

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΦΘΟΡΑΣ ΠΛΑΚΙΔΙΟΥ ΕΠΕΝΔΕΔΥΜΕΝΟΥ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΑΛΛΟΥ  
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΟΡΝΕΥΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΧΡΗΣΤΟΥ ΡΟΥΠΑΚΙΑ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μεγάλη σημασία της φθοράς των κοπτικών εργαλείων κατά τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού μετάλλων επιβάλλει την εντατική μελέτη της. Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου όμως, είναι εξαιρετικά δύσκολη η κατάστρωση ακριβών υπολογιστικών ή αναλυτικών μοντέλων του και έτσι η ανάγκη πειραματικής διερεύνησης των μηχανισμών της φθοράς και του διαρκή εμπλουτισμού και εκσυγχρονισμού της βιβλιογραφίας όσον αφορά στη συσχέτισή της με άλλες παραμέτρους και άλλα φαινόμενα της κοπής παραμένει αμείωτη. Ειδικότερα για το πεδίο φθοράς, το οποίο είναι και το πλέον χρήσιμο για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου, είναι διαρκής η αναζήτηση για έναν μη παρεμβατικό στην κατεργασία τρόπο παρακολούθησης της επέκτασής του. Ερευνούμε μία πιθανά υποσχόμενη διεύθυνση αυτής ακριβώς της αναζήτησης.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Διερευνούμε τη συσχέτιση μεταξύ της διακύμανσης των δυνάμεων κοπής και της επέκτασης του πεδίου φθοράς κατά την κατεργασία χάλυβα St37 με εργαλείο επενδεδυμένου σκληρομετάλλου. Η διερεύνηση εκτείνεται σε τέσσερις ταχύτητες κοπής 160m/min, 200m/min, 225m/min και 250m/min ενώ η πρόωση (0.8mm/rev) και το βάθος κοπής (0.5mm) διατηρούνται σταθερά. Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιείται υγρό κοπής. Μετά την εξαγωγή και την επεξεργασία των πειραματικών ευρημάτων καταλήγουμε στο ότι το πεδίο φθοράς δεν είναι αξιόπιστη ένδειξη για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου στις υψηλές ταχύτητες τόννευσης καθώς το εργαλείο αστοχεί καταστροφικά πριν το πεδίο φθοράς φτάσει τις συνιστώμενες κατά τα διεθνή πρότυπα τιμές. Πάραυτα, για τις μεσαίες ταχύτητες έως και 200m/min φαίνεται σαφής τάση της αύξησης των δυνάμεων της κοπής να ακολουθεί την επέκταση του πεδίου φθοράς έως και αμέσως πριν το τέλος της ζωής του εργαλείου.

## **ABSTRACT**

We investigate the correlation between the fluctuation of the cutting forces and the progression of the flank wear during the turning of St37 steel with a coated insert tool. The investigation spans four cutting speeds 160m/min, 200m/min, 225m/min and 250m/min while feed (0.8mm/rev) and depth of cut (0.5mm) remain unchanged. Cutting fluid is used throughout the whole experiment. After extraction and processing the experimental findings, it is concluded that flank wear is not a reliable indication for estimating tool life in high cutting speeds because the tool catastrophically fails before the flank wear reaches the suggested values of international standards. However, for medium cutting speeds up to 200m/min we observe clear inclination of the increase of the cutting forces to follow the progression of the flank wear right up until the end of the tool life.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ο γράφων θα ήθελε να ευχαριστήσει τον Λέκτορα Άγγελο Μαρκόπουλο για την ανάθεση της εργασίας και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της πειραματικής διαδικασίας καθώς και το διαδακτορικό του φοιτητή Νίκο Κάρκαλο για τη βοήθειά του.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Περί φθοράς κοπτικών εργαλείων
- 1.2 Τύποι φθοράς εργαλείων
- 1.3 Στοιχειώδεις μηχανισμοί φθοράς εργαλείων
- 1.4 Το πεδίο φθοράς

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

- 2.1 Ο σκοπός του πειράματος
- 2.2 Η πειραματική διαδικασία
- 2.3 Τα πειραματικά αποτελέσματα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

- 3.1 Ταχύτητα 160m/min
- 3.2 Ταχύτητα 200m/min
- 3.3 Ταχύτητα 225m/min
- 3.4 Ταχύτητα 250m/min

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Εισαγωγή

#### 1.1 Περί φθοράς κοπτικών εργαλείων

Η φθορά των κοπτικών εργαλείων είναι υψίστης σημασίας στην κοπή μετάλλων. Λόγω του άμεσου αντίκτυπου της στην ποιότητα επιφάνειας και στην λογιστική των κατεργασιών, η φθορά του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση της απόδοσής του<sup>1</sup>. Πολλές ερευνητικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την κατανόηση και την πρόβλεψη της φθοράς εργαλείου, Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές θεωρούνται ως εμπειρικές προσεγγίσεις της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Κατά συνέπεια, πολλά θεμελιώδη ζητήματα δεν έχουν επιλυθεί, κυρίως λόγω των πολύπλοκων φυσικών και χημικών διεργασιών που προκαλούν ή επηρεάζουν τη φθορά<sup>3</sup>. Η μεγάλη πολυπλοκότητα του ζητήματος της φθοράς πηγάζει από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των κατεργαζόμενων υλικών, των εργαλειομηχανών, των εργαλείων κοπής, των ψυκτικών μέσων και των συνθηκών κοπής. Λόγω των συνδυασμένων επιπτώσεων αυτών των παραγόντων, οι διεπιφάνειες εργαλείου-αποβλίττου και εργαλείου-τεμαχίου έχουν σχεδόν αδιευκρίνιστες συνθήκες επαφής με έντονες τοπικού χαρακτήρα διεπιφανειακές θερμοκρασίες και τριβές<sup>6</sup>. Επιπλέον, οι έντονα μη γραμμικές θερμο-μηχανικές συμπεριφορές του κατεργαζόμενου υλικού συνδυάζονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Ακόμα και αν αυτά τα ζητήματα είχαν επιλυθεί, οι ακριβείς μηχανισμοί φθοράς δεν θα είχαν αναγνωρισθεί και περιγραφεί ποσοτικά.

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, το κοπτικό εργαλείο αλληλεπιδρά άμεσα με ένα κατεργαζόμενο τεμάχιο. Απόβλιττο παράγεται με διάτμηση του κατεργαζόμενου υλικού, ενώ η θερμότητα που προέρχεται από την πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου υλικού και τη διεπιφανειακή τριβή μεταξύ του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου μεταφέρεται στο εργαλείο<sup>2</sup>. Η θερμοκρασία τόσο του τεμαχίου όσο και του εργαλείου αυξάνονται σημαντικά και οι συνθήκες κοπής γίνονται δυσχερέστερες. Το κοπτικό εργαλείο υφίσταται εντονότερη θερμική καταπόνηση και τελικά θα καταστραφεί. Παρόλο που το κατεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται μόνο περιοδική θερμική φόρτιση, το υλικό στην επιφάνεια υφίσταται μετασχηματισμό φάσης<sup>6</sup>. Η τραχιά δευτερεύουσα φάση του κατεργαζόμενου υλικού διασπάται και διαχέεται μέσα στο υλικό, διότι το όριο διαλυτότητας συνήθως αυξάνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό περιπλέκει περαιτέρω ένα φαινόμενο ήδη πολύπλοκο.

Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας των συγκεκριμένων φαινομένων, πολλοί ερευνητές υιοθέτησαν εμπειρικές προσεγγίσεις όπως η εξίσωση Taylor<sup>3</sup>. Είναι φανερό ότι η

εξάρτηση από τέτοιες εμπειρικές προσεγγίσεις για την κατανόηση και πρόβλεψη της φθοράς των κοπτικών εργαλείων οφείλεται ακριβώς σε αυτήν την αδυναμία να παρατηρηθούν λεπτομερώς οι διεργασίες και να αναγνωριστούν ακριβώς οι μηχανισμοί που οδηγούν στη φθορά.

Τυπικά, πολλοί μηχανισμοί φθοράς εμφανίζονται ταυτόχρονα κατά τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού μεταλλικών υλικών, πράγμα που κάνει μια συστηματική, συγκεντρωμένη μελέτη της φθοράς κοπτικού εργαλείου πολύ δύσκολη. Οι υπεύθυνοι για τη φθορά μηχανισμοί αλλάζουν ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας και το συνδυασμό υλικών κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου. Στους κοινά αποδεκτούς μηχανισμούς φθοράς που έχουν αναγνωριστεί συμπεριλαμβάνονται η επικόλληση, η τριβή, η διάσπαση, η διάχυση, η οξείδωση και άλλες χημικές διεργασίες μεταξύ των υλικών του εργαλείου και του τεμαχίου<sup>1</sup>. Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, ή επικόλληση και η τριβή τείνουν να κυριαρχούν ενώ οι διάσπαση, διάχυση, οξείδωση, όπως και άλλες χημικές αντιδράσεις συσχετίζονται περισσότερο με υψηλές ταχύτητες. Για παράδειγμα τα σεμεντιτικά εργαλεία φθείρονται εύκολα όταν χρησιμοποιούνται για την κατεργασία χαλύβων λόγω διάσπασης, ενώ κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου αντιστέκονται πολύ περισσότερο στη φθορά λόγω του σχηματισμού ενός στρώματος αντίδρασης μεταξύ του άνθρακα από τον σεμεντίτη και του τιτανίου. Το πεδίο φθοράς οφείλεται κυρίως στην αποξεστική δράση της τραχιάς δεύτερης φάσης του κατεργαζόμενου υλικού ενώ είναι γνωστό ότι η φθορά κρατήρα είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού πολλών παραγόντων όπως η επικόλληση, η τριβή και η διάχυση<sup>6</sup>.

