονται λεπτά τεμάχια με περιορισμένη στιβαρότητα λόγω αύξησης της ακτινικής δύναμης κοπής παρουσιάζονται αυτοδιεγειρόμενες ταλαντώσεις με αρνητικές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής του αλλά και κακή ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Όπως και οι βασικές γωνίες της κόψης πρέπει να επιλέγονται βάση των συνθηκών κάθε κατεργασίας έτσι και η καμπυλότητα πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με το επιλεγμένο βάθος κοπής και τη ταχύτητα πρόωσης.

Στη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων υπάρχουν και άλλες εξίσου σημαντικές γωνίες όπως η γωνία μεταξύ της κόψης και της κατεύθυνσης της πρόωσης που ονομάζεται γωνία τοποθέτησης

(γωνία κ), σε μεγάλες γωνίες τοποθέτησης η κατανομή της φόρτισης γίνεται σε μικρότερη περιοχή του εργαλείου με συνέπεια τη μείωση του χρόνου ζωής του. Η γωνία μεταξύ των κόψεων του κοπτικού ονομάζεται γωνία αιχμής (γωνία ε) και σε μικρές τιμές της τα κοπτικά κατά τη κατεργασία γίνονται γρήγορα αιχμηρά [5]. Τέλος είναι η γωνία που προσδιορίζει τη θέση της κυρίας κόψης ως προς την οριζόντια θέση και ονομάζεται γωνία κλίσης (γωνία λ).

2.3 Φθορά κοπτικού εργαλείου

Κατά τη μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο, έρχονται σε επαφή και με τη σχετική κίνησή τους δημιουργούνται υψηλές θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις. Ανάλογα με τους παράγοντες (ταχύτητα κοπής, γεωμετρία κοπτικού εργαλείου) της κάθε κοπής φθείρεται προοδευτικά το κοπτικό εργαλείο μέχρι τη τελική αστοχία του. Οι καταπονήσεις παρατηρούνται στη ζώνη διάτμησης, στη ζώνη τριβής εργαλείου - αποβλίπτου αλλά και στη ζώνη τριβής της ελεύθερης επιφάνειας με τη κατεργασμένη επιφάνεια. Οι τρεις αυτές ζώνες αποτελούν πηγές απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας με το μεγαλύτερο ποσοστό να εκλύεται από το απόβλιπτο μακριά από τη περιοχή της κοπής. Έτσι κατά τη κατεργασία με αφαίρεση υλικού σύμφωνα και με τους παράγοντες που επικρατούν κάθε φορά ενεργοποιούνται διάφοροι μηχανισμοί φθοράς με αποτέλεσμα τη προοδευτική απομάκρυνση υλικού του κοπτικού εργαλείου.



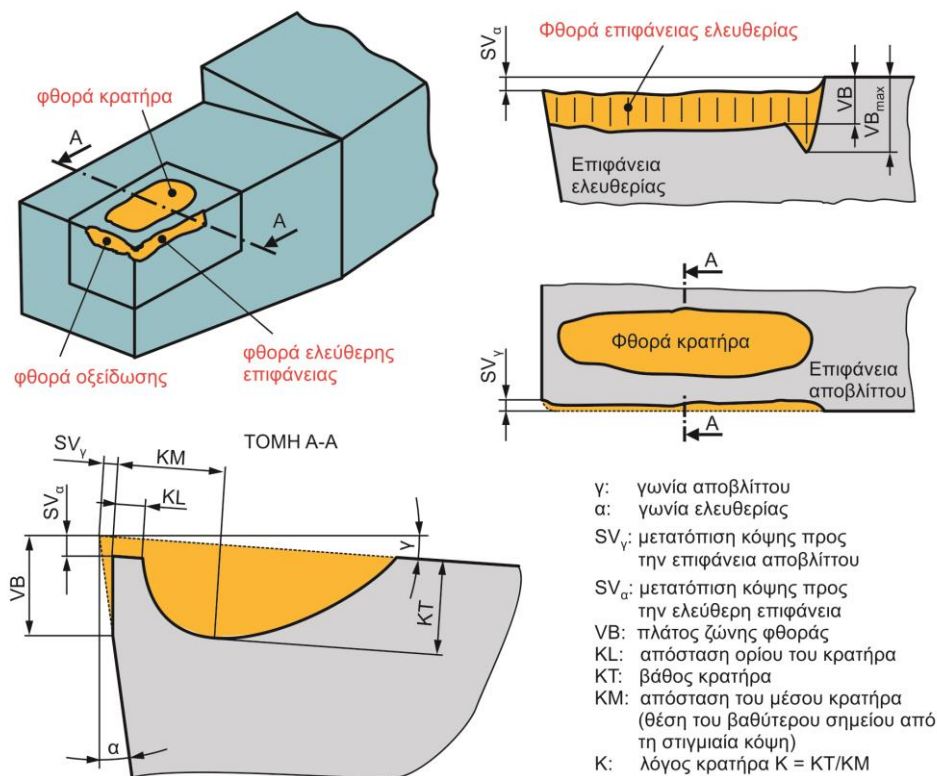
Σχήμα 2.8: Αντιπροσωπευτικοί τύποι αστοχίας κοπτικών εργαλείων

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζονται ορισμένοι τύποι αστοχίας κοπτικών εργαλείων που παρατηρούνται, είτε στην επιφάνεια αποβλίπτου είτε στην επιφάνεια ελευθερίας, ακόμα και στην ακμή τους εξαιτίας διάφορων αίτιων που έχουν να κάνουν με το είδος της κατεργασίας, τη γεωμετρία του κοπτικού που χρησιμοποιήθηκε, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες έγινε η κοπή αλλά και με το συνδυασμό υλικών κοπτικού και τεμαχίου.

Οι σημαντικότερες μορφές φθοράς των κοπτικών εργαλείων επιγραμματικά είναι οι εξής:

- φθορά της ελεύθερης επιφάνειας,
- φθορά κρατήρα της επιφάνειας αποβλίπτου,
- απολέπιση της κόψης,
- μικροθραύσεις, ρωγμές της ακμής,
- πλαστική παραμόρφωση της ακμής,
- θραύση της ακμής.

Οι δυο πρώτες μορφές είναι αναπόφευκτες σε κάθε κατεργασία αφαίρεσης υλικού και αποτελούν έναν από τους κύριους παράγοντες απόσυρσης των κοπτικών εργαλείων. Η φθορά ελεύθερης επιφάνειας προκύπτει από τη τριβή της με το τεμάχιο και την ενεργοποίηση διαφόρων μηχανισμών φθοράς που θα αναλυθούν παρακάτω. Η περιοχή που αναπτύσσεται η φθορά καλείται ζώνη φθοράς και στη περίπτωση που είναι ομοιόμορφη χαρακτηρίζεται από το μέσο πλάτος φθοράς VB , το μέγιστο πλάτος φθοράς VB_{max} και από το πλάτος φθοράς στην άκρη της κύριας κόψης VB_N το οποίο δημιουργείται συνήθως εξαιτίας της οξειδωσης, όπως και το αντίστοιχο της πλαγίας κόψης[2]. Στη περίπτωση που δεν είναι ομοιόμορφη η ελεύθερη επιφάνεια χωρίζεται σε υποπεριοχές, βάση του διεθνή κανονισμού DIN 3685 και μετριέται το σχετικό πλάτος κάθε περιοχής. Όσον αφορά τη φθορά κρατήρα μετριέται με τη χρήση κρατηρογραφημάτων όπου το μέγιστο βάθος κρατήρα(KT), η σχετική απόσταση του KT από εξωτερικό χείλος του κοπτικού (KM) καθώς και ο λόγος $K=(KT/KM)$ να αποτελούν τα κύρια μεγέθη περιγραφής της φθοράς στη επιφάνεια αποβλίπτου. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν καθώς και τα μεγέθη SV_γ και SV_α που αφορούν τη μετατόπιση της κόψης προς την επιφάνεια αποβλίπτου και ελεύθερης επιφάνειας αντίστοιχα.

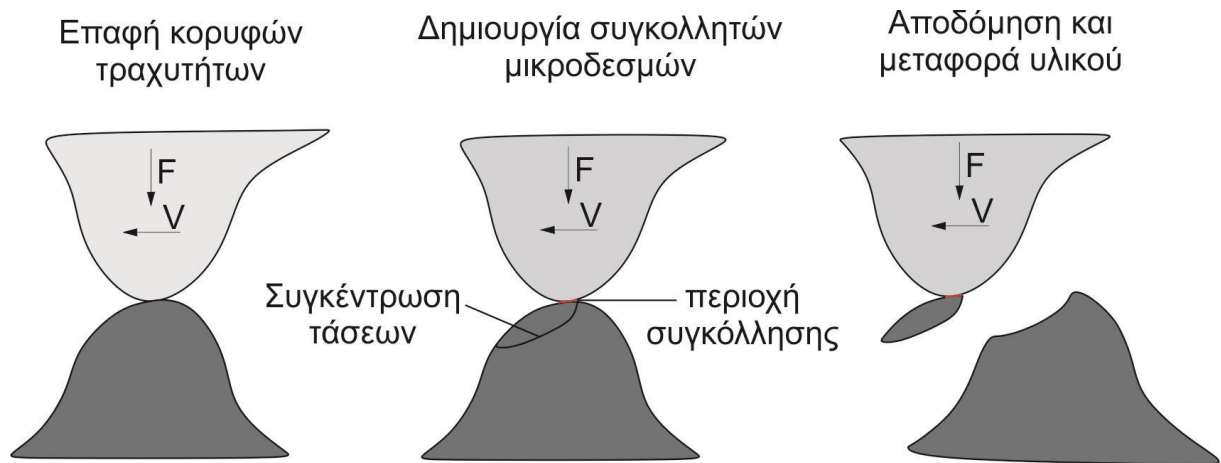


Σχήμα 2.9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φθοράς ελεύθερης επιφάνειας και φθορά κρατήρα

Σε κάθε κατεργασία σύμφωνα με τα μεγέθη που τη χαρακτηρίζουν, ενεργοποιούνται μηχανισμοί φθοράς και επιταχύνουν την ανάπτυξη της. Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς είναι οι εξής:

- Συναφειακές μικροσυγκολλήσεις
- Απόξεση (τριβή)
- Τριβοχημικές αντιδράσεις (οξείδωση, διάχυση στέρεας κατάστασης)
- Κόπωση

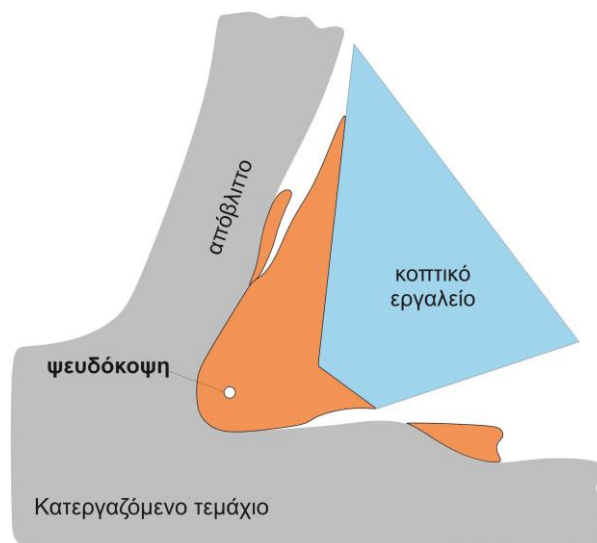
Όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός των **συναφειακών μικροσυγκολλήσεων** δημιουργούνται ομογενής συνδέσεις σε επίπεδο ατομικών ηλεκτρονικών στοιβάδων μεταξύ των υλικών των επαπτόμενων μικροπεριοχών όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10. Έτσι κατά τη σχετική κίνηση των επιφανειών η σύνδεση αυτή δεν καταστρέφεται από το σημείο συγκόλλησης αλλά εντός του ενός ή του άλλου υλικού εξαιτίας της υψηλής μηχανικής αντοχής που έχει το υλικό στο σημείο συγκόλλησης. Έτσι κατά τη συνεχή πίεση και κίνηση των δυο επιφανειών αρχίζει η σταδιακή αποδόμηση των υλικών. Στις χαμηλές ταχύτητες αυξάνεται ο χρόνος επαφής των μικροπεριοχών συγκόλλησης και έτσι ευνοείται ο παραπάνω μηχανισμός, οπότε η επιλογή της ταχύτητας που μειώνει κατά πολύ τον χρόνο επαφής μπορεί ουσιαστικά να οδηγήσει στη πλήρη αποφυγή των συναφειακών μικροσυγκολλήσεων.



