

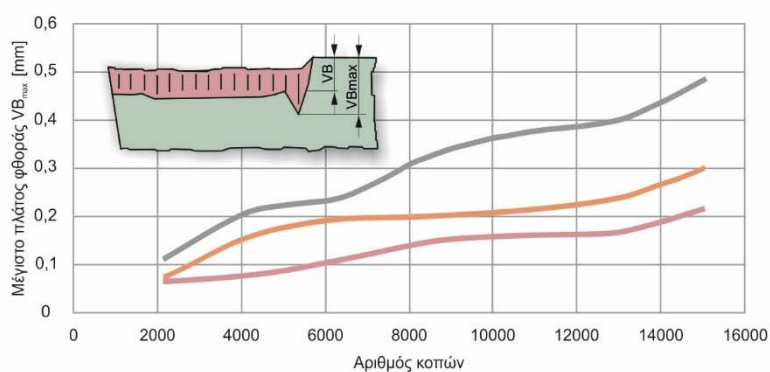


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑ Ck45



ΧΟΥΛΙΑΡΑ ΓΡΑΜΜΑΤΟΥΛΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

**ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΙΛΑΛΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στην Ελένη, το Βασίλη και
την Αναστασία.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να έχει πραγματοποιηθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και τη στήριξη κάποιων ανθρώπων. Για αυτό το λόγο, θεωρώ σημαντικό να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Αριστομένη Αντωνιάδη, ο οποίος από την πρώτη στιγμή μου εμπιστεύτηκε την εργασία την οποία του ζήτησα, με καθοδήγησε και με βοήθησε σε ότι χρειάστηκα μέχρι και το τέλος της εκπόνησής της. Επίσης, η εργασία αυτή δε θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τον Αντώνη Λυρώνη και τη Χαρά Ευσταθίου, οι οποίοι με στήριξαν και ήταν σαν δεύτεροι δάσκαλοι στην εκμάθηση όλων όσων απαιτούνταν για να πραγματοποιηθεί αυτή η δουλειά. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά από το εργαστήριο του m3, που με υποδέχτηκαν στο εργαστήριο με το καλύτερο κλίμα συνεργασίας και ένιωθα ότι εργάζομαι σε ένα οικείο περιβάλλον.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	8
1.2 Στόχοι διπλωματικής εργασίας	8
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας	8
2. ΦΘΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	10
2.1 Φθορά κοπτικών εργαλείων	10
2.2 Διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων	14
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	17
3.1 Έμμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς	17
3.1.1 Στην τórνευση	17
3.1.2 Στο φραιζάρισμα	20
3.1.3 Στη διάτρηση	23
3.1.4 Γενικά συμπεράσματα	26
3.2 Άμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς	26
3.2.1 Διεθνείς ερευνητικές Εργασίες	28
3.2.2 Γενικά συμπεράσματα	31
4. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	32
4.1 Στερεομικροσκόπιο Leica M125	32
4.2 Κέντρο κατεργασίας DMG-DMU 50eco	34
4.2 Υλικό κατεργασίας και κοπτικό εργαλείο	35
4.3 Ιδιοκατασκευή συγκράτησης	37
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	39
5.1 Περιγραφή πειραμάτων	39
5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων - Συμπεράσματα	41
5.2.1 Πείραμα 1	41
5.2.2 Πείραμα 2	42
5.2.3 Πείραμα 3	43
5.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα τριών πειραμάτων	44
5.3 Επιβεβαίωση μετρήσεων	45
6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	51
6.1 Προβλήματα που αντιμετωπίσαμε	51
6.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις	51
7. ΣΥΝΟΨΗ	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Οι κατεργασίες κοπής αποτελούν την πιο συνήθη μέθοδο κατασκευής μεταλλικών προϊόντων. Με τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη των ευφυών αυτοματοποιημένων συστημάτων παραγωγής και κατεργασίας, οι απαιτήσεις για υψηλή διαστατική ακρίβεια, αύξηση της παραγωγικότητας και μείωση του κόστους παραγωγής έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό. Η πρόβλεψη του επιπέδου της φθοράς που αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία είναι αυτό που καθορίζει το πότε ένα κοπτικό εργαλείο πρέπει να αντικατασταθεί. Έχει άμεση επίδραση στο κόστος παραγωγής, στην τελική ποιότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, καθώς επίσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας των κατεργασιών κοπής. Πολλοί ερευνητές, ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα, επικεντρώνονται στη μελέτη φθοράς των κοπτικών εργαλείων, καταλήγοντας πως η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής έχουν μεγάλη επίδραση σε αυτό το πεδίο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η πειραματική μελέτη της εξέλιξης της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας κοπής σε κατεργασία φραιζαρίσματος προσώπου χάλυβα Ck45. Η παρακολούθηση της φθοράς γίνεται με άμεσο τρόπο μέσω οπτικού συστήματος στερεομικροσκοπίου, μετρώντας το μέγιστο πλάτος φθοράς (VB_{max}) του κοπτικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα της μελέτης καταλήγουν στην εξαγωγή διαγραμμάτων ανάπτυξης της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές ταχύτητας κοπής. Τα διαγράμματα αυτά είναι καμπύλες που προβλέπουν την εξέλιξη της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κοπών ή το μήκος της κοπής στη συγκεκριμένη κατεργασία.

1.2 Στόχοι διπλωματικής εργασίας

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων σε σχέση με το επίπεδο φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας κοπτικών εργαλείων, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα κοπής. Η ταχύτητα κοπής αποτελεί μια από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους στην ανάπτυξη της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Η παρούσα δουλειά, αλλά και κάθε πειραματική μελέτη που σχετίζεται με τη φθορά έχουν βασικό στόχο την αναζήτηση των βέλτιστων συνθηκών κοπής για διάφορες κατεργασίες, κάτι που όταν καθίσταται δυνατό, αυξάνει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, τη διαστατική ακρίβεια του παραγόμενου τεμαχίου και τελικά οδηγεί στην αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του κόστους παραγωγής.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Πιο συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το επίπεδο των γνώσεων και όλο το θεωρητικό υπόβαθρο, που είναι απαραίτητο ώστε να κατανοήσουμε τι είναι η φθορά γενικά στα μηχανικά εξαρτήματα και, πιο συγκεκριμένα, με ποιους τρόπους αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία, αλλά και πόσο σημαντικό ρόλο παίζει στη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων. Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει, μέσω παραδειγμάτων από διεθνείς ερευνητικές εργασίες, τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να παρακολουθούμε την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων σε κάθε είδους κατεργασία, τόσο με έμμεσο όσο και με άμεσο τρόπο, καθώς και κάποια συμπεράσματα που εξάγονται από την έρευνα που έχει διεξαχθεί μέχρι στιγμής στον τομέα. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται όλος ο εξοπλισμός και τα όργανα μέτρησης που ήταν απαραίτητα για την εκπόνηση της πειραματικής μας ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται στο στερεομικροσκόπιο και το λογισμικό του, την εργαλειομηχανή, στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, καθώς επίσης περιγράφονται αναλυτικά η γεωμετρία και οι ιδιότητες του κοπτικού εργαλείου και του υλικού κατεργασίας αντίστοιχα. Τέλος, περιγράφεται η ιδιοκατασκευή συγκράτησης του κώνου που εμπεριείχε το κοπτικό εργαλείο, η οποία ήταν

απαραίτητο να δημιουργηθεί πριν την έναρξη των πειραμάτων για να επιτευχθεί η σωστή μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς (VB_{\max}). Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται όλα τα στάδια της πειραματικής μας ανάλυσης, τα αποτελέσματα των πειραμάτων, η σύγκριση των δεδομένων που έβγαλε η πειραματική έρευνα, όπως επίσης, και επιβεβαίωση μέρους των μετρήσεων μας σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα μέτρησης φθοράς κοπτικών εργαλείων. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγουμε από τη συγκεκριμένη πειραματική ανάλυση, τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και κατευθύνσεις για μελλοντική δουλεία πάνω στο αντικείμενο της.

2. ΦΘΟΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

2.1 Φθορά κοπτικών εργαλείων

Η φθορά αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αστοχίας μηχανικών εξαρτημάτων και στοιχείων μηχανών με σοβαρές τεχνικές και οικονομικές συνέπειες. Οι τεχνικές αφορούν τη σωστή λειτουργία μιας οποιασδήποτε μηχανικής εγκατάστασης, ενώ οι οικονομικές το κόστος κατεργασίας και παραγωγής. Όταν η φθορά ξεπεράσει ένα επιτρεπτό όριο μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στη διακοπή λειτουργίας μιας εγκατάστασης. Εμφανίζεται με ποικίλους τρόπους σε κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης μεταξύ εργαλείων και κατεργαζόμενων τεμαχίων, σε κάθε είδους κατασκευή και μηχανή με συνεργαζόμενα μέρη, όπως έδρανα ολίσθησης/κύλισης, οδοντωτοί τροχοί, τροχαλίες με ταινίες ή αλυσίδες, έμβολα και χιτώνια σε κυλίνδρους εσωτερικής καύσης, έκκεντρα και ωστήρια έκκεντρων, καθώς και σε υδραυλικές εγκαταστάσεις που μεταφέρουν ρευστά, στερεά ή μείγματα αυτών. Η φθορά εκτός από τη μεγάλη σημασία που έχει από τεχνολογική άποψη, αποτελεί, επίσης, αντικείμενο μελέτης και της ιατρικής επιστήμης, κυρίως σε περιπτώσεις εκφύλισης αρθρώσεων.

Πιο συγκεκριμένα, ως φθορά ορίζουμε τη διεργασία προοδευτικής απομάκρυνσης υλικού μεταξύ δύο επιφανειών, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή ή σε σχετική κίνηση. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να είναι μηχανικής, χημικής ή και μεικτής φύσεως. Στα κοπτικά εργαλεία η ανάπτυξη φθοράς έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση των διαστατικών χαρακτηριστικών του εργαλείου, που έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο, και τελικά την αστοχία του. Κριτήριο για την αστοχία ή μη του εργαλείου είναι το μέγεθος της φθοράς. Όταν υπάρχει υπέρβαση μιας προκαθορισμένης τιμής σε κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος του εργαλείου, ακόμα κι αν αυτό μπορεί να συνεχίσει την κατεργασία της κοπής, ή θραύση αυτού, τότε το κοπτικό εργαλείο θεωρείται άστοχο.

Στις κατεργασίες κοπής η φθορά των κοπτικών εργαλείων έχει ιδιαίτερη σημασία. Λόγω της άμεσης επίπτωσης της στην ποιότητα της τελικής επιφάνειας και στα οικονομικά της κοπής, η φθορά συχνά χρησιμοποιείται και για να αξιολογηθεί η απόδοση και η τεχνική συμπεριφορά ενός εργαλείου κοπής. Οι ερευνητικές μελέτες που έχουν διενεργηθεί για την κατανόηση και την πρόβλεψη της φθοράς είναι αρκετές, ωστόσο οι περισσότερες από αυτές αποτελούν μια εμπειρική προσέγγισή της. Η πολυπλοκότητα γύρω από τη φθορά των κοπτικών εργαλείων προέρχεται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένων αυτών του κατεργαζόμενου υλικού, της εργαλειομηχανής, του κοπτικού εργαλείου, των ψυκτικών που χρησιμοποιούνται στην κοπή, καθώς και των ίδιων των συνθηκών κοπής [1].

Η φθορά που αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία μπορεί να παρουσιαστεί με τις εξής μορφές:

Φθορά ελεύθερης επιφάνειας: Εμφανίζεται στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου (επιφάνεια προς το μέρος της νεοσχηματισμένης επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου), σαν αποτέλεσμα της τριβής/ολίσθησης του εργαλείου και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης και διάβρωσης/τριβής, οι οποίοι ενισχύονται από τις υψηλές θερμοκρασίες κοπής. Η περιοχή εμφάνισης της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας καλείται ζώνη φθοράς και χαρακτηρίζεται από το μέσο πλάτος φθοράς VB και από το μέγιστο πλάτος φθοράς (VB_{max}). Όσο μεγαλύτερη είναι η φθορά ελεύθερης επιφάνειας, τόσο το βάθος της κοπής μειώνεται [2]. Συνήθως η διάρκεια ζωής του εργαλείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο όριο μέσης φθοράς ελεύθερης επιφάνειας.

Φθορά κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίπτου του εργαλείου: Η μέγιστη φθορά κρατήρα εμφανίζεται στο σημείο μέγιστης θερμοκρασίας του κοπτικού εργαλείου. Εκεί υπάρχει ροή αποβλίπτου πάνω στην επιφάνεια αποβλίπτου του κοπτικού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρα στην εν λόγω επιφάνεια. Η φθορά κρατήρα οφείλεται κυρίως στη διάχυση ατόμων και

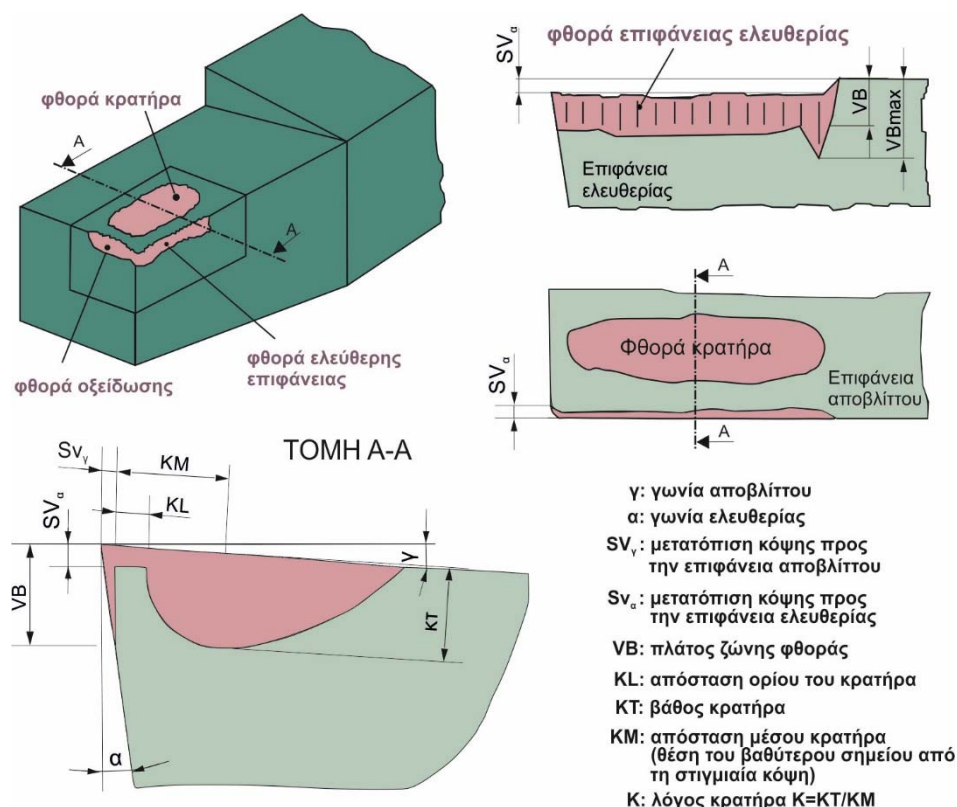
στην τριβή. Ο κρατήρας δεν επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της κοπής, αλλά κυρίως την αντοχή της κοπτικής ακμής, με πιθανή θραύση του κοπτικού εργαλείου. Χαρακτηρίζεται από το λόγο κρατήρα (K), δηλαδή το λόγο του βάθους κρατήρα (KT) προς την απόσταση του μέσου κρατήρα, (θέση του βαθύτερου σημείου από τη στιγμιαία κόψη, KM).

Απολέπιση/ Απόξεση της κόψης και στην επιφάνεια αποβλίπτου, μέσω της ψευδόκοψης, αναλόγως τις συνθήκες κοπής που χρησιμοποιούμε. Η ψευδόκοψη είναι ένα σφηνοειδές ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, που δημιουργείται υπό κατάλληλες συνθήκες και προϋποθέσεις, στην κόψη του εργαλείου κατά τη διαδικασία δημιουργίας αποβλίπτου.

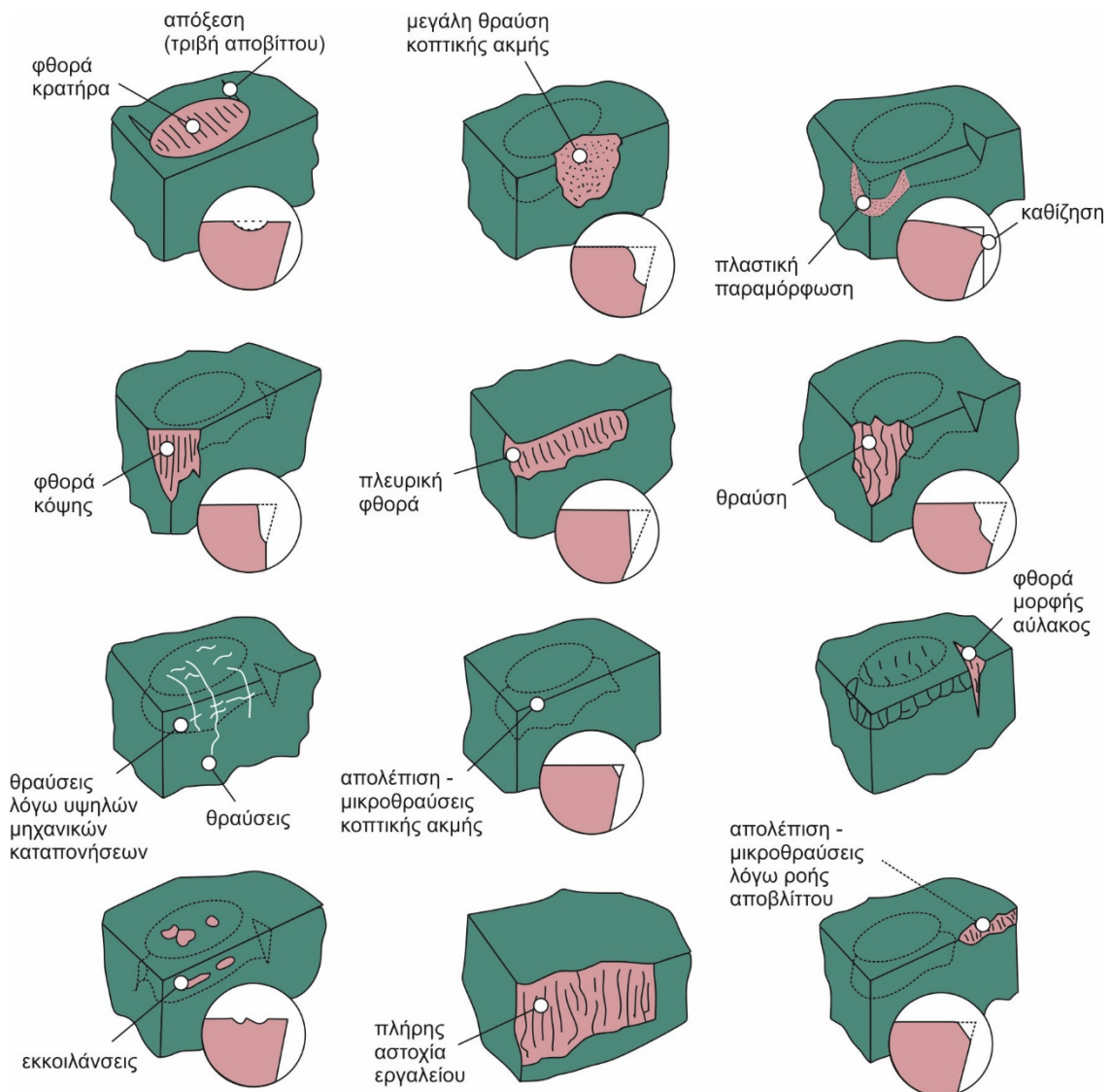
Φθορά λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Οφείλεται στο συνδυασμό υψηλής φόρτισής και υψηλών θερμοκρασιών.

Μικροθραύσεις, ρωγμές ή παραμορφώσεις, λόγω μηχανικών, θερμικών αιτιών και υψηλών μηχανικών καταπονήσεων.

Θραύση της ακμής του κοπτικού εργαλείου. Οφείλεται κυρίως στην επιβολή κρουστικών φορτίων.



Σχήμα 2.1 : Φθορά ελεύθερης επιφάνειας, φθορά κρατήρα και μεγέθη μετρησής τους



Σχήμα 2.2 : Είδη φθοράς κοπτικών εργαλείων

Οι δύο πρώτοι τύποι φθοράς είναι πρακτικά αναπόφευκτοι σε κάθε κατεργασία αποβολής υλικού. Η συμβολή δε του πλάτους φθοράς VB στην αστοχία των κοπτικών εργαλείων θεωρείται πολύ πιο σημαντική από όλες τις άλλες αιτίες φθοράς. Στο [σχήμα 2.1](#) παρουσιάζονται γραφικά αυτοί οι δύο τύποι φθοράς μαζί με τα μεγέθη με τα οποία αυτοί μετρούνται.

Το κοπτικό εργαλείο επηρεάζεται από διάφορους μηχανισμούς ανάπτυξης φθοράς, οι οποίοι αλλοιώνουν σταδιακά το κοπτικό μέχρι ένα τελικό στάδιο, όπου τελειώνει η διάρκεια ζωής του.

Οι κύριοι μηχανισμοί ανάπτυξης φθοράς παρουσιάζονται παρακάτω:

Σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών: Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται λόγω της τριβής μεταξύ του κατεργαζόμενου τεμαχίου ή του του αποβλίττου με το κοπτικό εργαλείο. Ο διαρκής σχηματισμός και καταστροφή των δεσμών αυτών κατά την κοπή, έχει ως συνέπεια την απόσπαση μικρών τεμαχίων υλικού από το εργαλείο προς το απόβλητο ή το τεμάχιο αντίστοιχα. Ο μηχανισμός ευνοείται σε χαμηλές ταχύτητες κοπής. Σε χαμηλές θερμοκρασίες η τάση προς σχηματισμό και λύση των δεσμών αυτών μειώνεται.

Απόξεση: Σκληρά τεμαχίδια του αποβλήτου κινούμενα και συγχρόνως πιεζόμενα πάνω στην επιφάνεια του αποβλήτου του κοπτικού εργαλείου, τη φθείρουν συνεχώς, εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα. Τα τεμαχίδια αυτά μπορεί να προέρχονται και από μικρά κομμάτια της ψευδόκοψης, η οποία εμφανίζεται συνήθως σε μεγάλες ταχύτητες κοπής.

Πλαστική παραμόρφωση: Οφείλεται στο συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών και υψηλής φόρτισης.

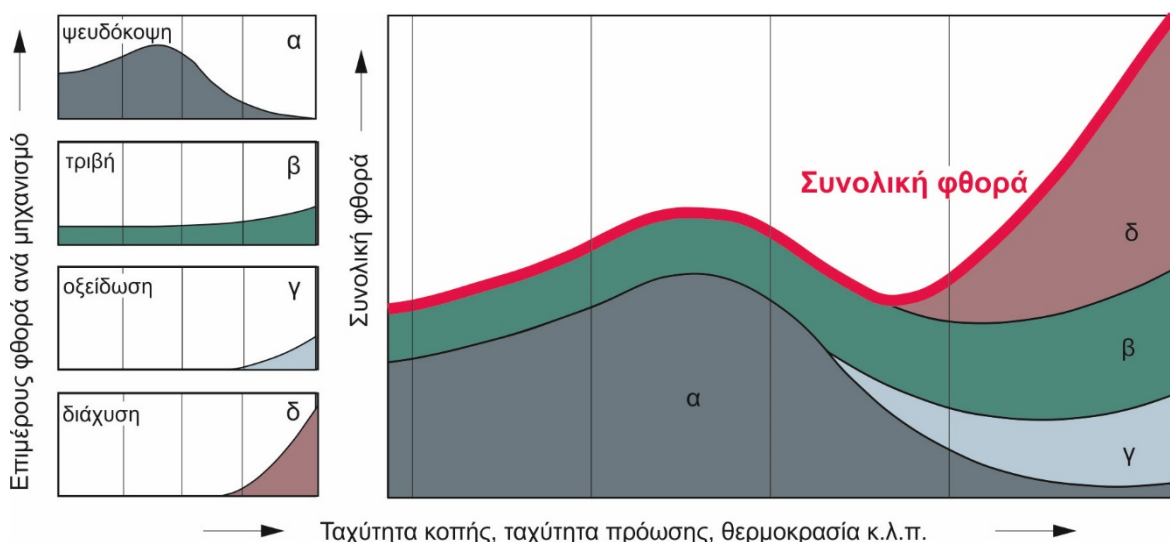
Διάχυση στερεάς κατάστασης: Άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου διαχέονται προς το απόβλητο ή το τεμάχιο, λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών για διάχυση, που προσφέρουν οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η μεταλλική επαφή του εργαλείου με το απόβλητο ή το τεμάχιο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταβολή της κρυσταλλικής δομής του υλικού του κοπτικού εργαλείου, που οδηγεί στην εξασθένησή του και την προϊούσα φθορά του.