Οι θερμοκρασίες κοπής, οι συνθήκες επαφής και οι τάσεις στις διεπιφάνειες εργαλείου-τεμαχίου και εργαλείου-αποβλίττου δεν επηρεάζουν μόνο τη φθορά αλλά και τη σχετική σημαντικότητα των μηχανισμών φθοράς<sup>3</sup>. Δυσμενείς συνθήκες κοπής, ιδιαίτερα η ταχύτητα κοπής, οδηγούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες κοπής. Οι υψηλές θερμοκρασίες κοπής έχουν ως αποτέλεσμα το απόβλιττο να προσβάλλει κρουστικά τη διεπιφάνεια εργαλείου-αποβλίττου αντί να ολισθαίνει πάνω της, πράγμα που οδηγεί σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες που ευνοούν μηχανισμούς φθοράς που ενεργοποιούνται από τη θερμότητα. Το κατεργαζόμενο υλικό μαλακώνει όσο η κατάσταση κοπής δυσχεραίνει, οπότε το εργαλείο γίνεται πιο επιρρεπές στην αποξεστική δράση της τριβής. Καθώς άλλοι μηχανισμοί γίνονται με τη σειρά τους εντονότεροι, η τριβή χάνει την κυριαρχία της πάνω στη προκαλούμενη φθορά και η επίδραση των άλλων μηχανισμών γίνεται πιο αισθητή.

## 1.2 Τύποι φθοράς εργαλείων

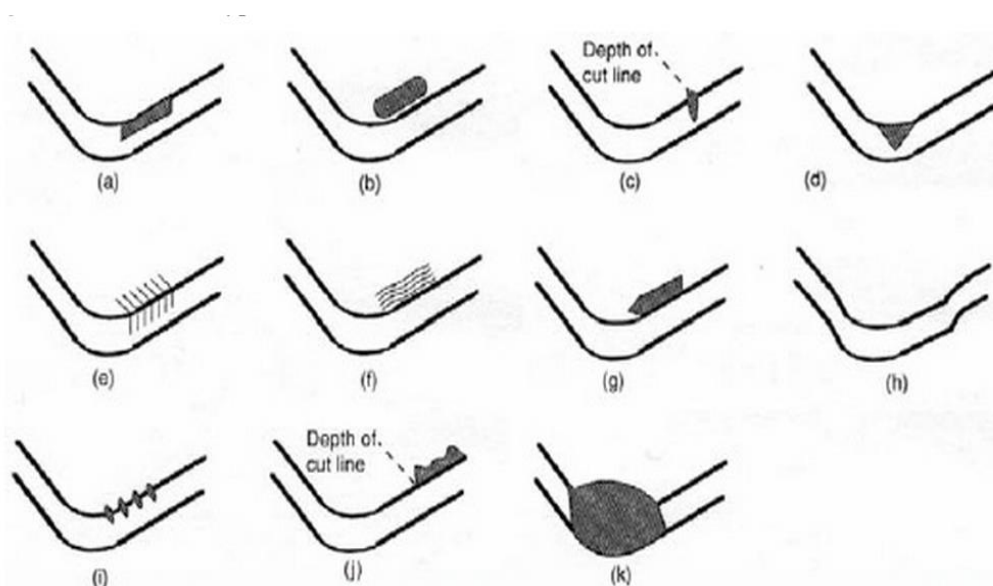
Υπό μια ευρύτερη έννοια, φθορά είναι η επιφανειακή βλάβη ή αφαίρεση υλικού από τη μία ή και τις δύο επιφάνειες λόγω της μεταξύ τους ολίσθησης, κύλισης ή κρουστικής

επαφής. Όμως, όταν αφορά τα κοπτικά εργαλεία, ο όρος αυτός θα πρέπει να συσχετιστεί με τις έννοιες της διάρκειας ζωής και της αστοχίας των εργαλείων. Διάρκεια ζωής ενός εργαλείου είναι ο χρόνος κατά τον οποίο αυτό μπορεί να χρησιμοποιείται για μια κατεργασία κοπής μετάλλου.

Αστοχία του εργαλείου είναι το γεγονός που σηματοδοτεί το τέλος της ζωής του. Ένα εργαλείο μπορεί να αστοχήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους: καταστροφική αστοχία, πλαστική παραμόρφωση ή σταδιακή φθορά. Τα δύο πρώτα αντιπροσωπεύουν μια πρόωρη αστοχία του εργαλείου. Η σταδιακή φθορά είναι αναπόφευκτη και φυσική συνέπεια σε κάθε τυπικό σενάριο κοπής μετάλλων. Ένας συνήθης τρόπος κατηγοριοποίησης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου είναι η περιοχή του εργαλείου όπου αυτή παρατηρείται σε κάθε περίπτωση. Τα διαφορετικά είδη φθοράς που μπορεί να συναντήσουμε σε ένα εργαλείο ενός σημείου είναι

- a) πεδίο φθοράς
- b) φθορά κρατήρα
- c) εξώτερη αυλακοειδής φθορά
- d) ακτινική φθορά αιχμής
- e) θερμικές ρωγμές
- f) παράλληλες με την κόψη ρωγμές
- g) επικαθήσεις κόψης
- h) δραστική πλαστική παραμόρφωση
- i) αποκολλήσεις κόψης
- j) αυλάκωση λόγω κρουστικής επαφής του αποβλίττου με το εργαλείο
- k) σπάσιμο αιχμής

και φαίνονται με την αντίστοιχη αλφαβητική αρίθμηση στην παρακάτω εικόνα<sup>1</sup>.





Προφανώς στην πραγματικότητα η μορφή της παρατηρούμενης φθοράς θα διαφέρει από αυτές τις απλές γραφικές αναπαραστάσεις. Αφενός το σχήμα και η περιοχή της φθοράς θα διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και τις συνθήκες κατεργασίας και αφετέρου πολλά από αυτά τα είδη φθοράς μπορεί να εμφανίζονται ταυτόχρονα.

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από αυτά τα είδη φθοράς παρουσιάζουν το πεδίο φθοράς και η φθορά κρατήρα διότι αναπτύσσονται σε όλες τις συμβατικές κατεργασίες μετάλλων<sup>6</sup>. Τα υπόλοιπα είδη είτε δεν μπορούν να θεωρηθούν περιπτώσεις κατεργασίας σταδιακής φθοράς είτε εμφανίζονται σε πολύ συγκεκριμένες περιστάσεις συνδυασμών εργαλείου-τεμαχίου. Η αυλάκωση λόγω κρουστικής επαφής του αποβλίττου παρατηρείται μόνο όταν κεραμικά εργαλεία κατεργάζονται υλικά που δίνουν ανθεκτικό και τραχύ απόβλιττο όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, Οι θερμικές αλλά και οι παράλληλες αυλακώσεις εμφανίζονται κυρίως σε διακοπτόμενες κοπές αλλά όταν εμφανιστούν οδηγούν σε ταχύτερες αποκολλήσεις από την κόψη του εργαλείου και άρα ταχύτερη καταστροφή. Παρόλο που οι επικαθήσεις κόψης δεν συνιστούν καθεαυτές φθορά του εργαλείου, επιδεινώνουν την αποξεστική δράση της τριβής και την επικολητική φθορά. Η δραστική πλαστική παραμόρφωση δεν είναι σταδιακή φθορά αλλά η εμφάνισή της αλλάζει τις συνθήκες κατεργασίας αλλοιώνοντας το σχήμα του εργαλείου, τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες της κοπής<sup>2</sup>. Τέλος, το σπάσιμο της αιχμής είναι μια αστοχία που θα εμφανιστεί είτε στην αρχή της κατεργασίας είτε αφού το εργαλείο έχει πρώτα υποστεί σταδιακή φθορά σε κάποιο βαθμό.

### *1.3 Στοιχειώδεις μηχανισμοί φθοράς εργαλείων*

#### *1.3.1 Επικόλληση*

Επικολητική φθορά συμβαίνει όταν μια επιφάνεια ολισθαίνει πάνω σε μια άλλη και ψήγματα της μίας επιφάνειας προσκολλώνται στην άλλη και στη συνέχεια αποκολλώνται από την αρχική<sup>1</sup>. Η προέλευση της επικολητικής φθοράς είναι οι ισχυρές δυνάμεις συνάφειας που εμφανίζονται όταν τα μόρια των υλικών έρχονται σε στενή επαφή. Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι η επικολητική φθορά είναι ανάλογη των δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο επιφανειών, είναι ανάλογη με την απόσταση όπου ολισθαίνουν οι επιφάνειες και αντιστρόφως ανάλογη της σκληρότητας των επιφανειών.

Κατά την κοπή μετάλλων, επικολλήσεις μπορεί να προκύψουν διότι το κατεργαζόμενο υλικό (ή φολίδες του κατεργαζόμενου υλικού) σχηματίζουν ισχυρούς δεσμούς με το υλικό του εργαλείου υπό τις υψηλές διεπιφανειακές δυνάμεις και

θερμοκρασίες. Εάν η αντοχή των μικροσκοπικών συσσωματωμάτων που προκύπτουν είναι υψηλότερη από την τοπική αντοχή μίας από τις δύο ολισθαίνουσες επιφάνειες, τότε τα συσσωματώματα θα αποκολληθούν από την επιφάνεια με τη μικρότερη αντοχή. Φθορά του εργαλείου θα προκύψει αν η επιφάνεια με τη μικρότερη αντοχή ανήκει σε αυτό. Σε περίπτωση που η επιφάνεια με τη μικρότερη αντοχή ανήκει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο ή στο απόβλιττο, μπορεί να εμφανιστούν επικαθήσεις στην κόψη του εργαλείου. Εν συντομία, επικολητική φθορά είναι ο σχηματισμός συσσωματωμάτων λόγω ισχυρών δεσμών μεταξύ μορίων του κατεργαζόμενου υλικού και του εργαλείου και στη συνέχεια η αποκόλληση των συσσωματωμάτων αυτών από την επιφάνεια του εργαλείου<sup>6</sup>. Η επικολητική φθορά είναι επικρατέστερη σε μέσες θερμοκρασίες και υποβοηθείται από το συνεχή σχηματισμό νέων επιφανειών χωρίς επικαλύψεις οξειδώσεων.