Σχήμα 2.10 : Δημιουργία και αστοχία μικροσυγκολλήσεων

Με τη συνεχή προσκόλληση στρωμάτων υλικού λόγω των συναφειακών μικροσυγκολλήσεων και της σχεδόν μηδενικής ταχύτητας ροής του αποβλίπτου, στη περιοχή κοντά στη κόψη δημιουργείται ένα σφηνοειδές ασύμμετρο σώμα που παρουσιάζει αυξημένη σκληρότητα λόγω ενδοτράχυνσης (σχήμα 2.11). Έτσι αντικαθιστά τη κόψη (**ψευδόκοψη**) με αρνητικές συνέπειες για τη κατεργασία αφού αυξάνει τη γωνία αποβλίπτου και μειώνει την επιφάνεια επαφής εργαλείου – αποβλίπτου. Καθώς η κοπή συνεχίζεται η ψευδόκοψη συνεχώς αναπτύσσεται μέχρι το σημείο που η καταπονημένη δομή της να αστοχήσει εξαιτίας των δυνάμεων κοπής που ασκούνται σε αυτή. Κατά τη θραύση της μικρά τεμαχίδια παρασύρονται μαζί με το απόβλιπτο ενώ αλλά διέρχονται προς την επιφάνεια ελευθερίας και τη νεοκατεργασμένη επιφάνεια με αποτέλεσμα να εντείνεται το πλάτος ζώνης φθοράς και να χειροτερεύει η κατεργασμένη επιφάνεια. Η παρουσία της ψευδόκοψης συμπερασματικά έχει τις παρακάτω αρνητικές συνέπειες:

- Αλλαγή μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων της κατεργασμένης επιφάνειας
- Αλλαγή διαστάσεων και μορφής του δοκιμίου
- Επιδείνωση της φθοράς του κοπτικού λόγω αποξέσεων
- Αυξημένη τραχύτητα στη νεοκατεργασμένη επιφάνεια
- Ενίσχυση των ταλαντώσεων

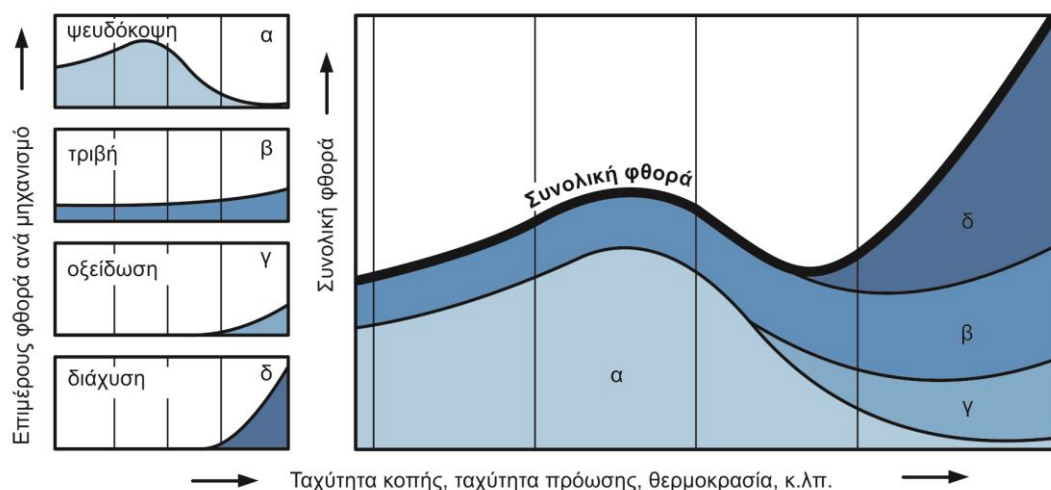


Σχήμα 2.11: Ψευδόκοψη

Έτσι είναι αναγκαίος ο έλεγχος του φαινομένου της ψευδόκοψης ώστε να διερευνηθούν οι συνθήκες που θα οδηγήσουν στη ελάττωση ή ακόμα και στην εξάλειψη του. Χαρακτηριστικό της ψευδόκοψης είναι ότι κατά την αύξηση της θερμοκρασίας, μέσω αύξησης της ταχύτητας κοπής η σκληρότητα και οι μηχανικές της ιδιότητες περιορίζονται σημαντικά, αφού ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί ανακρυστάλλωσης του υλικού της. Έτσι παρεμποδίζεται η ανάπτυξη της με τη συνεχή θραύση της μέχρι να τερματιστεί η δημιουργία της. Έρευνες πάνω στη ψευδόκοψη για διάφορες ταχύτητες κοπής δείχνουν ότι από κάποια ταχύτητα και μετά παύει να αναπτύσσεται. Επίσης το φαινόμενο της ψευδόκοψης περιορίζεται με τη χρήση κοπτικών πλακιδίων μεγαλύτερης γωνίας αποβλίπτου ώστε να έχει καλύτερη ροή ή με τη μείωση της πρόωσης που μειώνει το πάχος αποβλίπτου ή τη χρήση κατάλληλου υγρού κοπής.

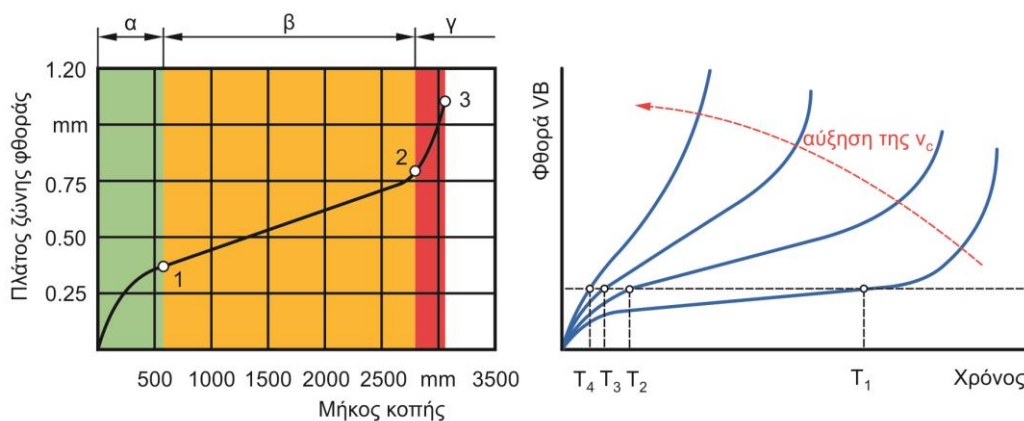
Παρατηρείται επίσης ότι κατά τη διείδυση των κορυφών των τραχυτήτων μεταξύ των επιφανειών ή τεμαχιδίων υπό τη μορφή μικρόκοκκων ενεργοποιείται παράλληλα ο μηχανισμός **απόξεσης** (τριβή). Έτσι ανάλογα με τη σκληρότητα των υλικών αυτών κατά τη διείδυση εμφανίζονται μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις, δημιουργία μικροαποβλίπτων λόγω μικροκοπής ακόμα και μικροθραύσεις λόγω υπερκαταπόνησης ή προηγούμενης ενδοτράχυνσης του υλικού. Χαρακτηριστικό του μηχανισμού αυτού είναι ότι είναι αναπόφευκτος λόγω της συνεχούς επαφής του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο, και συμμετέχει στην ανάπτυξη φθοράς σε όλη τη διάρκεια της κοπής. Τα σωματίδια που προκύπτουν από τους μηχανισμούς απόξεσης, εξαιτίας της σκληρότητας τους πρέπει να απομακρυνθούν από τη περιοχή συνεργασίας των επιφανειών διότι συμβάλουν στην επιτάχυνση τους[2]. Όπως και τα σύνθετα καρβίδια και οξειδία που προκύπτουν από τη σταδιακή αποδόμηση των επιφανειών λόγω **τριβοχημικών αντιδράσεων**. Αντιδράσεις που προκύπτουν από φυσικοχημικές διεργασίες ενεργοποιημένες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, πιέσεων και ταχυτήτων ολίσθησης ανάμεσα στις δυο συνεργαζόμενες επιφάνειες. Ανάμεσα στις διεργασίες που ενεργοποιούνται είναι η οξειδωση που μπορεί να οδηγήσει το κοπτικό σε αστοχία λόγω της αύξησης του πλάτους ζώνης φθοράς στα άκρα της επαφής εργαλείου τεμαχίου. Αφού η προσαγωγή οξυγόνου στο σημείο επαφής του εργαλείου με το τεμάχιο εντείνει το πλάτος ζώνης φθοράς και επιδρά αρνητικά στη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Για το περιορισμό της επιλέγεται κατάλληλη γωνία τοποθέτησης της κύριας κόψης καθώς και σχετικά μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας της ώστε να εμποδίζεται η πρόσβαση οξυγόνου σε κάποιο δυνατό βαθμό. Σε θερμοκρασίες ακόμα υψηλότερες περίπου 800°C για εργαλεία ανθεκτικά σε αυτές παρατηρούνται αλλαγές στη χημική σύσταση τους λόγω **διάχυσης στερεάς κατάστασης**. Όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός αυτός άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου διαχέονται προς το απόβλιπτο ή το τεμάχιο με αποτέλεσμα τη μεταβολή του κρυσταλλικού πλέγματος του εργαλείου και την αποδόμηση του.

Παράλληλα με τους μηχανισμούς που προαναφέρθηκαν, ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί **κόπωσης** των υλικών όταν στα στοιχειώδη σημεία επαφής κοπτικού και τεμαχίου, οι αναπτυσσόμενες τάσεις ξεπεράσουν τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές των ορίων κόπωσης και διαρροής. Στις περιοχές επαφής των δυο επιφανειών δημιουργούνται τοπικές τάσεις και φορτίσεις που όσο δεν ξεπερνούν τις επιτρεπτές τιμές δεν δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις και αποξέσεις. Οι συνεχείς φορτίσεις στα σημεία επαφής σε συνδυασμό με υψηλές δυνάμεις κοπής και υψηλές θερμοκρασίες που περιορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες κάθε υλικού, δημιουργούν μικρορηγματώσεις και μικροθραύσεις στις συνεργαζόμενες επιφάνειες και έτσι αυτές σταδιακά αποδομούνται. Με τις μικρορηγματώσεις λόγω κόπωσης των υλικών που παρατηρούνται σε επίπεδα παράλληλα της επιφάνειας αποβλίπτου και πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια αλλά και σε επίπεδα κάθετα στην επιφάνεια αποβλίπτου, να αποφεύγονται μονό με την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κοπής.



Σχήμα 2.12.: Επίδραση συνθηκών κατεργασίας στους μηχανισμούς ανάπτυξης φθοράς

Οι μηχανισμοί που προαναφέρθηκαν εκτυλίσσονται κατά τη κοπή και η φθορά στο κοπτικό που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της είναι συνήθως αποτέλεσμα όλων των μηχανισμών μαζί, με διαφορετικό ποσοστό συνεισφοράς ο καθένας ανάλογα με τις συνθήκες που τη διέπουν. Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζετε η πορεία της συνολικής φθοράς του εργαλείου, η στιγμή ενεργοποίησης των κύριων μηχανισμών φθοράς αλλά και την ένταση τους κατά την αύξηση των δυνάμεων κοπής και της θερμοκρασίας. Κατά τη κοπή σε χαμηλές ταχύτητες όπως αναφέρθηκε παραπάνω αυξάνεται ο χρόνος επαφής των επιφανειών και έτσι έχουμε ενεργοποίηση του μηχανισμού των μικροσυγκολλήσεων αλλά επίσης και το φαινόμενο της ψευδόκοψης όπου οδηγεί σε φθορά εξαιτίας αποξέσεων. Με τη σταδιακή αύξηση της ταχύτητας κοπής τα παραπάνω φαινόμενα μειώνονται φτάνοντας σχεδόν στο σημείο να εξαλειφθούν όμως τότε με τη ταυτόχρονη αύξηση δυνάμεων κοπής και θερμοκρασίας ενεργοποιούνται και εντείνονται περισσότερο όσο τα παραπάνω μεγέθη αυξάνονται, οι μηχανισμοί τριβοχημικών αντιδράσεων και κόπωσης. Η οξειδωση γίνεται πιο έντονη και συνεισφέρει κατά πολύ στο σύνολο της φθοράς επίσης άτομα του κοπτικού διαχέονται προς το απόβλιπτο και το τεμάχιο με αποτέλεσμα την αποδόμηση του πρώτου. Κάθε κατεργασία κοπής πρέπει να μελετηθεί προτού επιλεχθούν η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής και η ταχύτητα πρόωσης, ως προς τα υλικά που συμμετέχουν σε αυτή, το είδος της κοπής, τη γεωμετρία του κοπτικού. Όστε η κοπή να γίνεται κάτω από ευνοϊκές συνθήκες που δεν εντείνουν τη φθορά που παρατηρείται από τον κάθε μηχανισμό και τον συνδυασμό τους.



Σχήμα 2.13: Εξέλιξη πλάτους ζώνης φθοράς κοπτικού εργαλείου

Το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της φθοράς των κοπτικών είναι το πλάτος ζώνης φθοράς που αναλύθηκε παραπάνω (VB) για αυτό χρησιμοποιήθηκε και για τη παρούσα εργασία το μέγεθος αυτό για την ανάλυση της φθοράς μετά το περάς των πειραμάτων. Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζετε η εξέλιξη του πλάτους ζώνης φθοράς και όπως διακρίνεται η πορεία της χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές συμπεριφοράς. Στη πρώτη ζώνη ο ρυθμός ανάπτυξης της φθοράς είναι απότομος λόγω της εμπλοκής του κοπτικού στη κοπή με τη συνακόλουθη άμβλυνση της αιχμηρής στην αρχή κόψης. Έπειτα ο ρυθμός της φθοράς σταθεροποιείται (β περιοχή) για ένα μεγάλο διάστημα και είναι ανάλογη του μήκους κοπής και του χρόνου κοπής έως ότου φτάσει στη γ περιοχή όπου εκεί έχουμε επιτάχυνση της φθοράς μέχρι τελικά το κοπτικό εργαλείο να αστοχήσει. Με τη ταχύτητα κοπής να παίζει πολύ καθοριστικό ρόλο όσον αφορά το χρόνο που θα χρειαστεί το κοπτικό μέχρι να φτάσει στη τρίτη περιοχή. Στο δεξί μέρος του παραπάνω σχήματος παρουσιάζετε το πόσο πιο γρήγορα και απότομα η τιμή της φθοράς φτάνει στη περιοχή γ όσο η ταχύτητα αυξάνεται. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό το πόσο σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα κοπής για την ανάπτυξη κάθε μορφής φθοράς και το πόσο προσεκτικά και μελετημένα πρέπει να γίνεται η επιλογή βάσης των δεδομένων κάθε κατεργασίας αφού επηρεάζει δραματικά τη διάρκεια ζωής του κοπτικού.

2.4 Διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων

Διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων νοείται ο χρόνος κατά τον οποίο το εργαλείο είναι λειτουργικό και παραγωγικό διατηρώντας τη γεωμετρία του και τις μηχανικές του ιδιότητες. Ο ενεργός αυτός χρόνος μπορεί επίσης να εκφραστεί σε μονάδες μήκους κατεργασμένης επιφάνειας και όγκου αφαιρούμενου υλικού μέχρι τελικής αστοχίας.