Οξειδωση: Εμφανίζεται κυρίως στη δευτερεύουσα κόψη του κοπτικού εργαλείου και αφορά κυρίως τα σκληρομέταλλα σε μεγάλες ταχύτητες κοπής, που συνοδεύονται από μεγάλη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία. Έτσι το οξυγόνο γίνεται χημικά πιο ενεργό, ευνοώντας την οξειδωση. Το βάθος της οξειδωσης αυξάνεται με το χρόνο κοπής και σε βεβαρημένες συνθήκες κοπής μπορεί να προκαλέσει ακόμα και θραύση της κόψης.

Διάβρωση: Σε διαβρωτικό περιβάλλον σχηματίζονται οξείδια στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, τα οποία απομακρύνονται εύκολα με την τριβή. Επιπλέον, τα πρόσθετα υψηλής πίεσης (EP) των υγρών κοπής σχηματίζουν μη μεταλλικές ενώσεις με το υλικό του κοπτικού εργαλείου, με στόχο τη δημιουργία μη μεταλλικού στρώματος, που εμποδίζει την εκτενή ανάπτυξη συγκολλητών δεσμών.

Ηλεκτροχημική φθορά: Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια επαφής ανόμοιων υλικών αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη, που επιτείνει το φαινόμενο της διάχυσης του άνθρακα.

Κόπωση του επιφανειακού υλικού του κοπτικού εργαλείου. Συναντάται ο ισχυρισμός ότι ισχυρή κυκλική φόρτιση προκαλεί κόπωση στο επιφανειακό υλικό του κοπτικού εργαλείου, συνεπώς δημιουργούνται εκκοιλάνσεις.



Σχήμα 2.3 : Επίδραση ταχύτητας κοπής, ταχύτητας πρόωσης και θερμοκρασίας στην ενεργοποίηση των διάφορων μηχανισμών φθοράς

Στο σχήμα 2.3 περιγράφεται η επίδραση της θερμοκρασίας, της ταχύτητας κοπής και πρόωσης στην ενεργοποίηση διάφορων μηχανισμών φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Παρατηρούμε ότι σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και πρόωσης, άρα και χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω του φαινομένου της ψευδόκοψης, αλλά και λόγω της ισχυρής τριβής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, εμφανίζονται αντίστοιχα οι μηχανισμοί της απόξεσης και του σχηματισμού και λύσης συγκολλητών δεσμών. Καθώς οι ταχύτητες κοπής και πρόωσης και η θερμοκρασία αυξάνονται η φθορά αναπτύσσεται μέσω των μηχανισμών της οξείδωσης και της διάχυσης στερεάς κατάστασης.

2.2 Διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων

Η ανάπτυξη φθοράς στο κοπτικό εργαλείο αποτελεί βασικό παράγοντα μείωσης της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου, αφού επηρεάζει τη διαστατική ακρίβεια, την ευστάθεια και την αξιοπιστία της κατεργασίας. Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου T είναι η εκμεταλλεύσιμη ζωή του, εκφρασμένη σε μονάδες χρόνου ή όγκου αφαιρούμενου υλικού ή θεωρητικού μήκους αποβλήτου, από τη στιγμή που το νεοτροχισμένο εργαλείο αρχίζει να εργάζεται μέχρι ένα σημείο λειτουργίας, το οποίο καθορίζεται από συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας. Το κριτήριο αστοχίας που συνήθως επιλέγεται είναι το μέγιστο πλάτος της ζώνης φθοράς (VB_{max}) στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και βάσει αυτού αποφασίζεται πότε το εργαλείο έχει συμπληρώσει το χρόνο ζωής του, ώστε να χρειάζεται αντικατάσταση. Αυτό αποδεικνύεται με τις παρακάτω σχέσεις.

$$VB = g(V_c, f, e) \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

$$T = \sigma(VB) \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

Οι δύο παραπάνω σχέσεις, δίνουν την εξαιρετικά σημαντική για τις κατεργασίες σχέση:

$$T = f(V_c, f, e) \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

Πιο συγκεκριμένα η διάρκεια ζωής του εργαλείου εκφράζεται μαθηματικά από την εξίσωση Taylor (1906):

$$V_c T^n = C \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Όπου V ταχύτητα κοπής, T η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, n εκθέτης Taylor. Τα n και C είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό κατεργασίας, το βάθος κοπής και την ταχύτητα κοπής.

Tool Material	n	C (m/min)
High Speed Steel		
Non-Steel Work	0.125	120
Steel Work	0.125	70
Cemented Carbide		
Non-Steel Work	0.25	900
Steel Work	0.25	500
Ceramic		
Steel Work	0.6	3000

Σχήμα 2.4 : Χαρακτηριστικές τιμές για τις σταθερές n και C στην εξίσωση Taylor

Η ταχύτητα κοπής αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, όπως αποδεικνύει η παραπάνω σχέση. Η εξίσωση, όμως, μπορεί να τροποποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως το βάθος κοπής και η πρόωση με τον παρακάτω τρόπο:

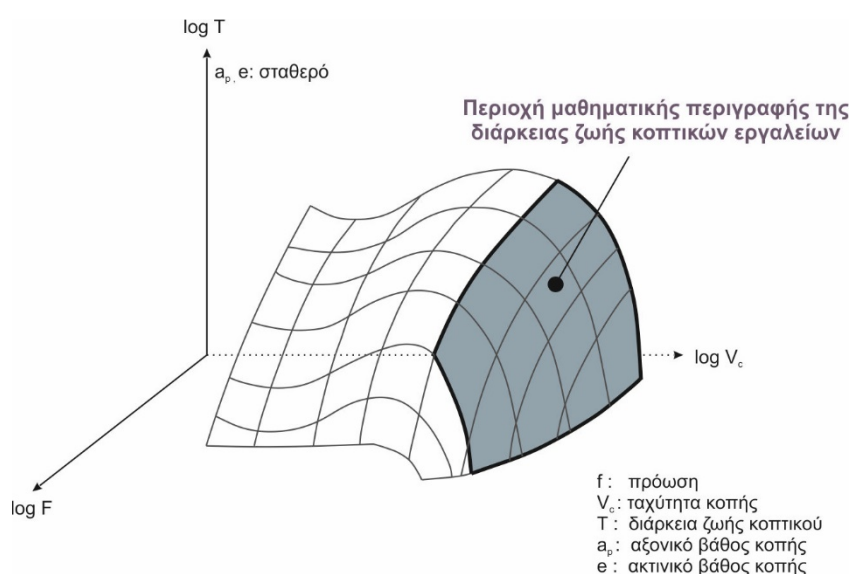
$$V_c \cdot T^n \cdot f^{n/m} \cdot e^{n/k} = C \quad (\text{Εξίσωση 2.5})$$

Όπου e είναι το βάθος κοπής, f η πρόωση και n, m, k εκθέτες Taylor (σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό κατεργασίας, την πρόωση, το βάθος κοπής και την ταχύτητα κοπής). Πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν ότι η σειρά προτεραιότητας της επιρροής στο χρόνο ζωής από τις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η εξής:

$$V_c > f > e. \quad (\text{Εξίσωση 2.6})$$

Παρόλη την ύπαρξη των παραπάνω σχέσεων, υπάρχει αβεβαιότητα στις εμπειρικές σταθερές και η ζωή του εργαλείου θεωρείται γενικά μια στοχαστική διαδικασία. Η εύρεση της πραγματικής σχέσης μεταξύ διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου και των συνθηκών κοπής αποτελούσε και αποτελεί ακόμη αντικείμενο έρευνας. Για το σκοπό αυτόν έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα πρότυπα προσομοίωσης με τη μορφή παραμετρικών εξισώσεων (εκθετικές, πολυωνυμικές, κ.α.), στις οποίες υπεισέρχεται ένας αριθμός σταθερών συντελεστών. Ο υπολογισμός των συντελεστών αυτών με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων, αποτελεί την ουσία κάθε ερευνητικής εργασίας, που σκοπό έχει να προσδιορίσει τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας για ένα συγκεκριμένο ζεύγος κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου, διότι για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να είναι καταρχήν γνωστή η ακριβής συμπεριφορά της φθοράς.

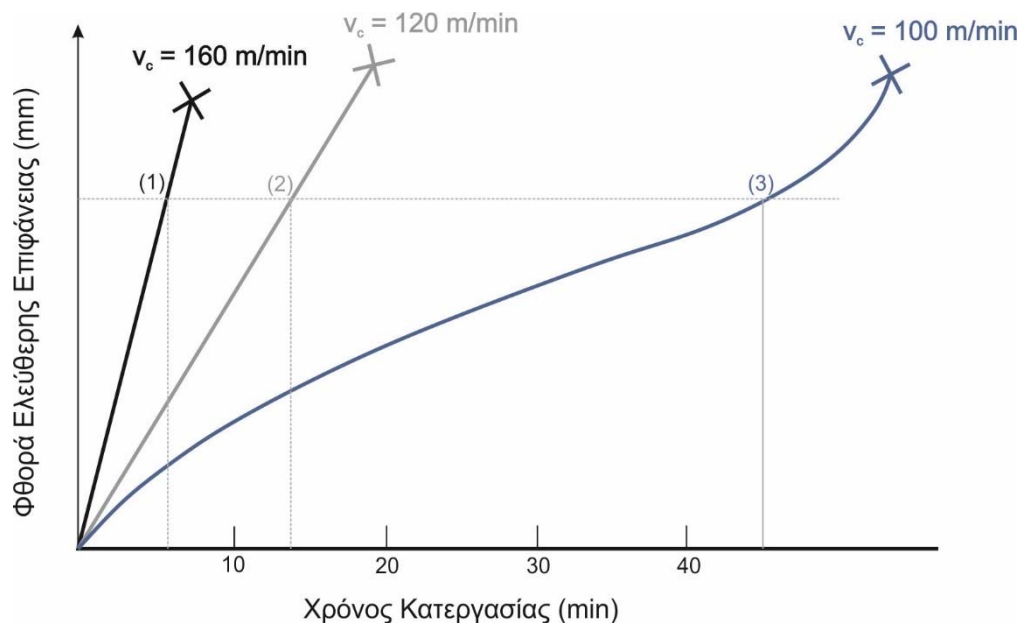
Συνήθως εξετάζουμε τη διάρκεια ζωής μόνο με βάση την επιρροή που έχουν σε αυτή οι συνθήκες κοπής, θεωρώντας ότι όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμένουν σταθεροί. Στο σχήμα 2.5, παρίσταται η διάρκεια ζωής σε ένα τρισδιάστατο λογαριθμικό διάγραμμα υπό τη μορφή χωρικής επιφάνειας, στο οποίο το αξονικό βάθος κοπής a_p , καθώς και το ακτινικό βάθος κοπής e , διατηρούνται σταθερά. Με έντονο πλαίσιο βλέπουμε την κατ'εξοχήν εκμεταλλεύσιμη περιοχή που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία, στην οποία εμφανίζεται η οικονομικά βέλτιστη ταχύτητα. Η περιοχή αυτή μπορεί να προσεγγιστεί με ένα επίπεδο στο λογαριθμικό καρτεσιανό σύστημα του σχήματος και έτσι η διάρκεια ζωής T να εκφραστεί με σχετικά απλοϊκό τρόπο, σαν συνάρτηση $T = f(V_c, f)$.



Σχήμα 2.5: Η διάρκεια ζωής T ως συνάρτηση της ταχύτητας κοπής V_c και της πρόωσης f για σταθερό ακτινικό και αξονικό βάθος κοπής, e και a_p αντίστοιχα.

Εκτός από τις συνθήκες κοπής, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω:

- Είδος της κατεργασίας κοπής
- Κοπτικό εργαλείο
 - Υλικό του κοπτικού εργαλείου και φυσικές ιδιότητές του
 - Επικάλυψη του κοπτικού και είδος αυτής
 - Γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου
- Κατεργαζόμενο υλικό (σύσταση και ιδιότητές του)
- Τρόπος πρόσδεσης του κοπτικού εργαλείου
- Τρόπος πρόσδεσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου
- Συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής)
- Δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανή-εργαλείο-τεμάχιο
-



Σχήμα 2.6: Επίδραση της αύξησης της ταχύτητας κοπής στη φθοράς ελεύθερης επιφάνειας

Από τα παραπάνω και από το σχήμα 2.6 γίνεται κατανοητό, πόσο σημαντική επίδραση έχει η ταχύτητα κοπής στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Η αύξηση της τιμής της αυξάνει ραγδαία τη φθορά του κοπτικού εργαλείου και συνεπώς μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής. Η ταχύτητα κοπής, λοιπόν, αποτελεί ένα μέγεθος που χρήζει συνεχούς έρευνας σε κάθε είδος και υλικό κατεργασίας.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Η τόννευση, το φραιζάρισμα και η διάτρηση αποτελούν βασικές βιομηχανικές κατεργασίες παραγωγής πολλών ειδών προϊόντων, κάτι που κάνει το κόστος των κοπτικών εργαλείων σημαντικό ποσό του κόστους παραγωγής. Το κόστος των κοπτικών, επειδή αφορά το κόστος εξοπλισμού, υπολογίζεται στο 3–12% του συνολικού κόστους παραγωγής. Θεωρητικά αποτελεί ένα αρκετά μικρό κόστος, παρόλα αυτά, βέβαια, μπορεί είτε να δαπανηθεί αλλού είτε να αποθηκευτεί. Ταυτόχρονα, αξίζει να σημειωθεί πως το 20% του μη παραγωγικού χρόνου οφείλεται στην αστοχία των κοπτικών εργαλείων στις σύγχρονες εργαλειομηχανές. Όλα αυτά αποδεικνύουν τη μεγάλη αναγκαιότητα παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, ώστε να προβλέπεται η εξέλιξη της φθοράς τους.

Τα τελευταία χρόνια έχουν ερευνηθεί και παρουσιαστεί ποικίλες μέθοδοι παρακολούθησης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τις άμεσες και τις έμμεσες μεθόδους παρακολούθησης φθοράς. Οι πρώτες, οι οποίες συνήθως είναι και οι πιο ακριβείς, μετρούν τη φθορά άμεσα, καθώς αναπτύσσεται, και βασίζονται στην οπτική επίβλεψη ή όραση με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι δεύτερες μετρούν τη φθορά μέσω της μελέτης διάφορων μεγεθών που σχετίζονται με αυτή, ενώ στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, αυτό συμβαίνει χωρίς να χρειάζεται η αποσυναρμολόγηση του εργαλείου για τη μέτρηση. Τέτοια μεγέθη είναι :

- Οι δυνάμεις κοπής
- Οι ακουστικές εκπομπές
- Οι ταλαντώσεις του κοπτικού εργαλείου
- Η ανακλαστικότητα των αποβλήτων
- Η θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου

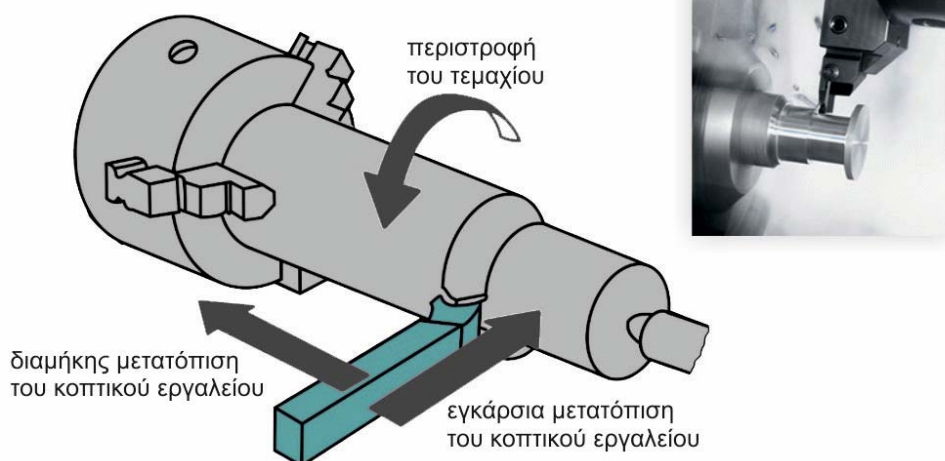
Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεθόδων, ανάλογα με το σκοπό που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου. Όταν ο έλεγχος της φθοράς πραγματοποιείται σε βιομηχανικό περιβάλλον για παραγωγικούς λόγους, οι απαιτήσεις για μια αποτελεσματική γρήγορη μέθοδο παρακολούθησης αυξάνονται σημαντικά, σε σχέση με τον έλεγχο που μπορεί να γίνεται για εκπαιδευτικούς, ερευνητικούς σκοπούς σε κάποιο εργαστήριο. Μερικές από τις μεθόδους είναι αποτελεσματικότερες στην ανίχνευση της θραύσης, ενώ άλλες είναι καταλληλότερες για τον έλεγχο της σταδιακής φθοράς. Από την άποψη αυτή, υπάρχει ακόμα μεγάλη διακριτοποίηση στην καταλληλότητα των διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μια σύντομη περιγραφή στις έμμεσες μεθόδους παρακολούθησης φθοράς στις τρεις βασικές κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, δηλαδή την τόννευση, το φραιζάρισμα και τη διάτρηση.

3.1 Έμμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς

3.1.1 Στην τόννευση

Η τόννευση αποτελεί τη διαδικασία κατεργασίας τεμαχίων κυκλικής διατομής και συμμετρικά κατά τον άξονα περιστροφής. Κατά την τόννευση το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόννου. Με αυτό τον τρόπο, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκους μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Κατά την ορθογωνική κοπή, η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι προσανατολισμένη κάθετα προς τη διεύθυνση της κοπής, αλλά παράλληλα προς το τεμάχιο, ενώ κατά την πλάγια κοπή, η κύρια κόψη είναι προσανατολισμένη σε κλίση ως προς το τεμάχιο. Τα κοπτικά εργαλεία στις διεργασίες αυτές δεν περιστρέφονται. Ως αποτέλεσμα της απλοϊκής φύσης της, η τόννευση, αποτελεί αντικείμενο σημαντικής μελέτης.



Σχήμα 3.1 : Κινηματική τόννευσης – Στιγμιότυπο από κατεργασία τόννευσης

Δυνάμεις κοπής: Η χρήση των δυνάμεων κοπής αποτελεί μία από τις σημαντικότερες έμμεσες μεθόδους παρακολούθησης της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου κατά την τόννευση, αφού είναι γνωστό ότι η φθορά ελεύθερης επιφάνειας επηρεάζει τις δυνάμεις αυτές. Οι μετρήσεις σε αυτή την περίπτωση γίνονται είτε με δυναμόμετρα, είτε μέσω της ισχύος της ατράκτου και της ταχύτητας [3 , 4]. Όσον αφορά του αισθητήρες ταχύτητας, συνήθως χρησιμοποιούνται ταχύμετρα ή ταχογεννήτριες. Τα ταχύμετρα κατασκευάζονται με στάτη μόνιμων μαγνητών και δρομέα, που περιστρέφεται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Έτσι επάγεται στα τυλίγματα του οπλισμού του δρομέα τάση, η οποία με τη βοήθεια και του συλλέκτη δίδεται στην έξοδο ως συνεχές ρεύμα ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής. Στην τάση εξόδου πάντοτε υπάρχει θόρυβος εναλλασσόμενης τάσης, πλάτους έως 5% της τιμής της συνεχούς και θεμελιώδους συχνότητας που σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης της ισχύος της ατράκτου για τον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής, είναι ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μια αποδοτική εποπτεία της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου, κατά την επιτάχυνση του άξονα της ατράκτου. Μόνο κάτω από σταθερές συνθήκες θα μπορούσε να ληφθούν αξιόπιστες αποφάσεις. Παρά το γεγονός αυτό, έχει βρεθεί ότι το ρεύμα της ατράκτου είναι επαρκές για να προγραμματίσει ένα γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος θα εκπαιδεύει ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, για την εποπτεία των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών. Ωστόσο, η ακρίβεια του συγκεκριμένου συστήματος δεν είναι τόσο υψηλή, όσο άλλων συστημάτων που χρησιμοποιούν τριαξονική μέτρηση της δύναμης, με τη χρήση ενός δυναμόμετρου [4].

Ακουστικές εκπομπές: Οι ακουστικές εκπομπές (ΑΕ) που προέρχονται από κατεργασία τόννευσης αποτελούνται από συνεχή και παροδικά σήματα, τα οποία έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα συνεχή σήματα σχετίζονται με τη φθορά του εργαλείου και την πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου, ενώ τα παροδικά σήματα προκύπτουν από το σχηματισμό αποβλίπτου, την ανάπτυξη ρωγμών, την απομάκρυνση του αποβλίπτου κ.α. [5]. Για την παρακολούθηση της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιούνται αισθητήρες ακουστικών εκπομπών. Οι αισθητήρες αυτοί παρέχουν αρκετά ακριβείς μετρήσεις, λόγω της ευαισθησίας τους στην αναλογία υψηλού θορύβου. Οι ΑΕ συλλέγονται χρησιμοποιώντας υψηλής ακρίβειας κατευθυντικά μικρόφωνα, με μεγάλη αντοχή ακόμα και σε παραγωγικό περιβάλλον, ή μέσω πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, ικανών να ανιχνεύουν και να μεταδίδουν ακουστικά κύματα, τα οποία ταξιδεύουν πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των αισθητήρων ΑΕ είναι η ικανότητά τους να διαχειρίζονται συχνότητες, υψηλότερες από αυτές της κατεργασίας, περιορίζοντας, έτσι, την εισαγωγή θορύβου στα σήματα που δημιουργούνται [5, 6]. Τα σήματα ακουστικών εκπομπών που μετρούνται στο εργαλείο επηρεάζονται σημαντικά από τη φθορά κρατήρα. Αντίθετα, η φθορά ελεύθερης επιφάνειας μπορεί να εντοπιστεί καλύτερα μετρώντας τα σήματα ΑΕ πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα σήματα ακουστικών εκπομπών

δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, από ότι η χρήση δυνάμεων, στην ανίχνευση της φθοράς και της θραύσης. Ωστόσο, η ακριβής σχέση μεταξύ των δύο φαινομένων ακόμα δεν έχει προσδιοριστεί πλήρως.

Ταλαντώσεις: Η ανάλυση των ταλαντώσεων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθόδους ανίχνευσης φθοράς με έμμεσο τρόπο. Οι σύγχρονοι αισθητήρες μετατρέπουν το αποτέλεσμα της ταλάντωσης σε ανάλογο ηλεκτρικό μέγεθος (ρεύμα ή τάση), το οποίο οδηγείται σε κάποια διάταξη για περαιτέρω επεξεργασία. Σε ένα σήμα οι βασικές μηχανικές ποσότητες που αντιπροσωπεύουν τις ταλαντώσεις είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση, με την τελευταία να αποτελεί την πιο συχνά μετρούμενη ποσότητα. Οι μετρήσεις των ταλαντώσεων χρησιμοποιούνται περισσότερο, από τη στιγμή που η εγκατάσταση των επιταχυνσιόμετρων έγινε ευκολότερη κοντά στην περιστρεφόμενη άτρακτο, χωρίς να είναι αναγκαίες μετατροπές στα μηχανικά της μέρη. Οι παραγόμενες ταλαντώσεις σχετίζονται με την ύπαρξη φθοράς, διότι αν σε ένα δυναμικό σύστημα οι δυνάμεις κοπής αυξηθούν, τότε και η δυναμική αντίδραση θα αυξηθεί. Βέβαια, υπάρχουν αδυναμίες της συγκεκριμένης μεθόδου μέτρησης, όπως η συσχέτιση των παραγόμενων ταλαντώσεων με το υλικό του τεμαχίου, τις συνθήκες κοπής, καθώς και τη δομή της εργαλειομηχανής. Ένας απ' τους πιο διαδομένους τύπους επιταχυνσιόμετρου για τη μέτρηση ταλαντώσεων είναι το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο. Η πρωτογενής εκτίμηση φθοράς των κοπτικών εργαλείων, μέσω των σημάτων των παραγόμενων ταλαντώσεων κατά την κατεργασία, προκύπτει από την αξιοποίηση των στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο του χρόνου. Η πιο βασική τεχνική ανάλυσης των ταλαντώσεων μετασχηματίζει το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, με χρήση του ταχέος μετασχηματισμού Fourier, προκειμένου να ανιχνευθούν οι ασυνήθιστες αλλαγές στις συχνότητες της ταλάντωσης, πιθανόν λόγω φθοράς ή αποβλίπτων.