### 1.3.2 Τριβή

Η τριβή οδηγεί σε αποξεστική φθορά όταν μία σκληρή και τραχιά επιφάνεια ή μία επιφάνεια που περιέχει σκληρά σωματίδια ολισθαίνει πάνω σε μια πιο μαλακή επιφάνεια. Στις περισσότερες περιπτώσεις κοπής μετάλλων το υλικό του κοπτικού εργαλείου είναι σκληρότερο από αυτό του κατεργαζόμενου τεμαχίου όμως κατά τη διάρκεια της κατεργασίας σχηματίζονται στην επιφάνεια του τεμαχίου σκληρότερες φάσεις του υλικού του και είναι αυτές που αφαιρούν υλικό από την επιφάνεια του εργαλείου. Ανάλογα με τη μορφολογία αυτών των φάσεων μπορεί να προκύψει τριβή είτε δύο είτε τριών σωμάτων στη διεπιφάνεια υλικού-εργαλείου<sup>2</sup>.

Η τριβή είναι σημαντικός αλλά και ο πιο πολύπλοκος από τους μηχανισμούς φθοράς και αυτό γίνεται φανερό και από το ότι υπάρχουν μόνο εμπειρικοί τύποι που εξηγούν ή προβλέπουν τη φθορά που προκύπτει λόγω αυτής ενώ ακόμα και κατά την κατάστρωση αυτών των εξισώσεων έχουν γίνει -στις περισσότερες περιπτώσεις- παραδοχές και απλουστεύσεις. Ο τρόπος με τον οποίο η τριβή προκύπτει ανάμεσα και επιδρά στις διεπιφάνειες της κοπής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τα ακριβή τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών και οι παράμετροι της κοπής<sup>3</sup>. Επίσης, άλλοι μηχανισμοί φθοράς που εμφανίζονται σε κάθε περίπτωση σε διαφορετικό βαθμό επηρεάζουν την αποξεστική δράση της τριβής. Εξάλλου, κατά τη διεξαγωγή κάθε πειράματος θα γίνουν αναπόφευκτα κάποιες παραδοχές-οσοδήποτε μικρές-προκειμένου να προκύψουν ομοιόμορφα και εύχρηστα πειραματικά ευρήματα. Αυτοί είναι και οι λόγοι που πολλές φορές στη βιβλιογραφία βρίσκει κανείς αντιφάσεις στις περιγραφές της εξέλιξης της φθοράς λόγω τριβής, ανάλογα με τους διάφορους συνδυασμούς υλικών εργαλείου-τεμαχίου και τις εκάστοτε συνθήκες κοπής<sup>6</sup>.

### 1.3.3 Διάχυση

Διάχυση στερεάς φάσης λαμβάνει χώρα από περιοχές υψηλής ατομικής πυκνότητας προς περιοχές χαμηλής ατομικής πυκνότητας. Ο ρυθμός της διάχυσης αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Διάχυση μπορεί να συμβεί κατά την κοπή μετάλλων λόγω της στενής επαφής υπό υψηλή θερμοκρασία και σε μια μικρή ζώνη αντίδρασης του κοπτικού εργαλείου με το απόβλιττο<sup>1</sup>. Η φθορά λόγω διάχυσης προκαλεί εξασθένηση της δομής της επιφάνειας του εργαλείου και είναι πιθανότερη σε συνδυασμούς υλικών εργαλείου-τεμαχίου που είναι επιρρεπείς στην εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες κοπής διότι οι χαμηλές ταχύτητες συνεπάγονται μεγαλύτερους χρόνους επαφής εργαλείου-αποβλίττου που επίσης ευνοούν τη διάχυση. Η διάχυση είναι πιο δύσκολο να μελετηθεί πειραματικά διότι ποτέ δεν εμφανίζεται μόνη της και σπάνια κυριαρχεί ως μηχανισμός φθοράς<sup>6</sup>.

### 1.3.4 Διάλυση

Η διάλυση λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια αποβλίττου και-λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που απαιτείται για να συμβεί, οι συνθήκες κοπής πρέπει να είναι δυσμενείς. Κατά τη διάλυση, ψήγματα του υλικού του εργαλείου σχηματίζουν ένα στερεό διάλυμα με το υλικό του αποβλίττου<sup>3</sup>. Όσο λοιπόν δημιουργείται απόβλιττο, αφαιρείται υλικό από την επιφάνεια του εργαλείου. Η έκταση της φθοράς λόγω διάλυσης εξαρτάται τόσο από τη χημική αδράνεια του υλικού του εργαλείου όσο και από τη συνάφειά του με το κατεργαζόμενο υλικό. Η φθορά λόγω διάλυσης κυριαρχεί σε σχετικά υψηλές ταχύτητες κοπής. Ο μηχανισμός της διάλυσης έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για να εξηγήσει τη φθορά σε εργαλεία από καρβίδια, σε εργαλεία επικαλυμμένα με καρβίδια και σε κεραμικά εργαλεία. Μάλιστα, υπάρχει σαφής κατάταξη των διάφορων υλικών εργαλείων ανάλογα με την ανθεκτικότητά τους στη διάλυση.

### 1.3.5 Χημική αντίδραση

Η διάλυση ως μηχανισμός φθοράς δεν επαρκεί για να εξηγήσει τα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την κατεργασία χημικά δραστικότερων υλικών. Καθεαυτές, διάφορες χημικές αντιδράσεις που μπορεί να συμβαίνουν κατά την κοπή δεν αποτελούν μηχανισμό αντίδρασης, όμως μπορεί να επηρεάσουν την εξέλιξη της φθοράς του εργαλείου όταν διάφορα παράγωγα την αντίδρασης των υλικών εργαλείου-τεμαχίου παρασύρονται από το απόβλιττο ή επικάθονται στην κατεργαζόμενη επιφάνεια<sup>3</sup>. Η χημική φθορά εντείνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα κοπής δραστικών υλικών όπως τα κράματα τιτανίου, ή όταν

χρησιμοποιούνται υγρά κοπής που περιέχουν ενώσεις του θείου ή του χλωρίου. Συνήθως μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση εργαλείων με κατάλληλη επιφανειακή επικάλυψη ή με την εναλλαγή προσθέτων στα χρησιμοποιούμενα υγρά κοπής.

Η οξείδωση είναι μία από τις πιο συνηθισμένες μορφές χημικής φθοράς και συμβαίνει όταν το υλικό του εργαλείου ή το κατεργαζόμενο υλικό αντιδρούν με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο<sup>6</sup>. Παρατηρείται συχνά στην περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια εργαλείου τεμαχίου που είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα και διακρίνεται εύκολα λόγω του χρωματισμού που προκαλεί στο υλικό του εργαλείου. Μπορεί να προκαλέσει εξώτερη αυλακοειδή φθορά η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του εργαλείου. Επίσης, φολίδες οξειδωμένου υλικού παρεισφρεύουν στη διεπιφάνεια εργαλείου-αποβλίττου ή εργαλείου-τεμαχίου εντείνοντας την αποξεστική δράση της τριβής.

#### 1.4 Το πεδίο φθοράς

##### 1.4.1 Μηχανισμός

Η φθορά των κοπτικών εργαλείων είναι αναπόφευκτη. Είναι σημαντικό όμως να μπορούμε να την προβλέψουμε και να φροντίσουμε ώστε να εμφανίζεται με τρόπο συστηματικό και όχι με τη μορφή καταστροφικής αστοχίας. Από αυτήν την άποψη, ο προτιμότερος τύπος φθοράς είναι το πεδίο φθοράς, διότι εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις τόννευσης και επειδή είναι πιο εύκολο να μετρηθεί ο βαθμός στον οποίο έχει προχωρήσει<sup>4</sup>. Η εμφάνιση του πεδίου φθοράς οφείλεται ως επί το πλείστον στην αποξεστική δράση της τριβής ανάμεσα στην εξωτερική όψη του κοπτικού εργαλείου και την επιφάνεια που προκύπτει από την αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Φυσικά, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κοπής άλλοι μηχανισμοί φθοράς που εμφανίζονται επηρεάζουν την επέκταση του πεδίου φθοράς.

##### 1.4.2 Σημασία της μελέτης του πεδίου φθοράς

Στη βιομηχανία, είναι το πεδίο φθοράς που κατεξοχήν χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εναπομείνουσας ζωής των κοπτικών εργαλείων. Αυτό οφείλεται στο ότι αφενός είναι εύκολο να μετρηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια η έκτασή του επιτόπου ακόμα και με ένα μικρής μεγέθυνσης μικροσκόπιο, αφετέρου στο ότι υπάρχουν διαθέσιμοι πολλοί εμπειρικοί τύποι που βοηθούν σε αυτήν την εκτίμηση οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις

παραμέτρους κοπής που μπορεί να θεωρηθούν σημαντικότερες κατά περίπτωση αλλά και τους διάφορους συνδυασμούς υλικών εργαλείων-τεμαχίων<sup>8</sup>.

Παρόλα αυτά, υπάρχει- και θα υπάρχει για όσο καιρό δεν είναι διαθέσιμο ένα ακριβές αναλυτικό ή υπολογιστικό μοντέλο της φθοράς των κοπτικών- ανάγκη εμπλουτισμού της βιβλιογραφίας που αφορά στο πεδίο φθοράς, από τη μορφή της εξέλιξής του ανάλογα με τις παραμέτρους της εκάστοτε κατεργασίας έως τη συμπεριφορά του εργαλείου όταν το πεδίο φθοράς έχει προχωρήσει αλλά και το πως επιδρά σε συνδυασμό με άλλους μηχανισμούς φθοράς στην ποιότητα της επιφάνειας των τεμαχίων<sup>6</sup>. Επιπλέον, από τις αντιφάσεις που συναντά κανείς στη βιβλιογραφία όσον αφορά τις τάσεις της εξέλιξης του πεδίου φθοράς σε κάποιες περιπτώσεις, φαίνεται η σημασία του ελέγχου της αξιοπιστίας και του εύρους ισχύος των πειραματικών ευρημάτων που έχουν προκύψει κατά τη μελέτη ενός τόσο πολύπλοκου αλλά και τόσο σημαντικού φαινομένου.