Τα βασικότερα κριτήρια αστοχίας είναι η τιμή πλάτους ζώνης φθοράς και το βάθος κρατήρα στην επιφάνεια ελευθερίας και αποβλήτου αντίστοιχα. Έτσι όταν ένα κοπτικό εργαλείο ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια φθοράς είτε στη μια είτε στην άλλη επιφάνεια κρίνεται ακατάλληλο για περαιτέρω κατεργασίες. Αλλά κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται είναι η καθορισμένη τιμή όγκου αφαιρούμενου υλικού, το καθορισμένο όριο τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας και το πεδίο ανοχών κρίσιμων διαστάσεων του τεμαχίου. Είναι λοιπόν προφανές ότι οι συνθήκες κοπής, οποίο και να είναι το κριτήριο αστοχίας επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου αφού από αυτές εξαρτάται το μέγεθος της φθοράς. Η μαθηματική εξίσωση που εκφράζει τη διάρκεια ζωής των κοπτικών είναι η εξίσωση Taylor (εξίσωση 2.5) και παρουσιάζεται παρακάτω.

$$v_c T^n = C \quad (2.5)$$

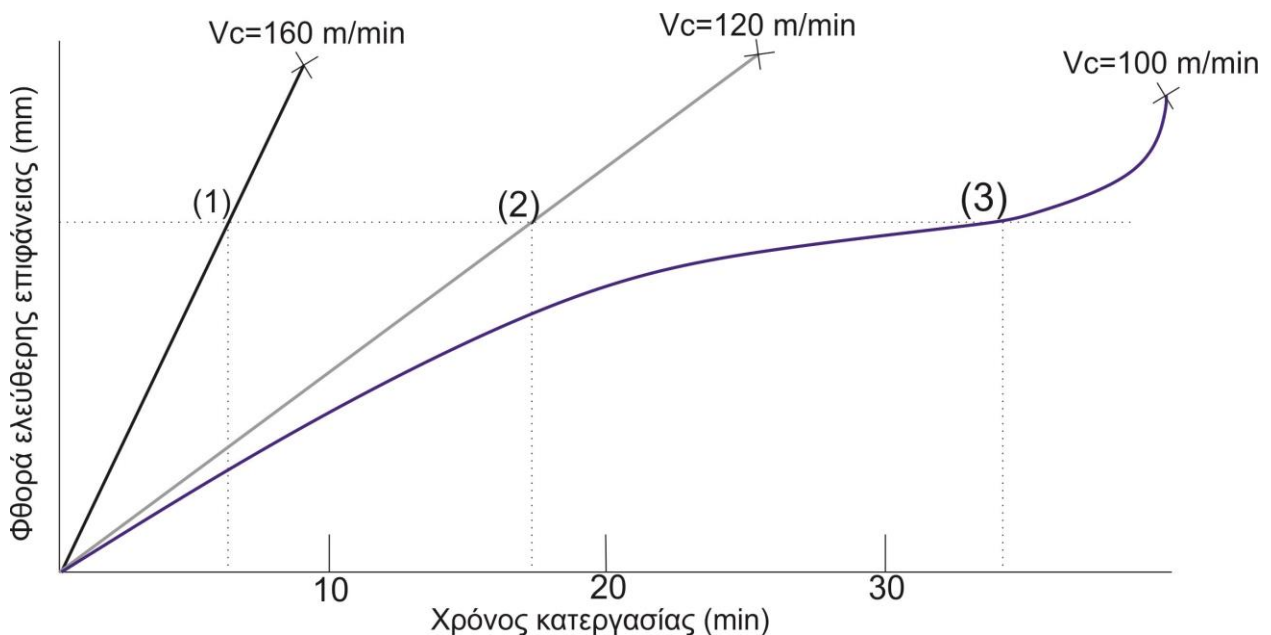
οπού v_c η ταχύτητα κοπής, n και C σταθερές που έχουν σχέση με το υλικό τεμαχίου και κοπτικού. Παρότι από τη παραπάνω εξίσωση είναι εμφανές το πόσο σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα κοπής δεν λαμβάνει υπόψη τους εξίσου σημαντικούς παράγοντες της πρόωσης και του βάθους κοπής. Έτσι η εξίσωση 2.5 αν τροποποιηθεί ως εξής:

$$v_c T^n f^{n/m} e^{n/k} = C \quad (2.6)$$

οπού f η πρόωση, e το βάθος κοπής και n , m , k έκθετες Taylor που εξαρτώνται από τα υλικά της κατεργασίας, γίνεται πιο πλήρης. Η σειρά επιρροής των συνθηκών κοπής πάνω στη διάρκεια ζωής του εργαλείου, από πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ως εξής:

$$v_c > f > e \quad (2.7)$$

Στο σχήμα 2.14 φαίνεται πόσο μεγάλη είναι η επίδραση της ταχύτητας κοπής στη διάρκεια ζωής του εργαλείου αφού η αύξηση της μειώνει αισθητά τον χρόνο αυτό. Γεγονός που οφείλεται στις υψηλές καταπονήσεις που δέχεται το κοπτικό εργαλείο αλλά και στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και ενεργοποιούν τους μηχανισμούς οξείδωσης, διάχυσης στερεάς κατάστασης και κόπωσης των υλικών.



Σχήμα 2.14: Επίδραση ταχύτητας κοπής στη φθορά ελεύθερης επιφάνειας

Βεβαία υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επιδρούν, ίσως σε μικρότερο βαθμό, στην ωφέλιμη διάρκεια ζωής του κοπτικού όπως είναι:

- Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου
- Το υλικό του κοπτικού και οι ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν
- Η επικάλυψη και οι ιδιότητες της
- Το υλικό του τεμαχίου
- Το υγρό κοπής
- Ο τρόπος πρόσδεσης κοπτικού και τεμαχίου

2.5 Μέθοδοι έλεγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων

Η δυνατότητα παρακολούθησης και μελέτης της φθοράς αλλά και του ρυθμού ανάπτυξης της είναι πολύ σημαντική διαδικασία διότι έχει ποικίλα οφέλη στη κατεργασία, το κόστος παραγωγής των προϊόντων της αλλά και το συνολικό χρόνο της. Το κόστος των κοπτικών εργαλείων αποτελεί το 3%-12% του συνολικού κόστους παραγωγής και το 20% του μη παραγωγικού χρόνου των εργαλειομηχανών οφείλεται στην αστοχία τους καθιστώντας όπως προαναφέρθηκε τη μελέτη της φθοράς αναγκαία για τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Οι μέθοδοι παρακολούθησης χωρίζονται σε έμμεσες και άμεσες. Με τις άμεσες να είναι πιο ακριβείς αφού μετρούν τη φθορά καθώς αυτή αναπτύσσεται και βασίζονται στην οπτική παρακολούθηση με τη χρήση Η/Υ. Σε αντίθεση με τις έμμεσες που μετρούν αλλά μεγέθη που σχετίζονται με τη φθορά με το πλεονέκτημα του ότι δεν αποσυναρμολογείται το εργαλείο για τη λήψη της μέτρησης.

Τέτοια μεγέθη παρακολούθησης της φθοράς για τη τórνευση είναι τα εξής:

- Οι **δυνάμεις κοπής** όπου με τη βοήθεια δυναμόμετρου μετρούνται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται με τη δυνατότητα εντοπισμού έντονης φθοράς ή θραύσης.
- Οι **ακουστικές εκπομπές** που δημιουργούνται κατά τη κατεργασία, όπου με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητήρων μετρούνται για την ανίχνευση της φθοράς ή της θραύσης.
- Οι **ταλαντώσεις** όπου με τη βοήθεια ειδικών αισθητήρων μετατρέπεται το αποτέλεσμα της ταλάντωσης σε ηλεκτρικό μέγεθος για περαιτέρω επεξεργασία αφού σχετίζονται με την ύπαρξη φθοράς.
- Η **ανακλαστικότητα αποβλίπων** αφού η αλλαγή χρώματος του αποβλίπτου οπότε και ανακλαστικότητα του σχετίζεται με τη θερμοκρασία που παράγεται λόγω της τριβής.
- Η **θερμοκρασία** που αναπτύσσεται στο κοπτικό εργαλείο, μέσω της μέτρησης της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν η οποία μεταδίδεται στο χώρο υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Παρότι οι έμμεσες μέθοδοι έλεγχου φθοράς θεωρούνται πιο δημοφιλείς λόγω του ότι είναι ευκολότερες, λόγω της συνεχής βελτίωσης της απόδοσης των αισθητήρων όρασης οι άμεσες θεωρούνται ακριβέστερες λόγω μικρής επιρροής από τα σήματα θορύβου αφού οι εικόνες λαμβάνονται με CCD κάμερες, τεχνολογία ελάχιστα ευαίσθητη στο θόρυβο βιομηχανικού περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιορισμοί στη χρήση άμεσων μεθόδων αφού πρέπει να γίνεται η λήψη της εικόνας υπό κατάλληλο φωτισμό και έπειτα με το κατάλληλο αλγόριθμο ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας να γίνει απομάκρυνση του θορύβου από την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου για ακριβέστερο προσδιορισμό των περιοχών φθοράς.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εργαλειομηχανή

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η εργαλειομηχανή CTX 310 ecoline της DMG (σχήμα 3.1). Γενικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τόρνου αποτελούν σημαντική πληροφορία καθώς προσδιορίζουν και περιορίζουν τις δυνατότητες του κάθε κέντρου κατεργασίας και λαμβάνονται υπόψη κατά τον προγραμματισμό του. Ο τόρνος CTX 310 διαθέτει επικλινή εργαλειοφορέο 45° μοιρών με δυνατότητα πρόσδεσης, μέσω υδραυλικού συστήματος σύσφιξης 12 κοπτικών εργαλείων (σχήμα 3.2). ώστε να πραγματοποιούνται εργασίες με τον ελάχιστο νεκρό χρόνο που προκύπτει από τη παύση της κατεργασίας για την αλλαγή των κοπτικών. Ο χρόνος αλλαγής μεταξύ δυο θέσεων εργαλείων, 30 μοιρών απόστασης, φτάνει τα 0,4 δευτερόλεπτα[1].



Σχήμα 3.1: Κέντρο κατεργασίας CTX 310 ecoline

Είναι περιστροφικό εργαλειοφορέο κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο που διαθέτει στιβαρότητα, ακαμψία και πολύ καλή συμπεριφορά στην απορρόφηση των κραδασμών και των δονήσεων που δημιουργούνται κατά τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Είναι μικρό με εύρος διαδρομών 182,5mm στον κάθετο άξονα (X) και 455mm στον οριζόντιο (Z), με τη ακρίβεια κίνησης των σερβοκινητήρων να φτάνει το 1μm, με τη δυνατότητα κατεργασίας τεμαχίων έως και 200mm μήκος. Ο κινητήρας που διαθέτει και δίνει κίνηση μέσω ιμάντα στον κύριο άξονα κίνησης του τόρνου, παρέχει ισχύς της τάξεως των 20HP και μέγιστη ροπή 166,5Nm, σχεδιασμένος για να έχει σταθερότητα και χαμηλό κόστος συντήρησης. Η άτρακτος μέσω του κινητήρα μπορεί να περιστραφεί έως και 5000 στροφές ανά λεπτό(rpm) με χρόνο ανάπτυξης τους τα 5,8 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 3.2: Εργαλειοφορείο CTX 310 ecoline

Διαθέτει επίσης σύγχρονο περιστρεφόμενο κεντροφορέα για την υποστήριξη δοκιμών μεγάλου λόγου μήκους, διαμέτρου (σχήμα 3.3). Η πίεση που ασκεί ο κεντροφορέας πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με το μήκος και τη διάμετρο της ράβδου αλλά και των μηχανικών, φυσικών ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου υλικού. Αφού σε περιπτώσεις ευλύγιστων ή ευθραύστων δοκιμών παραπάνω πίεση μπορεί να δημιουργήσει πλαστική παραμόρφωση, ακόμα και θραύση του δοκιμίου. Ενδεικτικό εύρος της πίεσης για τις περισσότερες κατεργασίες τórνευσης είναι 200psi έως 400psi (1.4Mpa έως 2.8Mpa). Η οπή για τη τοποθέτηση του κεντροφόρα γίνεται με ειδικό κοπτικό εργαλείο που ονομάζεται κεντροτρύπανο. Το κεντροτρύπανο που επιλέγεται πρέπει να έχει τη κατάλληλη γωνία ώστε να ταιριάζει με τις μοίρες της μύτης του κεντροφορέα.



Σχήμα 3.3: Διάταξη σύγχρονου περιστρεφόμενου κεντροφορέα

Στην αριστερή πλευρά του σχήματος 3.1 διακρίνεται το εργονομικό panel SLIMline® με οθόνη TFT 15'', Siemens 840D solutionline με λογισμικό ShopTurn για τον απλό και γρήγορο προγραμματισμό της εργαλειομηχανής. Επίσης διαθέτει τρισδιάστατη προσομοίωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου με δυνατότητα απεικόνισης κάθε σταδίου της κατεργασίας σε πραγματικό χρόνο.

3.2 Υλικά πειράματος

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι κράμα αλουμινίου με την ονομασία 7075, όπου με τον αριθμό δηλώνονται οι κύριες προσμίξεις του και προσδιορίζεται η βασική κατεργασία που έχει υποστεί. Είναι ένα κράμα αλουμινίου που κατατάσσεται στα κράματα διαμόρφωσης με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από αυτά της χύτευσης, όμως παρουσιάζει ανισοτροπίες σε αυτές. Έχει τον ψευδάργυρο ως βασικό στοιχείο και δεν έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία, η χημική σύσταση, οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 και στον πίνακα 3.2 αντίστοιχα.

Χημική σύσταση	Περιεκτικότητα(wt.%)
Si	0,4
Fe	0,5
Cu	1,2-2
Mn	0,3
Mg	2,1-2,9
Cr	0,18-0,28
Zn	5,1-6,1
Ti	0,2
Άλλα	0,15

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 7075

Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες	
Πυκνότητα	2,81 g/cm ³
Σκληρότητα	60 Hb
Αντοχή σε διαρροή	228 Mpa
Αντοχή σε εφελκυσμό	103 Mpa
Εκατοστιαία επιμήκυνση	16%

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες Al 7075

Γενικότερα τα κράματα αλουμινίου έχουν ευρεία χρήση στη βιομηχανία, αφού από αυτά κατασκευάζονται πολλά προϊόντα- σκευή μεταφοράς και αποθήκευσης τροφίμων μέχρι και δομικά στοιχεία αεροπλάνων- ενδεικτικό το γεγονός ότι το 65%-81% του βάρους ενός σύγχρονου αεροπλάνου αντιστοιχεί σε τεμάχια κραμάτων αλουμινίου[2]. Τα κράματα αυτά παρότι έχουν υποδεέστερες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες από τα σιδηρούχα υλικά, λόγω του μικρού ειδικού βάρους τους και της χαμηλότερης πυκνότητας τους έχουν όμως υψηλότερη κατεργαστικότητα και ταυτόχρονα χαμηλότερο κόστος μορφοποίησης.