Ανακλαστικότητα αποβλίπτων: Η ανακλαστικότητα των αποβλίπτων αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική μέθοδο ελέγχου φθοράς κατά την τόννευση, όπως παρουσιάζεται στο [7]. Η ανακλαστικότητα των αποβλίπτων ορίζεται ως η αναλογία της προσπίπτουσας ροής στην επιφάνεια ενός αποβλίπτου και της ανακλώμενης ροής από την επιφάνεια. Η ποικιλία των τιμών ανακλαστικότητας του αποβλίπτου οφείλεται κυρίως στη μεταβολή του χρώματος στην επιφάνεια του αποβλίπτου. Το χρώμα αυτό μεταβάλλεται από το αρχικό χρώμα του υλικού που είναι γκρι ή ασημί σε μπλε, σκούρο μπλε ή καφέ-κόκκινο, ανάλογα το χρόνο κατεργασίας. Μελετώντας το μήκος κύματος των διαφορετικών χρωμάτων, φαίνεται ότι το κεφτέ-κόκκινο έχει υψηλότερη τιμή ανακλαστικότητας σε σχέση με το μπλε. Η αλλαγή στο χρώμα της επιφάνειας του αποβλίπτου σχετίζεται, κατά κύριο λόγο, με τη θερμοκρασία στην κοπή, που προέρχεται από την τριβή στην κοπή. Όσο το εργαλείο και το απόβλιπτο είναι σε επαφή κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, τόσο λιγότερη θερμότητα θα ρέει πίσω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του αποβλίπτου. Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η ανακλαστικότητα του αποβλίπτου σε συνδυασμό με τις δυνάμεις κοπής παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση της φθοράς του κοπτικού. Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται σαν είσοδοι για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Ένα μείζον πρόβλημα με τη συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ότι οι μετρήσεις ανάκλασης πρέπει να γίνουν offline, πράγμα που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες κοπής.

Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία αποτελεί ένα φυσικό μέγεθος, μέσω του οποίου παίρνουμε πολύ σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη της φθοράς και την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων, αφού αυτά είναι αποδοτικά σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών. Όπως κάθε σώμα, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός, έτσι και τα κοπτικά εργαλεία εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η οποία μεταδίδεται στο χώρο υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαιρείται στην υπεριώδη, στην ορατή και στην υπέρυθη περιοχή. Στα περισσότερα συστήματα οι επιφανειακές θερμοκρασίες ακτινοβολούν στην υπέρυθη περιοχή (0,8 μm έως 100 μm) [8]. Έναν βασικό τρόπο μέτρησης της θερμοκρασίας αποτελεί η χρήση του πυρομέτρου ολικής ακτινοβολίας. Το πυρόμετρο χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες μεταξύ 700° C και 2000° C. Συλλαμβάνει ολόκληρο το φάσμα της ακτινοβολίας του μετρούμενου σώματος και είναι βαθμονομημένο για συνθήκες μέλανος σώματος (ιδανικό σώμα το οποίο απορροφά όλο το φως που προσπίπτει πάνω του). Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το ότι δεν έρχεται σε επαφή με το θερμό σώμα. Η θερμοκρασία που μετράει

το πυρόμετρο είναι με βάση το νόμο Stefan-Boltzmann, ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας πηγής.

Μια άλλη μέθοδο συλλογής των πληροφοριών που χρειαζόμαστε σχετικά με τη θερμοκρασία των εργαλείων είναι η θερμογραφία. Η θερμογραφία είναι σημαντικό διαγνωστικό εργαλείο στη βιομηχανία και αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία η υπέρυθρη ακτινοβολία μετατρέπεται σε ορατή. Η μέτρηση γίνεται χωρίς επαφή. Η κατανομή της θερμοκρασίας του αντικειμένου που μετράται αποτυπώνεται με ένα εύρος χρωμάτων σε πραγματικό χρόνο. Με τη θερμογραφία δεν μετράται απευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Έτσι, οι υποεπιφανειακές ανωμαλίες στο υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία, προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες. Η θερμογραφία χρησιμοποιεί μια κάμερα με IR και μια οθόνη για απεικόνιση. Το σημαντικότερο στοιχείο στην κάμερα αποτελεί ο ανιχνευτής IR, ο οποίος μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική. Καλύτερα αποτελέσματα της μεθόδου έχουμε στην on-line θερμογραφία με χρήση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης. Η υπέρυθρη θερμογραφία απαιτεί ανάλυση των δεδομένων απεικόνισης για την εποπτεία της φθοράς, όμως η διαδικασία αυτή απλοποιείται, λόγω της διαθεσιμότητας λογισμικών μηχανικής όρασης. Η χρήση υπερηχητικών εκπομπών καθίσταται σπάνια, πέρα από την κατεργασία της τόννευσης.

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα: Η χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στην τόννευση για παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων με έμμεσο τρόπο αφορά κατά κύριο λόγο την ανίχνευση της θραύσης. Ο συνδυασμός τους με τις υπόλοιπες μεθόδους, όπως φαίνεται και παραπάνω, μας δίνει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων. Η ακρίβεια τους εμφανίζει εντυπωσιακά αποτελέσματα, αφού ανέρχεται σε ποσοστά της τάξης του 90%. Παρόλα αυτά, όμως, λόγω της απαίτησης για εκτεταμένη εκπαίδευσή τους, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα δεν αποτελούν μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή.

3.1.2 Στο φραιζάρισμα

Το φραιζάρισμα είναι η κατεργασία κατά την οποία η κοπή πραγματοποιείται, μέσω ενός περιστρεφόμενου κοπτικού εργαλείου. Το εργαλείο αυτό είναι κυκλικής διατομής με πολλές κοπτικές ακμές σε μορφή σφήνας, ώστε το εργαλείο να εισέρχεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και να πραγματοποιεί την κοπή. Το τεμάχιο αυτό, συνήθως, εκχονδρίζεται ή αποπερατώνεται, ενώ για καλή ποιότητα τελικής επιφάνειας χρησιμοποιείται η κατεργασία του φινιρίσματος. Η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου αποτελεί την κύρια κίνηση της κοπής. Η γωνιακή ταχύτητα της περιστροφής αυτής αποτελεί σημαντική παράμετρο της ταχύτητας κοπής και γι' αυτό το λόγο επιλέγεται σε συνδυασμό με το κατεργαζόμενο υλικό, το υλικό του κοπτικού εργαλείου και το είδος του φραιζαρίσματος. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ της τόννευσης και του φραιζαρίσματος, αποτελεί το γεγονός ότι οι δυνάμεις και οι ροπές στο φραιζάρισμα είναι περιοδικές. Αυτό οφείλεται τόσο στη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων, όσο και στη φύση της κατεργασίας. Κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής κάθε δόντι εισέρχεται στο τεμάχιο, κινείται μέσα σε αυτό και εξέρχεται.



Σχήμα 3.2: Τυπικό προφίλ κοπτικού εργαλείου φραιζαρίσματος προσώπου

Φραιζάρισμα προσώπου

Το φραιζάρισμα προσώπου είναι ένα είδος φραιζαρίσματος (γίνεται χρήση του για την πειραματική μελέτη μας παρακάτω), κατά το οποίο ο άξονας του εργαλείου είναι κάθετος στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Το κοπτικό εργαλείο έχει κυλινδρική μορφή, αφαιρώντας υλικό από το τεμάχιο με περιφερειακά διατεταγμένες και στο εμπρός του προσώπου του κοπτικές ακμές.



Σχήμα 3.3 : Στιγμιότυπο από κατεργασία φραιζαρίσματος προσώπου

Δυνάμεις κοπής: Η χρήση των δυνάμεων κοπής αποτελεί μια πολύ δημοφιλή μέθοδο για την ανίχνευση της φθοράς στην κατεργασία φραιζαρίσματος. Η μέτρηση των δυνάμεων κοπής γίνεται κατά κύριο λόγο με δυναμόμετρα. Το δυναμόμετρο χρησιμοποιείται τόσο για off-line όσο και για on-line μελέτη της κατάστασης κοπτικών εργαλείων [9,10]. Η συσκευή παρέχει άμεση πληροφορία για τη δύναμη κοπής, που αποτελεί την καλύτερη παράμετρο για να περιγράψουμε την κατεργασία. Το δυναμόμετρο χρησιμοποιείται, επίσης, για να εντοπίσει τη θραύση, η οποία εμφανίζεται σαν μια μεγάλη ακμή (peak) στο σήμα. Αυτή η μεγάλη ακμή (peak) αποτελεί, ωστόσο, και πρόβλημα της μεθόδου, καθώς συχνά τα σήματα μπορεί να μας δίνουν ψευδείς συναγερμούς. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τιμές τους μπορεί να υπερβούν τα όρια που επιλέγονται για να σηματοδοτήσουν τη θραύση. Με τη χρήση δυναμόμετρων για την ακριβή μέτρηση των δυνάμεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, υπολογίζεται μια μέση προκύπτουσα δύναμη ως εξής :

$$F_{av} = \sqrt{F_{ax}^2 + F_{ay}^2} \quad (\text{Εξίσωση 3.1})$$

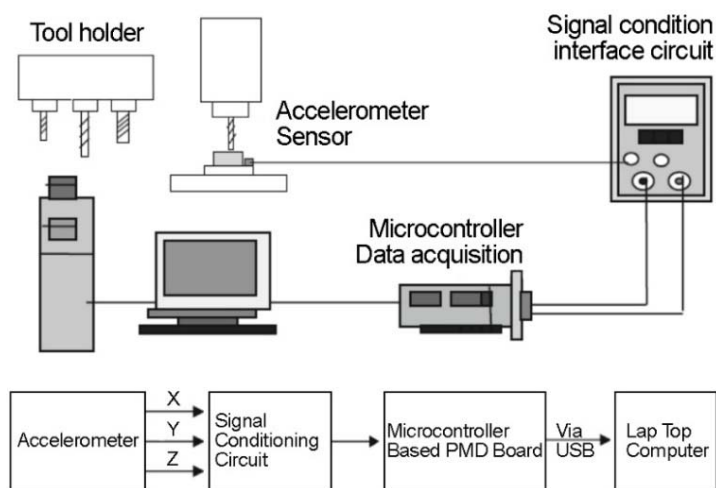
Όπου F_{ax} και F_{ay} είναι ο μέσος όρος των δυνάμεων στις κατευθύνσεις x και y σε μία περίοδο δοντιών. Με τη χρήση τη συνισταμένης δύναμης μπορεί να ανιχνευθεί η θραύση του εργαλείου και να διαχωριστεί από τους ψευδείς συναγερμούς. Ο συνδυασμός του δυναμόμετρου με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρέχει μεγάλη ακρίβεια στον εντοπισμό της φθοράς που φτάνει το 90,7%.

Ταλαντώσεις: Οι δυνάμεις τριβής μεταξύ εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, καθώς και πιθανή θραύση στα πλακίδια προκαλούν ταλάντωση. Η μέτρηση των ταλαντώσεων σε αυτή την περίπτωση γίνεται με τη βοήθεια ενός επιταχυνσιόμετρου, τοποθετημένο στο πλακίδιο του κοπτικού εργαλείου. Όταν η φθορά αυξάνεται πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή, υπάρχει και

αύξηση των δυνάμεων κοπής, κάτι το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε αύξηση των ταλαντώσεων. Γι' αυτό το λόγο, η ανάλυση των σημάτων των ταλαντώσεων παρέχει καλή πληροφορία για τον εντοπισμό της θραύσης [11, 12]. Τα μειονεκτήματα του επιταχυνσιόμετρου είναι τα εξής [13] :

- Η ταχύτητα της κατεργασίας πρέπει να παραμένει εντός ενός ορισμένου ορίου
- Το εύρος των σημάτων μειώνεται με μια αύξηση της απόστασης μεταξύ του αισθητήρα και της κοπτικής ακμής
- Η θέση πρόσδεσης του επιταχυνσιόμετρου μπορεί να αλλάξει τις τιμές
- Το παραγωγικό περιβάλλον δεν είναι καλή επιλογή για τέτοιου είδους αισθητήρες (λόγω ψυκτικού υγρού, αποκόλληση αποβλήτων κ.α.)

Στην έρευνα που πραγματοποιείται στο [14], εξετάζεται ο ρόλος των ταλαντώσεων και η σχέση τους με τη φθορά των κοπτικών εργαλείων χρησιμοποιώντας ένα επιταχυνσιόμετρο τοποθετημένο επί του πλακιδίου ενός κοπτικού εργαλείου φραιζαρίσματος προσώπου. Κατά το φραιζάρισμα διάφορες διακριτές ζώνες υψηλής ενέργειας παρατηρούνται στο πεδίο της συχνότητας. Αυτές σχετίζονται με το υποσύστημα του τραπέζιού-τεμαχίου, το υποσύστημα ατράκτου-κοπτικού εργαλείου, και το ίδιο το εργαλείο. Διαπιστώθηκε επίσης, ότι υπάρχουν ορισμένες ζώνες συχνοτήτων που είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και μπορούν να αγνοηθούν.



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα κίνησης σε πειραματική διαδικασία χρήσης επιταχυνσιόμετρου για τη μελέτη φθοράς κοπτικών

Ισχύς ατράκτου: Η κατανάλωση της ισχύς της ατράκτου είναι ευθέως ανάλογη της ροπής στρέψης, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει σχέση μεταξύ ρεύματος και δυνάμεων κοπής, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο για την τórνευση. Η παραπάνω διαδικασία στο φραιζάρισμα γίνεται με αισθητήρες ρεύματος μέσω των οποίων μπορεί να εντοπιστεί φθορά στα κοπτικά εργαλεία [15,16]. Στο [16] παρουσιάζεται η στρατηγική κατά την οποία η μελέτη της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου σχετίζεται με παραμέτρους της κοπής. Ο αισθητήρας ρεύματος είναι συνήθως συμπληρωματικό κομμάτι στα συστήματα, αφού συνδυάζεται με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για αύξηση της αξιοπιστίας και βελτιωμένα αποτελέσματα.

Ακουστικές εκπομπές: Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας της κοπής δημιουργούνται θόρυβοι από την εργαλειομηχανή, λόγω της ύπαρξης τάσεων μεταξύ αυτής και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, των αποβλήτων που προκύπτουν από την αφαίρεση υλικού και της θραύσης του εργαλείου. Το πλεονέκτημα των αισθητήρων AE είναι το ίδιο με αυτό στην τórνευση, ότι ανιχνεύουν δηλαδή συχνότητες υψηλότερες από αυτές του περιβάλλοντος και χρησιμοποιούνται τόσο για τον εντοπισμό της φθοράς [17], όσο και για τον εντοπισμό της θραύσης [18]. Παρόλο όμως, το μικρό κόστος το δικό τους και της εγκατάστασής τους, δεν αποτελούν αξιόπιστη επιλογή για παραγωγικό περιβάλλον, λόγω του κινδύνου να συλλάβουν άλλους θορύβους. Επίσης

χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή η σωστή πρόσδεσή τους στη μηχανή, καθώς αυτό επηρεάζει κατά πολύ τις τιμές τους.

Δείκτης φθοράς- Δείκτης θραύσης: Μια άλλη μέθοδος για τον προσδιορισμό της κατάστασης του εργαλείου, είναι ο υπολογισμός δύο δεικτών, του δείκτη θραύσης και του δείκτη φθοράς, οι οποίοι υπολογίζονται ως εξής:

$$\text{δείκτης θραύσης} = \frac{\text{RMS (έξοδος φίλτρου)}}{\text{RMS (δεδομένα εισόδου)}} \quad (\text{Εξίσωση 3.2})$$

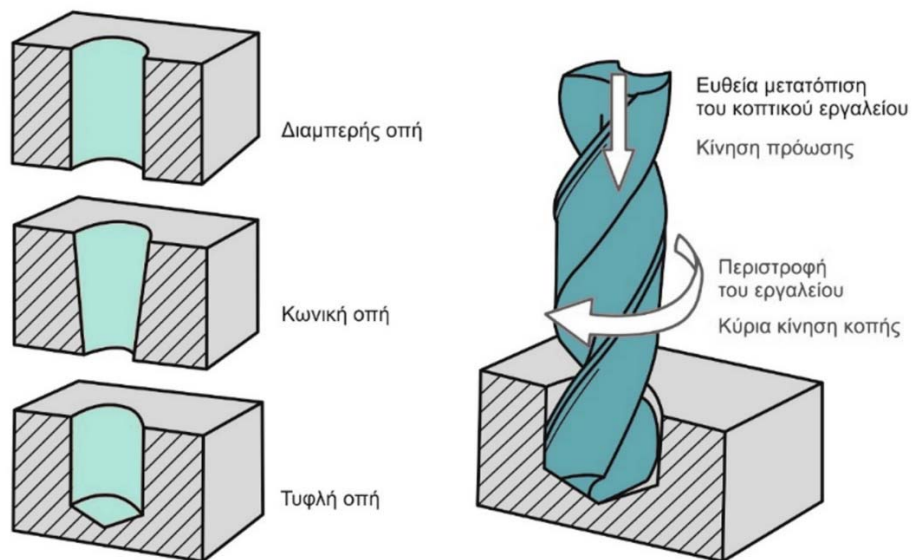
$$\text{δείκτης φθοράς} = \frac{\sqrt{\text{διακύμανση}}}{\text{βάθος κοπής} \cdot \frac{\text{rpm}}{660}} \quad (\text{Εξίσωση 3.3})$$

Όσο αφορά το δείκτη φθοράς, η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με το βάθος της κοπής και την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού. Η χρήση των αδιάστατων δεικτών θραύσης και φθοράς αποδείχθηκε αρκετά επιτυχημένη. Σε περιπτώσεις θραύσης, η αναλογία ποικίλει μεταξύ 0.4 και 0.83 για υγιή και φθαρμένα κοπτικά εργαλεία, αντίστοιχα. Ο δείκτης της φθοράς του εργαλείου, είναι ανεξάρτητος με την πρόωση, το βάθος κοπής και την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου.

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα: Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα στο [19] χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα συστήματα πολλών αισθητήρων για την παρακολούθηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Έχει διαπιστωθεί, επίσης, πως η τυπική απόκλιση των σημάτων δόνησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο συσχέτισης με τη φθορά [19]. Δύο τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν στο [20], για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής στην κατεργασία του φραιζαρίσματος. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί όγδοης τάξης αυτοπαλινδρόμηση (AR) για τον εντοπισμό φθοράς σε τραχιά και μη κοπτικά εργαλεία. Στο [21], αποδείχτηκε ότι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι πολύ αποτελεσματικά όταν τροφοδοτούνται με δεδομένα δυνάμεων. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα συνδυάζονται με προσαρμοστικά δίκτυα συντονισμού στο [22] για να μειωθεί η εξάρτησή τους από ειδική εκπαίδευση, βελτιώνοντας έτσι, την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται επίσης, για την παρακολούθηση της φθοράς κοπτικού εργαλείου στο [23] και βρέθηκε ότι μπορεί να πετύχει ακρίβεια της τάξης του 91%.

3.1.3 Στη διάτρηση

Η διάτρηση αποτελεί μία από τις παλαιότερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μηχανουργικές κατεργασίες δημιουργίας οπών. Είναι, επίσης, μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες κοπής αφού τα περισσότερα μηχανολογικά εξαρτήματα διαθέτουν οπές διάφορων μορφών και μεγεθών. Χρησιμοποιείται τόσο σε μεταλλικά όσο και σε μη μεταλλικά αντικείμενα. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη διάτρηση έχουν δύο κοπτικές ακμές, ενώ απαιτούνται από αυτά δύο ταυτόχρονες κινήσεις. Η κύρια κίνηση κοπής είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου (τρυπάνι), ενώ σε ειδικές περιπτώσεις (boring) υπάρχει δυνατότητα περιστροφής και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η ταχύτητα κοπής εξαρτάται από τον αριθμό των στροφών και εκφράζεται σε [m/min]. Παίρνει τη μέγιστη τιμή της στην περιφέρεια του τρυπανιού, ενώ μειώνεται στο κέντρο του. Η δεύτερη κίνηση στη διάτρηση είναι η ευθεία μετακίνηση του τρυπανιού προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η κίνηση αυτή καθορίζεται από την πρόωση του κοπτικού και ελέγχει το πάχος του παραγόμενου αποβλήτου, οπότε και τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Μεγάλη ταχύτητα πρόωσης αντιστοιχεί σε μεγάλο πάχος αποβλήτου και αντίστοιχα σε μεγάλες δυνάμεις κοπής. Η ταχύτητα πρόωσης μετρείται σε [mm/rev]. Οι κατεργασίες διάτρησης χωρίζονται σε διατρήσεις πλήρους οπής και μεγέθυνσης οπής. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται τρυπάνια τριών ή τεσσάρων κοπτικών ακμών. Η διάτρηση σε αντίθεση με το φραιζάρισμα και την τórνευση απαιτεί πλήρη βύθιση του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 3.5 : Κινηματική της διάτρησης και είδη οπών

Η φθορά στη διάτρηση είναι μια προοδευτική διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα στο εξωτερικό άκρο των κοπτικών ακμών του τρυπανιού και οφείλεται στην τριβή και στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ωστόσο, στη συνεχή κοπή η αστοχία του τρυπανιού είναι μια στοχαστική διαδικασία. Βασικές αιτίες για τη μείωση της διάρκειας ζωής του τρυπανιού είναι οι ανομοιογένειες που μπορεί να υπάρχουν στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και στο υλικό του εργαλείου, οι ανωμαλίες στη ροή της κοπής και η αναπόφευκτη ασυμμετρία κατά τη διάρκεια της τριβής των κοπτικών ακμών [24]. Η φθορά στο τρυπάνι έχει πολύ σημαντική επίδραση στην ποιότητα της οπής καθώς και στη διάρκεια ζωής του ίδιου του τρυπανιού. Ως εκ τούτου, η online παρακολούθηση της φθοράς στη διάτρηση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στη βιομηχανική παραγωγή.



Σχήμα 3.6 : Στιγμιότυπο από κατεργασία διάτρησης

Δυνάμεις κοπής: Όπως ήδη έχει αναφερθεί και νωρίτερα, η παρακολούθηση των δυνάμεων κοπής μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες για τη φθορά των κοπτικών εργαλείων. Είναι γενικά γνωστό πως οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται όσο αυξάνεται η φθορά των κοπτικών εργαλείων [25]. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της τριβής μεταξύ κοπτικού και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στη διάτρηση οι δυνάμεις που μετρώνται είναι η ροπή και η πρόωση. Η πρόωση έχει χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση φθοράς στη διάτρηση στο [26]. Η ταυτόχρονη παρακολούθηση της πρόωσης και της ροπής είναι πολύ συχνό φαινόμενο το οποίο βλέπουμε στα [25, 27]. Η μέτρηση της ροπής βασίζεται στην παραμόρφωση λόγω στρέψης που υφίσταται η επιφάνεια ενός κυλινδρικού άξονα από ελαστικό υλικό, όταν εφαρμόζεται ροπή σε αυτό τον άξονα. Κατά την εφαρμογή ροπής στον άξονα, προκαλείται συστρόφη και επομένως η επιφάνειά του κοπτικού εργαλείου

παραμορφώνεται. Η γωνία συστροφής του κυλινδρικού άξονα είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης ροπής και του μήκους του άξονα. Η εποπτεία της ροπής αποτελεί γενικά μία δαπανηρή διαδικασία και λόγω αυτού σε πληθώρα περιπτώσεων μετράται η ισχύς της ατράκτου αντί αυτής [28].