Είναι προφανές ότι στη βιομηχανία οι απαιτήσεις για την επιτάχυνση της παραγωγής είναι μεγάλες. Το κατά πόσο μπορούν να επισπευστούν οι διάφορες κατεργασίες χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα από την ανάγκη για συχνή αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων ή από τη χαμηλή ποιότητα των τελικών επιφανειών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επαρκή κατανόηση της φθοράς των εργαλείων και από την ικανότητα για αξιόπιστη εκτίμηση της εναπομείνουσας διάρκειας ζωής τους<sup>9</sup>. Σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικών μονάδων, πριν την έναρξη μεγάλων μερίδων παραγωγής, γίνονται επιτόπιες μελέτες της εξέλιξης της φθοράς των συγκεκριμένων εργαλείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τα υλικά που πρόκειται να τεθούν υπό κατεργασία και τις συνθήκες κοπής που θα υποστούν· άλλες φορές ανατίθενται τέτοιες μελέτες συγκεκριμένων περιπτώσεων σε εξωτερικά ερευνητικά κέντρα. Είναι προφανώς επιθυμητό να ευρεθούν τρόποι ώστε η ανάγκη για την αποκλειστική μελέτη κάθε έκαστης περίπτωσης να περιοριστεί.

Πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν ήδη πραγματοποιηθεί με σκοπό την εύρεση μη παρεμβατικών στην κατεργασία τρόπων εκτίμησης της φθοράς-και άρα της εναπομείνουσας διάρκειας ζωής του εργαλείου<sup>7</sup>. Το να μπορεί να αποφεύγεται η διακοπή των κατεργασιών προκειμένου να παρατηρηθεί η φθορά του εκάστοτε εργαλείου είναι σημαντικό διότι-πέρα από την προφανή εξοικονόμηση χρόνου- ορισμένα εργαλεία γίνονται πιο επιρρεπή σε κάποιους τύπους φθοράς όταν χρησιμοποιούνται σε διακοπτόμενες κατεργασίες. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κάθε μελέτη του πεδίου φθοράς που εκτείνεται σε εύλογο εύρος κάποιας παραμέτρου της κοπής μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για το μηχανουργείο αλλά και πολύτιμο σημείο αναφοράς για περαιτέρω έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Το πείραμα

#### 2.1 Ο σκοπός του πειράματος

Γνωρίζουμε ότι η φθορά αλλάζει τη γεωμετρία του εργαλείου και ότι η αλλαγή αυτή συνεπάγεται τη διακύμανση των δυνάμεων της κοπής. Διαισθητικά, αλλά και ανατρέχοντας στα αποτελέσματα άλλων πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί (για διαφορετικούς δε συνδυασμούς υλικών εργαλείου-τεμαχίου), αναμένουμε ότι υπάρχει συσχέτιση-έστω και χαλαρή- ανάμεσα στην τιμή των δυνάμεων κοπής και το μέγεθος της φθοράς σε κάθε σημείο της κατεργασίας.

Θα ήταν χρήσιμο να μπορεί να διαπιστωθεί εάν αυτή η συσχέτιση είναι αφενός υπαρκτή και αφετέρου αρκετά ισχυρή ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί αργότερα για επιτόπια εκτίμηση της φθοράς σε συνθήκες παραγωγής. Αυτός ακριβώς είναι και ο σκοπός τούτης της εργασίας: να διαπιστωθεί εάν προβλέπεται η δυνατότητα να παρατηρηθεί εμμέσως- αλλά αξιόπιστα- η εξέλιξη του πεδίου φθοράς κατά την τόννευση σε μέσες και υψηλές ταχύτητες κοπής, μέσω των μετρούμενων δυνάμεων που δέχεται το κοπτικό εργαλείο.

#### 2.2 Η πειραματική διαδικασία

##### 2.2.1 Πειραματικός εξοπλισμός

Τόρνος: HAAS TL-1

Εργαλείο: CNMG120408-M4

Δυναμόμετρο: KIAG SWISS 9257A

Μετρητική κάρτα: National Instruments 1830300-01L

Ενισχυτές: 2x Kistler 5011, 1x Kistler 5006

Λογισμικό: LabView, ImageJ

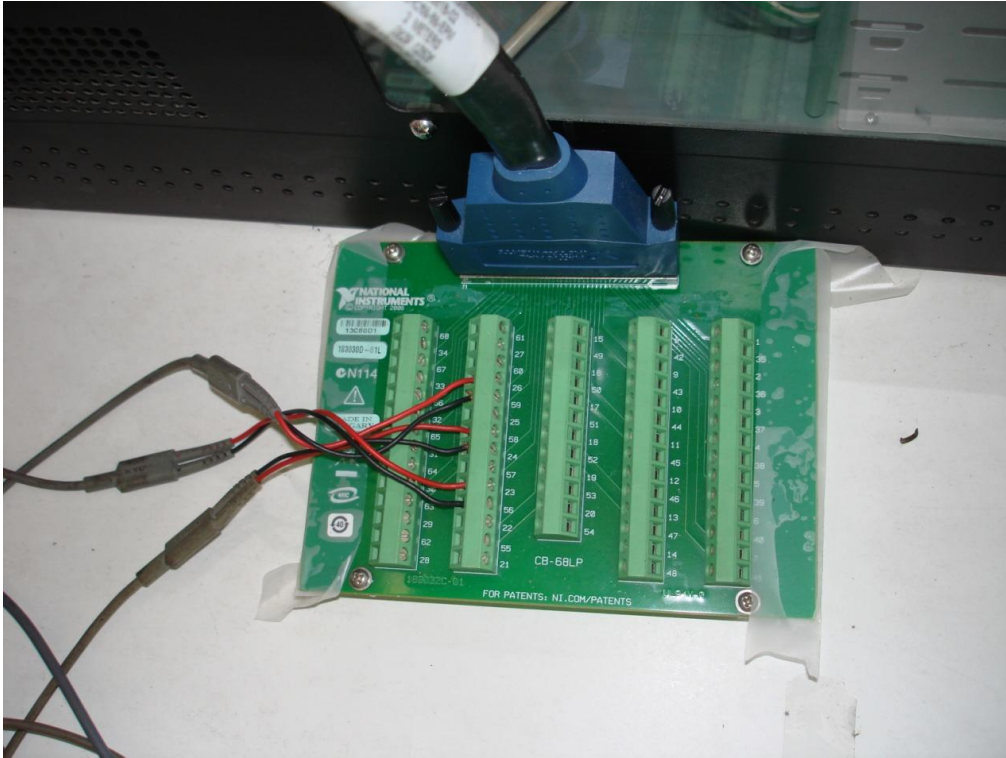
Ακολουθούν φωτογραφίες του πειραματικού εξοπλισμού