Έχουν ειδική αντοχή που ποσοτικοποιείται ως ο λόγος της αντοχής προς το ειδικό βάρος[3] και γενικότερα έχουν χαρακτηρίζονται από τα εξής:

- Υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Αντίσταση στη διάβρωση σε κοινά περιβάλλοντα όπως αυτό της ατμοσφαιράς.
- Υψηλή ολκιμότητα, γεγονός που δικαιολογεί την εύκολη μορφοποίηση τέτοιων κραμάτων.
- Διατηρούν την ολκιμότητα τους και σε χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της εδροκεντρωμένης κυβικής κρυσταλλικής δομής (FCC) τους.
- Έχουν χαμηλό σημείο τήξης, περίπου στους 600° C και έτσι υπάρχει περιορισμός στις μέγιστες θερμοκρασίες χρήσης τους.

Κατά τη μορφοποίηση τους με αφαίρεση υλικού παράγονται χαμηλότερες δυνάμεις κοπής (30%-50% χαμηλότερες από τους χάλυβες) και χαμηλότερες μηχανικές καταπονήσεις στη κόψη. Οι ταχύτητες κοπής κατά τη κατεργασία κραμάτων αλουμινίου περιορίζεται προς τα κάτω για αποφυγή έντονης φθοράς από τους συγκολλητικούς μικροδεσμούς- που δημιουργούνται στις χαμηλές ταχύτητες- και προς τα πάνω λόγω του χαμηλού σημείου τήξης τους. Παρόλα αυτά είναι πολλαπλάσιες από αυτές της κοπής χάλυβα.

Τα κράματα αλουμινίου, όπως τα δοκίμια των πειραμάτων, χαμηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο(Si) έχουν ευκολοπαραμορφώσιμο χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα το οποίο ευνοεί τη δημιουργία συνεχών αποβλίπτων και ψευδοαποβλίπτων μεταξύ της επιφάνειας ελευθερίας και του κατεργαζόμενου υλικού. Το φαινόμενο δημιουργίας ψευδοαποβλίπτων μειώνει τη ποιότητα της κατεργασίας και πρέπει να αποφεύγεται. Οπότε υπάρχει ανάγκη για μείωση των θερμοκρασιών κατά τη κοπή μέσω μικρότερων ταχυτήτων κοπής, χρήση αιχμηρής κόψης και θετικές γωνίες αποβλίπτου. Όσον αφορά το κατάλληλο είδος κοπτικού εργαλείου που προτείνεται για τη κατεργασία τέτοιων κραμάτων, από τη βιβλιογραφία είναι τα σκληρομέταλλα της ομάδας K, τα πολυκρυσταλλικά αδαμαντοφόρα και σε ειδικές περιπτώσεις τα μονοκρυσταλλικά.

Για τη κατεργασία λοιπόν των κραμάτων Al7075 επιλέχθηκε σκληρομέταλλο της ομάδας K, ποιο συγκεκριμένα το κοπτικό εργαλείο CNMA 120408 (σχήμα 3.4) της Kennametal με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.



Σχήμα 3.4: Ένθετο πλακίδιο CNMA 120408

Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου	
Ονομασία κατά ISO	CNMA 120408
Ονομασία κατά ANSI	CNMA 432
Βαθμός	K68
Διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου(D)	12.7 mm
Κύρια διάσταση πλακιδίου(L10)	12.9 mm
Πάχος(S)	4.76 mm
Καμπυλότητα κόψης(R)	0.8 mm
Διάμετρος οπής(D1)	5.16 mm
Κατηγοριοποίηση κατά ISO	K10
Κατηγοριοποίηση κατά ANSI	C3
Επικάλυψη	Χωρίς επικάλυψη
Γωνία κόψεων	80°

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου

Με τη κωδικοποίηση του να δίνει σχεδόν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλακιδίου που έχει γίνει βάση του κανονισμού ISO 1832 του 2004. Το πρώτο γράμμα δείχνει το σχήμα που έχει το πλακίδιο με το C να δηλώνει ότι έχει σχήμα ρόμβου και γωνία κόψεων 80°. Το δεύτερο γράμμα προσδιορίζει τις μοίρες τη γωνίας ελευθερίας που έχει το κοπτικό με αυτό του πειράματος (γράμμα N) να έχει μηδενική γωνία ελευθερίας, το τρίτο γράμμα τη κατηγορία ανοχών το τέταρτο τη διαμόρφωση ροής του αποβλήτου και συγκράτησης του πλακιδίου. Τέλος οι αριθμοί δηλώνουν το πάχος(04) και την ακτίνα της κόψης(08) σε χιλιοστά. Η ομάδα K κατά τη ταξινόμηση DIN ISO 513 συνίσταται για τη κατεργασία χυτοσιδήρου με φυλλοειδή ή σφαιροειδή σεμεντίτη αφού η μικρή παραμορφωσιμότητα τους πριν από τη θραύση δημιουργεί ασυνεχή απόβλιττα και οι θερμοκρασίες κοπής διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα[2]. Όμως από τη κατάταξη της Kennametal του κοπτικού στο βαθμό K68 δηλώνεται η καλή αντοχή στη τριβή κατά τη κατεργασία χυτοσιδήρου, ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα, μη σιδηρούχων υλικών, αμέταλλων αλλά αποτελεί και εναλλακτική επιλογή των καρβιδίων βαθμού K313 ιδανικά για μορφοποίηση κραμάτων (superalloys)[4]. Το ότι κατατάσσεται στην υποομάδα εφαρμογής K10 δηλώνει ότι, από τα κοπτικά της ομάδας K, ανήκει σε αυτά με τη δεύτερη μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά αλλά και σκληρότητα όμως χαρακτηρίζεται από μειωμένη ολκιμότητα σε σχέση με της υποομάδες που ακολουθούν (K20, K30, K40).

Όσον αφορά τη χημική σύσταση του, αποτελείται από καρβίδια βολφραμίου κοβαλτίου (Wc/Co), τα οποία περιέχουν ίσα άτομα βολφραμίου και άνθρακα με μικρή ποσότητα συνδετικής ουσίας (κοβάλτιο) και έχει μικρόκοκκη δομή (extra fine) με μέση διάμετρος κόκκων 0,2μm-0,5μm[2]. Παρότι είναι σκληρό αφού αποτελείται από βολφράμιο, υλικό από τα σκληρότερα για διάφορες τεχνικές εφαρμογές, δεν ενδείκνυται για τη κοπή χάλυβα αφού σε αυτή αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (της τάξης των 800°C) που καταστρέφουν τη δομή του σκληρομέταλλου. Στον πίνακα 3.4 παρατίθεται η χημική σύσταση και κάποιες φυσικές ιδιότητες του ένθετου πλακιδίου.

Χημική σύσταση	
Βολφράμιο(Wc)	94%
Κοβάλτιο(Co)	6%
Πυκνότητα	14.94 g/cm ³
Σκληρότητα(HRA)	92.8 RA
Αντοχή στη διαρροή	2480 Mpa

Πίνακας 3.4: Χημική σύσταση και φυσικές ιδιότητες κοπτικού εργαλείου

Τα ένθετα πλακίδια τοποθετήθηκαν σε εργαλειοδέτη της Sandvik με τον κωδικό DCLNL 2020K 12. Με τα γράμματα να δηλώνουν- κατά DIN 4983- τον τύπο συγκράτησης, τη μορφή του κοπτικού πλακιδίου, μορφή στελέχους συγκράτησης, γωνία ελευθερίας, κατεύθυνση κοπής, ύψος στελέχους (σε mm), πλάτος στελέχους, μήκος του στελέχους και μήκος κοπτικής ακμής αντίστοιχα[5]. Οι γωνίες του κοπτικού μετά τη πρόσδεση του στον εργαλειοδέτη παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5.

Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου	Μοίρες
Γωνία κύριας κόψης (angle of inclination)	$\lambda_s = -6^\circ$
Γωνία αποβλήτου (rake angle valid with flat insert)	$\gamma = -6^\circ$
Γωνία τοποθέτησης (entering angle)	$K_r = 95^\circ$
Ακτίνα κόψης (nose radius)	Re= 0.8mm
Γωνία ελευθερίας (clearance angle)	$\alpha = 0^\circ$

Πίνακας 3.5: Γεωμετρία κοπτικού

3.3 Οπτικό Στερεομικροσκόπιο

Η μελέτη των κοπτικών εργαλείων μετά το πέρας κάθε πειράματος έγινε από οπτικό στερεομικροσκόπιο ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός του πλάτους ζώνης φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας. Το σύστημα μελέτης της φθοράς αποτελείται από το οπτικό στερεομικροσκόπιο M125 της εταιρείας Leica (σχήμα 3.5) και μια υπολογιστική μονάδα για επεξεργασία της εικόνας μέσω του λογισμικού Leica Application Software V4.1.



Σχήμα 3.5: Στερεομικροσκόπιο Leica M125

Το στερεομικροσκόπιο είναι πλήρως αποχρωματικό μεγάλου εύρους μεγέθυνσης (0.8x-10x, 12.5:1) διαθέτει ενσωματωμένη CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης (592 x 1944) με μέγεθος εικονοστοιχείου 2.78μm x 2.78μm. Για τη λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης η κεφαλή της κάμερας κβαντίζει τη πληροφορία που λαμβάνει από τη CCD κάμερα με 12 bit και παράγει τις εικόνες με φυσική αναπαράσταση των χρωμάτων. Επίσης διαθέτει δακτύλιο φωτισμού περιμετρικά του φακού με 40 LED ψυχρού φωτισμού με τη δυνατότητα επιλογής διάφορων συνδυασμών φωτισμού τους για διαφορετικές συνθήκες φωτισμού του κοπτικού εργαλείου με σκοπό δημιουργία αντίθεσης μεταξύ φθαρμένης και άφθαρτης επιφάνειας του.

3.4 Προγραμματισμός Πειραμάτων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν υπό σταθερή πρόωση, σταθερό βάθος κοπής, σταθερό χρόνο κατεργασίας και αλλαγή γίνονταν μόνο στη ταχύτητα κοπής αφού θεωρείται ο πιο καθοριστικός παράγοντας ανάπτυξης φθοράς. Το πείραμα για κάθε ταχύτητα σταματούσε όταν ολοκληρωνόντουσαν 30 λεπτά καθαρής κατεργασίας χωρίς να υπολογίζονται σε αυτό το χρόνο νεκροί χρόνοι όπως αλλαγή κοπτικού, αλλαγή τεμαχίου και προετοιμασία τεμαχίου. Το πείραμα επίσης σταματούσε αν το πλάτος ζώνης φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού πλακιδίου ξεπερνούσε τα 0,6mm περίπτωση που το κοπτικό αποσύρετε. Οι τιμές της πρόωσης και του βάθους κοπής δεν επιλέχθηκαν τυχαία καθώς επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που δημιουργούνται κατά τη κοπή. Από τη βιβλιογραφία[5] κατά τη τόννευση κραμάτων αλουμινίου με καρβίδια χωρίς επικάλυψη δίνονταν οι ακόλουθες τιμές:

- Βάθος κοπής 0,25mm έως 8,8mm
- Πρόωση 0,08mm/rev έως 0,62mm/rev

Έτσι βάση των ορίων αυτών και ενός πρότυπου πειράματος με περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά επιλέχθηκαν οι τιμές των 2mm ως ακτινικό βάθος κοπής και των 0,315mm/rev για τη ταχύτητα κίνησης του κοπτικού (πίνακας 3.6).

Συνθήκες κοπής	
Βάθος κοπής	2mm
Πρόωση	0,315mm/rev
Χρόνος κοπής	30min

Πινάκας 3.6: Συνθήκες κοπής

Οι ταχύτητες που έγιναν τα πειράματα είναι αυτές των 5, 10, 20, 30 και 50m/min, για να υπολογιστούν τα περάσματα και ο αριθμός ράβδων αλουμινίου που θα χρειαστούν σε κάθε ταχύτητα μέχρι να ολοκληρωθεί ο απαιτούμενος χρόνος των 30 λεπτών χρησιμοποιήθηκε το excel, όπου υπολογίστηκε ακριβώς ο χρόνος κοπής (σε min) σε κάθε πέρασμα οι απαιτούμενες στροφές του τεμαχίου ώστε να μπορέσει το κοπτικό με τη συγκεκριμένη πρόωση να κάνει το πέρασμα για το βάθος των 2 χιλιοστών.

Η διάμετρος κάθε περάσματος υπολογίζεται ως η διάμετρος του προηγούμενου περάσματος μειωμένη κατά 4mm αφού το ακτινικό βάθος κοπής είναι 2mm. Όσον αφορά τις στροφές υπολογίζονται από τον τύπο,

$$n = \frac{(Vc \cdot 1000)}{(\pi \cdot D)} \quad (3.1)$$

Οπότε έχοντας γνωστά ταχύτητα και διάμετρο υπολογίζουμε τις στροφές ανά λεπτό. Οι απαιτούμενες στροφές που θα περιστραφεί το τεμάχιο μέχρι το κοπτικό εργαλείο να φτάσει στο σημείο που πρέπει υπολογίζονται από το λόγο μήκους κατεργασίας(L) και πρόωση κοπής(f). Μέγεθος απαραίτητο για να υπολογίζουμε για πόσο χρόνο θα κόβει το κάθε πάσο αφού διαιρώντας το με τις στροφές που κινείται η άτρακτος(η) μας δίνουν το χρόνο που χρειάζεται.

3.5 Εκτέλεση Πειραμάτων

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η πορεία της πειραματικής διαδικασίας όπου μετά το τέλος της κατεργασίας στον τόρνο CTX 310 ecoline ακολουθεί η οπτική παρακολούθηση του πλάτους ζώνης φθοράς και η λήψη της φωτογραφίας από το στερεομικροσκόπιο. Έπειτα μέσω του λογισμικού Leica Application Software V4.1 γίνονταν η μέτρηση του πλάτους ζώνης φθοράς για την εξαγωγή της καμπύλης φθοράς και των πέντε πειραμάτων.