Ακουστικές εκπομπές: Οι πειραματικές εργασίες που έγιναν στο [29] περιλαμβάνουν τη συλλογή των σημάτων ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια κατεργασιών διάτρησης. Διαπιστώθηκε ότι καθώς αυξάνεται η φθορά, η ενέργεια του σήματος ακουστικής εκπομπής αυξάνεται κι αυτή. Υπάρχουν πολλές πηγές ακουστικών εκπομπών. Στη διάτρηση οι πιο γνωστές είναι η πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η τριβή στην επιφάνεια εργαλείου-αποβλήττου και στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η θραύση, η προσκόλληση αποβλήτων στο κοπτικό εργαλείο. Δεν έχει ακόμη, όμως, ταυτοποιηθεί σωστά με την ανάλυση ΑΕ σε ποιες από αυτές τις ειδικές φάσεις παράγεται μεγαλύτερη φθορά. Το [29] μας περιγράφει τη σχέση του βάθους και του χρόνου διάτρησης με τα δεδομένα των ακουστικών εκπομπών σε 5 στάδια της κατεργασίας για επικαλυμμένα και μη επικαλυμμένα τρυπάνια. Το πρώτο στάδιο αντιστοιχεί στο σημείο που το τρυπάνι ελαφρώς εισέρχεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Το δεύτερο και το τρίτο στάδιο ονομάζονται παροδική και σταθερή διάτρηση αντίστοιχα. Το τέταρτο στάδιο αφορά το σταμάτημα του τρυπανιού και το πέμπτο την επαναφορά του. Στο δεύτερο και τέταρτο στάδιο της κατεργασίας παρατηρήθηκε εμφάνιση φθοράς με αντίστοιχη αύξηση της ακουστικής ενέργειας

Ταλαντώσεις: Οι ταλαντώσεις στη διάτρηση μετρώνται τόσο στην εγκάρσια όσο και στην αξονική κατεύθυνση. Τα σήματα των ταλαντώσεων περιλαμβάνουν αξιόπιστα χαρακτηριστικά για τον έλεγχο της φθοράς και της θραύσης ενός τρυπανιού για τους εξής λόγους: Πρώτον, γιατί στη διάτρηση η συχνότητα διατηρείται σχετικά σταθερή, δεύτερον, οι φυσικές συχνότητες των εγκάρσιων και αξονικών λειτουργιών του συστήματος τεμαχίου – τρυπανιού είναι αδρανείς στη διάτρηση εγκάρσιας τομής, κάτι που απλοποιεί την παρακολούθηση φθοράς τρυπανιών διάφορων μεγεθών και τρίτον, οι ταλαντώσεις επηρεάζονται κυρίως από τη ροπή και την πρόωση που αποτελούν και τις κυρίαρχες δυνάμεις στη διάτρηση.

RMS: Η μέτρηση της RMS τιμής αποτελεί μια αρκετά αποτελεσματική μέθοδο για τον έλεγχο των επιπέδων φθοράς και τον εντοπισμό της θραύσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η RMS τιμή περιέχει συνδυασμό ενέργειας από το καθαρό σήμα και από το θόρυβο. Στην περίπτωση των ταλαντώσεων και της παρακολούθησης σημάτων ακουστικών/υπερηχητικών εκπομπών, η συνιστώσα του θορύβου μπορεί να είναι σημαντική. Συγκρινόμενη με άλλες στατιστικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της αριθμητικής μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης, της κύρτωσης, της λοξότητας, διαπιστώθηκε ότι η RMS τιμή δεν δίνει καλύτερα αποτελέσματα, αλλά πάντα βρισκόταν μεταξύ των κορυφαίων τεσσάρων. Ο συνδυασμός αυτού με την ευκολία του υπολογισμού της αποδεικνύει, γιατί η τιμή RMS των συλλεγόμενων σημάτων αποτελεί μία από τις ευρέως διαδεδομένες μεθόδους παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων στη διάτρηση.

Αυτο-οργανωμένα νευρωνικά δίκτυα: Στην κατεργασία της διάτρησης χρησιμοποιούνται διάφορα είδη αυτό-οργανωμένων δικτύων και παράλληλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την παρακολούθηση της φθοράς. Στο [30] έχουμε ένα νευρωνικό δίκτυο αντίστροφης διάδοσης, το οποίο κάνοντας συνδέσεις από το στρώμα εισόδου στο στρώμα εξόδου βελτιώνει την αποδοτικότητα της εκπαίδευσης. Αυτο-οργανωμένα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση της φθοράς και μέσω του ταχέως μετασχηματισμού Fourier για την εξαγωγή χαρακτηριστικών τόσο σε σήματα δύναμης όσο και σε σήματα ροπής. Ένας άλλος τύπος νευρωνικού δικτύου, ονομαζόμενος περιορισμένης ενέργειας Coulomb, χρησιμοποιείται για να κατηγοριοποιήσει τα σήματα σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιείται για αναγνώριση προτύπων και μπορεί να δημιουργήσει νέες κλάσεις, όταν αντιμετωπίζει ένα πρότυπο για το οποίο δεν έχει εκπαιδευτεί. Αυτή η δυνατότητα προσαρμογής είναι πολλά υποσχόμενη και δίνει ακρίβεια της τάξης του 90% [31].

3.1.4 Γενικά συμπεράσματα

Εκτός από τις πιο συγκεκριμένες πληροφορίες για την κάθε κατεργασία, είναι σημαντικό να βγουν και κάποια βασικά συμπεράσματα από τη χρήση των έμμεσων μεθόδων παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων. Η χρήση των αισθητήρων αποτελεί, ίσως, το σημαντικότερο κομμάτι των μεθόδων, ειδικά στη μελέτη των δυνάμεων, των ταλαντώσεων και των ακουστικών εκπομπών. Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε, έδειξε ότι οι διαθέσιμοι εμπορικοί αισθητήρες, είναι κατάλληλοι για την εξαγωγή σημαντικής πληροφορίας, αλλά υπάρχει μια γενική τάση να επωφεληθούν τα συστήματα από την τεχνολογία νέων αισθητήρων για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

Από τις διάφορες ερευνητικές εργασίες που έχουν γίνει, κατανοούμε πως είναι πολύ δύσκολο να γίνει μια σύγκριση των μεθόδων ως προς την καταλληλότητα τους και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς η καταλληλότητα μεταβάλλεται ανάλογα το είδος της κατεργασίας, το περιβάλλον στο οποίο διεξάγεται η μέτρηση και το είδος της πληροφορίας που θέλουμε να λάβουμε. Ωστόσο, κάποια υποτυπώδη συμπεράσματα που μπορούν να βγουν. Σε πρακτικό επίπεδο, δείχνουν πως η χρήση της ισχύος της ατράκτου αποτελεί μια λιγότερο δημοφιλή μέθοδο σε σχέση με τη χρήση των δυνάμεων κοπής, ή τις ταλαντώσεις. Οι ακουστικές εκπομπές αποτελούν, επίσης, μια αρκετά δημοφιλή μέθοδο.

Η χρήση γενικά της τεχνητής νοημοσύνης, των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και των συστημάτων ασαφούς λογικής αποτελούν μέθοδο που μας δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια, όταν συνδυάζεται με άλλες μεθόδους ελέγχου της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα παρέχουν μια εξαιρετική μαθησιακή ικανότητα και ως εκ τούτου, φαίνεται ότι προσφέρουν αρκετές δυνατότητες για διαδεδομένη χρήση. Η δυσκολία χρήσης της μεθόδου έγκειται πρώτον, στο ότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε διάφορες παραμέτρους της κοπής και δεύτερον, στην απαίτηση εκτεταμένης εκπαίδευσής τους για τη σωστή λειτουργία τους. Αυτό σημαίνει πως η εκπαίδευση ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί να γίνουν αρκετές δοκιμαστικές κοπές και για το λόγο αυτό είναι βιώσιμα μόνο σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Το σημαντικότερο στοίχημα στην περαιτέρω εξέλιξη και βελτιστοποίηση των έμμεσων μεθόδων ελέγχου, είναι η εύρεση νέων τρόπων, ώστε αυτές να καθίστανται κατάλληλες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η μη εύκολη χρήση τους ή η καθόλου χρήση κάποιων από αυτών απευθείας στην παραγωγική διαδικασία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα. Όσο πιο ακριβό και περίπλοκο είναι ένα σύστημα, τόσο λιγότερες είναι οι πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Έτσι, είναι επιβεβλημένο να εξισορροπηθεί η ανάγκη για αποτελεσματική εποπτεία με την ανάγκη για πρακτικά συστήματα, βασισμένα σε φτηνούς, απλούς και αποδοτικούς αισθητήρες και μεθοδολογίες. Η ευκολία της εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και αναβάθμισης του συστήματος ελέγχου της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες, ώστε το σύστημα αυτό να είναι επιτυχημένο. Μόνο με τον τρόπο αυτό, μπορούν οι μέθοδοι ελέγχου να μην μένουν μόνο σε εκπαιδευτικό και ερευνητικό επίπεδο, αλλά να αποτελεί βασικό κομμάτι ελέγχου σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον.

3.2 Άμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς

Οι άμεσες μέθοδοι ελέγχου μετρούν τη φθορά άμεσα και απευθείας πάνω στο εργαλείο σε αντίθεση με τις έμμεσες, όπου η μέτρηση γίνεται μέσω ενδιάμεσων μεταβλητών, οι οποίες συσχετίζονται με την φθορά του εργαλείου, όπως οι δυνάμεις κοπής, οι ακουστικές εκπομπές, οι ταλαντώσεις και άλλες. Οι άμεσες μέθοδοι βασίζονται στην οπτική επιθεώρηση ή στην όραση με τη χρήση υπολογιστών (computer vision). Μπορεί οι έμμεσες μέθοδοι να θεωρούνταν πιο δημοφιλείς για πολλά χρόνια, καθώς η μέτρηση της φθοράς γίνεται ευκολότερα με αυτές, χωρίς να σταματάει, δηλαδή, η διαδικασία της κατεργασίας, παρόλα αυτά, φαίνεται πως η κατάσταση αρχίζει να αλλάζει. Η ακρίβεια των μετρήσεων των άμεσων μεθόδων είναι πολύ καλύτερη, λόγω του ότι επηρεάζονται πολύ λιγότερο από σήματα θορύβου.

Όπως φαίνεται, τα οπτικά συστήματα άμεσων μεθόδων μέτρησης φθοράς αποτελούν μία ιδιαίτερα αξιόπιστη επιλογή, παρά το υψηλό τους κόστος. Η σημαντική, όμως, πρόοδος που έχει επιτευχθεί στον τομέα της τεχνολογίας αισθητήρων τα τελευταία χρόνια και πιο συγκεκριμένα στη βελτιστοποίηση της απόδοσης τους, αλλά και στην ταυτόχρονη μείωση του κόστους των αισθητήρων όρασης, αποτελεί βασικό εφόδιο για περαιτέρω εξέλιξη της έρευνας στον τομέα της άμεσης μέτρησης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Επιπλέον, οι εξελίξεις στην επεξεργασία εικόνας και την τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης παρέχουν πιο αξιόπιστη εικόνα ανάλυσης της φθοράς άρα και καλύτερες στρατηγικές αντικατάστασης εργαλείου. Οι εικόνες της φθοράς λαμβάνονται, κατά κύριο λόγο, με CCD κάμερες, μια τεχνολογία πολύ λιγότερο ευαίσθητη στο θόρυβο βιομηχανικού περιβάλλοντος σε σχέση με τους αισθητήρες των έμμεσων μεθόδων. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση ενός συστήματος μηχανικής όρασης για παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων κατά τις κατεργασίες κοπής, οι οποίοι έγκεινται στη χρήση ενός κατάλληλου συστήματος φωτισμού και ενός ισχυρού αλγόριθμου ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για την απομάκρυνση του ανεπιθύμητου θορύβου από την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και τον ακριβή προσδιορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος. Οι πολλές ερευνητικές εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα, δείχνουν πως τα συστήματα μηχανικής όρασης με χρήση υπολογιστών αποτελούν ήδη μια εξαιρετικά αξιόπιστη και υπολογίσιμη τεχνολογία. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, πως ο χαρακτηρισμός των διαφορετικών μορφολογιών φθοράς δεν έχει ακόμη επιτευχθεί αποτελεσματικά.

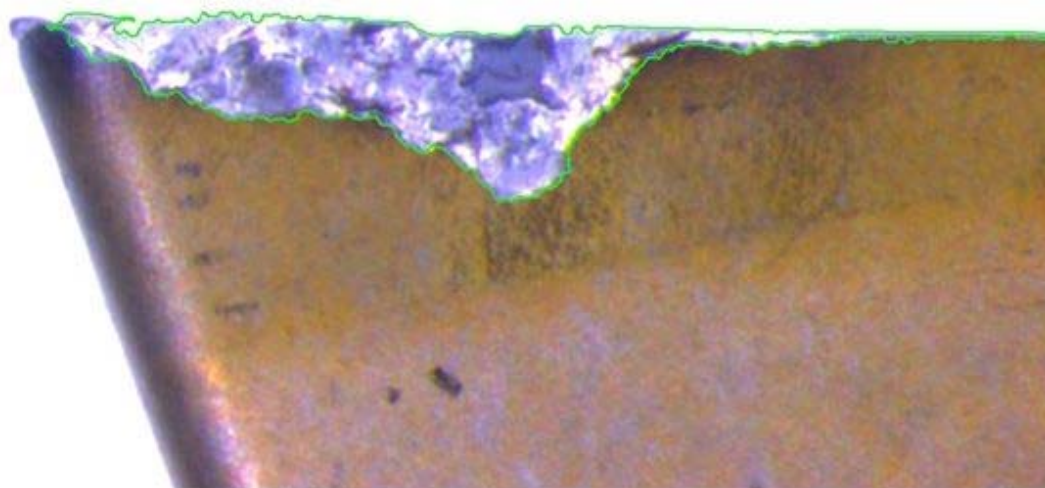
Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στα συστήματα παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, τα οποία βασίζονται στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Τα εν λόγω συστήματα αποτελούν φθηνές και ευέλικτες λύσεις στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, δεν έρχονται σε επαφή με τα εργαλεία και μπορούν να λειτουργούν και να ελέγχονται εξ' αποστάσεως, κάτι που τα καθιστά αναπόσπαστα τμήματα μη επανδρωμένων συστημάτων παραγωγής.

Γενικότερα, ένα σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, αποτελείται από τις βαθμίδες της προεπεξεργασίας, της κατάτμησης, της ανίχνευσης ακμών και της επεξεργασίας της εικόνας, μέσω μαθηματικών-μορφολογικών τελεστών [32]. Η προεπεξεργασία της εικόνας, αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη βελτίωση της οπτικής εμφάνισης μιας εικόνας και την τροποποίησή της με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αποτελεσματικότερη η παραπέρα ανάλυσή της. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του θορύβου, της θάμπωσης (blurring), τη βελτιστοποίηση της αντίθεσης και άλλων χωρικών χαρακτηριστικών των εικόνων. Στο βήμα αυτό, συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές φιλτραρίσματος και τεχνικές αύξησης της αντίθεσης της εικόνας. Οι τεχνικές φιλτραρίσματος χωρίζονται σε τεχνικές στο πεδίο του χώρου (spatial domain) και σε τεχνικές στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain). Διακρίνονται επίσης και ως γραμμικές ή μη γραμμικές τεχνικές φιλτραρίσματος. Στις μεθόδους παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων κατά τις κατεργασίες κοπής, η προεπεξεργασία αποτελεί ζωτικής σημασίας διεργασία για την επεξεργασία της ληφθείσας εικόνας, διότι είναι πιθανόν να υπάρχει αρκετός θόρυβος πάνω στα κοπτικά εργαλεία λόγω αντανάκλασεων, σκόνης, υγρών κοπής, προσκολλημένων αποβλίττων κ.α.

Μετά την προεπεξεργασία, ακολουθούν οι διαδικασίες της κατάτμησης της εικόνας και της ανίχνευσης των ακμών, μιας και ο προσδιορισμός των περιοχών ή των αντικειμένων που περιέχει μια εικόνα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την παραπέρα επεξεργασία, ανάλυση ή αναγνώριση. Συνήθως για την ανάπτυξη και την επιλογή μιας τεχνικής κατάτμησης χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες της ασυνέχειας (discontinuity) και ομοιότητας (similarity). Με τον έλεγχο της ασυνέχειας εξετάζεται η απότομη μεταβολή στις τιμές των εικονοστοιχείων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να προσδιοριστούν απομονωμένα σημεία, καμπύλες και ακμές. Ο έλεγχος της ομοιότητας ως προς ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά οδηγεί σε τεχνικές τμηματοποίησης, όπως η κατωφλίωση (thresholding) και η ανάπτυξη περιοχών (region growing). Γενικότερα, για την τμηματοποίηση μιας εικόνας φθοράς, χρησιμοποιούνται τεχνικές κατωφλίωσης και πολυκατωφλίωσης, για να διαχωριστεί η ζώνη φθοράς από την άφθαρτη περιοχή του κοπτικού εργαλείου και από το φόντο. Η ανίχνευση των ακμών είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, διότι με τις ακμές μπορούν να περιγραφούν, να προσδιοριστούν και να αναγνωριστούν αντικείμενα που περιέχονται σε ψηφιακές εικόνες. Ως

ακμή μπορεί να θεωρηθεί μια καμπύλη, στις δύο πλευρές της οποίας υπάρχουν σημαντικές διαφορές που αφορούν τις εντάσεις φωτεινότητας ή ακόμα ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά χώρου. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να αφορούν την πυκνότητα της εικόνας, την υφή και κυρίως τις αλλαγές στην κατανομή των επιπέδων του γκρι. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει ακόμα κάποιο γενικό μαθηματικό μοντέλο που να καθορίζει επακριβώς τις ακμές. Διαφορετικές προσεγγίσεις καταλήγουν σε διαφορετικές ανιχνεύσεις των ακμών. Κάθε εφαρμογή μπορεί να απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένης τεχνικής ανίχνευσης ακμών.

Το επόμενο κατά σειρά βήμα έγκειται στην επεξεργασία της εικόνας, που λαμβάνεται μετά την κατάτμηση ή μετά την ανίχνευση ακμών, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών. Η μαθηματική μορφολογία αναφέρεται στη μελέτη της γεωμετρίας, της τοπολογίας και της μορφής των αντικειμένων. Αφορά συγκεκριμένες πράξεις, όπου μια εικόνα αλληλεπιδρά με ένα δομικό στοιχείο και μετατρέπεται σε μια απλοποιημένη και λειτουργική μορφή, διατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφής της. Στοχεύει, κυρίως στη βελτίωση της δομής των αντικειμένων (φιλτράρισμα θορύβου, απλοποίηση των αντικειμένων, λείανση/όξυνση των περιγραμμάτων) και στην ποσοτική περιγραφή των αντικειμένων (χαρακτηριστικά εμβαδού, περιμέτρου). Τελικά, μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας προκύπτει ένα ενιαίο μορφολογικό στοιχείο, που σκιαγραφεί πλήρως την περιοχή ενδιαφέροντος και από το οποίο μπορούν να εξαχθούν και να υπολογιστούν τα επιθυμητά μεγέθη.



Σχήμα 3.7 : Σκιαγράφιση της περιοχής της φθοράς από σύστημα άμεσης μέτρησης της

3.2.1 Διεθνείς ερευνητικές Εργασίες

Μια από τις πρώτες προσπάθειες αυτοματοποιημένης άμεσης μέτρησης της φθοράς κοπτικών εργαλείων έγινε από τους Jeon και Kim [33], οι οποίοι πρότειναν μια in-situ οπτοηλεκτρονική μέθοδο. Στη μέθοδο αυτή, μια δέσμη laser He-Ne προσέκρουε στην επιφάνεια του υπό εξέταση κοπτικού εργαλείου, συνεπώς υπήρχε αντανάκλαση φωτός μόνο από τη ζώνη φθοράς. Με τον τρόπο αυτό, μόνο η συγκεκριμένη περιοχή γίνονταν ορατή από τη Vidicon κάμερα. Στη συνέχεια, αφού ψηφιοποιήθηκε η ληφθείσα εικόνα, επεξεργάστηκε μέσω μιας σειράς τεχνικών (καθολική κατωφλίωση, αφαίρεση του θορύβου μέσω εξισορρόπησης ιστογράμματος, εντοπισμός του περιγράμματος της φθοράς, εξομάλυνση του περιγράμματος) με σκοπό την απομόνωση και τη μέτρηση της ζώνης φθοράς.

Ο Kurada και ο Bradley [34] χρησιμοποίησαν δύο οδηγούς οπτικών ινών για να πετύχουν ικανοποιητική αντίθεση μεταξύ της φθαρμένης και της άφθαρτης περιοχής του κοπτικού εργαλείου και έλαβαν τις εικόνες φθοράς μέσω μιας CCD κάμερας. Αφού απομάκρυναν το θόρυβο λόγω κατοπτρικών ανακλάσεων, με χρήση ενός 5x5 median φίλτρου, εφάρμοσαν τόσο

τελεστές ανίχνευσης ακμών, όσο και τελεστές υψής για την κατάτμηση της εικόνας. Οι πρώτοι (Sobel/Frei-Chen) παρήγαγαν αποτελέσματα με φτωχή διακριτοποίηση, μεταξύ της ζώνης φθοράς και της άφθαρτης περιοχής του κοπτικού εργαλείου. Όσο αφορά τους δεύτερους, έδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα και περιέγραψαν ικανοποιητικά το ρυθμό εξέλιξης του φαινομένου της φθοράς.

Ο Weis έλαβε εικόνες φθοράς από εναλασσόμενα πλακίδια τόνευσης, χωρίς να τα αποδεσμεύσει από την εργαλειομηχανή. Με τη βοήθεια ενός υπέρυθρου φίλτρου, η περιοχή της φθοράς έγινε περισσότερη ευδιάκριτη και η περιοχή του φόντου πιο θολή. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν τεχνικές επεξεργασίας δυαδικών εικόνων και μορφολογικοί τελεστές για την απομόνωση και τη μέτρηση της περιοχής της φθοράς. Τα αποτελέσματα της μεθόδου επιβεβαιώθηκαν μέσω μετρήσεων, με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου. Στη συγκεκριμένη έρευνα, δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στο σύστημα φωτισμού για την on-line λήψη της εικόνας φθοράς, απ' ότι στις μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Ο Wang [35] και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για τη λήψη και την επεξεργασία διαδοχικών εικόνων κινουμένων ένθετων πλακιδίων κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος, με χρήση μιας τεχνικής συσχέτισης διαδοχικών ζευγών εικόνων. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος εξαρτιόταν ισχυρά από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου και δεν ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για μέτρηση της φθοράς σε κοπτικά πλακίδια καρβιδίων με επικάλυψη, λόγω της αλληλεπίδρασης του υλικού της επικάλυψης με το φως. Για να υπερνικήσουν τον περιορισμό του κατωφλίου, ανέπτυξαν μια διαφορετική μέθοδο, βασισμένη στην αμεταβλητότητα των ροπών, για την ακριβή επιλογή του κάτω τμήματος της ζώνης φθοράς, με μέγιστο σφάλμα 15mm και ελάχιστο 3mm, συγκριτικά με τη μέτρηση που λαμβάνονταν από το μικροσκόπιο.

Ο Sahabi και ο Ratnam [36] δημιούργησαν ένα online σύστημα για τη μέτρηση της φθοράς της κοπτικής ακμής πλακιδίων τόνευσης. Αφού εντόπισαν το προφίλ της κοπτικής ακμής του φθαρμένου κοπτικού εργαλείου, το αφαίρεσαν απ' το προφίλ της κοπτικής ακμής του υγιούς εργαλείου στο πολικό σύστημα συντεταγμένων και υπολόγισαν το πλάτος της φθοράς της κοπτικής ακμής. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν κατόρθωσε να ποσοτικοποιήσει το πλάτος της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρικές πληροφορίες της κοπτικής ακμής σε συνδυασμό με την τραχύτητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, ώστε να καθίσταται δυνατή η μέτρηση της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας, σε μια ζώνη πλησίον της κοπτικής ακμής. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των μετρήσεων που λήφθηκαν μέσω του προφίλ της κοπτικής ακμής του εργαλείου και των ανάλογων που λήφθηκαν με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ήταν 7.7%, ενώ το μέσο σφάλμα μεταξύ των μετρήσεων που λήφθηκαν μέσω του προφίλ της τραχύτητας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και των ανάλογων που λήφθηκαν με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ήταν 5.5%. Ωστόσο, η προτεινόμενη μέθοδος δεν μπόρεσε να εφαρμοστεί σε κατεργασίες υψηλής ακρίβειας με χαμηλή πρόωση.

Ο Kim και οι συνεργάτες [37], χρησιμοποίησαν μια CCD κάμερα σε συνδυασμό με ένα σύστημα φωτισμού οδηγούμενο από οπτικές ίνες για να φωτογραφίσουν την πλευρική επιφάνεια ενός τετράπτερου κονδυλίου. Διενεργήθηκαν αρκετά πειράματα για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών φωτισμού και βάση αυτών κατασκευάστηκε μια διάταξη, με σκοπό τη λήψη ευκρινών εικόνων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν περισσότερο προσανατολισμένη ως προς το οπτικό σύστημα, απ' ότι στις μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Ο Kerr και οι συνεργάτες του [38] μέτρησαν άμεσα το μέγιστο πλάτος της φθοράς, με τη βοήθεια λογισμικού ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (ImagePro Plus) και συσχέτισαν τη συμπεριφορά της σε σταθερές συνθήκες κοπής, με συγκεκριμένες παραμέτρους της εικόνας, τόσο κατά την κατεργασία της τόνευσης, όσο και κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος. Αρχικά, χρησιμοποίησαν μη γραμμικούς τελεστές, όπως η διακύμανση (variance), οι οποίοι φάνηκαν αρκετά επιτυχημένοι ως προς το διαχωρισμό της ζώνης φθοράς από την υπόλοιπη εικόνα. Ακολούθησε η κατωφλίωση της συγκεκριμένης εικόνας και καταμετρήθηκαν τα στοιχεία που είχαν τιμή μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή του κατωφλίου T, με σκοπό να υπάρξει μια ένδειξη του μεγέθους της φθοράς. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα της εργασίας των

Kurada και Bradley, όμως ήταν ευαίσθητη σε αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, καθώς και σε θόρυβο που πιθανόν να ευρίσκονταν στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου (σκόνη, προσκολλημένα απόβλητα, κ.α.).