Εικόνα 2.1: Ο τόρνος HAAS



Εικόνα 2.2: Οι ενισχυτές KISTLER

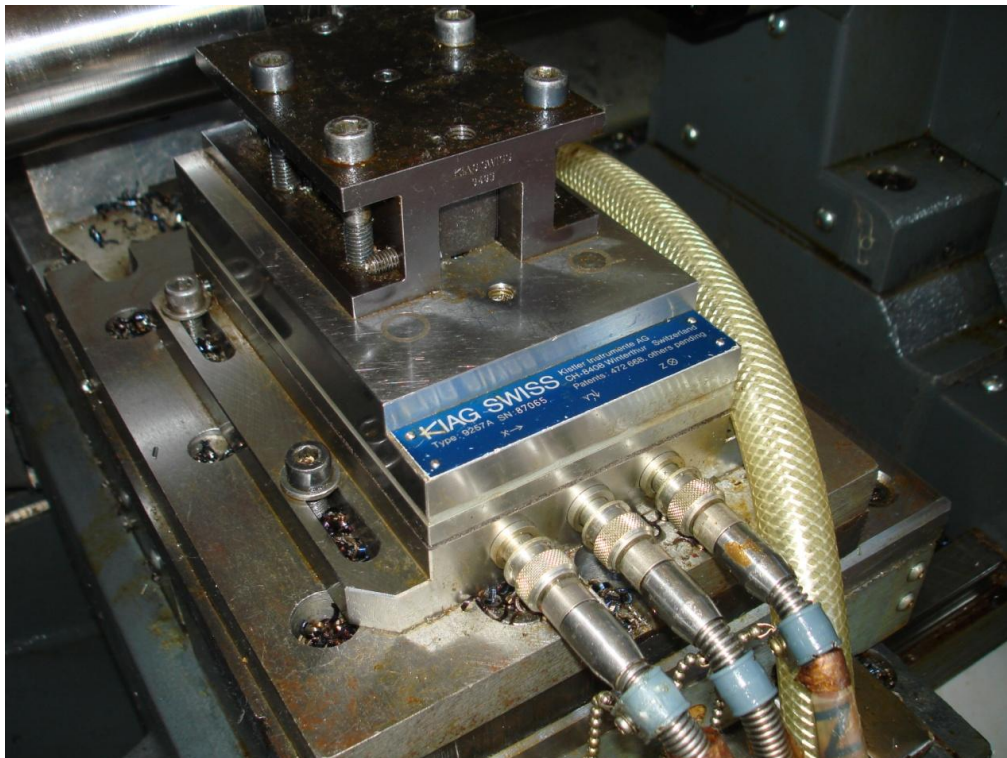


Εικόνα 2.3: Η μετρητική κάρτα National Instruments

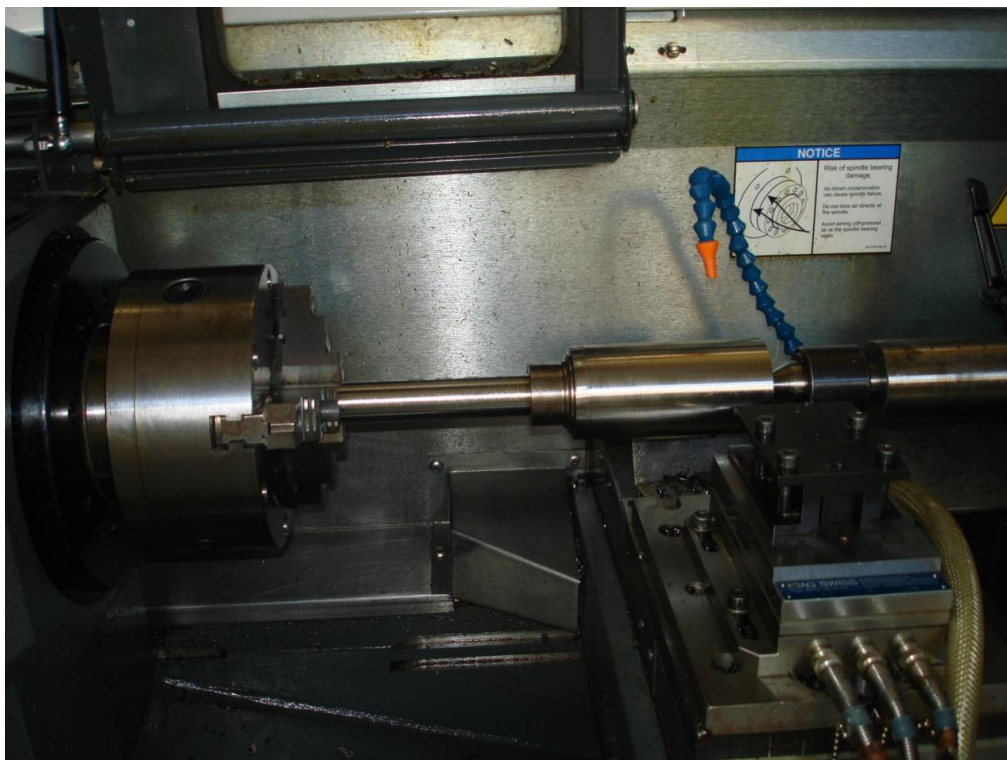


Εικόνα 2.4: Ο υπολογιστής συνδεδεμένος με τη μετρητική κάρτα και τους ενισχυτές





Εικόνα 2.5: Το δυναμόμετρο KIAG SWISS



Εικόνα 2.6: Άποψη του δυναμόμετρου προσαρμοσμένου πάνω στο εργαλειοφορείο

## 2.2.2 Διεξαγωγή

Κατεργάστηκαν κυλινδρικές ράβδοι χάλυβα με βάθος κοπής  $0.5\text{mm}$  και πρόωση  $0.8\text{mm/rev}$  τα οποία παρέμειναν σταθερά σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιήθηκε υγρό κοπής. Κάθε 3 ή 5 πάσα (ανάλογα με το μήκος της ράβδου που κατεργαζόταν) μετρούνταν οι δυνάμεις της κοπής και έπειτα λαμβανόταν φωτογραφία της κόψης του εργαλείου υπό το μικροσκόπιο με μεγέθυνση τέτοια ώστε να φαίνεται το πεδίο φθοράς. Οι φωτογραφίες ελήφθησαν με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή από τον προσοφθάλμιο φακό του μικροσκοπίου.

Έγιναν μετρήσεις σε 4 ταχύτητες κοπής:  $160\text{m/min}$ ,  $200\text{m/min}$ ,  $225\text{m/min}$  και  $250\text{m/min}$ . Σε κάθε περίπτωση οι μετρήσεις σταματούσαν όταν το πεδίο φθοράς ξεπερνούσε τα  $200\mu\text{m}$  (τιμή που συνήθως σηματοδοτεί το τέλος της χρήσης του εργαλείου σε βιομηχανικές εφαρμογές) ή μετά την καταστροφική αστοχία του εργαλείου. Λόγω του ότι δεν μπορούσε να υπολογιστεί η έκταση του πεδίου φθοράς παρά με το μάτι κατά τη διάρκεια του πειράματος, έχουν προκύψει από τις μετρήσεις τιμές πάνω από  $200\mu\text{m}$ .

## 2.3 Τα πειραματικά αποτελέσματα

### 2.3.1 Επεξεργασία

Οι μετρήσεις των δυνάμεων από το LabView παρελήφθησαν αρχικά σε αρχεία μορφής *.txt* έπειτα μεταφέρθηκαν σε φύλλα του Excel και καταστρώθηκαν οι γραφικές παραστάσεις των δυνάμεων στο πεδίο του χρόνου. Έτσι εντοπίστηκαν τα διαστήματα ενδιαφέροντος όπου οι δυνάμεις παρέμεναν σταθερές και οι τελικές τιμές προέκυψαν από το μέσο όρο αυτών. Επίσης στο Excel έγιναν όλα τα τελικά διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

Η μέτρηση του πεδίου φθοράς έγινε μέσω του ImageJ όπου συγκρίθηκε η έκτασή του σε κάθε περίπτωση με το γνωστό πλάτος ταινίας ( $1\text{mm}$ ) που τοποθετούνταν κάθε φορά δίπλα στην περιοχή ενδιαφέροντος πριν τη λήψη των φωτογραφιών.

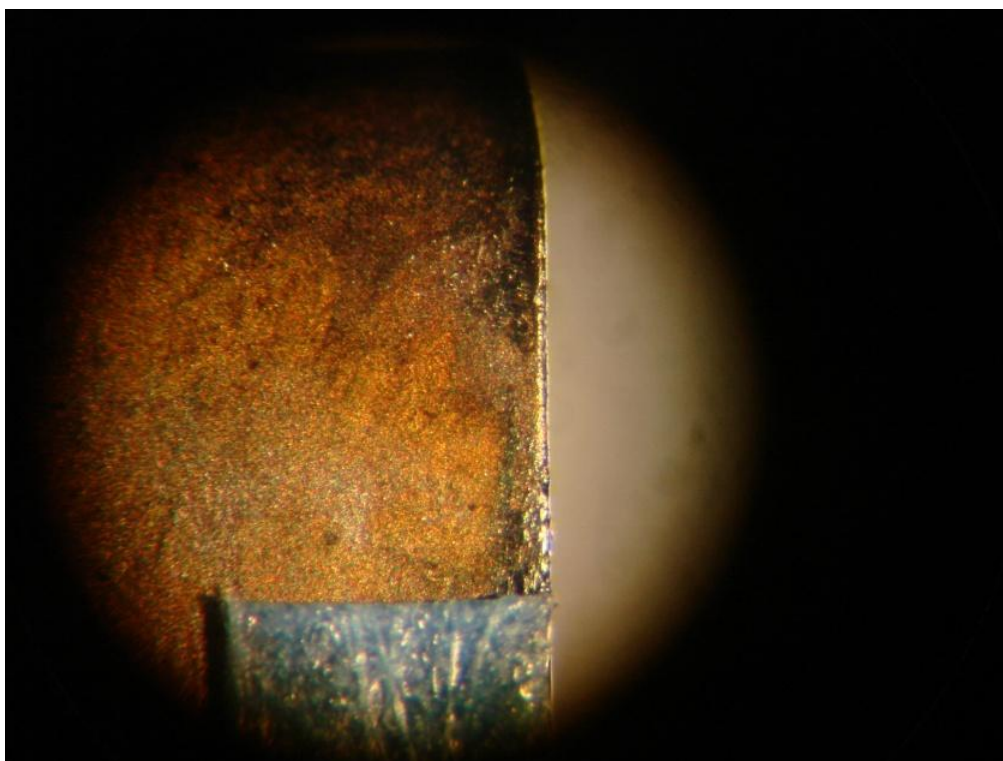
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

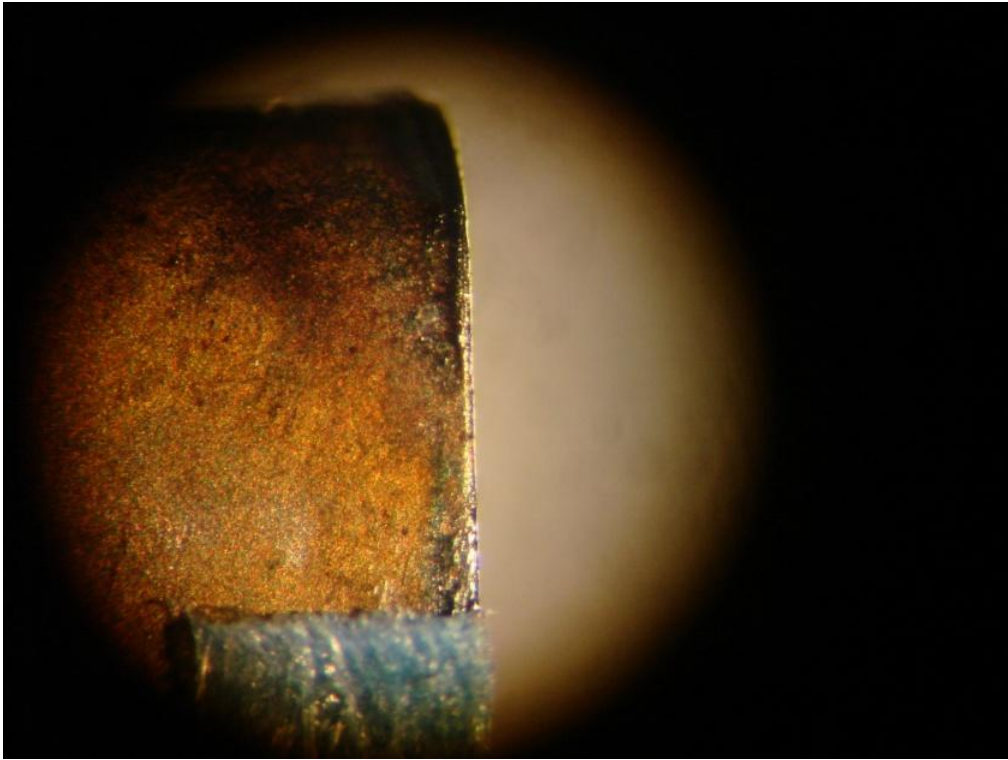
### Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

Παρουσιάζονται παρακάτω ορισμένες από τις φωτογραφίες που είναι πιο αντιπροσωπευτικές της εξέλιξης της φθοράς σε κάθε ταχύτητα (στο αρχικό κείμενο είναι έγχρωμες). Ο αριθμός στη λεζάντα κάθε εικόνας αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό της μέτρησης μετά από την οποία ελήφθη η εν λόγω φωτογραφία.