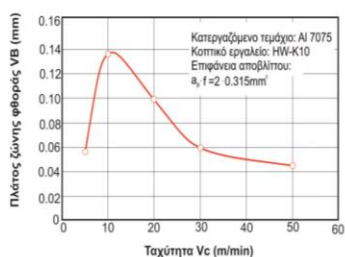
Κατεργασία δοκιμίων στο κέντρο κατεργασίας CTX 310 ecoline



Λήψη φωτογραφίας μέσω του στερεομικροσκοπίου Leica M125



Μέτρηση μέγιστου πλάτους ζώνης φθοράς



Εξαγωγή καμπύλης φθοράς

Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας

Για την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν απαραίτητη η σύνταξη του κατάλληλου κώδικα για κάθε κατεργασία και ταχύτητα. Έτσι μέσω της οθόνης διεπαφής ([σχήμα 3.9](#)) και του περιβάλλοντος προγραμματισμού της εργαλειομηχανής συντάχτηκαν οι απαραίτητοι κώδικες ([πινάκας 3.9](#)) και έγιναν οι απαραίτητες δοκιμές μέσω του συστήματος τρισδιάστατης προσομοίωσης που διαθέτει το κέντρο κατεργασίας.



Σχήμα 3.9: Control panel SLIMline®

Κώδικας CNC	
1	G71 G54 G18 G90
2	G95 F0.315
3	WORKPIECE(,, "CYLINDER",192,0,-185,- 135,50)
4	G26 S1000
5	G96 S50 M04
6	G00 X130 Z25
7	T="ROUGHING_TOOL_1" D1 M06
8	G00 X46
9	Z5
10	M108
11	CYCLE951(50,0,22,-110,22,- 110,1,2,0,0,11,0,0,0,5,0.315,0,2,1110000)
12	G01 X50
13	G00 Z25
14	X120
15	M09
16	M30

Πινάκας 3.9: Ενδεικτικός κώδικας CNC

Μετά τον έλεγχο του κώδικα μέσω της προσομοίωσης για τυχόν παραβλέψεις ή λάθη στη σύνταξη πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες ενέργειες για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων που εντείνουν τη φθορά, όπως οι ταλαντώσεις λόγω κακής πρόσδεσης του τεμαχίου στο σφιγκτήρα. Έπειτα μέσω υπολογισμού του λόγου μήκους και διαμέτρου της ράβδου έγινε ο έλεγχος όσον αφορά την ανάγκη στήριξης του δοκιμίου από τον κεντροφορέα. Αν ο λόγος μήκους, διαμέτρου ήταν χαμηλότερος του 3 η κατεργασία γίνονταν χωρίς κάποια στήριξη, στη περίπτωση που η τιμή του κυμαινόταν από 3 έως 10, η κοπή γινόταν με τη βοήθεια του κεντροφορέα (σχήμα 3.10).

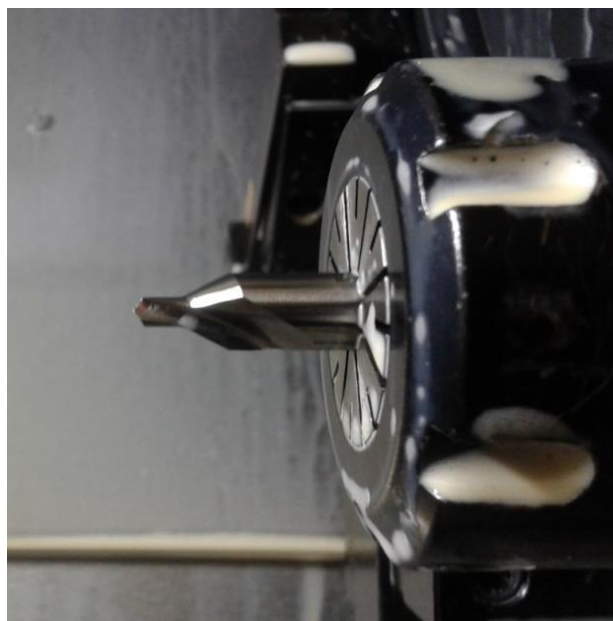


Σχήμα 3.10: Στιγμιότυπο κατά τη κατεργασία με χρήση του κεντροφορέα

Η χρήση του κεντροφορέα απαιτεί προετοιμασία του δοκιμίου με κοπτικό εργαλείο (σχήμα 3.11) ειδικό για τη διάνοιξη οπών τοποθέτησης του. Πρώτα όμως έγινε η κατεργασία του προσώπου της ράβδου για να υπάρχει αναφορά για τις μετρήσεις και αποφυγή ταλαντώσεων στο κεντροτρύπανο κατά την επαφή του με το ακατέργαστο πρόσωπο. Η κατεργασία του προσώπου πραγματοποιήθηκε με χαμηλή ταχύτητα πρόωσης, χαμηλές στροφές της ατράκτου και μικρό βάθος κοπής. Έτσι η συγκεκριμένη κατεργασία έγινε υπό σταθερή ταχύτητα και πρόωση 40m/min και 0.1mm/rev αντίστοιχα, με το μέγιστο αριθμό περιστροφών της ατράκτου να περιορίζεται από το κώδικα στις 1000.

Έπειτα γινόταν αλλαγή κοπτικού και σε ενεργή θέση έμπαινε το κεντροτρύπανο που έκανε μια κωνική οπή 60 μοιρών κατάλληλη για τη τοποθέτηση του κεντροφορέα. Η κατεργασία έγινε με ταχύτητα 60m/min και πρόωση 0.07mm/rev, 600 στροφές το λεπτό σύμφωνα πάντα με τις υποδείξεις των κατασκευαστών όσον αφορά τη χρήση κεντροτρυπανού για κράματα αλουμινίου.

Αν από το αρχικό προγραμματισμό των πειραμάτων είχε κριθεί αναγκαία η χρήση του κεντροφορέα, μετά τη διάνοιξη της οπής γινόταν ένα αρχικό πέρασμα στη ράβδο για μήκος περίπου 40mm μέχρι την ελάχιστη διαμέτρου που θα έφτανε το πείραμα. Έτσι ώστε κατά τη διεξαγωγή του να μην υπάρχει κίνδυνος το εργαλειοφορείο να συγκρουστεί με το κεντροφορέα. Στις περιπτώσεις αυτές ο χρόνος κατεργασίας τους συνυπολογίστηκε και αυτός στον συνολικό χρόνο κατεργασίας αφού γινόταν υπό τις συνθήκες του κάθε πειράματος. Έπειτα η ράβδος ήταν έτοιμη για την ασφαλή διεξαγωγή των πειραμάτων.



Σχήμα 3.11: Κεντροτρύπανο 60° κατασκευασμένο από ταχυχάλυβα (HSS)

Πείραμα 1°

Για το πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια ράβδος μήκους 500mm και διαμέτρου 50mm χωρίς να κατεργαστεί σε όλο της το μήκος. Τοποθετήθηκε έτσι ώστε ο λόγος μήκους διαμέτρου να μην υπερβαίνει το 3 για να αποφευχθεί η χρήση κεντροφόρεα. Για το τελευταίο πέρασμα υπολογίστηκε πρώτα ο χρόνος κατεργασίας του για να συμπληρωθεί ο συνολικός χρόνος των 30 λεπτών. Έπειτα υπολογιστήκαν οι απαιτούμενες στροφές που θα κάνει το δοκίμιο μέχρι να ολοκληρωθεί ο χρόνος και από αυτές πολλαπλασιάζοντας με τη πρόωση υπολογίστηκε το μήκος του τελευταίου περάσματος.

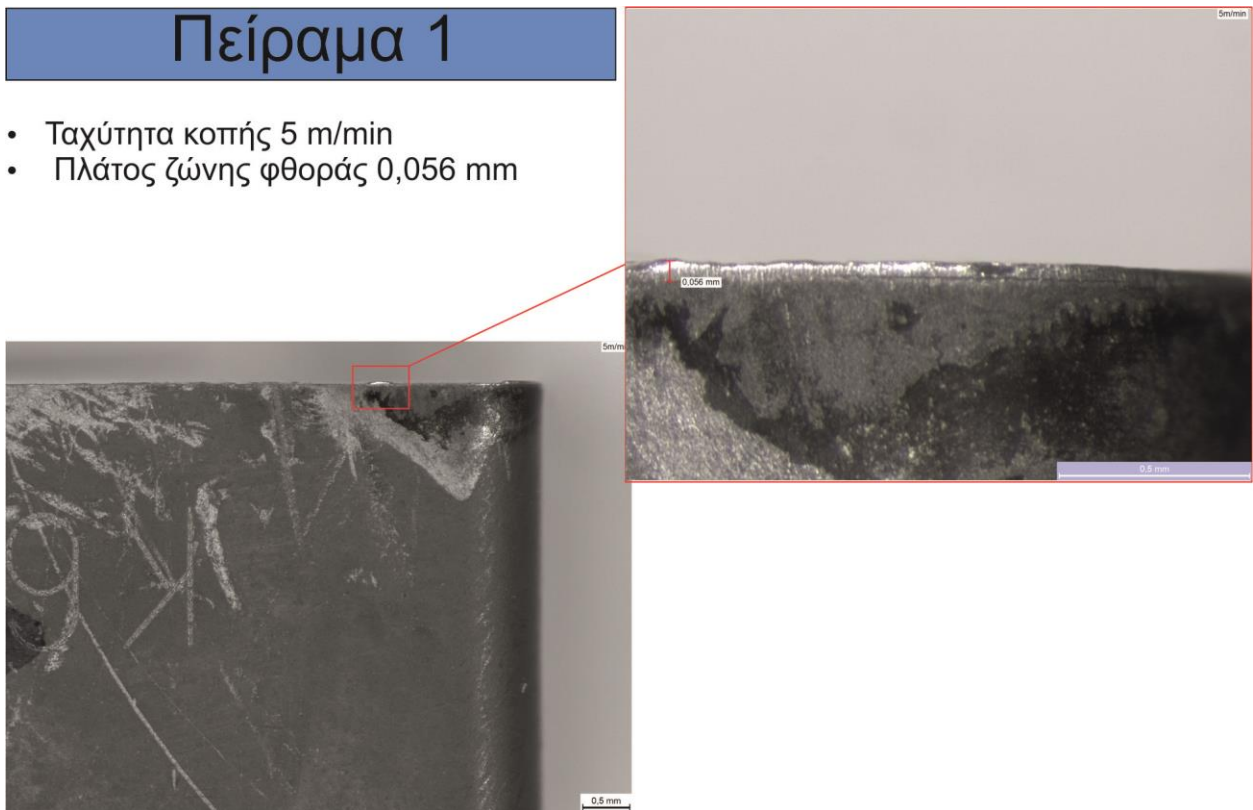
Ταχύτητα Κοπής(V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
5m/min	46mm	35rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	10,1min
5m/min	42mm	38rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	9,2min
5m/min	38mm	42rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	8,3min
5m/min	34mm	47rpm	35mm	0,315mm/rev	111 rev	2,4min

Πινάκας 3.7: Στοιχεία πειράματος για $V_c=5\text{m/min}$

Κατά την εκτέλεση του πρώτου πειράματος ο ήχος ήταν σχετικά έντονος αφού στην άκρη του δοκίμιο έχει τη λιγότερη στήριξη και κατά τη σύγκρουση του με το κοπτικό ταλαντώνεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αυτές οι ακουστικές εκπομπές. Μετά τα πρώτα 10mm ο ήχος δεν ήταν έντονος αφού το δοκίμιο είχε περισσότερη στήριξη. Επίσης όσον αφορά το απόβλιπτο ήταν συνεχές και ελικοειδή τύπου ροδέλα. Παρακάτω παρουσιάζεται το πλακίδιο μετά τα περάσματα.

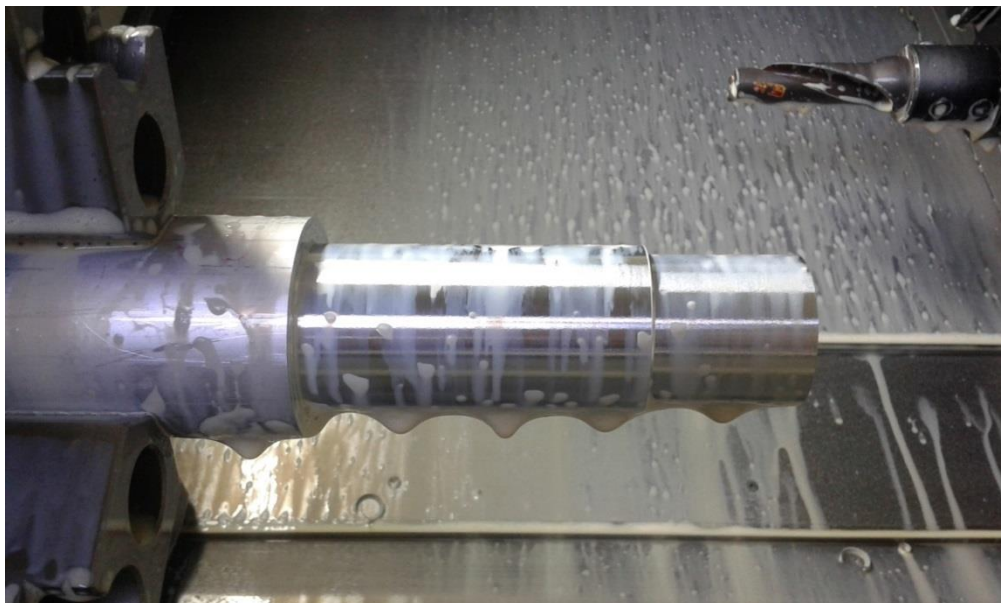
Πείραμα 1

- Ταχύτητα κοπής 5 m/min
- Πλάτος ζώνης φθοράς 0,056 mm



Σχήμα 3.12: Πλακίδιο 1^{ου} πειράματος

Η φθορά που μετρήθηκε από το λογισμικό Leica Application Software V4.1 στην ελεύθερη επιφάνεια είναι 0,056 mm με ρυθμό αφαίρεσης υλικού 3150 mm³ ανά λεπτό. Το μέγεθος της φθοράς που μετρήθηκε είναι σχετικά μικρό και οφείλεται στους μηχανισμούς των συναφειακών μικροσυγκολλήσεων και αποξέσεων λόγω της τριβής, που ενεργοποιούνται στις σχετικά χαμηλές ταχύτητες κοπής χωρίς να ενεργοποιείται παράλληλα ο μηχανισμός των μικρορηγματώσεων λόγω κόπωσης. Και η συμβολή των τριβοχημικών αντιδράσεων είναι αμελητέα αφού η σχετική ταχύτητα ολίσθησης των επιφανειών είναι μικρή.