Ο Stemmer και οι συνεργάτες [39] του εφάρμοσαν ένα νευρωνικό δίκτυο για την ταξινόμηση της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας και της θραύσης του κοπτικού εργαλείου, με σφάλμα της τάξεως του 4%, χρησιμοποιώντας μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Παρατήρησαν, μέσω του συστήματος μηχανικής όρασης, ότι η φθορά της πλευρικής επιφάνειας παρουσίαζε οξύτερη και φωτεινότερη υφή, συγκριτικά με τη θραύση. Με βάση τη συγκεκριμένη παρατήρηση, ταξινόμησαν τα είδη της φθοράς και μέτρησαν άμεσα το εμβαδόν, το μέσο και το μέγιστο πλάτος της. Όσον αφορά τις μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, χρησιμοποίησαν τον ανιχνευτή ακμών Canny, γραμμική παρεμβολή, τεχνικές επεξεργασίας δυαδικών εικόνων και τον αλγόριθμο ενεργών περιγραμμάτων. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν υλοποιήθηκε ταξινόμηση περισσότερων μορφών φθοράς, όπως για παράδειγμα η φθορά της κοπτικής ακμής ή η φθορά κρατήρα.

Οι Liang και Chiou [40] εισήγαγαν μια νέα μέτρηση της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας σε κονδύλια με πολλαπλά στρώματα επικάλυψης. Αφού ανίχνευσαν τις ισχυρές ακμές της περιοχής της φθοράς με τη βοήθεια γεωμετρικών ροπών εφάρμοσαν μια τεχνική εξομάλυνσης, η οποία έκανε χρήση των καμπυλών B-Spline. Στη συνέχεια, χρησιμοποίησαν ένα Gaussian φίλτρο για την εξομάλυνση της καμπύλης και μια στατιστική διαδικασία επιλογής του κατάλληλου κατωφλίου για την αποτελεσματική εξαγωγή της ζώνης φθοράς, ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια το μέγιστο πλάτος της.

Ο Inoue και οι συνεργάτες του [41] έκαναν μια γενικευμένη προσέγγιση ανίχνευσης φθοράς σε ραβδόμορφα κοπτικά εργαλεία, μέσω τελεστών ανίχνευσης ακμών (Prewitt) και εξήγαγαν παραμέτρους της εικόνας, αφού υλοποίησαν ένα διακριτό μετασχηματισμό Fourier, στην εικόνα με τις ανιχνευμένες ακμές. Ωστόσο, πολλές ατέλειες των εργαλείων, δε μπορούσαν να ανιχνευτούν από το συγκεκριμένο σύστημα μέτρησης.

Ο Jackson [42] χρησιμοποίησε ένα νευρωνικό δίκτυο, για την ακριβή ανίχνευση μικρών αλλοιώσεων στην επιφάνεια ενός κονδυλίου μικρής διαμέτρου. Η συγκεκριμένη τεχνική ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για μικροκοπές, ωστόσο ήταν εξαιρετικά δύσκολο να χρησιμοποιηθεί online.

Το 2013 στο Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Οργάνωσης Παραγωγής (WZL) του Πανεπιστημίου του Aachen, ο Schmitt και οι συνεργάτες του [43] ανέπτυξαν και προσάρμοσαν στο κέντρο κατεργασίας μια μονάδα φωτισμού, μέσω της οποίας εξαλείφονται οι διαταραχές από πιθανές ανακλάσεις και σκιάσεις στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Ο πλήρης φωτισμός χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο εξαγωγής ακμών του Canny και με μια γραμμική παρεμβολή για τη λεπτομερή ανίχνευση του ορίου της κοπτικής ακμής, ενώ ο πλευρικός φωτισμός χρησιμοποιήθηκε για έναν πρώιμο διαχωρισμό της ζώνης φθοράς από την υπόλοιπη περιοχή του κοπτικού εργαλείου. Αφού χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της εξισορρόπησης ιστογράμματος για την αύξηση της φωτεινότητας της ζώνης φθοράς στη ληφθείσα εικόνα, ακολούθησε η δυαδικοποίησή της με χρήση καθολικού κατωφλίου και η εφαρμογή μορφολογικών τελεστών για τον περιορισμό του θορύβου της δυαδικής εικόνας. Προκειμένου να επιτευχθεί μια αξιόπιστη εποπτεία των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών εργαλείων, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος των ενεργών περιγραμμάτων, για την ακριβή εξαγωγή της περιοχής της φθοράς. Ως ενεργά περιγράμματα θεωρούνται οι παραμετρικές καμπύλες που κινούνται στο επίπεδο της εικόνας, με τέτοιον τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ένα ενεργειακό συναρτησιακό. Έτσι, με τη βοήθεια ενός λογισμικού με γραφική διεπαφή χρήση, το οποίο έκανε χρήση των παραπάνω μεθόδων, μετρήθηκε με εξαιρετική ακρίβεια το εμβαδόν, το μέσο και το μέγιστο πλάτος της φθοράς. Παράλληλα, υλοποιήθηκε και ταξινόμηση του τύπου της φθοράς του εκάστοτε κοπτικού εργαλείου, με τη βοήθεια ενός νευρωνικού δικτύου 14 εισόδων (στατιστικά δεδομένα της εικόνας εισόδου και δεδομένα ακμών) και 2 εξόδων (φθορά ελεύθερης επιφάνειας, θραύση). Η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου επαληθεύθηκε με πειράματα φθοράς που διεξήχθησαν σε κοπτικά εργαλεία διαφορετικών γεωμετριών και διαφορετικών υλικών κατασκευής.

3.2.2 Γενικά συμπεράσματα

Γίνεται κατανοητό πως οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες μέχρι στιγμής αφορούν μεθόδους κατάτμησης εικόνων φθοράς που σχετίζονται με τεχνικές καθολικής κατωφλίωσης ή πολυκατωφλίωσης και σε χρήση τελεστών ανίχνευσης ακμών/υφής. Οι συγκεκριμένες τεχνικές στηρίζονται σε μια *a priori* γνώση του αριθμού των τελικών κλάσεων (clusters) και εκμεταλλεύονται μόνο ένα μέρος της πληροφορίας του πεδίου της εικόνας, καθώς χρησιμοποιούν ως δεδομένο για την ανάλυση, συνήθως μόνο την τιμή της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Συμπερασματικά, δεν είναι ικανές να χειριστούν την πολυπλοκότητα ενός πολυδιάστατου χώρου χαρακτηριστικών και συχνά, λόγω της ύπαρξης ανακλάσεων και θορύβου στη ληφθείσα εικόνα, αποτυγχάνουν να δώσουν μια εξαιρετικά ικανοποιητική κατάτμηση.

4. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

4.1 Στερεομικροσκόπιο Leica M125

Στην παρούσα πειραματική μελέτη το σύστημα μέτρησης της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας των κοπτικών εργαλείων αποτελείται από ένα στερεομικροσκόπιο M125 της εταιρείας Leica. Είναι ένα πλήρως αποχρωματικό στερεομικροσκόπιο μεγάλου εύρους μεγέθυνσης (0.8x - 10x, 12.5:1) με ενσωματωμένη CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης (592 × 1944 με μέγεθος εικονοστοιχείου 2.78 μm × 2.78 μm). Η κεφαλή της κάμερας κβαντίζει την πληροφορία εικόνας που λαμβάνει από το CCD κύκλωμα με 12 bit και φροντίζει για την παραγωγή εξαιρετικής ποιότητας εικόνων υψηλής ανάλυσης με φυσική αναπαράσταση των χρωμάτων. Ευκρινείς εικόνες είναι δυνατόν να ληφθούν και κάτω από χαμηλό φωτισμό. Ο παρεμβαλλόμενος θερμικός θόρυβος μειώνεται αποτελεσματικά με τη διαδικασία της ενεργής ψύξης, που εκτελεί η κάμερα μέσω ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου Peltier.



Σχήμα 4.1 : Το στερεομικροσκόπιο Leica M125

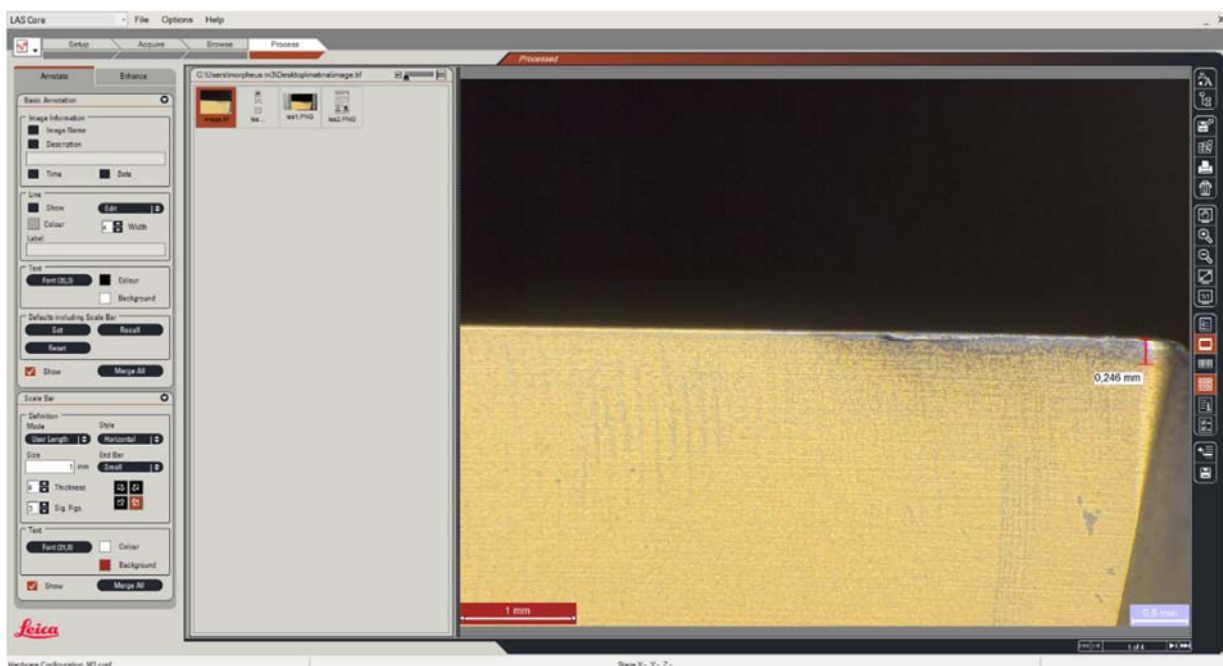
Οι μέθοδοι της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιούνται, έχουν ως στόχο την απομόνωση και τη μέτρηση της περιοχής φθοράς με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο. Τελικά, προκύπτει ένα ενιαίο μορφολογικό στοιχείο, που σκιαγραφεί πλήρως την περιοχή της φθοράς, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν και να υπολογιστούν το μέγιστο πλάτος φθοράς, αλλά και να επιτευχθεί ένας διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών περιοχών που υπάρχουν στη ζώνη φθοράς. Η φωτογραφία λαμβάνεται κάτω από κατάλληλο φωτισμό, ο οποίος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του δακτυλίου LED του στερεομικροσκοπίου. Οι μονάδες φωτισμού αποτελούν ένα ιδιαίτερα κρίσιμο στοιχείο για τη «σωστή» λήψη μιας εικόνας. Για το λόγο αυτό, αρκετές ερευνητικές προσπάθειες πάνω στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, δίνουν μεγάλη έμφαση στο φωτισμό του υπό εξέταση κοπτικού. Ακολουθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας. Στην παρούσα εργασία, για να επιτευχθεί μια καλύτερη αντίθεση μεταξύ της περιοχής φθοράς και της άφθαρτης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, χρησιμοποιείται ο

δακτύλιος φωτισμού του στερεομικροσκοπίου. Ο δακτύλιος, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος περιμετρικά του αντικειμενικού φακού αποτελείται από 40 πολύ ισχυρά LED ψυχρού φωτισμού, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα διαφορετικών συνδυασμών του φωτισμού τους, με σκοπό τη δημιουργία διαφορετικών συνθηκών φωτισμού στο κοπτικό εργαλείο (κάθετος, πλευρικός φωτισμός κ.α.). Στη συγκεκριμένη εργασία, έγινε χρήση του κάθετου φωτισμού στο πάνω μέρος της φωτογραφίας μας.



Σχήμα 4.2: Δακτύλιος φωτισμού του στερεοσκοπίου Leica M125

Η προεπεξεργασία της εικόνας πριν τη λήψη της πραγματοποιείται μέσω υπολογιστή στο λογισμικό του στερεομικροσκοπίου Leica Application Software V4.1. Μέσω του λογισμικού μπορούμε να κάνουμε βασικές ρυθμίσεις όπως το ζουμ και ο φωτισμός, αλλά και άλλες όπως η αντίθεση των χρωμάτων, τον θόρυβο, το ιστόγραμμα κ.α.



Σχήμα 4.3: Περιβάλλον λογισμικού του στερεομικροσκοπίου Leica Application Software V4.1

Μετά τη λήψη της εικόνας υπό τις κατάλληλες συνθήκες, ώστε να φαίνεται καθαρά η περιοχή της φθοράς, γίνεται η μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς στο ίδιο λογισμικό. Στην εντολή PROCESS μας δίνεται η δυνατότητα να μέσω της επιλογής Distance line να μετρήσουμε το μέγιστο πλάτος φθοράς, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το μειονέκτημα της μέτρησης του μέγιστου πλάτους φθοράς μέσω του στερεομικροσκοπίου είναι ότι το μέγιστο πλάτος μετριέται εμπειρικά πάνω στη φωτογραφία, με το «μάτι», οπότε και το σφάλμα στη συγκεκριμένη

διαδικασία είναι αναπόφευκτο. Για το λόγο αυτό, αργότερα, οι μετρήσεις θα επιβεβαιωθούν και σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα μέτρησης με χρήση αλγορίθμου Mean- Shift.

4.2 Κέντρο κατεργασίας DMG-DMU 50eco

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής βασίστηκε σε τρία πειράματα αποτύπωσης φθοράς ελεύθερης επιφάνειας πλακιδίων καρβιδίου για διαφορετικές ταχύτητες κοπής σε κατεργασία φραιζαρίσματος προσώπου χάλυβα Ck45. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο κέντρο κατεργασίας DMG-DMU 50eco, που βρίσκεται στο εργαστήριο m3 του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Σχήμα 4.4: Κέντρο κατεργασίας DMG-DMU 50eco

Το DMG-DMU 50eco είναι ένα ψηφιακά καθοδηγούμενο κέντρο κατεργασίας 5 αξόνων (3+2), τρεις γραμμικούς (x,y,z) και δύο περιστροφικούς άξονες στην τράπεζα πρόσδεσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου (γύρω από τον y, γύρω από τον z). Δεν αποτελεί ένα καθαρά 5-αξονικό κέντρο κατεργασίας, καθώς η κοπή πραγματοποιείται μόνο στους τρεις γραμμικούς άξονες, αφού οι άλλοι δύο στην τράπεζα χρησιμοποιούνται μόνο για τοποθέτηση. Οι κατεργασίες που μπορούν να διεξαχθούν στο κέντρο είναι αυτές του φραιζαρίσματος και της διάτρησης, ενώ περιλαμβάνει εργαλειοφορέα 16 θέσεων. Η αλλαγή των εργαλείων γίνεται αυτόματα και πνευματικά. Η άτρακτός του περιστρέφεται έως και 8000 (rpm/min), αλλά μπορεί να φτάσει έως και 42000 (rpm/min) με τη βοήθεια πολύστροφου τσοκ στην περίπτωση μικροκατεργασιών. Έχει ισχύ 13 KW και ροπή 83 Nm, ενώ είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο για μέγιστη στιβαρότητα. Η εργαλειομηχανή καθοδηγείται από τον ελεγκτή Sinumerik 810D της SIEMENS. Προγραμματίζεται είτε απευθείας πάνω στο χειριστήριο της μηχανής με G-κώδικα, είτε μέσω υπολογιστή με τη βοήθεια προγραμμάτων CAD-CAM.



Σχήμα 4.5: Συσκευή προорύθμισης εργαλείων Microset Uno 115eco

Πριν την κατεργασία στην εργαλειομηχανή είναι απαραίτητη η μέτρηση των χαρακτηριστικών των κοπτικών εργαλείων. Η μέτρηση αυτή έγινε στη συσκευή προорύθμισης εργαλείων Microset Uno 115eco. Η συσκευή διαθέτει ανιχνευτή ακμών για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, γραμμικούς άξονες, πνευματική σύσφιξη των αξόνων για μέγιστη ακρίβεια, ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω CMOS ψηφιακής κάμερας με τηλεσκοπικούς φακούς.

Στην παρούσα διπλωματική, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πειράματα διεξάγονται στην κατεργασία φραιζαρίσματος. Με φραιζάρισμα κατεργάζονται τεμάχια από διάφορα υλικά όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος, συνθετικά υλικά κ.λπ., με επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές, ακόμα και οδοντωτοί τροχοί. Τα τεμάχια πρώτα εκχονδρίζονται και έπειτα γίνεται η κατεργασία της αποπεράτωσης, ενώ, όταν απαιτούνται άριστες επιφάνειες, σαν τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η λείανση. Στο φραιζάρισμα τα απόβλητα απομακρύνονται από ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο (κεφαλή φραιζαρίσματος ή κονδύλι), το οποίο διαθέτει πολλαπλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες κυκλικά. Για να μπορεί να εισέρχεται το κοπτικό εργαλείο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, οι κοπτικές ακμές έχουν τη μορφή σφήνας. Κατά τη διάρκεια της κοπής, οι κοπτικές ακμές εισέρχονται και εξέρχονται η καθεμία από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, μέσα σε ένα μικρό μέρος της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, το φραιζάρισμα διακρίνεται σε περιφερικό ή μετωπικό. Στο περιφερικό φραιζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο διαθέτει περιφερειακά διατεταγμένες κοπτικές ακμές. Τα απόβλητα που προκύπτουν έχουν στη συγκεκριμένη περίπτωση σφηνοειδές σχήμα. Η επιφάνεια του κοπτικού που καταπονείται περισσότερο, κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία, είναι η ελεύθερη επιφάνεια, για το λόγο αυτό μετράται και η φθορά στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Η φθορά που εμφανίζεται οφείλεται στην ολίσθηση/τριβή του εργαλείου επάνω στο τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης και διάβρωσης/τριβής, που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής.

4.2 Υλικό κατεργασίας και κοπτικό εργαλείο

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας φραιζαρίσματος προσώπου (face milling), αφαιρούνταν επίπεδα υλικού κατά τον γ-άξονα. Οι διαστάσεις του κατεργαζόμενου τεμαχίου ήταν 119X160X25_[mm]. Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι ανθρακούχος χάλυβας Ck45 με περιεκτικότητα 0,45% άνθρακα. Έχει καλή κατεργασιμότητα τόσο υπό κανονικές συνθήκες, όσο και σε δύσκολες κατεργασίες, αντοχή σε εφελκυσμό 570 - 700 MPa, ενώ η σκληρότητά του

κυμαίνεται μεταξύ 170 και 210 HB. Ο CK 45 χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία και ενδείκνυται για κατασκευές μεγάλης αντοχής σε φθορά.

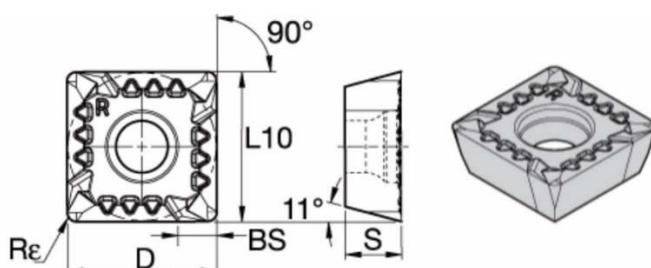
ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ CK 45	
Χημικό Στοιχείο	Περιεκτικότητα
Άνθρακας, C	0.420 – 0.50%
Σίδηρος, Fe	98.51 – 98.98 %
Μαγνήσιο, Mn	0.60 – 0.90 %
Φώσφορο, P	≤ 0.040 %
Θείο, S	≤ 0.050 %

Σχήμα 4.6: Χημικές ιδιότητες χάλυβα Ck 45

Το κοπτικό εργαλείο που μελετήθηκε είναι ένα μεσαίας κατεργασίας πλακίδιο καρβιδίου SPET10T304PPELGB2 R04 της Kennametal ποιότητας KC725M, επικαλυμμένο με χοντρή επίστρωση PVD και στρώσεις TiN/TiCN/TiN. Ενδείκνυται για φραιζάρισμα χάλυβα, ανοξειδωτου χάλυβα και χυτοσιδήρου, τόσο σε υγρή, όσο και ξηρή κατεργασία. Το κοπτικό εργαλείο συγκρατείται σε κεφαλή δύο δοντιών διαμέτρου 25 (mm) , αλλά στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μόνο το ένα δόντι της κεφαλής.



Σχήμα 4.7: Κοπτικό εργαλείο και κεφαλή συγκράτησης



catalog number	Grade	D	S	L10	BS	Rε	hm	cutting edges
SPET10T304PPELGB2	KC725M	10,00	3,97	10,00	2,70	0,4	0,08	4

Σχήμα 4.8: Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου

4.3 Ιδιοκατασκευή συγκράτησης

Από το γεωμετρία το κοπτικού εργαλείου προκύπτει πως η πλευρά, στην οποία πρέπει να μετρηθεί το μέγιστο πλάτος φθοράς, δηλαδή η επιφάνεια ελευθερίας, έχει κλίση 5° . Αυτή η κλίση δημιουργεί πρόβλημα κατά τη μέτρηση της φθοράς από την κάμερα του στερεομικροσκοπίου, καθώς χάνεται η καθετότητα ως προς αυτή, άρα και δημιουργείται σφάλμα κατά τη μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς. Για το λόγο αυτό, πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ήταν απαραίτητη η σχεδίαση και η κατασκευή μιας ιδιοκατασκευής, η οποία θα εξαλείφει αυτή την κλίση κατά τη μέτρηση. Η ιδιοκατασκευή αυτή επιλέχτηκε να είναι μία βάση από αλουμίνιο, στην οποία μπορεί να τοποθετείται σταθερά ο κώνος που συγκρατεί την κεφαλή φραιζαρίσματος και κατ' επέκταση και το ίδιο το πλακίδιο, ούτως ώστε να αποφευχθεί ο μηδενισμός του εργαλείου στην εργαλειομηχανή μετά από κάθε μέτρηση της φθοράς, στην περίπτωση που αποσυναρμολογούνταν μόνο το πλακίδιο ή η κεφαλή, ώστε να συνεχιστεί το πείραμα.



Σχήμα 4.9: Ιδιοκατασκευή συγκράτησης κώνου

Το κύριο μέρος της ιδιοκατασκευής σχεδιάστηκε στο Autodesk Inventor Professional 2016 και περιελάμβανε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων 150X100X18 [mm], το οποίο στο κέντρο του έχει δύο ομόκεντρες κυκλικές διατομές. Η μικρότερη χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση του κώνου και η μεγαλύτερη για τη συγκράτησή του, ενώ υπάρχει μια προεξοχή, η οποία «κουμπώνει» στην εσοχή που έχει ο κώνος και χρησιμοποιείται ως «στοπ» για καλύτερη συγκράτηση. Οι κυκλικές διατομές έχουν κλίση 5° στην αντίθετη κατεύθυνση από την κλίση που έχει το πλακίδιο τοποθετημένο στον κώνο, ώστε η κάμερα του στερεομικροσκοπίου να λάβει κάθετη λήψη της επιφάνειας ελευθερίας του κοπτικού. Το σχέδιο της ιδιοκατασκευής μετατράπηκε με πρόγραμμα CAM/CAD σε G-κώδικα και έπειτα περάστηκε στην εργαλειομηχανή για την τελική

κατεργασία. Όλες οι επιφάνειες του κατεργαζόμενου τεμαχίου εκχονδρίστηκαν με face milling πριν την τελική κατεργασία για να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες και να επιτευχθεί καλύτερη επιπεδότητα των επιφανειών. Μετά από αυτή τη διαδικασία κατασκευάστηκαν και τα πόδια της ιδιοκατασκευής, τα οποία δέθηκαν με κοχλίες στο κυρίως μέρος. Καθόλη τη διάρκεια της κατασκευής ελέγχονταν οι διαστάσεις και η καθετότητα το πλακιδίου για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Μετά από την ολοκλήρωση της ιδιοκατασκευής υπολογίστηκε ότι το σφάλμα στην καθετότητα λόγω ανοχών είναι της τάξης των $\pm 0,001\text{mm}$ για υποτυπώδη επιφάνεια $0,1 \times 0,1$ [mm].