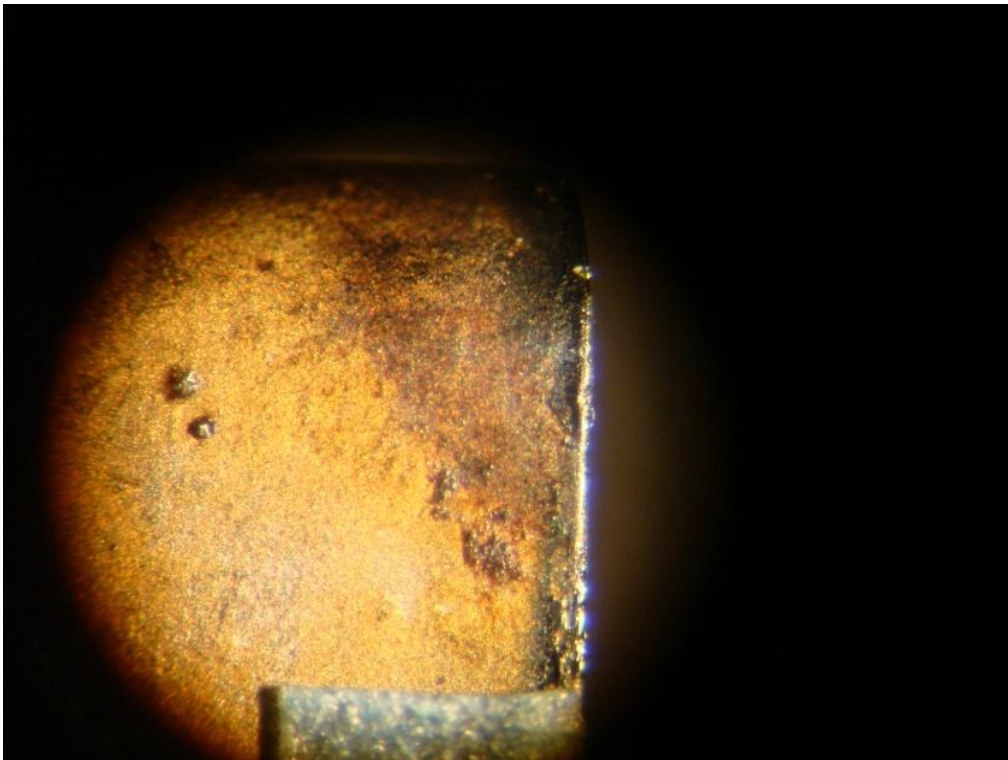
Ακολουθούν πινακοποιημένα τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων για κάθε ταχύτητα καθώς και τα διαγράμματα ενδιαφέροντος συνοδευόμενα από σύντομες παρατηρήσεις. (Σημειώνεται ότι η κύρια δύναμη κοπής είναι η  $F_z$ .)

#### 3.1 Αποτελέσματα για ταχύτητα κοπής 160m/min

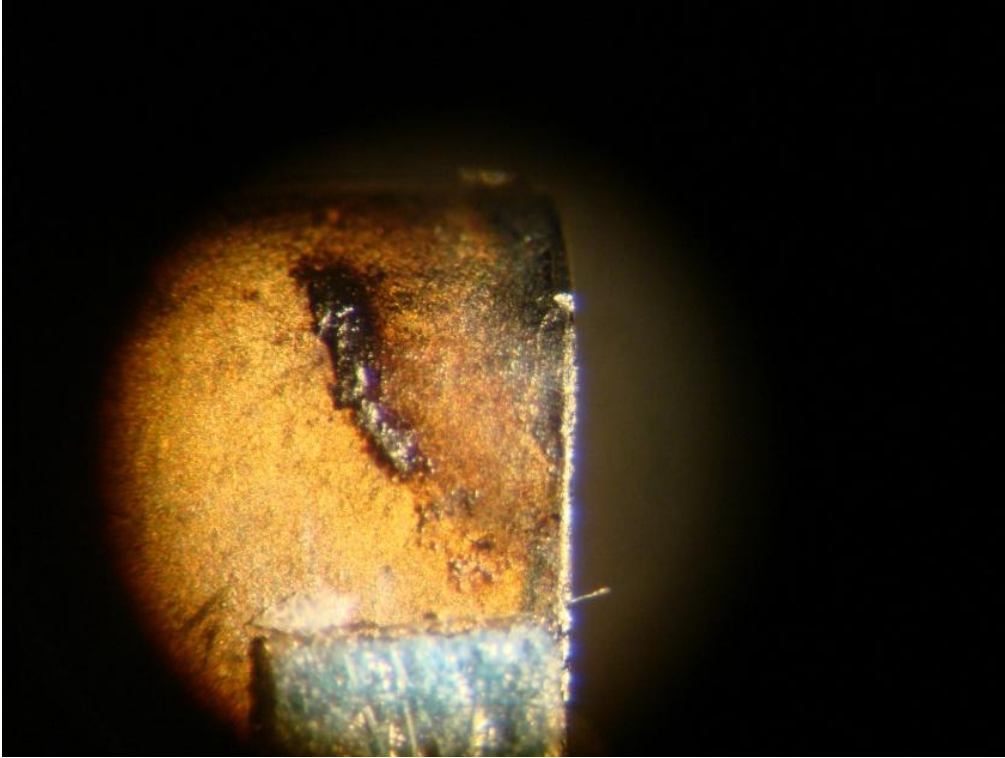




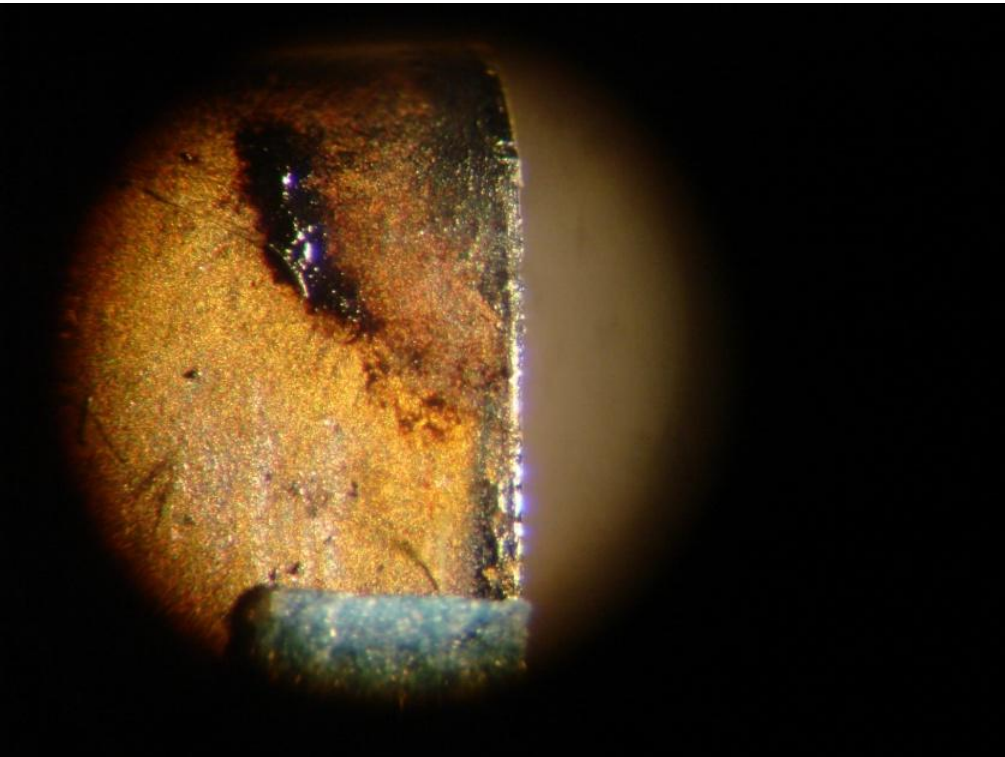
160 (5)



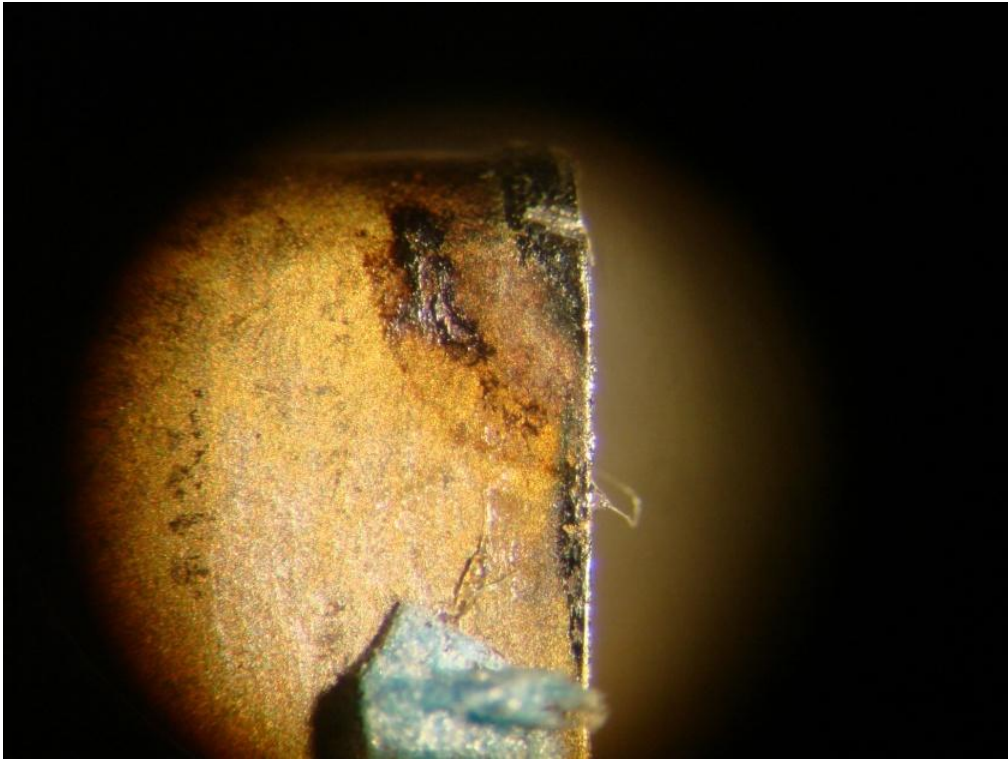
160 (8)