Σχήμα 3.13: Δοκίμιο 1^{ου} πειράματος μετά το τέλος των περασμάτων

Πείραμα 2^ο

Η ράβδος του προηγούμενου πειράματος οντάς ακατέργαστη από τη μια πλευρά χρησιμοποιήθηκε για το δεύτερο πείραμα. Τοποθετήθηκε σε τέτοιο σημείο ώστε να μην είναι αναγκαία η χρήση κεντροφορέα. Ο χρόνος κατεργασίας μετά τη κατεργασία της πρώτης ράβδου έφτασε στα 26,1 λεπτά οπότε χρησιμοποιήθηκε μια δεύτερη μήκους 70 mm και διαμέτρου 34 mm. Ο ήχος στη πρώτη ράβδο ήταν φυσιολογικός μέχρι η διάμετρος να φτάσει στα 30mm από εκεί και έπειτα εξαιτίας του μεγάλου λόγου μήκους, διαμέτρου ήταν έντονος. Έτσι εξαιτίας των ακτινικών δυνάμεων που ασκούνται στο δοκίμιο δημιουργούνται ταλαντώσεις και παράγουν τον έντονο ήχο που παρατηρήθηκε στο πείραμα αυτό. Ενώ στη δεύτερη ήταν απόλυτα φυσιολογικός λόγω του μικρού μήκους με συνέπεια τη καλύτερη στήριξη του από τον σφιγκτήρα. Το απόβλιπτο και στα δυο τεμάχια ήταν συνεχές με την ίδια μορφή του πρώτου πειράματος.

Ταχύτητα Κοπής(V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
10m/min	46mm	69rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	5min
10m/min	42mm	76rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	4,6min
10m/min	38mm	84rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	4,2min
10m/min	34mm	94rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	3,7min
10m/min	30mm	106rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	3,3min
10m/min	26mm	122rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,9min
10m/min	22mm	145rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,4min

Πινάκας 3.8: Στοιχεία πειράματος για $V_c=10\text{m/min}$, 1^ο τεμάχιο

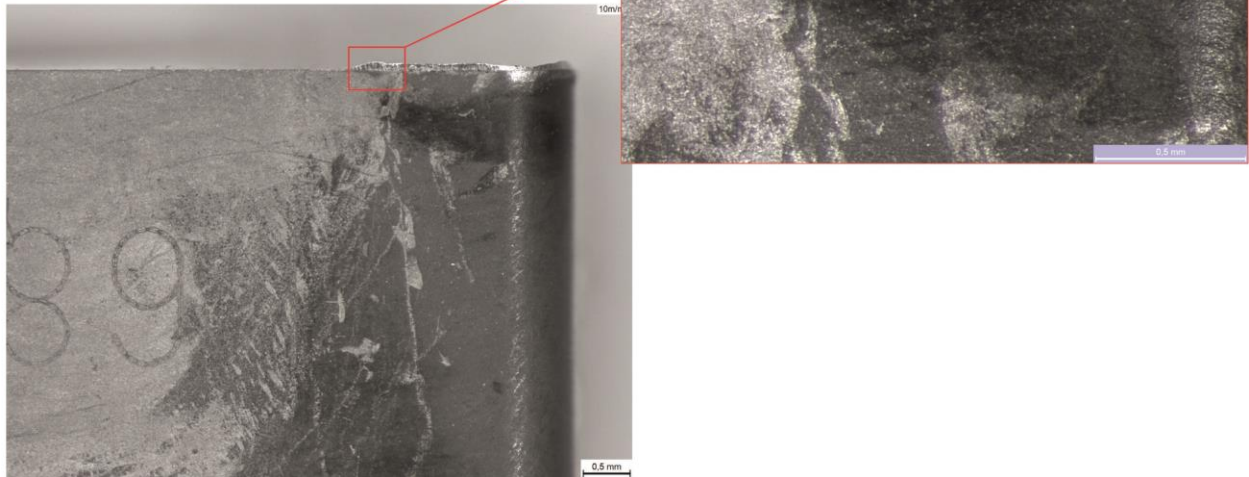
Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
10m/min	30mm	106rpm	50mm	0,315mm/rev	159 rev	1,5min
10m/min	26mm	122rpm	50mm	0,315mm/rev	159 rev	1,3min
10m/min	22mm	145rpm	50mm	0,315mm/rev	159 rev	1,1min

Πινάκας 3.9: Στοιχεία πειράματος για $V_c=10\text{m/min}$, 2^ο τεμάχιο

Στο σχήμα 3.14 φαίνεται το πλακίδιο του 2^{ου} πειράματος με το πλάτος ζώνης φθοράς για τα 10m/min να υπολογίζεται στα 0,137mm, μέγεθος αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του πρώτου πειράματος αλλά με διπλάσιο ρυθμό αφαίρεσης υλικού (6300mm³/min). Η εντονότερη φθορά είναι αποτέλεσμα του ότι το κοπτικό κατεργάστηκε διπλασία ποσότητα υλικού λόγω του διπλασιασμού της ταχύτητας κοπής οπότε τα φαινόμενα της τριβής και των μικροσυγκολλήσεων εντάθηκαν. Η παρουσία της ψευδόκοπης είναι σημαντική όπως και στο πείραμα των 5m/min αλλά λόγω του μεγαλύτερου ρυθμού αφαίρεσης υλικού οι συνέπειες της είναι εντονότερες στο παρών πείραμα.

Πείραμα 2

- Ταχύτητα κοπής 10 m/min
- Πλάτος ζώνης φθοράς 0,137 mm



Σχήμα 3.14: Πλακίδιο 2^{ου} πειράματος

Πείραμα 3^ο

Για το τρίτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια ράβδος μήκους 500mm με διάμετρο 50mm. Η ράβδος κατεργάστηκε και από τις δυο πλευρές με τη βοήθεια του κεντροφορέα διότι όταν η διάμετρος φτάνει τα 30mm όπως παρατηρήθηκε στο 2^ο πείραμα λόγω αύξησης του λόγου μήκους, διαμέτρου δημιουργείται ταλάντωση του τεμαχίου με τις αντίστοιχες συνέπειες στη φθορά του κοπτικού. Έτσι με τη χρήση κεντροφορέα αποφεύχθηκε το φαινόμενο αυτό. Τέλος όσον αφορά το απόβλιπτο ήταν και σε αυτή τη περίπτωση συνεχές.

Ταχύτητα Κοπής(V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
20m/min	46mm	138rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,5min
20m/min	42mm	152rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,3min
20m/min	38mm	168rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,1min
20m/min	34mm	187rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	1,9min
20m/min	30mm	212rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	1,7min
20m/min	26mm	245rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	1,4min

Πινάκας 3.10: Στοιχεία πειράματος για $V_c=20\text{m/min}$, 1^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
20m/min	46mm	138rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,5min
20m/min	42mm	152rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,3min
20m/min	38mm	168rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	2,1min
20m/min	34mm	187rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	1,9min
20m/min	30mm	212rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	1,7min

Πινάκας 3.11: Στοιχεία πειράματος για $V_c=20\text{m/min}$, 2^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
20m/min	46mm	138rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,9min
20m/min	42mm	152rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,8min
20m/min	38mm	168rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,8min
20m/min	34mm	187rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,7min
20m/min	30mm	212rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,6min
20m/min	26mm	245rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,5min

Πινάκας 3.12: Στοιχεία πειράματος για $V_c=20\text{m/min}$, 3^ο τεμάχιο

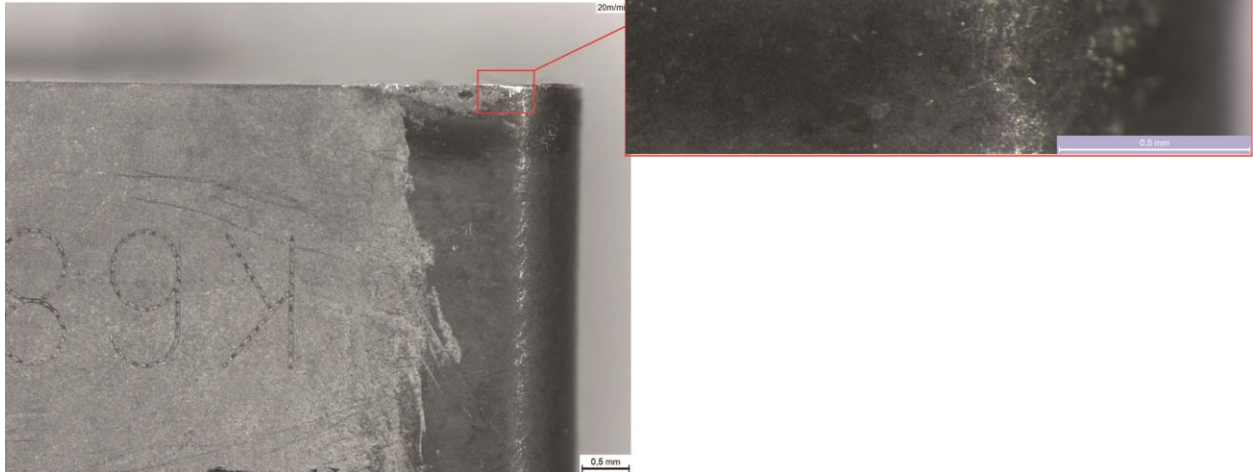
Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
20m/min	46mm	138rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,9min
20m/min	42mm	152rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,8min
20m/min	38mm	168rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,8min
20m/min	34mm	187rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,7min
20m/min	30mm	212rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,6min
20m/min	26mm	245rpm	40mm	0,315mm/rev	127rev	0,5min

Πινάκας 3.12: Στοιχεία πειράματος για $V_c=20\text{m/min}$, 3^ο τεμάχιο

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.15 το πλάτος ζώνης φθοράς μειώθηκε καθόσον μετρήθηκε στα 0.099mm. Με την αύξηση της ταχύτητας μειώνεται ο ελάχιστος χρόνος επαφής των συνεργαζομένων επιφανειών και δυσκολεύεται η δημιουργία μικροσυγκολλήσεων και κατ' επέκταση το μέγεθος της ψευδόκοπης. Οπότε είναι αναμενόμενο το πλάτος ζώνης φθοράς να μειωθεί αφού κατά τη κατεργασία με τη ταχύτητα των 20mm/min δεν δημιουργούνται οι δυνάμεις και οι θερμοκρασίες εκείνες που ενεργοποιούν τις τριβοχημικές αντιδράσεις ή τους μηχανισμούς κόπωσης για να εντείνουν τη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας.

Πείραμα 3

- Ταχύτητα κοπής 20 m/min
- Πλάτος ζώνης φθοράς 0,099 mm



Σχήμα 3.15: Πλακίδιο 3^{ου} πειράματος

Πείραμα 4^ο

Για το πείραμα των 30m/min χρησιμοποιήθηκε μια ράβδος διαμέτρου 50mm και μήκους 500mm όπου στην αρχή έγινε το πέρασμα ασφάλειας για τη χρήση του κεντροφόρα. Η ράβδος τοποθετήθηκε έτσι ώστε κατά τη κατεργασία να χρησιμοποιηθεί το μέγιστο δυνατό μήκος βάση των δυνατοτήτων του κέντρου κατεργασίας και ταυτόχρονα ο λόγος μήκους διαμέτρου να μην ξεπερνά το ανώτατο όριο των 10 μονάδων . Πρώτα έγινε το πέρασμα των 40mm και από τις δυο πλευρές μετά έγινε η διάνοιξη της οπής έπειτα τοποθετήθηκε έτσι ώστε το κάθε πέρασμα να έχει μήκος 210mm. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ο ήχος ήταν φυσιολογικός αλλά όταν το κοπτικό έφτανε περίπου στη μέση της ράβδου λόγω της ακτινικής δύναμης και της πίεσης του κεντροφορέα ο ήχος ήταν έντονος για περίπου 30mm. Η επιφάνεια της κατεργασμένης ράβδου ήταν σχετικά λεία εκτός από τη περιοχή που ο ήχος ήταν έντονος λόγω της ταλάντωσης που δυσχεραίνει τη νεοκατεργασμένη επιφάνεια.