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Περιγραφή πειραμάτων

Πριν περάσουμε στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας πρέπει να επισημανθεί ότι η προετοιμασία των περαμάτων δεν περιελάμβανε μόνο την ιδιοκατασκευή για τη σωστή μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς. Ακολούθησε η γραφή του G-κώδικα για τον προγραμματισμό της εργαλειομηχανής για την κατεργασία και η προεπεξεργασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Το τεμάχιο αφού δέθηκε στην τράπεζα της εργαλειομηχανής, στη συνέχεια, ευθυγραμμίστηκε με τη βοήθεια του μετρητικού, που διαθέτει το κέντρο κατεργασίας και καθορίστηκε το μηδενικό σημείο του τριαξονικού συστήματος συντεταγμένων πάνω στην τράπεζα. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο, πριν υποστεί την τελική κατεργασία κοπής, εκχονδρίστηκε, ώστε να αποφευχθούν ακαθαρσίες και σκουριά από αυτό και να προκύψει η αναγκαία επιπεδότητα, η οποία απαιτείται για να υπάρχει το ίδιο βάθος κοπής σε όλη την επιφάνεια του τεμαχίου.

Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε τρεις κύκλους πειραμάτων με διαφορετικές ταχύτητες κοπής στο καθένα, για 200, 300 και 400 [m/min], ενώ σταθερές ήταν οι μεταβλητές της πρόωσης 0.15 [mm/rev/tooth], του αξονικού βάθους κοπής 0.5 [mm] και του ακτινικού βάθους κοπής 18 [mm]. Επίσης, προτιμήθηκε κατεργασία φραιζαρίσματος ξηράς κοπής (χωρίς ψυκτικό υγρό), ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία εμφάνισης φθοράς στο κοπτικό εργαλείο. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του φραιζαρίσματος διακόπταμε την εργαλειομηχανή κάθε δύο περάσματα και περίπου 2000 κοπές, ώστε να γίνει η μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς. Σε κάθε ένα από τα τρία πειράματα έγιναν επτά μετρήσεις.

	ΠΕΙΡΑΜΑ 1	ΠΕΙΡΑΜΑ 2	ΠΕΙΡΑΜΑ 3
Ταχύτητα Κοπής V_c (m/min)	200	300	400
Πρόωση f_z (mm/rev,tooth)	0.15	0.15	0.15
Ακτινικό βάθος κοπής t_{xy} (mm)	18	18	18
Αξονικό βάθος κοπής t_z (mm)	0.5	0.5	0.5
Πρόωση ανά λεπτό F (mm/min)	382	573	764
Περιστροφική ταχύτητα S (rpm)	2547	3820	5093

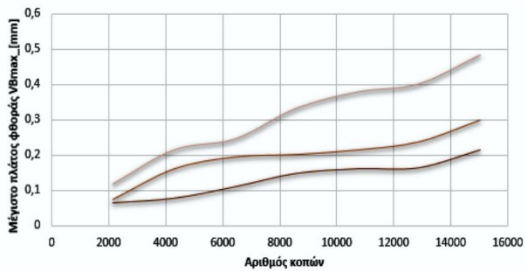
Σχήμα 5.1 : Συνθήκες κοπής τριών πειραμάτων

Για την κάθε μέτρηση γινόταν παύση της κατεργασίας, ούτως ώστε αφαιρέσουμε τον ολόκληρο τον κώνο συγκράτησης της κεφαλής φραιζαρίσματος και κατ' επέκταση του κοπτικού πλακιδίου. Ο κώνος τοποθετούνταν στην ιδιοκατασκευή στήριξης, για να εξαιρεθεί η κλίση του πλακιδίου και να γίνει σωστά η μέτρηση. Η ιδιοκατασκευή ήταν τοποθετημένη πάνω στο στερεομικροσκόπιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9. Έπειτα γινόταν η ρύθμιση του φωτισμού στο στερεομικροσκόπιο, η προεπεξεργασία της εικόνας πριν τη λήψη (αντίθεση χρωμάτων, θόρυβος, φωτεινότητα) και τέλος η λήψη της φωτογραφίας μέσω του λογισμικού του. Μετά τη λήψη στο ίδιο λογισμικό γινόταν η μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς (VB_{max}), μέσω της δυνατότητας που μας έδινε να μετρήσουμε αποστάσεις πάνω στη φωτογραφία. Οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για να φτιαχτεί μια γραφική παράσταση. Αυτή η γραφική παράσταση είναι η λεγόμενη καμπύλη φθοράς, από την οποία εξάγονται τα συμπεράσματά μας για την εξέλιξη της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας. Η σύγκριση των καμπυλών αυτών για τα τρία διαφορετικά πειράματα, θα μας δώσει τις αναγκαίες πληροφορίες για την επίδραση της αύξησης της ταχύτητας κοπής στην φθορά του κοπτικού εργαλείου. Ένα τυπικό διάγραμμα κίνησης της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 5.2.



κατεργασία στην
εργαλειομηχανή

λήψη φωτογραφίας κοπτικού
στο στερεομικροσκόπιο



εξαγωγή καμπυλών φθοράς



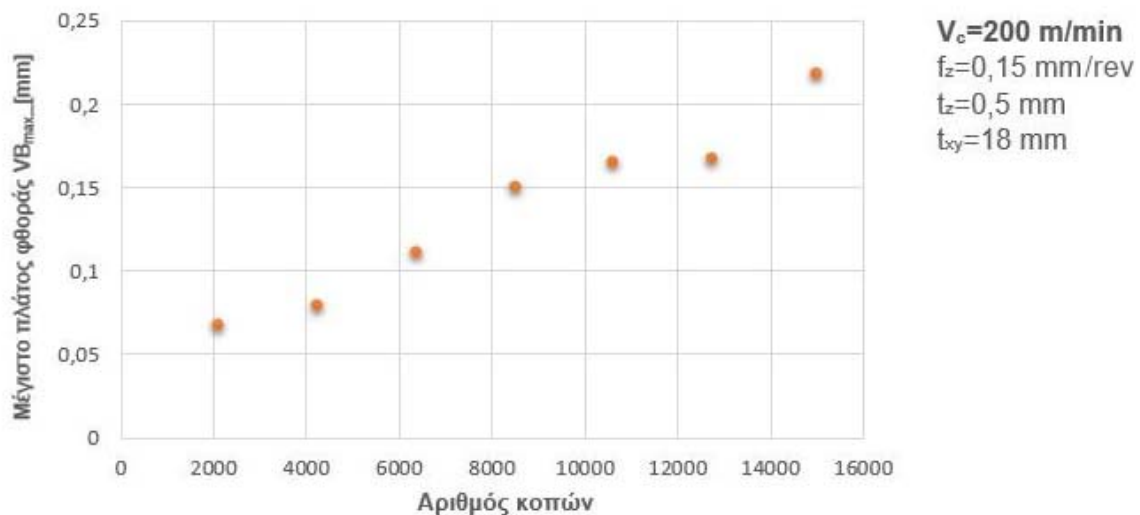
Ψ.Ε.Ε και τελική
μέτρηση VBmax

Σχήμα 5.2: Διάγραμμα κίνησης της πειραματικής διαδικασίας μας

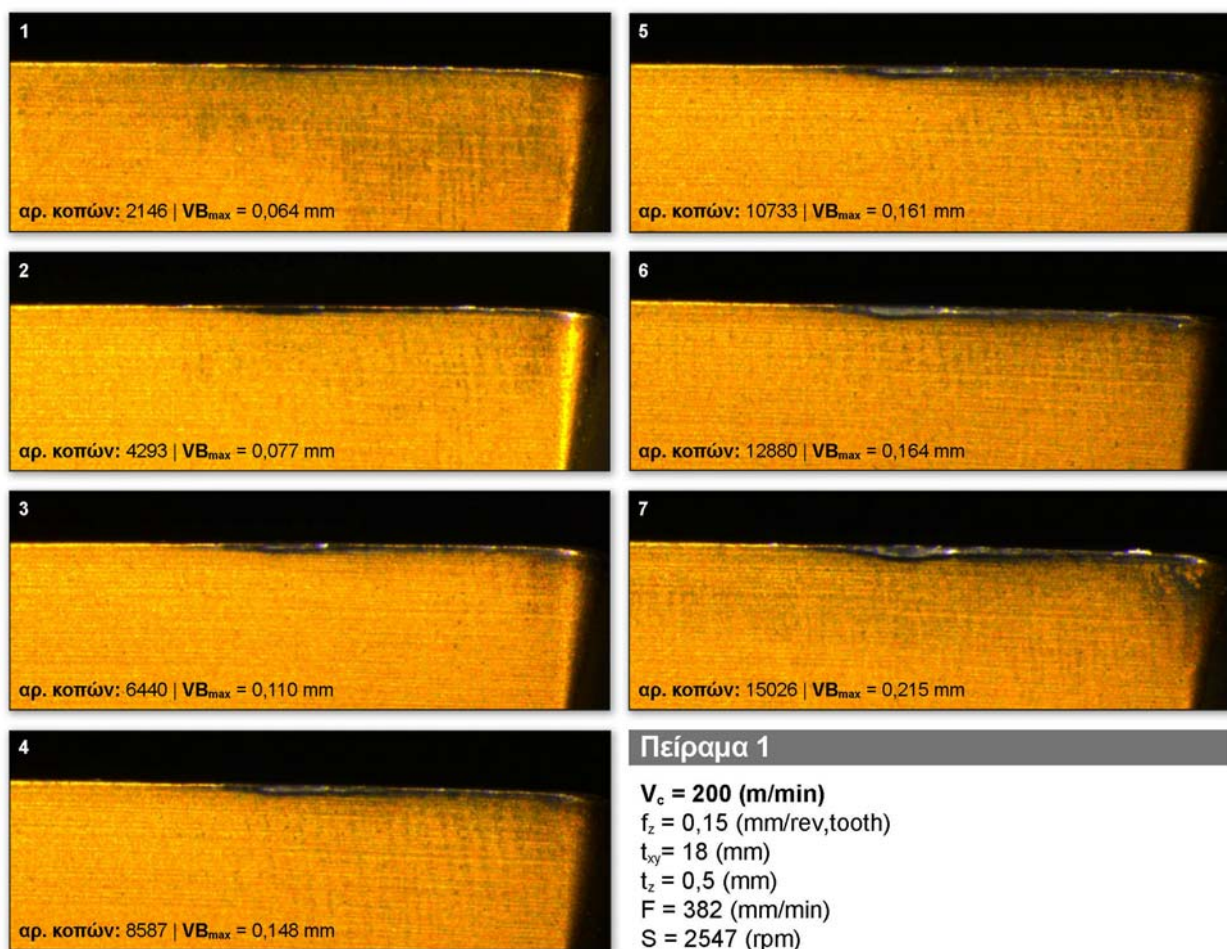
5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων - Συμπεράσματα

5.2.1 Πείραμα 1

Στη συνέχεια παραθέτονται αναλυτικά οι συνθήκες κοπής, τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας μέσω του στερομικροσκοπίου, η καμπύλη φθοράς που δημιουργείται βάσει των αποτελεσμάτων, καθώς και στιγμιότυπα από τη ζώνη φθοράς της κάθε μέτρησης, για το Πείραμα 1.



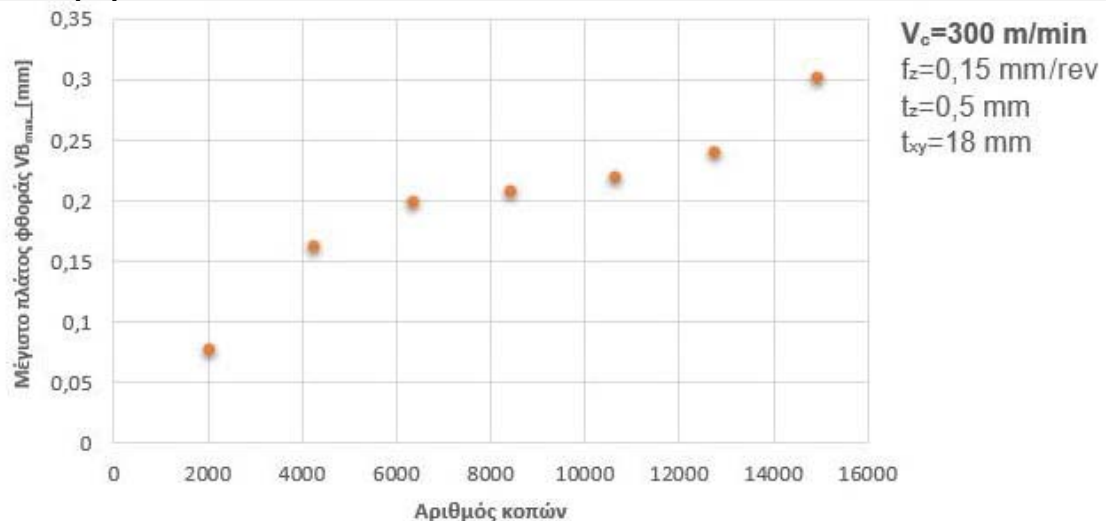
Σχήμα 6.1: Καμπύλη εξέλιξης της φθοράς για το Πείραμα 1.



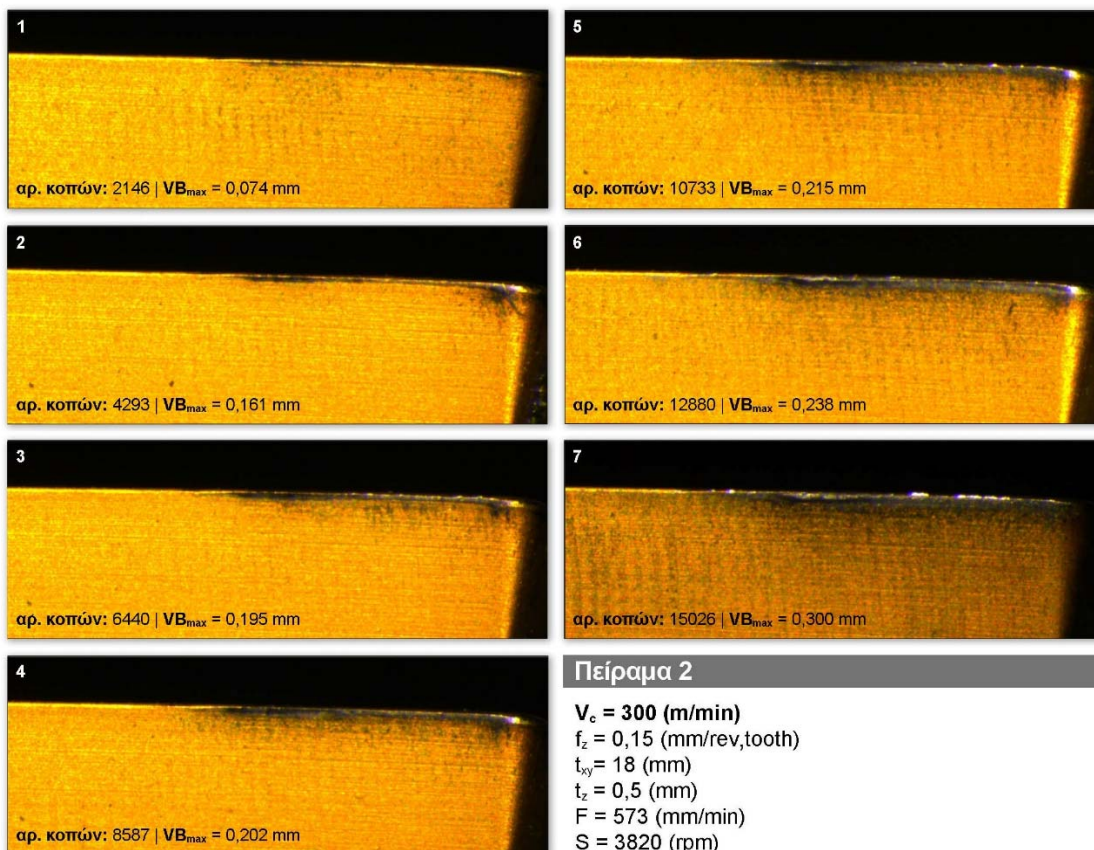
Σχήμα 6.2: Στάδια εξέλιξης φθοράς – στιγμιότυπα κάθε μέτρησης για το Πείραμα 1.

Η ζώνη φθοράς, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες, αρχικά έχει μαύρο χρώμα, το οποίο προέρχεται από το «ξύσιμο» των στρωμάτων της επικάλυψης. Καθώς ο αριθμός των κοπών αυξάνεται, η απόχρωση της ζώνης φθοράς αλλάζει σε διάφορα τμήματά της σε γκρι/ασημί. Η αλλαγή αυτή στο χρώμα δείχνει την εισχώρηση της φθοράς βαθύτερα στα στρώματα των επικαλύψεων και της δομής του κοπτικού εργαλείου. Είναι εμφανές, πως στο πρώτο πείραμα με ταχύτητα κοπής 200m/min, η ζώνη φθοράς φαίνεται να εξαπλώνεται με ένα σχετικά ομοιόμορφο τρόπο σε σχέση με τα άλλα δύο πειράματα, πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού, ενώ το χρώμα της αλλάζει από μαύρο σε γκρι/ασημί μόνο στα τελευταία στάδια της κατεργασίας.

5.2.2 Πείραμα 2



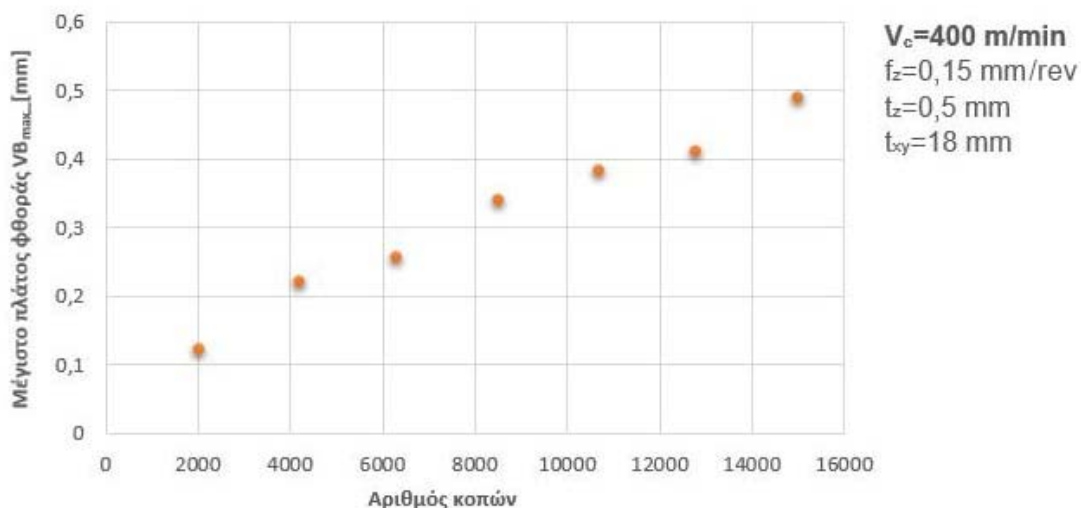
Σχήμα 6.3: Καμπύλη εξέλιξης της φθοράς για το Πείραμα 2.



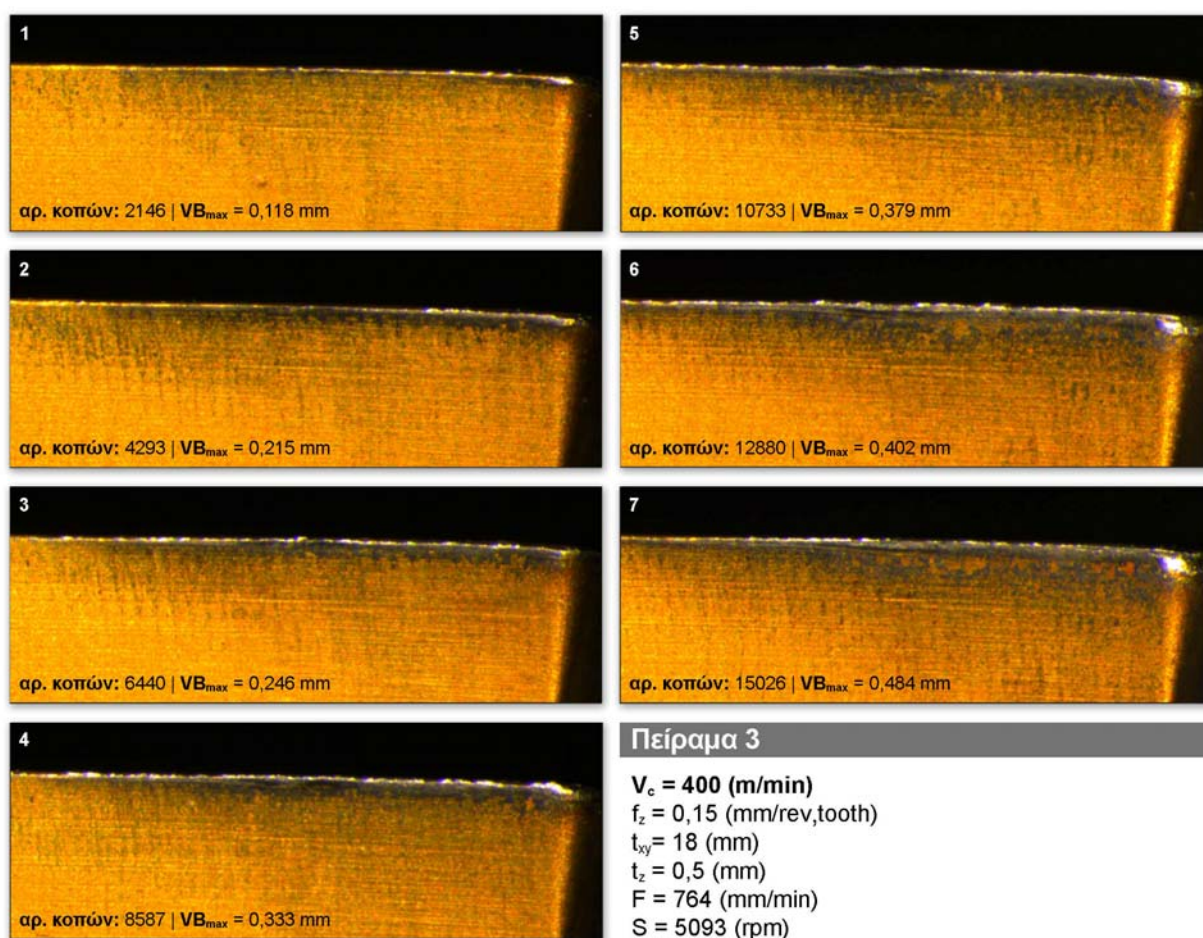
Σχήμα 6.4: Στάδια εξέλιξης φθοράς – στιγμιότυπα κάθε μέτρησης για το Πείραμα 2.

Στο δεύτερο πείραμα με ταχύτητα κοπής 300m/min, η ζώνη φθοράς έχει λιγότερο ομοιόμορφο σχήμα, ενώ εξελίσσεται πολύ γρηγορότερα στη μύτη του κοπτικού εργαλείου. Παράλληλα, παρατηρούμε πως το χρώμα της ζώνης φθοράς αλλάζει πολύ νωρίτερα σε σχέση με το πρώτο πείραμα.

5.2.3 Πείραμα 3



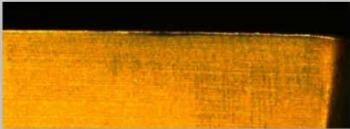
Σχήμα 6.5: Καμπύλη εξέλιξης της φθοράς για το Πείραμα 3.