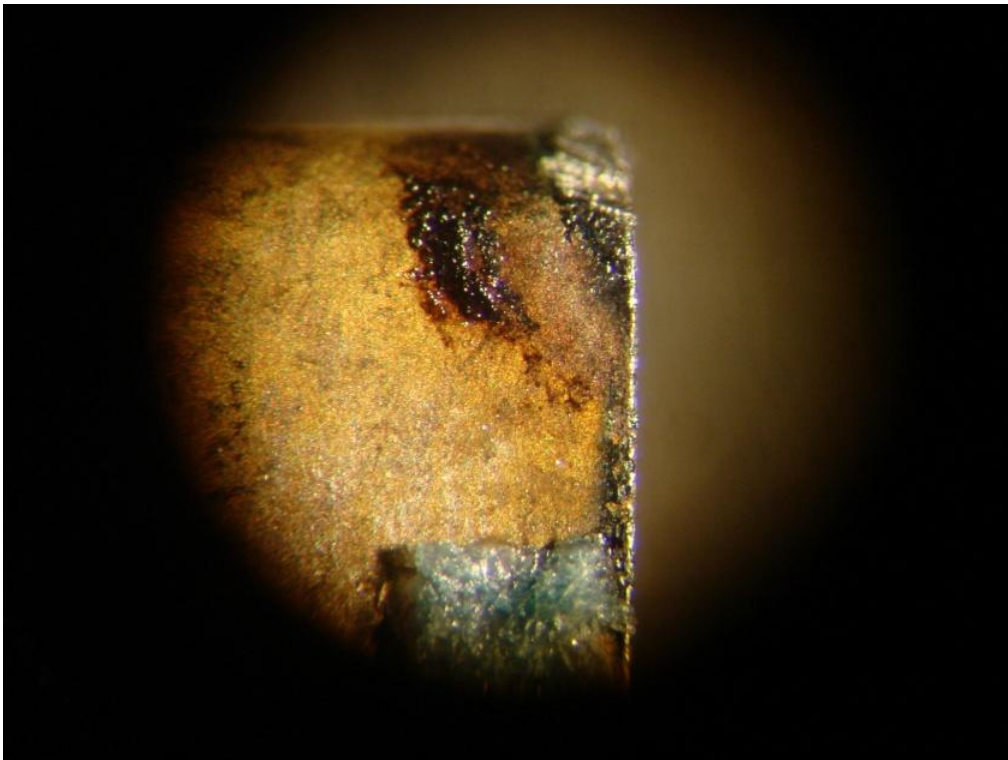
160 (10)



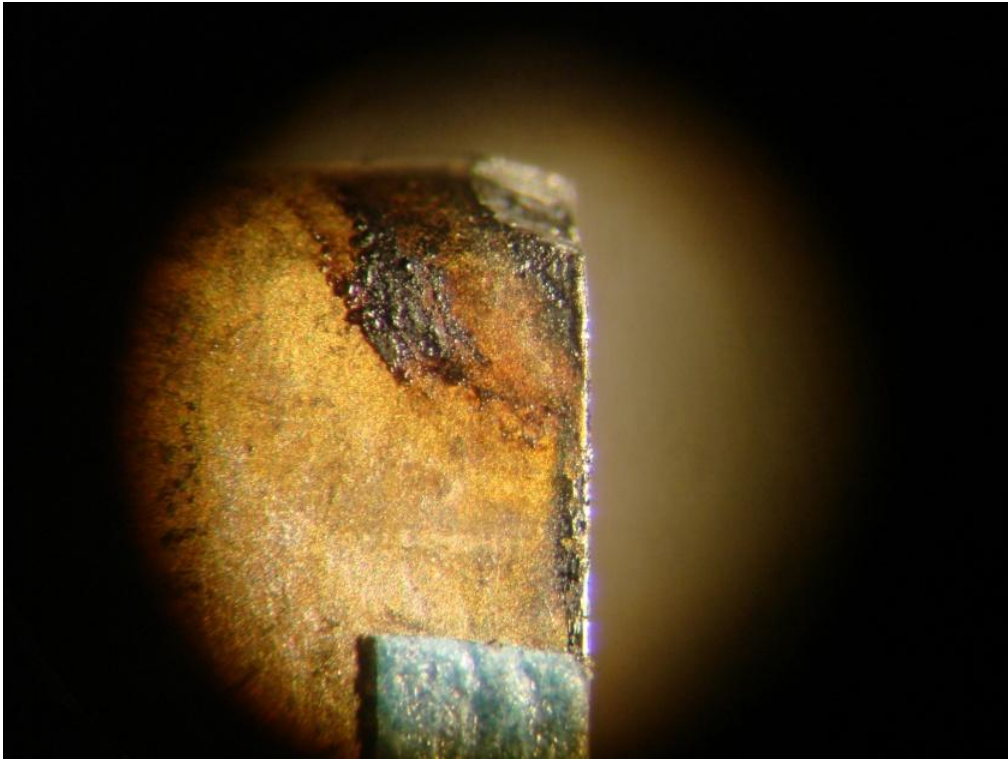
160 (13)



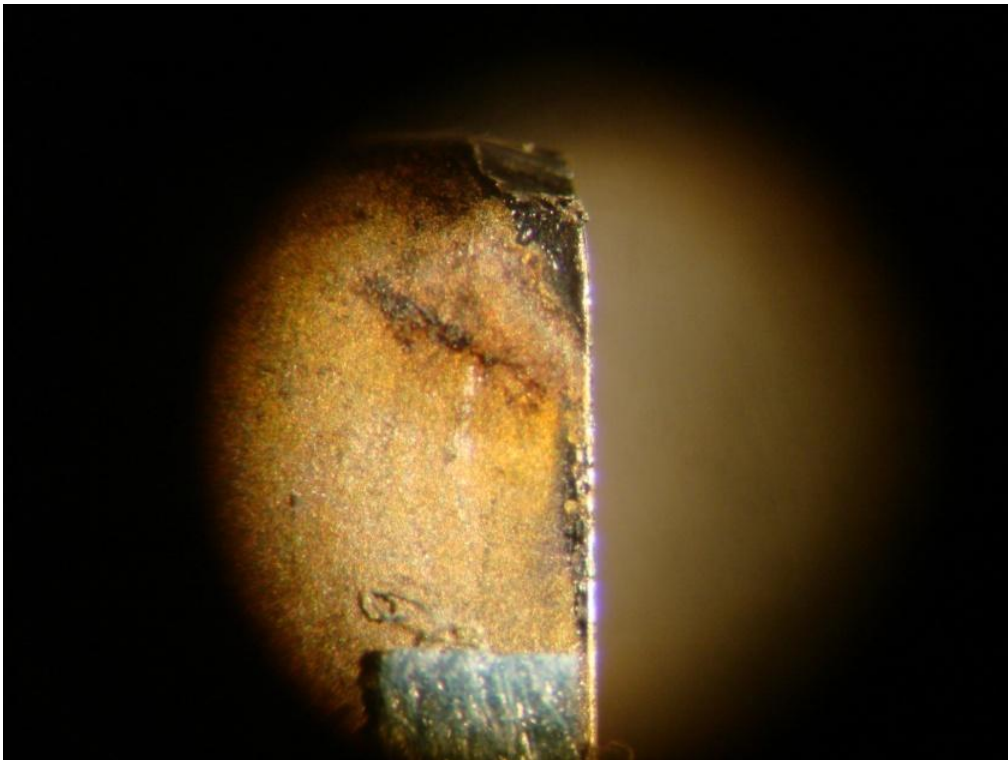
160 (14)



160 (15)



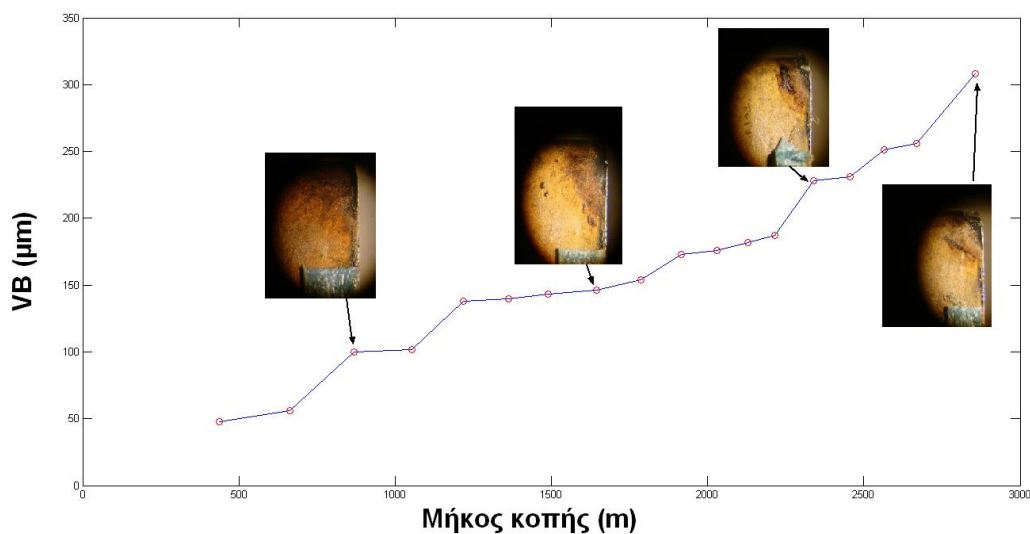
160 (17)



160 (18)