Ταχύτητα Κοπής (V _c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(η)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
30m/min	46mm	208rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	3,2min
30m/min	42mm	227rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,9min
30m/min	38mm	251rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,7min
30m/min	34mm	281rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,4min
30m/min	30mm	318rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,1min
30m/min	26mm	367rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	1,8min

Πινάκας 3.12: Στοιχεία πειράματος για V_c=30m/min, 1^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
30m/min	46mm	208rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,6min
30m/min	42mm	227rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,56min
30m/min	38mm	251rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,5min
30m/min	34mm	281rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,45min
30m/min	30mm	318rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,4min
30m/min	26mm	367rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,35min
30m/min	22mm	434rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,3min

Πινάκας 3.13: Στοιχεία πειράματος για $V_c=30\text{m/min}$, 1^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
30m/min	46mm	208rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,6min
30m/min	42mm	227rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,56min
30m/min	38mm	251rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,5min
30m/min	34mm	281rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,45min
30m/min	30mm	318rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,4min
30m/min	26mm	367rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,35min
30m/min	22mm	434rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,3min

Πινάκας 3.14: Στοιχεία πειράματος για $V_c=30\text{m/min}$, 2^ο τεμάχιο

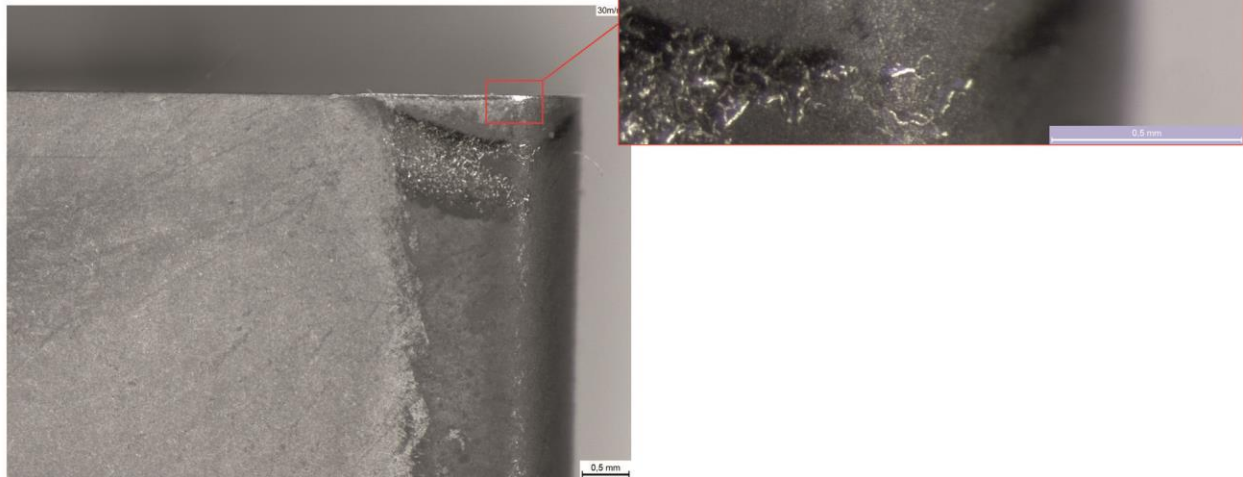
Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
30m/min	46mm	208rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	3,2min
30m/min	42mm	227rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,9min
30m/min	38mm	251rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,7min
30m/min	34mm	281rpm	210mm	0,315mm/rev	667 rev	2,4min

Πινάκας 3.15: Στοιχεία πειράματος για $V_c=30\text{m/min}$, 2^ο τεμάχιο

Το πλάτος ζώνης φθοράς μετρήθηκε στα 0.059mm (σχήμα 3.16) αποτέλεσμα που δείχνει ότι η αύξηση κατά 10m/min ευνόησε τη κατεργασία. Το φαινόμενο της ψευδόκοψης από την αύξηση της ταχύτητας μειώθηκε ακόμα περισσότερο σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα αφού όπως προαναφέρθηκε ο χρόνος επαφής των επιφανειών μειώνεται. Η αύξηση όμως της ταχύτητας δημιούργησε υψηλότερες θερμοκρασίες αφού παρατηρηθήκαν εντονότερες οι ζώνες οξείδωσης στην ελεύθερη επιφάνεια σε σχέση με αυτές του 3^{ου} πειράματος.

Πείραμα 4

- Ταχύτητα κοπής 30 m/min
- Πλάτος ζώνης φθοράς 0,059 mm



Σχήμα 3.16: Πλακίδιο 4^{ου} πειράματος

Πείραμα 5^ο

Για το τελευταίο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δυο ράβδοι αλουμινίου μήκους 500mm και διαμέτρου 50mm, έγιναν οι απαραίτητες κινήσεις όπως και στα προηγούμενα πειράματα για τη προετοιμασία των δοκιμίων. Ο ήχος όπως και στο 4^ο πείραμα ήταν φυσιολογικός και εντεινόνταν στη μέση περίπου του δοκιμίου, η επιφάνεια μετά το πείραμα ήταν σχετικά λεία και το απόβλητο ήταν συνεχές.

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρώση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
50m/min	46mm	346rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,4min
50m/min	42mm	379rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,35min
50m/min	38mm	419rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,3min
50m/min	34mm	468rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,25min
50m/min	30mm	531rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,25min
50m/min	26mm	612rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,2min
50m/min	22mm	724rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,15min

Πινάκας 3.16: Στοιχεία πειράματος για $V_c=50\text{m/min}$, 1^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
50m/min	46mm	346rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	2min
50m/min	42mm	379rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,8min
50m/min	38mm	419rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,7min
50m/min	34mm	468rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,5min
50m/min	30mm	531rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,3min
50m/min	26mm	612rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,1min

Πινάκας 3.17: Στοιχεία πειράματος για $V_c=50\text{m/min}$, 1^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
50m/min	46mm	346rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,4min
50m/min	42mm	379rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,35min
50m/min	38mm	419rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,3min
50m/min	34mm	468rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,25min
50m/min	30mm	531rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,25min
50m/min	26mm	612rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,2min
50m/min	22mm	724rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,15min

Πινάκας 3.18: Στοιχεία πειράματος για $V_c=50\text{m/min}$, 2^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
50m/min	46mm	346rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	2min
50m/min	42mm	379rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,8min
50m/min	38mm	419rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,7min
50m/min	34mm	468rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,5min
50m/min	30mm	531rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,3min
50m/min	26mm	612rpm	220mm	0,315mm/rev	698 rev	1,1min

Πινάκας 3.19: Στοιχεία πειράματος για $V_c=50\text{m/min}$, 2^ο τεμάχιο

Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
50m/min	46mm	346rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	1min
50m/min	42mm	379rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	0,9min
50m/min	38mm	419rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	0,8min
50m/min	34mm	468rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	0,7min
50m/min	30mm	531rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	0,65min
50m/min	26mm	612rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	0,6min
50m/min	22mm	724rpm	110mm	0,315mm/rev	349 rev	0,5min

Πινάκας 3.20: Στοιχεία πειράματος για $V_c=50\text{m/min}$, 3^ο τεμάχιο

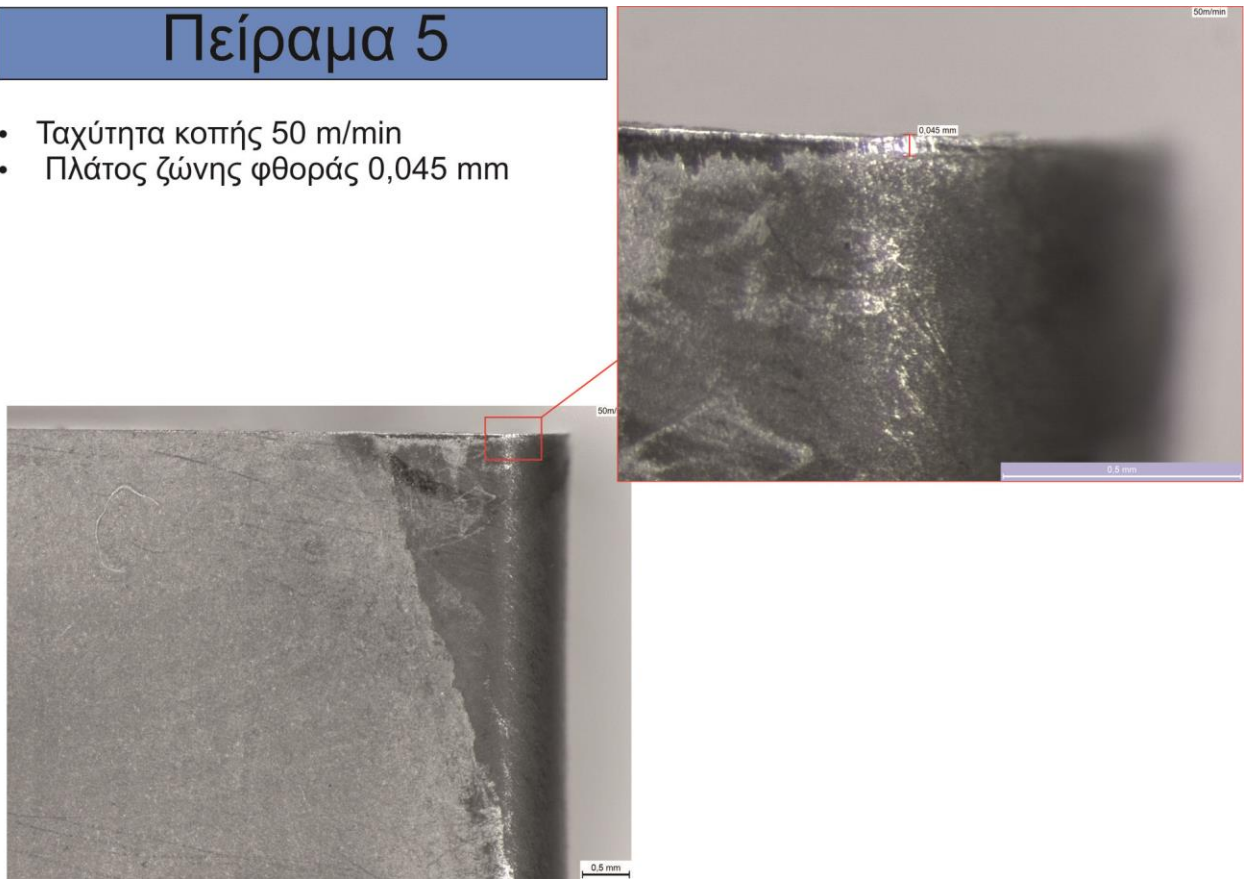
Ταχύτητα Κοπής (V_c)	Διάμετρος (d)	Στροφές(n)	Μήκος (L)	Πρόωση Κοπής(f)	Απαιτούμενες Στροφές	Χρόνος Κοπής(t)
50m/min	46mm	346rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,4min
50m/min	42mm	379rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,35min
50m/min	38mm	419rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,3min
50m/min	34mm	468rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,25min
50m/min	30mm	531rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,25min
50m/min	26mm	612rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,2min
50m/min	22mm	724rpm	40mm	0,315mm/rev	127 rev	0,15min

Πινάκας 3.21: Στοιχεία πειράματος για $V_c=50\text{m/min}$, 3^ο τεμάχιο

Το πλάτος ζώνης φθοράς για τη ταχύτητα αυτή είναι 0,045mm (σχήμα 3.17), η μικρότερη από όλες τις προηγούμενες μετρήσεις. Η αύξηση της ταχύτητας και σε αυτή τη περίπτωση λειτούργησε ευνοϊκά για τη κοπή αφού κατεργάστηκε περισσότερο υλικό έχοντας το μικρότερο πλάτος ζώνης φθοράς. Η ταχύτητα της συγκεκριμένης κατεργασίας μείωσε κατά πολύ τον χρόνο επαφής τεμαχίου, κοπτικού με συνέπεια οι συναφειακές μικροσυγκολλήσεις να περιοριστούν κατά πολύ σε σχέση με τα άλλα πειράματα. Το φαινόμενο της ψευδόκοπης περιορίζεται και αυτό με τη σειρά του και έτσι δημιουργείται φθορά στο πλακίδιο από τη τριβή κατά βάση χωρίς να φαίνεται από το αποτέλεσμα να συμβάλουν οι μηχανισμοί της διάχυσης και της κόπωσης.

Πείραμα 5

- Ταχύτητα κοπής 50 m/min
- Πλάτος ζώνης φθοράς 0,045 mm



Σχήμα 3.17: Πλακίδιο 5^{ου} πειράματος

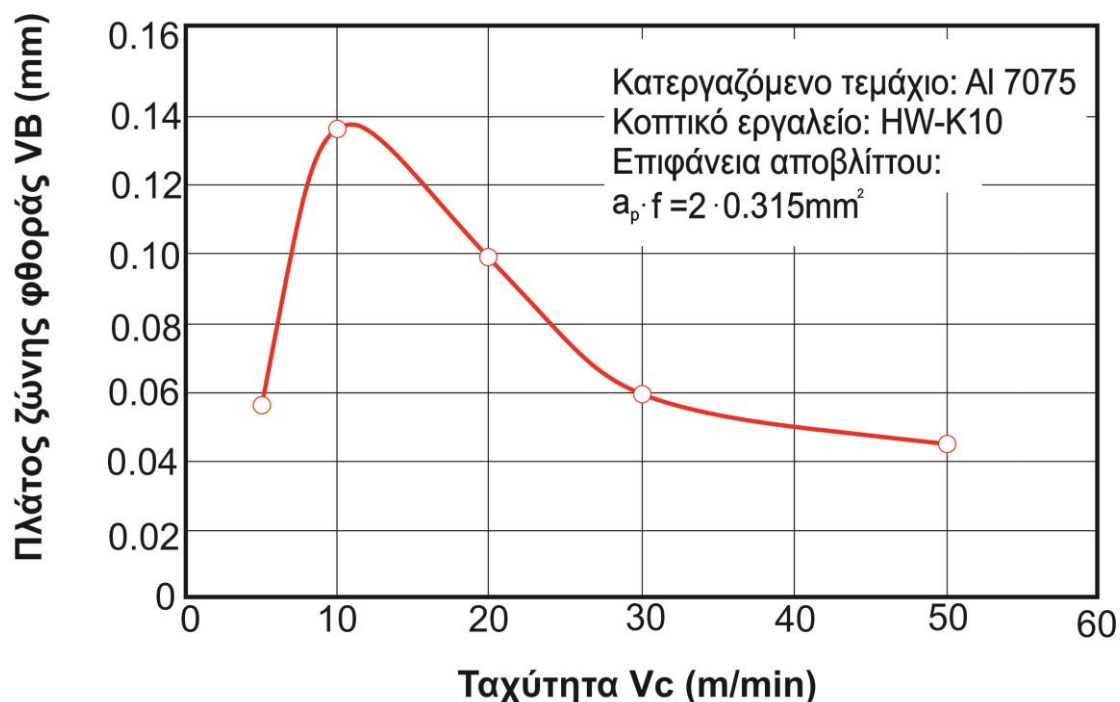
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η καμπύλη του πλάτους ζώνης φθοράς καθώς αυξάνεται η ταχύτητα αναμένετε να μην είναι γραμμική, όπως και αυτή του προτύπου πειράματος. Αφού παρότι που η αύξηση της δημιουργεί περισσότερες καταπονήσεις στο κοπτικό υπάρχει ένα σημείο όπου για κάποιο εύρος ταχυτήτων ο μηχανισμός των μικροσυγκολλήσεων δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί και έτσι παρουσιάζεται μείωση του πλάτους ζώνης φθοράς λόγω απουσίας ψευδόκοψης. Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας όμως δεν συνεχίζει να ευνοεί τη κοπή και παρουσιάζονται μεγαλύτερα πλάτη ζώνης φθοράς λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, δυνάμεων και καταπονήσεων.