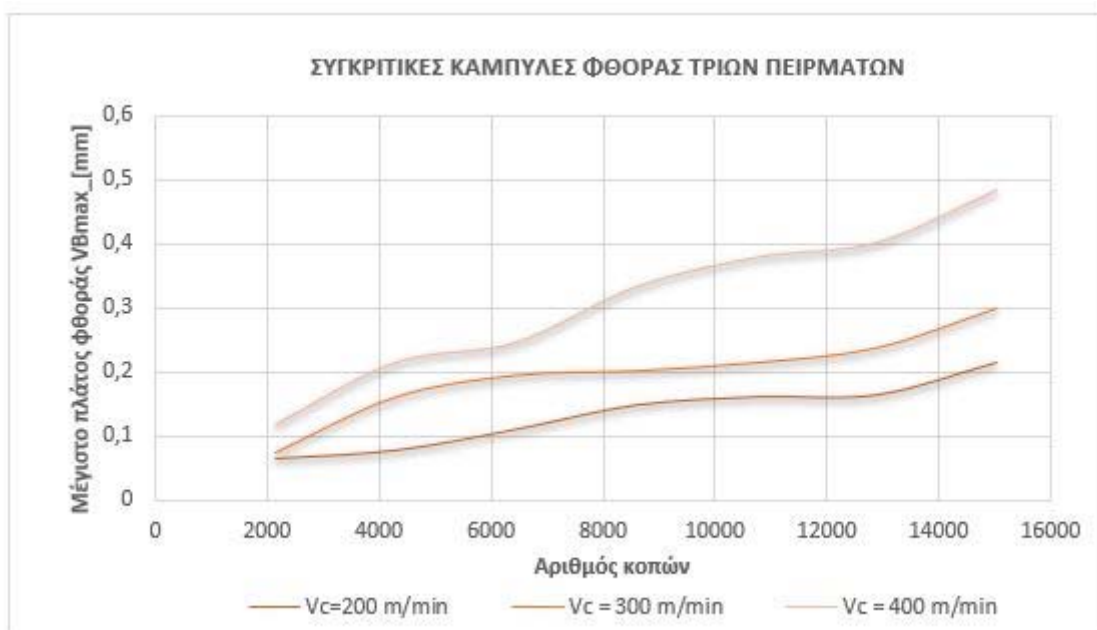
Σχήμα 6.6: Στάδια εξέλιξης φθοράς – στιγμιότυπα κάθε μέτρησης για το Πείραμα 2.

Το τρίτο πείραμα με ταχύτητα κοπής 400m/min έχει την πιο ανομοιόμορφη περιοχή φθοράς και από τα τρία, ενώ ταυτόχρονα η περιοχή εκτείνεται πολύ περισσότερο κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με τα δύο πρώτα πειράματα. Ταυτόχρονα, είναι εμφανές πως η απόχρωση της ζώνης αλλάζει από μαύρο σε γκρι/ασημί από τα πρώτα κιόλας στάδια της μέτρησης της φθοράς. Όπως και στο δεύτερο πείραμα, έτσι κι εδώ μέγιστο πλάτος φθοράς (VB_{max}) συναντάται και μετριέται κυρίως στη μύτη του κοπτικού εργαλείου.

5.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα τριών πειραμάτων

Πείραμα 1	Πείραμα 2	Πείραμα 3
$V_c = 200 \text{ (m/min)}$	$V_c = 300 \text{ (m/min)}$	$V_c = 400 \text{ (m/min)}$
 1. αρ. κοπών = 2146 $VB_{max} = 0,064 \text{ mm}$	 1. αρ. κοπών = 2146 $VB_{max} = 0,074 \text{ mm}$	 1. αρ. κοπών = 2146 $VB_{max} = 0,118 \text{ mm}$
 2. αρ. κοπών = 4293 $VB_{max} = 0,077 \text{ mm}$	 2. αρ. κοπών = 4293 $VB_{max} = 0,161 \text{ mm}$	 2. αρ. κοπών = 4293 $VB_{max} = 0,215 \text{ mm}$
 3. αρ. κοπών = 6440 $VB_{max} = 0,110 \text{ mm}$	 3. αρ. κοπών = 6440 $VB_{max} = 0,195 \text{ mm}$	 3. αρ. κοπών = 6440 $VB_{max} = 0,246 \text{ mm}$
 4. αρ. κοπών = 8587 $VB_{max} = 0,148 \text{ mm}$	 4. αρ. κοπών = 8587 $VB_{max} = 0,202 \text{ mm}$	 4. αρ. κοπών = 8587 $VB_{max} = 0,333 \text{ mm}$
 5. αρ. κοπών = 10733 $VB_{max} = 0,161 \text{ mm}$	 5. αρ. κοπών = 10733 $VB_{max} = 0,215 \text{ mm}$	 5. αρ. κοπών = 10733 $VB_{max} = 0,379 \text{ mm}$
 6. αρ. κοπών = 12880 $VB_{max} = 0,164 \text{ mm}$	 6. αρ. κοπών = 12880 $VB_{max} = 0,238 \text{ mm}$	 6. αρ. κοπών = 12880 $VB_{max} = 0,402 \text{ mm}$
 7. αρ. κοπών = 15026 $VB_{max} = 0,215 \text{ mm}$	 7. αρ. κοπών = 15026 $VB_{max} = 0,300 \text{ mm}$	 7. αρ. κοπών = 15026 $VB_{max} = 0,484 \text{ mm}$

Σχήμα 6.7 : Στάδια εξέλιξης της φθοράς, σε αντίστοιχες χρονικές στιγμές για τα τρία πειράματα



Σχήμα 6.8 : Καμπύλες φθοράς και των τριών πειραμάτων

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας, όπως φαίνονται τόσο από τις εικόνες, στις οποίες έγινε η μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς (VB_{max}), όσο και από τις καμπύλες φθοράς εξελίσσονται σύμφωνα με τα αναμενόμενα. Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής, αυξάνεται ταυτόχρονα και η φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, οπότε η διάρκεια ζωής του εργαλείου μειώνεται. Φαίνεται πως ο επικρατέστεροι μηχανισμοί ανάπτυξης φθοράς είναι αυτοί του σχηματισμού και λύσης συγκολλητών δεσμών και της απόξεσης, λόγω της έντονης τριβής κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος. Η επιλογή δε της ξηράς κοπής (χωρίς ψυκτικό υγρό) στην παρούσα πειραματική ανάλυση, ισχυροποιεί ακόμα περισσότερο την εμφάνιση της τριβής, άρα επιταχύνεται ακόμα περισσότερο ο ρυθμός διάδοσης της φθοράς στο κοπτικό εργαλείο.

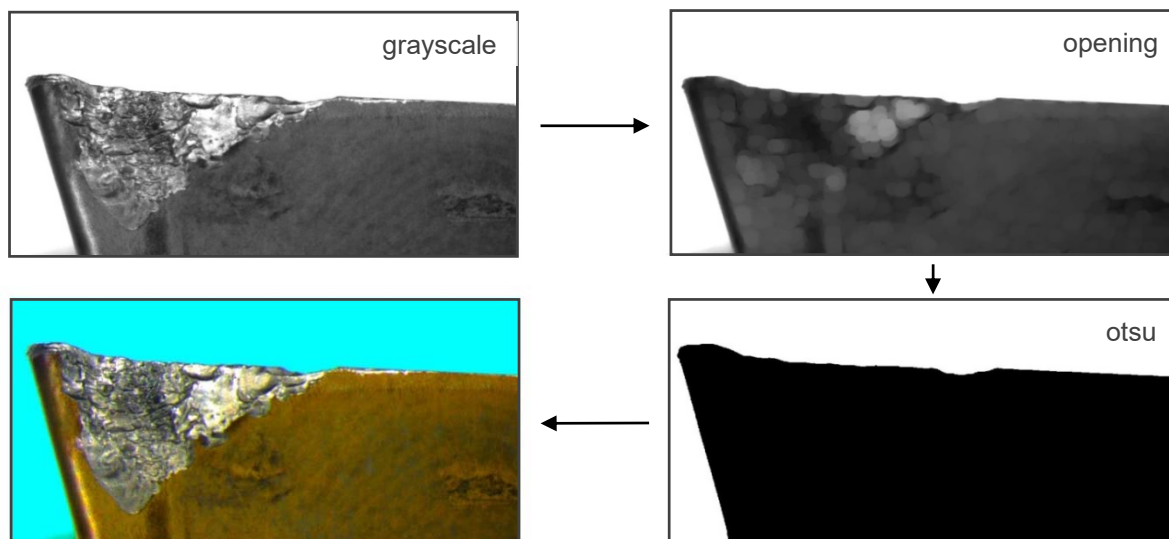
Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε πως η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει σαν συνέπεια τη ραγδαία εξέλιξη της φθοράς, οπότε αποτελεί ένα μέγεθος που πρέπει να μελετάται με ιδιαίτερη προσοχή τόσο από τις κατασκευάστριες εταιρίες, οι οποίες προτείνουν τις βέλτιστες συνθήκες κοπής για κάθε κοπτικό εργαλείο, όσο και από τους μηχανουργούς, κατά τη διάρκεια της εκάστοτε κατεργασίας. Λαθεμένη επιλογή των συνθηκών κοπής, θα οδηγήσει πολύ εύκολα σε μείωση της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου, με αποτέλεσμα τόσο ποιοτικές, όσο και οικονομικές συνέπειες κατά τη διάρκεια μιας παραγωγικής διαδικασίας.

5.3 Επιβεβαίωση μετρήσεων

Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας εξελίσσονται σωστά, συγκρίναμε τις μετρήσεις του Πειράματος 1 και του Πειράματος 2 με τις μετρήσεις που προέκυψαν για τα συγκεκριμένα πειράματα, από ένα ήδη υπάρχον σύστημα μέτρησης φθοράς με χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift, πραγματοποιώντας μια μη-παραμετρική τεχνική για την ανάλυση πολυδιάστατων χώρων χαρακτηριστικών. Το σύστημα αυτό τμηματοποιεί την εικόνα με τη βοήθεια του αλγορίθμου, αναγνωρίζει την περιοχή φθοράς και έπειτα μετράει το μέγιστο πλάτος φθοράς (VB_{max}).

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί τις εικόνες που έχουν ληφθεί από το στερεομικροσκόπιο, κάτω από τον κατάλληλο φωτισμό, μέσω του δακτυλίου LED ψυχρού

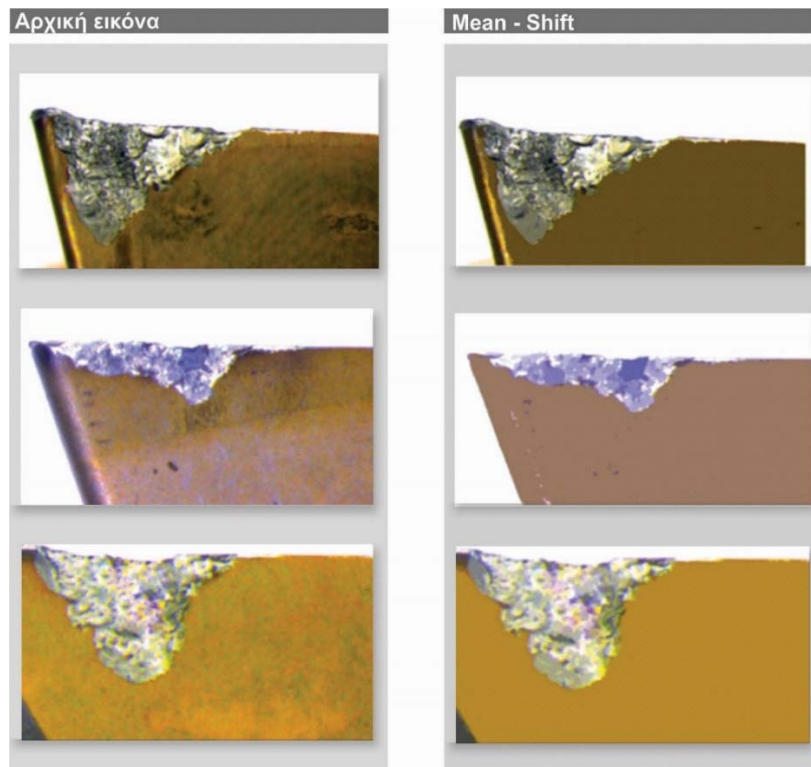
φωτισμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Αφού ληφθεί η φωτογραφία, κάτω από τον κατάλληλο φωτισμό ακολουθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας. Η συγκεκριμένη βαθμίδα στοχεύει στην απομάκρυνση του φόντου της ληφθείσας εικόνας, ώστε να διασφαλιστεί ότι δε θα συμμετάσχουν στη διαδικασία της κατάτμησης τα εικονοστοιχεία του φόντου. Σε αντίθεση περίπτωση, ο αλγόριθμος κατάτμησης θα οδηγήσει σε μια εντελώς εσφαλμένη ομαδοποίηση.



Σχήμα 6.9 : Διαδικασία αφαίρεσης του φόντου από τη ληφθείσα εικόνα

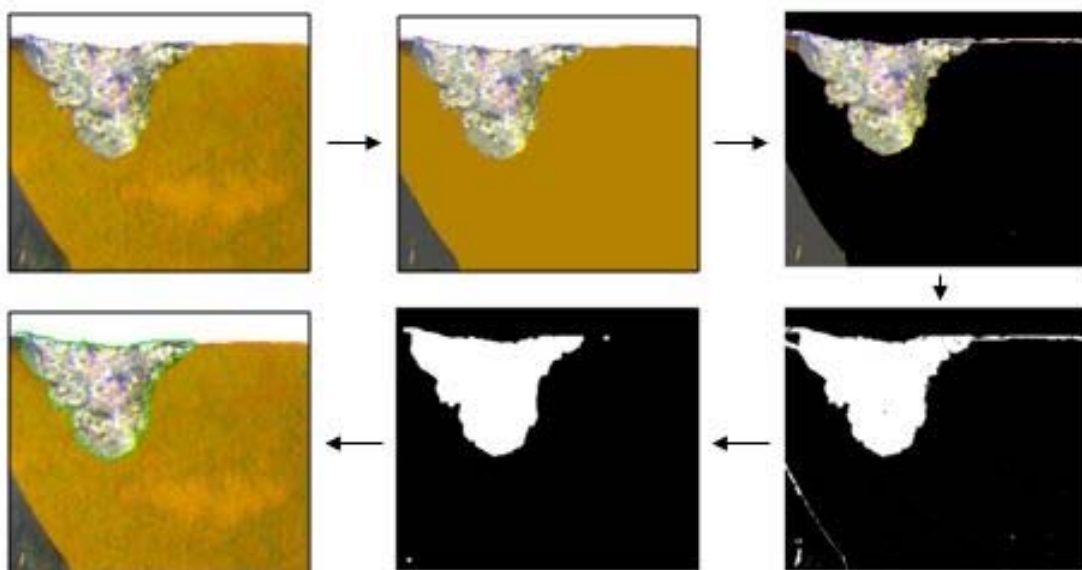
Κατόπιν, δημιουργείται ο χώρος χαρακτηριστικών, ο οποίος αποτελείται από τις τρεις χρωματικές συνιστώσες του κάθε εικονοστοιχείου (R,G,B), αλλά και τη χωρική πληροφορία του (συνιστώσες x,y), ώστε να παρέχεται αρκετά ικανοποιητική πληροφορία από το πεδίο της εικόνας. Έτσι, δημιουργείται ένα σύνολο ανεξαρτήτων και όμοια κατανεμημένων παρατηρήσεων στον 5-διάστατο χώρο, που ανήκει σε μια άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f , για την οποία δε γίνεται καμία υπόθεση όσον αφορά τη δομή της, πέραν της ομαλότητάς της. Η τμηματοποίηση της ληφθείσας εικόνας αποτελεί το επόμενο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στη συγκεκριμένη βαθμίδα του συστήματος, γίνεται χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift, ο οποίος προβαίνει σε μία εκτίμηση μόνο των μεγίστων και όχι ολόκληρης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας f , γεγονός που συνεπάγεται με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο, καθώς η εκτίμηση των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας πολυδιάστατων δεδομένων αποτελεί μια δαπανηρή υπολογιστικά διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ταχύτητα μια Gaussian μοντελοποίηση του χώρου των κλάσεων και αποκτάται μια άρτια τμηματοποίηση της ληφθείσας εικόνας.

Μετά την ταξινόμηση όλων των εικονοστοιχείων της εικόνας σε κλάσεις, ακολουθεί το στάδιο εντοπισμού της ζώνης φθοράς. Με οπτική εμποπτεία των κατατετμημένων εικόνων, παρατηρείται ότι η υγιής περιοχή του κοπτικού εργαλείου, αποτελεί την πολυπληθέστερη κλάση. Συνεπώς, η κλάση αυτή αφαιρείται και απομένει ως ωφέλιμη πληροφορία η περιοχή της φθοράς, μαζί με κάποιο ανεπιθύμητο θόρυβο. Στη συνέχεια γίνεται χρήση της κατωφλίωσης του Otsu, ώστε να δυαδικοποιηθεί η παραπάνω εικόνα και κατόπιν το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης ενέργειας επεξεργάζεται περαιτέρω, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών, με σκοπό το φιλτράρισμα του ανεπιθύμητου θορύβου και τη λείανση/όξυνση των περιγραμμάτων της περιοχής ενδιαφέροντος. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, η περιοχή με το μεγαλύτερο εμβαδόν, αντιστοιχεί στην περιοχή της φθοράς.

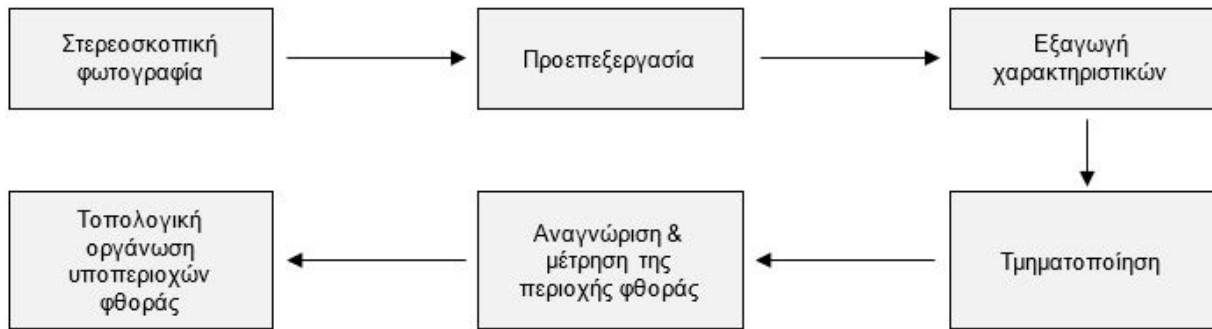


Σχήμα 6.10 : Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου Mean-Shift σε διάφορες εικόνες κοπτικών εργαλείων

. Από το ενιαίο αυτό μορφολογικό στοιχείο, υπολογίζεται το μέγιστο πλάτος και το εμβαδόν της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας. Το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου αφορά την ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών, εντός της ζώνης φθοράς. Συνεπώς, τα διανύσματα που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή του Mean-Shift και τα οποία ανήκουν στην περιοχή της φθοράς εισάγονται σε ένα δίκτυο Kohonen. Το συγκεκριμένο δίκτυο αυτό-οργανώνεται, με σκοπό να δημιουργηθούν διαφορετικές γειτονιές νευρώνων στο χάρτη, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις εισόδων. Έτσι, για κάθε εικόνα, οι λίγες περιοχές εντός της ζώνης φθοράς, που με οπτική εποπτεία φαίνεται να έχουν προκύψει από διαφορετικό αίτιο, οργανώνονται τοπολογικά, μέσω του δικτύου Kohonen.



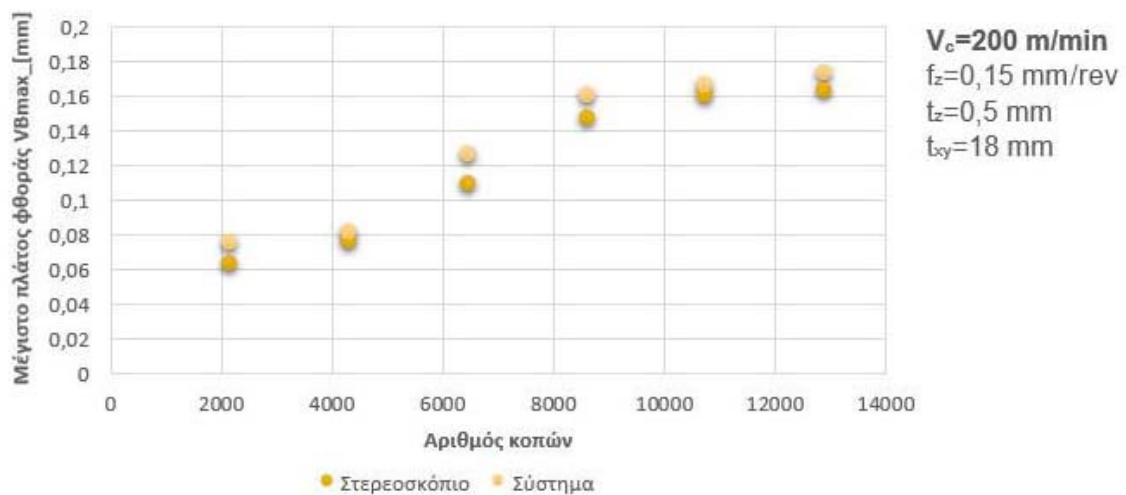
Σχήμα 6.11: Παράδειγμα αναγνώρισης της περιοχής της φθοράς



Σχήμα 6.12 : Διάγραμμα ροής συστήματος μέτρησης

ΠΕΙΡΑΜΑ 1		
Αριθμός κοπών	VB _{max} (mm) Στερεομικροσκόπιο	VB _{max} (mm) Σύστημα
2146	0.064	0.076
4293	0.077	0.082
6440	0.110	0.127
8587	0.148	0.161
10733	0.161	0.167
12880	0.164	0.174

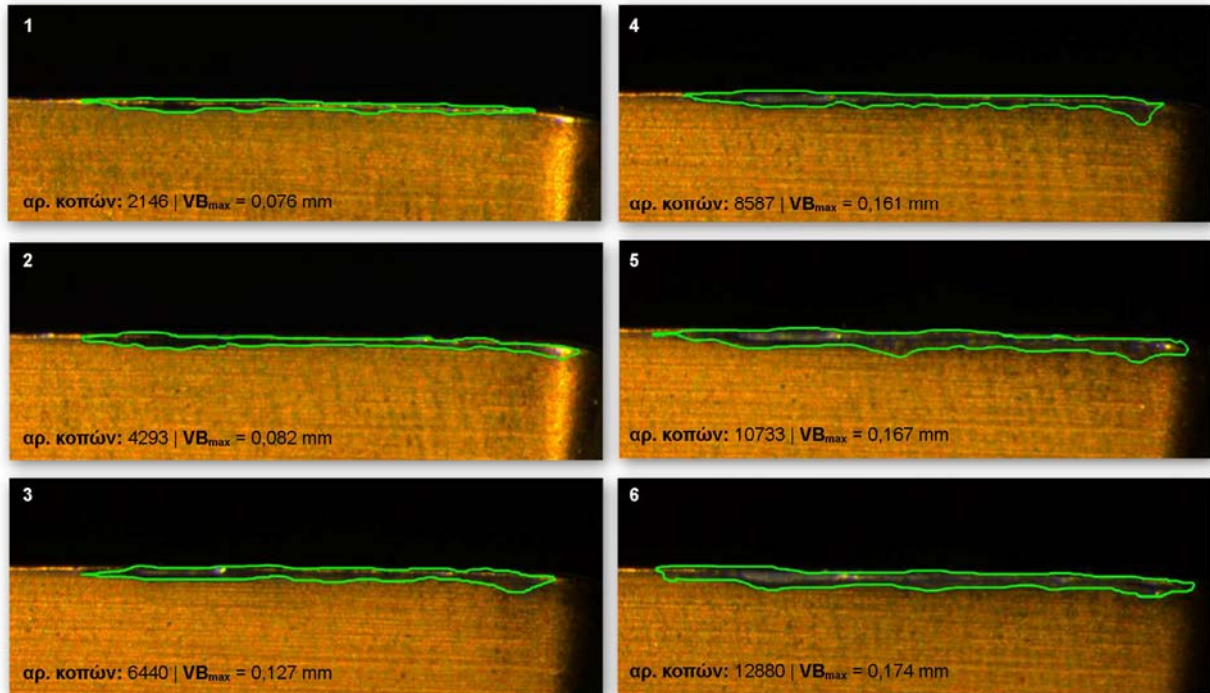
Σχήμα 6.13 : Σύγκριση τιμών του μέγιστου πλάτους φθοράς για το Πείραμα 1



Σχήμα 6.14: Καμπύλες εξέλιξης της φθοράς για μετρήσεις από το στερεομικροσκόπιο και το σύστημα για το Πείραμα 1.