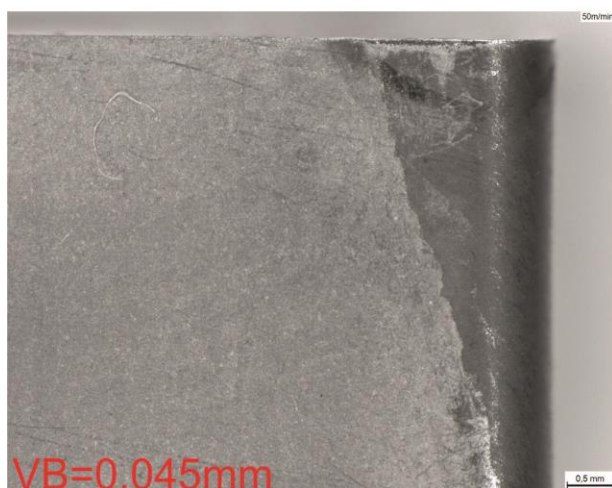
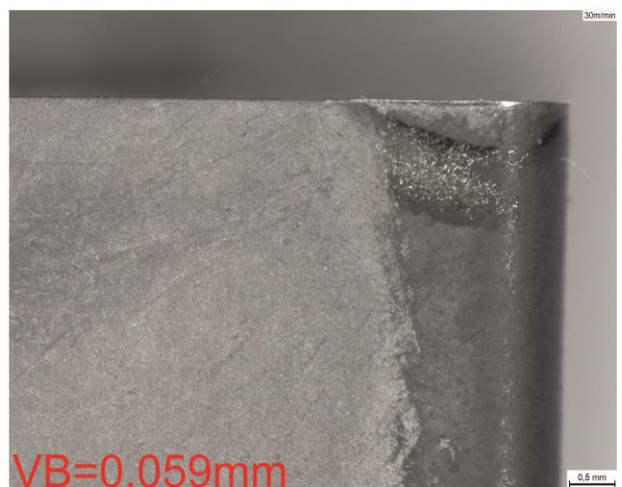
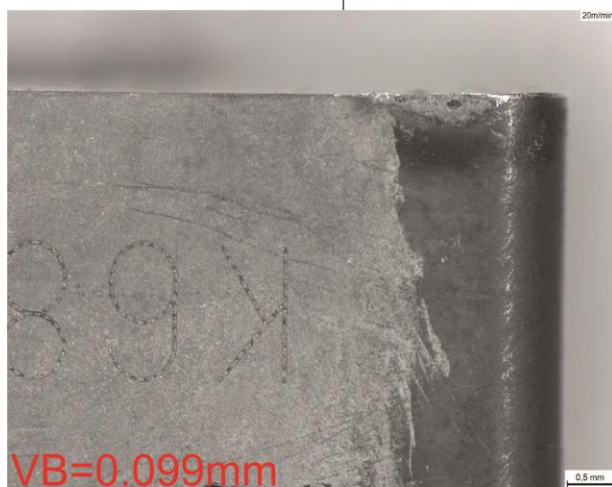
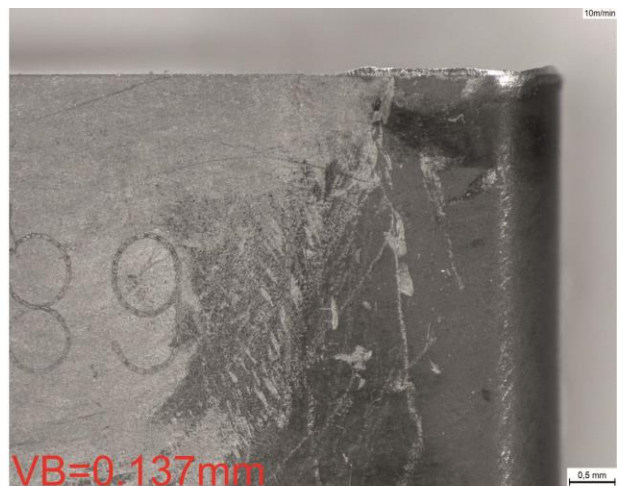
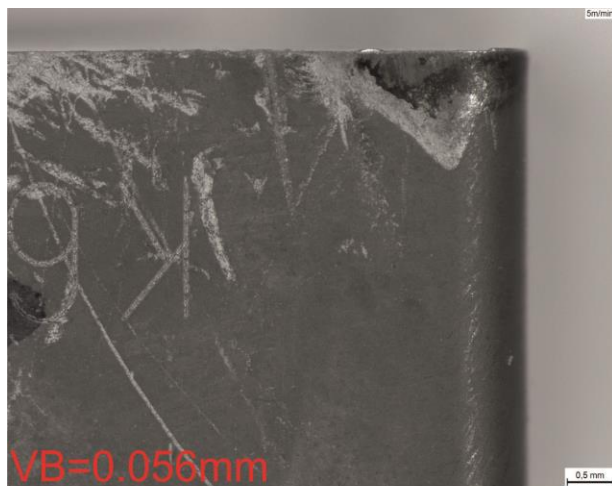
Ταχύτητα (m/min)	κοπής	Πλάτος φθοράς (mm)	ζώνης
5		0.056	
10		0.137	
20		0.099	
30		0.059	
50		0.045	

Πινάκας 4.1: Αποτελέσματα μετρήσεων πλάτους ζώνης φθοράς

Από τα αποτελέσματα των πέντε πειραμάτων προκύπτει η καμπύλη του σχήματος 4.1, καμπύλη που επιβεβαιώνει το θεωρητικό υπόβαθρο και το πρότυπο πείραμα. Επιβεβαιώθηκε η μη γραμμικότητα της καμπύλης του πλάτους ζώνης φθοράς και βρέθηκε το μέγιστο πλάτος ζώνης φθοράς εξαιτίας του φαινόμενου της ψευδόκοψης στο πείραμα των 10 m/min. Μετέπειτα βρέθηκε, για το εύρος των ταχυτήτων που εξετάστηκε, το σημείο σχεδόν πλήρης αποφυγής του, κατά τη κατεργασία των 50 m/min. Από το σημείο αυτό και μετά αναμένετε η αύξηση του VB λόγω έντονης τριβής, οξείδωσης, διάχυσης στερεάς κατάστασης για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 800°C αλλά και κόπωσης των συνεργαζομένων επιφανειών.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη φθοράς ελεύθερης επιφάνειας



Συνθήκες κοπής

$f=0.315 \text{ mm/rev}$

$a=2\text{mm}$

$t=30\text{min}$

Σχήμα 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα φθοράς πλάτους ζώνης φθοράς των κοπτικών εργαλείων

Η ταχύτητα κοπής είναι πολύ καθοριστικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου και καθορίζει τη παραγωγικότητα της εκάστοτε κατεργασίας. Οι μελέτες πάνω στη μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού εξετάζουν με ιδιαίτερο ενδιαφέρον τις επιδράσεις της ταχύτητας και προσπαθούν να προτείνουν κάποιες ιδανικές τιμές για αυτήν, σε σχέση με τα υλικά, το είδος της κατεργασίας και τη γεωμετρία του κοπτικού, ώστε να συνδυάζεται υψηλή παραγωγικότητα με χαμηλό πλάτος ζώνης φθοράς. Στη μελέτη που έγινε πάνω στη τόννευση κράματος αλουμινίου με καρβίδιο βολφραμίου κοβαλτίου επιβεβαιώθηκαν τα πρότυπα πειράματα και διαπιστώθηκε ότι από τις ταχύτητες που δοκιμάστηκαν ότι η βέλτιστη είναι αυτή των 50m/min καθόσον έχει τον μεγαλύτερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού (Πινάκας 4.2) και το μικρότερο πλάτος ζώνης φθοράς. Οπότε για τη διαδικασία της εκχόνδρισης του Al 7075 με το καρβίδιο CNMA120408 προτείνεται η ταχύτητα των 50m/min σαν τη πιο παραγωγική και κατάλληλη για εξάλειψη του φαινομένου της ψευδόκοψης.

Ταχύτητα (m/min)	κοπής	MRR(mm ³ /min)
5		3150
10		6300
20		12600
30		18900
50		31500

Πινάκας 4.2: Ρυθμός αφαίρεσης υλικού

Για της ταχύτητες μετά τα 50m/min αναμένετε να αυξηθεί το πλάτος ζώνης φθοράς λόγω των μεγαλύτερων θερμοκρασιών και δυνάμεων κοπής που θα δημιουργηθούν και θα οδηγήσουν στη διευκόλυνση της έναρξης των τριβοχημικών αντιδράσεων αλλά και υπέρβαση των οριακών τάσεων στα σημεία επαφής με αποτέλεσμα δημιουργία μικρορωγμών και σε κάποιες περιπτώσεις θραύσης.

5. ΣΥΝΟΨΗ

Συμπερασματικά λοιπόν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων εντοπίστηκε το μέγιστο πλάτος ζώνης φθοράς και πιθανόν το ελάχιστο στις σχετικά χαμηλές ταχύτητες κοπής, λόγω της ύπαρξης ή μη της ψευδόκοψης. Για το κοπτικό εργαλείο βολφραμίου κοβαλτίου που χρησιμοποιήθηκε στη κατεργασία κράματος αλουμινίου Al 7075, με τη συγκεκριμένη γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, η μέγιστη φθορά μετρήθηκε στη ταχύτητα των 10m/min. Με τη φθορά των 0,137mm της ελεύθερης επιφάνειας να οφείλεται κατά κύριο λόγο στη τριβή των συνεργαζομένων επιφανειών αλλά και στην έντονη παρουσία της ψευδόκοψης, φαινόμενου που παρατηρείται έντονα στις χαμηλές ταχύτητες κοπής. Η σταδιακή αύξηση της ταχύτητας εμποδίζει την ανάπτυξη του φαινόμενου αυτού αλλά παράγει υψηλότερες θερμοκρασίες και δυνάμεις που σταδιακά ενεργοποιούν και άλλους μηχανισμούς φθοράς. Στο παρόν πείραμα όταν η ταχύτητα κοπή έφτασε τα 50 m/min, με συνακόλουθη αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού παρατηρήθηκε ότι η φθορά ελεύθερης επιφάνειας είχε το μικρότερο πλάτος. Έτσι στο πείραμα των 50m/min μετρήθηκε το μικρότερο πλάτος οπου έφτασε τα 0.045mm. Γεγονός που οφείλεται στη σχεδόν πλήρη αποφυγή των συναφειακών μικροσυγκολλήσεων στη κόψη με ταυτόχρονη υποχώρηση του φαινόμενου της ψευδόκοψης.

Η μελέτη του πλάτους ζώνης φθοράς στη παρούσα εργασία έγινε μέσω του λογισμικού Leica Application Software V4.1, όπου υπό κατάλληλο φωτισμό από το δακτύλιο φωτισμού του στερεομικροσκοπίου, επιτυγχάνεται αντίθεση μεταξύ φθαρμένης και αφθαρτης επιφάνειας, ώστε να πραγματοποιηθεί η λήψη της επιθυμητής εικόνας. Έτσι, μέσω του λογισμικού μετρήθηκε εμπειρικά το πλάτος ζώνης φθοράς, με αναπόφευκτο σφάλμα στις μετρήσεις, για αυτό προτείνεται σε μελλοντικές έρευνες πάνω στη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας η χρήση ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης μέσω της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Παρ' όλο που οι εμπειρικές μετρήσεις θα αποκλίνουν από αυτές του υπολογιστικού συστήματος σίγουρα θα αποτυπώσουν την ίδια πορεία της φθοράς σε σχέση με την αύξηση της ταχύτητας.

Έπειτα, εξίσου σημαντική είναι η διερεύνηση του βαθμού επιρροής των υπόλοιπων συνθηκών κοπής στη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας δηλαδή της πρόωσης, του βάθους κοπής και της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου. Μια έρευνα πάνω στο πλάτος ζώνης φθοράς και την επίδραση όλων των συνθηκών κοπής και όχι μόνο της ταχύτητας κοπής, θα έδινε πληρέστερη εικόνα για την ανάπτυξή της. Η έρευνα της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να επεκταθεί και αφού πρώτα μελετηθεί το πλάτος ζώνης φθοράς και για ταχύτητες άνω των 50 m/min να βρεθεί η βέλτιστη. Κρατώντας τη βέλτιστη ταχύτητα σταθερή να γίνει διερεύνηση για διαφορές τιμές ταχυτήτων πρόωσης, αφού επηρεάζει το πάχος αποβλίπτου το οποίο όπως φάνηκε στο σχήμα 2.3 συμβάλει σημαντικά στη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας. Ακόμα προτείνεται έλεγχος της πορείας της για διάφορα βάθη κοπής, αφού επιδρά σημαντικά στις δυνάμεις κοπής. Σημαντική διαφορά στο πλάτος ζώνης φθοράς θα υπήρχε και με την αύξηση της γωνίας ελευθερίας αφού από έρευνες φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη φθορά στην επιφάνεια ελευθερίας (σχήμα 2.3) με τα πειράματα για διαφορές γωνίες ελευθερίας υπό σταθερή ταχύτητα να δείχνουν ότι στο εύρος 6° έως 12° μοιρών το VB κινείται σε χαμηλότερα επίπεδα. Συμπερασματικά για καλύτερα αποτελέσματα προτείνεται η επανάληψη του πειράματος με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων.
- Μικρότερη ταχύτητα πρόωσης για μικρότερο πάχος αποβλίπτου.
- Θετική γωνία αποβλίπτου.
- Γωνία ελευθερίας από 6° έως 12°.
- Μικρότερο βάθος κοπής.
- Χρήση κοπτικού με επικάλυψη.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. www.ecoline.dmgmori.com
2. Κων/νος-Διονύσιος Ε. Μπουζάκης., << Μηχανική και Τεχνολογία Μηχανουργικών Μορφοποιήσεων με Αφαίρεση Υλικού >>, Εκδόσεις ΖΗΤΗ 2010
3. William D. Callister., << Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών >>, Εκδόσεις Τζιολα 2008
4. www.kennametal.com
5. ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ Θ. ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ., << Μηχανουργική Τεχνολογία, Τόμος Β': Κατεργασίες κοπής >>, Εκδόσεις Τζιολα 2016
6. A. Manna, B. Bhattacharayya, A study in machinability of Al/Sic-MMC, Journal of materials Processing Technology 140 (2003) 711-716
7. A. Jawaid, C.H Che-Haron, A. Abdullah, Tool wear characteristic in turning of titanium alloy Ti-6246, Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) 329-334
8. N.B.Doddapattar, N Lakshmana swamy, An optimization of machinability of alluminium alloy 7075 and cutting tool parameters by using Taguchi technique, Journal Impact Factor (2012): 3.8071