Πείραμα 1

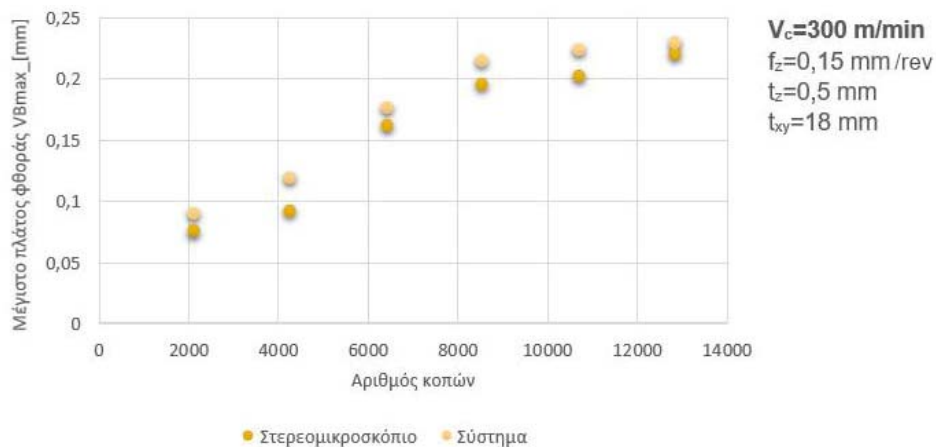
$V_c = 200 \text{ (m/min)}$ | $f_z = 0,15 \text{ (mm/rev,tooth)}$ | $t_{xy} = 18 \text{ (mm)}$ | $t_z = 0,5 \text{ (mm)}$ | $F = 382 \text{ (mm/min)}$ | $S = 2547 \text{ (rpm)}$



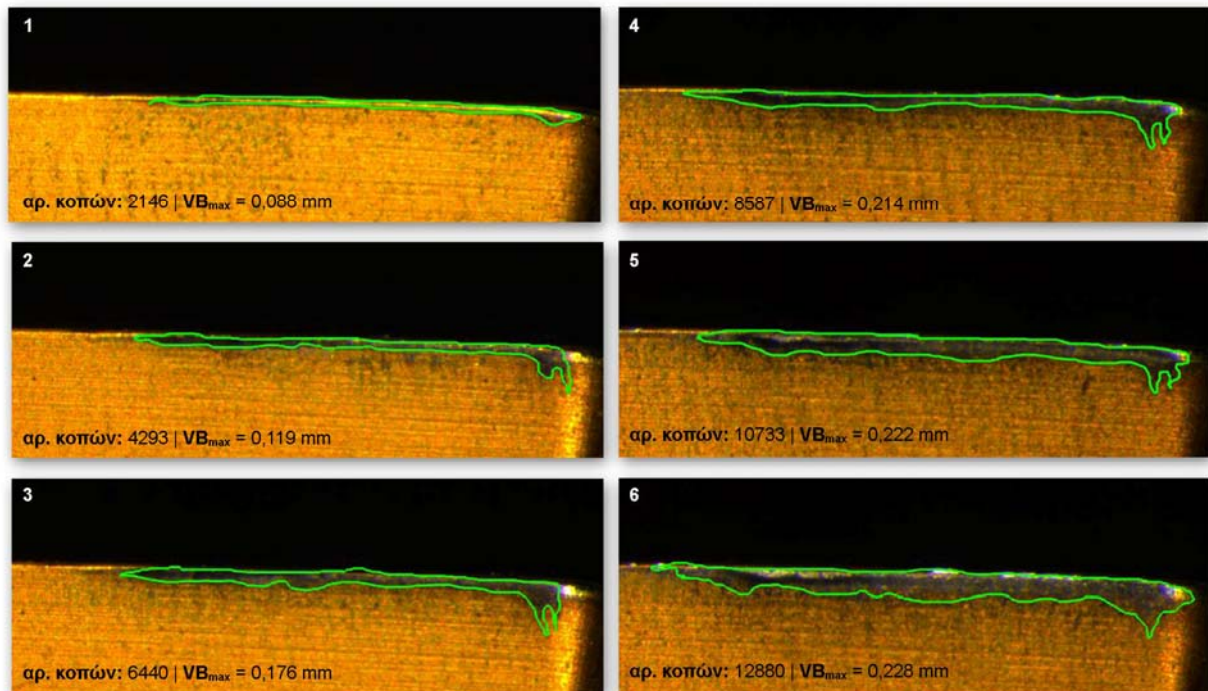
Σχήμα 6.15: Στάδια εξέλιξης φθοράς – στιγμιότυπα κάθε μέτρησης μέσω συστήματος για το Πείραμα 1

ΠΕΙΡΑΜΑ 2		
Αριθμός κοπών	$VB_{max} \text{ (mm)}$ Στερεομικροσκόπιο	$VB_{max} \text{ (mm)}$ Σύστημα
2146	0.074	0.088
4293	0.092	0.119
6440	0.161	0.176
8587	0.195	0.214
10733	0.202	0.222
12880	0.219	0.228

Σχήμα 6.16 : Σύγκριση τιμών του μέγιστου πλάτους φθοράς για το Πείραμα 2



Σχήμα 6.17: Καμπύλες εξέλιξης της φθοράς για μετρήσεις από το στερεομικροσκόπιο και το σύστημα για το Πείραμα 2.

Πείραμα 2 $V_c = 300 \text{ (m/min)} \mid f_z = 0,15 \text{ (mm/rev,tooth)} \mid t_y = 18 \text{ (mm)} \mid t_z = 0,5 \text{ (mm)} \mid F = 573 \text{ (mm/min)} \mid S = 3820 \text{ (rpm)}$ 

Σχήμα 6.18: Στάδια εξέλιξης φθοράς – στιγμιότυπα κάθε μέτρησης μέσω συστήματος για το Πείραμα 2

Στο [σχήμα 6.13](#) και στο [σχήμα 6.16](#) παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετρήσεων του μέγιστου πλάτους φθοράς του Πειράματος 1 και του Πειράματος 2 αντίστοιχα, τόσο απευθείας από το στερεομικροσκόπιο, όσο και από το σύστημα. Σύμφωνα με τις συγκεκριμένες μετρήσεις προκύπτει ότι η μέγιστη απόκλιση για το πείραμα ένα είναι της τάξης των 0,017 [mm], ενώ η μέση απόκλιση ανέρχεται στα 0,0105 [mm]. Στο πείραμα 2 οι τιμές για τη μέγιστη και τη μέση απόκλιση, ανέρχονται στα 0,027 [mm] και 0,017 [mm] αντίστοιχα. Το [σχήμα 6.15](#) και το [σχήμα 6.18](#) δείχνουν την αποτύπωση της ζώνης φθοράς που εντοπίζει το σύστημα μέτρησης, στα κύρια στάδια εξέλιξής της και σε αντίστοιχες χρονικές στιγμές για το Πείραμα 1 και το Πείραμα 2 αντίστοιχα, στα οποία έγινε η επιβεβαίωση των προηγούμενων μετρήσεων μας.

Από τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι εμφανές πως ενώ οι μετρήσεις του VB_{max} στα αντίστοιχα στάδια εξέλιξης της φθοράς μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο (η φθορά αυξάνεται όσο η κατεργασία προχωράει), ωστόσο, η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων συστήματος-στερεομικροσκοπίου είναι ευδιάκριτη. Σε όλες τις περιπτώσεις το πλάτος φθοράς εμφανίζεται μεγαλύτερο στο σύστημα από ότι στο στερεομικροσκόπιο. Αυτό οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο σφάλμα της μέτρησης του VB_{max} μέσω του λογισμικού του στερεομικροσκοπίου, η οποία μέτρηση γίνεται εμπειρικά, «με το μάτι», οπότε είναι και ιδιαίτερα εύκολο να διαφύγουμε της ακρίβειας. Αποδεικνύεται, έτσι, πως η απευθείας μέτρηση της φθοράς στο στερεομικροσκόπιο υστερεί σε σχέση με ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης με την ιδιαίτερη προσοχή στη ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, για το σωστό εντοπισμό της ζώνης φθοράς. Ο άρτιος εντοπισμός της περιοχής αυτής, αποτελεί το βασικότερο παράγοντα της ακριβούς μέτρησης του πλάτους φθοράς. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις και μέσω του συστήματος επιβεβαιώνουν ότι η φθορά εξελίσσεται ραγδαία με την αύξηση της ταχύτητας κοπής, όπως ακριβώς και μέσω του στερεομικροσκοπίου.

6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

6.1 Προβλήματα που αντιμετωπίσαμε

Η βασική δυσκολία που αντιμετωπίσαμε αφορούσε την εύρεση των κατάλληλων συνθηκών κοπής για την κατεργασία του υλικού μας (Χάλυβας Ck45), ώστε να καταλήξουμε σε αυτές που εμφανίζουν «άξια» για μέτρηση και μελέτη ζώνη φθοράς σε μία σχετικά σύντομη διάρκεια κατεργασίας. Ο χρόνος που καταναλώθηκε σε αυτή τη διαδικασία, αποτέλεσε και την κύρια αιτία που η πειραματική μελέτη δεν επεκτάθηκε στη μελέτη της επίδρασης και άλλων συνθηκών κοπής, πέρα από την ταχύτητα κοπής, στην ανάπτυξη της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας.

Ένα άλλο ζήτημα που μας απασχόλησε πριν αρχίσει η πειραματική διαδικασία, αφορούσε την ιδιοκατασκευή στήριξης του κώνου που κρατούσε το κοπτικό εργαλείο, ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η μέτρηση στο στερεομικροσκόπιο. Πέρα από τη σωστή σχεδίαση, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη καθετότητα του κοπτικού για τη μέτρηση, σημασία είχε και η στιβαρότητά της, ώστε να μη γίνεται εύκολα έστω και μικρή μετακίνησή της ή στρέψη της με αποτέλεσμα να υπάρχει ανομοιότητα μεταξύ των εικόνων των διαφορετικών μετρήσεων. Ως προς αυτό το κομμάτι υπήρξε μια σχετική ατέλεια, από την άποψη ότι σε κάποια σημεία υπήρχαν πάρα πολύ μικρές σχεδόν ανεπαίσθητες μετακινήσεις, οι οποίες όμως σε συνδυασμό με την πολύ μεγάλη ευαισθησία του στερεομικροσκοπίου, έδιναν σε έναν μικρό βαθμό διαφορετικές εικόνες για την κάθε μέτρηση.

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, ο κατάλληλος φωτισμός κατά τη λήψη της φωτογραφίας, ώστε να γίνει σωστά η μέτρηση της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μας χρησιμοποιήσαμε επιλογή φωτισμού διαθέσιμη από το ίδιο το στερεομικροσκόπιο, η οποία παρόλο που έδινε την καλύτερη δυνατή εικόνα, δημιουργούσε ταυτόχρονα και μία λωρίδα ανάκλασης στη δεξιά ακμή, κοντά στη μύτη του κοπτικού, αλλοιώνοντας ελαφρά το χρώμα της ζώνης φθοράς στην περιοχή αυτή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε πρακτικά με την κάλυψη μερίδας των LED του δακτυλίου φωτισμού του στερεομικροσκοπίου, το οποίο βοήθησε στο να πάρουμε μια καλή φωτογραφία, δεν αποτελεί όμως μια βέλτιστη λύση.

Τέλος, το σφάλμα που προκύπτει στις μετρήσεις του μέγιστου πλάτους φθοράς απευθείας από το λογισμικό του στερεομικροσκοπίου, προέρχεται από το ότι η επιλογή κάθε φορά του μέγιστου πλάτους φθοράς, από όλο το μήκος της ζώνης, στην κάθε φωτογραφία γίνεται με εμπειρικό τρόπο, «με το μάτι». Αυτό σε συνδυασμό με την ευαισθησία του λογισμικού σε μικρή μετακίνηση του χεριού, κατά τη μέτρηση της απόστασης από το αρχικό μέχρι το τελικό σημείο του μέγιστου πλάτους, οδηγεί αναπόφευκτα σε σφάλμα, όπως φαίνεται και από την επιβεβαίωση των μετρήσεων από το σύστημα σε σχέση με αυτές από το στερεομικροσκόπιο.

6.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Η μελέτη της φθοράς των κοπτικών εργαλείων αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο πεδίο στη διερεύνηση του, λόγω των πολλών παραμέτρων που μπορούν να επιδράσουν σημαντικά την εξέλιξη της. Η παρούσα διπλωματική κάνει ένα μικρό και συγκεκριμένο βήμα σε αυτή την κατεύθυνση. Η περαιτέρω μελέτη και ερευνητική δουλειά πάνω στο θέμα είναι άκρως απαραίτητη, και γι' αυτό, προτείνονται κάποιες συγκεκριμένες κατευθύνσεις για μελλοντική δουλειά.

Ένα πρώτο και σημαντικό βήμα που πρέπει να γίνει είναι η έρευνα της επίδρασης και των υπόλοιπων συνθηκών κοπής, πέρα από την ταχύτητα κοπής, στην ανάπτυξη φθοράς ελεύθερης επιφάνειας και πιο συγκεκριμένα για διαφορετικές προώσεις, διαφορετικά βάθη κοπής και συνδυασμό αυτών. Κατ' επέκταση, σημαντική είναι και η μελέτη της τόσο σε συνθήκες ξηράς, αλλά και υγρής κοπής, για να διερευνηθεί η διαφορετική εξέλιξη της και σε λιγότερο ισχυρή τριβή και θερμοκρασία κοπής. Πολύ σημαντικό ρόλο, επίσης, στη διάρκεια ζωής του κοπτικού

εργαλείου παίζει η επικάλυψή του. Η μελέτη εξέλιξης της φθοράς για διαφορετικά είδη επικαλύψεων, θα δώσει σίγουρα διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να εξαγάγουν σημαντικά συμπεράσματα για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών, ανάλογα την κατεργασία, το υλικό κλπ. Όλα τα παραπάνω, θα αποτελούν κενό γράμμα αν δεν επεκταθούν και σε άλλα είδη φραιζαρίσματος, αλλά και στην τόννευση και τη διάτρηση.

Σε κάθε κατεργασία, καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή του κοπτικού εργαλείου και των κατάλληλων συνθηκών κοπής παίζει το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η μελέτη της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας για ένα μεγάλο εύρος υλικών, που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανική παραγωγή, θα οδηγήσει σε πιο ολοκληρωμένη γνώση στο πεδίο της εξέλιξης φθοράς. Τέλος, οι διαδικασίες αυτές είναι απαραίτητο να επεκταθούν στη μελέτη όλων των ειδών φθοράς.

Τα όσα προαναφέρθηκαν θα μπορούσαν να ερευνηθούν ευκολότερα, αν υπήρχε μια διαδικτυακή πλατφόρμα, προσβάσιμη σε όλους, στην οποία όλοι οι χρήστες θα μπορούσαν να ανεβάζουν φωτογραφίες φθοράς κοπτικών εργαλείων και μέσω ενός συστήματος, αυτή να μετράται αυτόματα. Αν μια τέτοια δουλειά γινόταν πραγματικότητα σε ένα επόμενο διάστημα, θα αποτελούσε πρόκληση, καθώς θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη τόσο για εκπαιδευτικούς, όσο και για παραγωγικούς λόγους.

7. ΣΥΝΟΨΗ

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι παραγωγής προϊόντων (κυρίως μεταλλικών) είναι οι μηχανουργικές κατεργασίες κοπής. Η τóρνευση, το φραιζάρισμα και η διάτρηση αποτελούν τις βασικότερες από αυτές. Κύρια εξαρτήματα των συγκεκριμένων κατεργασιών αποτελούν τα κοπτικά εργαλεία. Η κατάσταση των κοπτικών εργαλείων κατά τη διάρκεια της κοπής μπορεί να μας δώσει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την παραγωγική διαδικασία. Η παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων γίνεται, κατά κύριο λόγο, με τη μέτρηση της φθοράς τους. Η φθορά αποτελεί την βασικότερη αιτία αστοχίας των κοπτικών εργαλείων και μείωση της διάρκειας ζωής τους. Προκαλεί αλλοίωση των διαστατικών χαρακτηριστικών του εργαλείου και έχει άμεση επίδραση στη τελική ποιότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου (διαστατική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας), αλλά και στο κόστος παραγωγής, αφού η αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων αφορά ένα σημαντικό μέγεθος του κόστους εξοπλισμού. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των αυτοματοποιημένων συστημάτων παραγωγής η αύξηση της παραγωγικότητας και μείωση του κόστους παραγωγής αποτελεί το βασικότερο στόχο και η παρακολούθηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική διεργασία σε αυτή την κατεύθυνση.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια πειραματική μελέτη της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας των κοπτικών εργαλείων σε κατεργασία φραιζαρίσματος προσώπου χάλυβα CK45 σε 5-αξονικό κέντρο κατεργασίας. Τα πειράματα εστιάζουν στην επίδραση της αύξησης της ταχύτητας κοπής στην εξέλιξη της φθοράς. Οι μετρήσεις γίνονται με άμεσο τρόπο με τη βοήθεια στερεομικροσκοπίου, στο οποίο γίνεται η λήψη φωτογραφίας της ζώνη φθοράς του κοπτικού εργαλείου και η μέτρηση του μέγιστου πλάτους φθοράς μέσω του λογισμικού του. Οι καμπύλες φθοράς, που προκύπτουν από τις μετρήσεις, μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας με ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας κοπής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J. A. Olortegui-Yume, P. Y. Kwon, Tool wear mechanisms in machining, *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, Vol. 2, No. 3, 2007
2. V. P. Astakhov Tool Service, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issue 6, May 2004, Pages 637–647
3. Colgan J., Chin H., Danai K., Hayashi S.R., On-line tool breakage detection in turning: a multi-sensor method, *Journal of Engineering for Industry*, 116:117–122, 1994
4. Szecsi T., A DC motor based cutting tool condition monitoring system., *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93:350–354, 1999
5. X. Li, A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42 (2002), pp. 157–165
6. Lee, D. E., Hwang, I., Valente, C. M. O., Oliveira, J. F. G. , Dornfeld, D. A., 2006, Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, pp.176–188
7. Yeo S.H., Khoo L.P., Neo S.S., Tool condition monitoring using reflectance of chip surface and neural network, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2000-11:507–514, 2000
8. N. Tandov,A. Parey, “Condition Monitoring of Rotary Machines”, *Indian Institute of Technology*, Part of the series Springer Series in Advanced Manufacturing pp 109-136
9. Obikawa T, Shinozuka J. Monitoring of flank wear of coated tools in high-speed machining with a neural network ART2. *Int J Mach Tools Manuf*2004;44(12–13):1311–8
10. Dong J, Subrahmanyam KVR, Wong YS, Hong GS, Mohanty AR. Bayesian-inference-based neural networks for tool wear estimation. *Int J Adv ManufTechnol* 2005;30(9–10):797–807
11. I. Yesilyurt, H. Ozturk, Tool condition monitoring in milling using vibration analysis, *International Journal of Production Research*, Vol. 45, No. 4, 15 February 2007, 1013–1028
12. J. Z. Zhang , J. C. Chen, Tool condition monitoring in an end-milling operation based on the vibration signal collected through a microcontroller-based data acquisition system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* October 2008, Volume 39, Issue 1, pp 118–128
13. B. Bahr, S. Motavalli & T. Arfi, Sensor fusion for monitoring machine tool conditions, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1997, VOL. 10, NO. 5, 314–323
14. N.K. Mehta, P.C. Pandey, G. Chakravarti, An investigation of tool wear and the vibration spectrum in milling, *Wear*, Volume 91, Issue 2, 1 November 1983, Pages 219-234
15. B. Y. Lee Y. S. Tarng, Application of the Discrete Wavelet Transform to the Monitoring of Tool Failure in End Milling Using the Spindle Motor Current, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* April 1999, Volume 15, Issue 4, pp 238–243
16. Shao H, Wang HL, Zhao XM. A cutting power model for tool wear monitoring in milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 44, Issue 14, November 2004, Pages 1503–1509
17. L. Xiaoli, Y. Zhejun, Tool wear monitoring with wavelet packet transform—fuzzy clustering method, *Wear*, Volume 219, Issue 2, September 1998, Pages 145-154
18. X. Li, S. Dong, Z. Yuan, Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 39, Issue 12, December 1999, Pages 1935–1944
19. Fu P., Hope AD., King G.A. , *Intelligent Tool Condition Monitoring in Milling Operation*, Systems Engineering Faculty Southampton Institute, UK, 1998

20. Ko T., Cho D.W., Adaptive optimization of face milling operations using neural networks, *Journal of Manufacture Science and Engineering*, 120(2):443–451, 1998
21. Lin S.C., Lin R.J., Tool wear monitoring in face milling using force signals, *Wear*, 198(1):136–142, 1996
22. Ko T., Cho D.W., Jung M.Y., On-line monitoring of tool breakage in face milling using a self-organized neural network, *Journal of Manufacturing Systems*, 14(2):80–90, 1995
23. Susanto V., Chen J.C., Fuzzy logic based in-process tool-wear monitoring system in face milling operations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3:186–192, 2003
24. E. Jantunen, A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42, Issue 9, July 2002, Pages 997–1010
25. S.C. Lin, C.J. Ting, Tool wear monitoring in drilling using force signals, *Wear* 180 (1-2) (1995) 53–60
26. I.N. Tansel, C. Mekdeci, O. Rodriguez, B. Urangun, Monitoring drill conditions with wavelet based encoding and neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 33 (4) (1993) 559–575
27. M. Routio, M. Saynatjoki, Tool wear and failure in the drilling of stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 52 (1) (1995) 35–43
28. Li X., “On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform”, *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, 39(1):157–164, 1999
29. A. L. Quadro, J.R.T. Branco, Analysis of the acoustic emission during drilling test, *Surface and Coatings Technology Volumes 94–95*, October 1997, Pages 691-695
30. T.I. Liu, W.Y. Chen, K.S. Anatharaman, Intelligent Detection of Drill Wear, *Mechanical Systems and Signal Processing Volume 12*, Issue 6, November 1998, Pages 863-873
31. E. Jantunen, A summary of methods applied to tool condition monitoring in Drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 997–1010
32. Sonka, M., Hlavac, V., Boyle R., *Image Processing Analysis and Machine Vision*, 2nd Edition, Brooks/Cole Publishing Company, 1999
33. Jeon, J.U., Kim, S.W., Optical flank wear monitoring of cutting tools by image processing, *Wear*, 127(1988): 207-217, 1988
34. Kurada, S., Bradley, C., A Machine Vision System for Tool Wear Assessment, *Tribology International*, 30:295–304, 1993
35. Wang, W., Wong, Y.S., Hong, G.S., Flank Wear Measurement by Successive Image Analysis, *Computers and Industrial*, 56:816–830, 2005
36. Sahabi, H.H., Ratnam, M.M., On-line Monitoring of Tool Wear in Turning Operation in the Presence of Tool Misalignment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38:718–727, 2008
37. Kim, J.H., Moon, D.K., Lee, D.W., Kim, J.S., Kang, M.C., Kim, K.H., Tool Wear Measuring Technique on the Machine Using CCD and Exclusive jig, *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131:668–674, 2002
38. Kerr, D., Pengilley, J., Garwood, R., Assessment and Visualisation of Machine Tool Wear Using Computer Vision, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28:781–791, 2006
39. Stemmer, M., Pavim, A., Adur, M., Deschamps, F., Schmitt, R., Hermes, R., Machine Vision and Neural Networks Applied to Wear Classification on Cutting Tools, *Pocceedings*

- of the EOS Conference on Industrial Imaging and Machine Vision (Munich, Germany), 2005
40. Liang, Y.T., Chiou, Y.C., An effective Drilling Wear Measurement Based on Visual Inspection Technique, Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences (JCIS 2006), Kaohsiung, Taiwan, 2006
 41. Inoue, S., Konishi, M., Imai, J., Surface Defect Inspection of a Cutting Tool by Image Processing with Neural Networks, Memoirs of the Faculty of Engineering Okayama University, 43:55–60, 2009
 42. Jackson, M.J., Robinson, G.M., Hyde, L.J., Rhodes, R., Neural Image Processing of the Wear of Cutting Tools Coated with Thin Films, Journal of Materials Engineering and Performance, 15:223–229, 2006
 43. Schmitt, R., Cai, Y., Pavim, A., Machine Vision System for Inspecting Flank Wear on Cutting Tools, ACEE Int. J on Control System and Instrumentation, vol 0.3, No. 01, 2013
 44. Α. Λυρώνης, Ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης φθοράς κοπτικών εργαλείων με τη βοήθεια Ψ.Ε.Ε., Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014
 45. Α. Αντωνιάδης, Μηχανουργική Τεχνολογία, Τόμος Β' (2^η έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, 2016