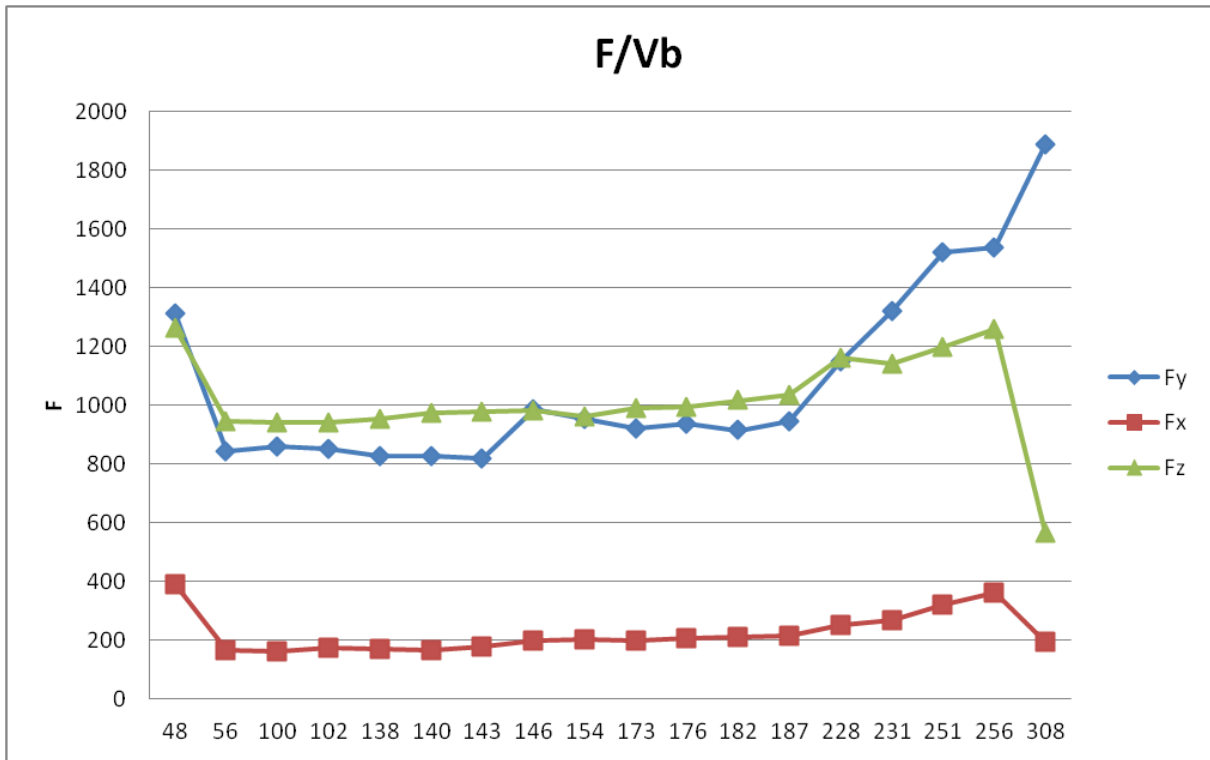
160m/min					
α/α μέτρησης	l m	Vb μm	Fy N	Fx N	Fz N
1	438,330	48	1314,707	388,450	1265,070
2	663,739	56	842,525	163,765	945,945
3	869,022	100	860,913	163,179	939,785
4	1054,179	102	852,325	174,470	942,033
5	1219,210	138	827,223	169,115	954,837
6	1364,116	140	826,451	164,197	973,810
7	1488,896	143	820,442	178,833	977,660
8	1644,484	146	984,765	196,915	982,638
9	1786,837	154	953,356	201,217	962,366
10	1915,055	173	920,200	197,153	988,679
11	2028,937	176	936,242	204,990	992,810
12	2128,585	182	914,654	210,912	1016,841
13	2213,997	187	945,474	215,185	1033,434
14	2338,639	228	1148,272	251,721	1160,454
15	2456,056	231	1319,678	265,898	1140,756
16	2566,247	251	1520,121	322,009	1200,000
17	2669,212	256	1538,005	363,327	1260,439
18	2857,118	308	1886,951	194,958	566,110

Πίνακας 3.1.1: Έκταση πεδίου φθοράς και τιμές δυνάμεων για τις μετρήσεις με ταχύτητα 160m/min

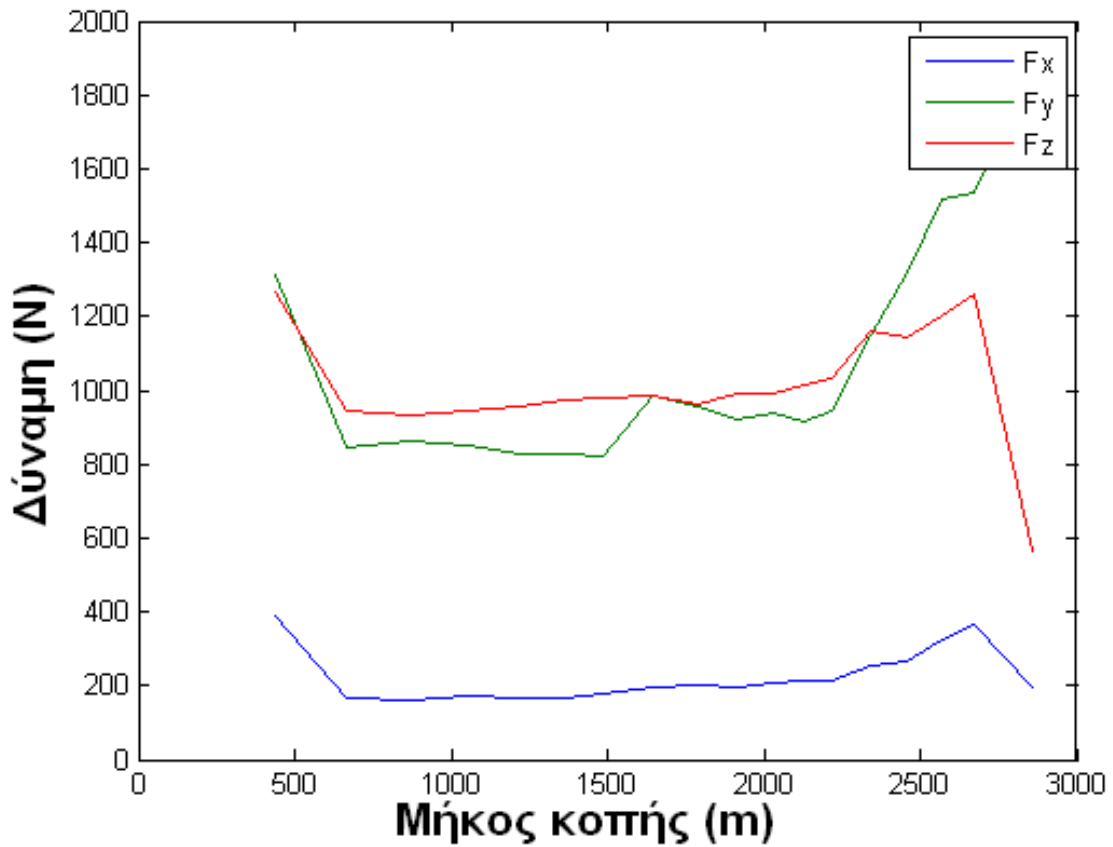


Διάγραμμα 3.1.1: Έκταση πεδίου φθοράς συναρτήσει μήκους κοπής





Διάγραμμα 3.1.2: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει φόρτας

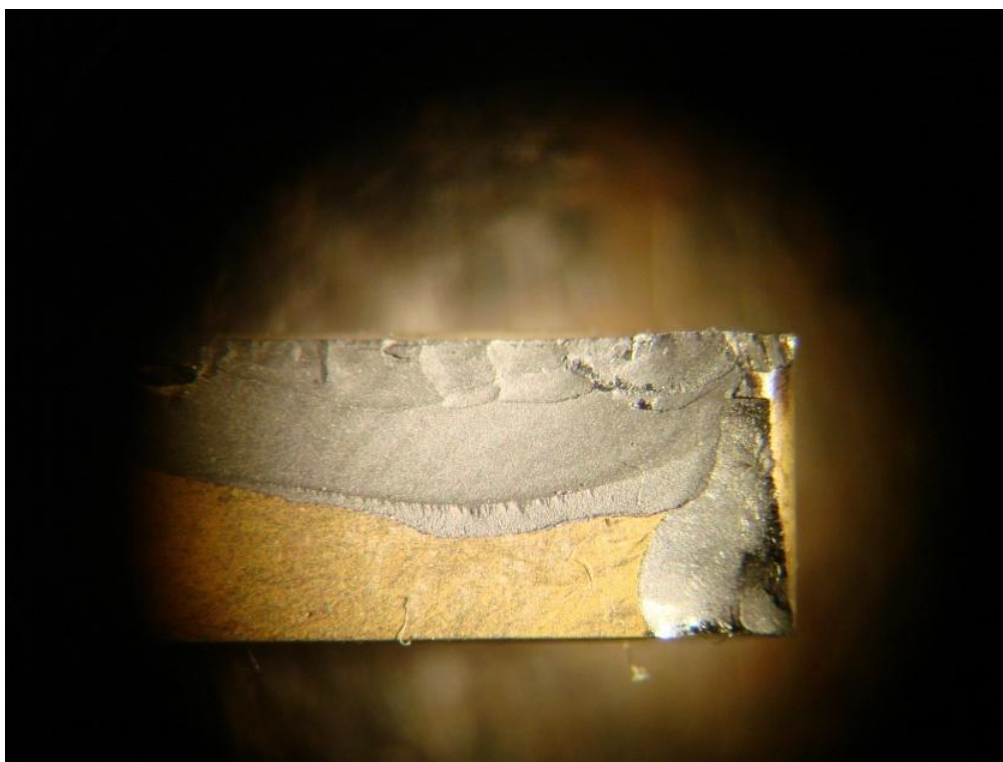


Διάγραμμα 3.1.3: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει μήκους κοπής

Στις παραπάνω φωτογραφίες βλέπουμε ότι το πεδίο φθοράς σχηματίζεται σε μία περιοχή ενδιαφέροντος κοντά στην αιχμή του εργαλείου. Η εξέλιξή του έχει την αναμενόμενη μορφή και κατά διαστήματα είναι σχεδόν γραμμική. Ακόμα βλέπουμε ότι οι δυνάμεις κοπής τείνουν να αυξηθούν με την κύρια δύναμη κοπής να αυξάνεται και αυτή σχεδόν γραμμικά παράλληλα με την επέκταση του πεδίου φθοράς.

Παρατηρούμε ότι μετά τη μέτρηση με α/α 13 έχουμε θραύση της αιχμής του εργαλείου. Ενδεχομένως εδώ έπαιξαν ρόλο άλλοι μηχανισμοί φθοράς εκτός της τριβής.

Στη φωτογραφία με α/α 14 βλέπουμε επίσης μία κάπως απότομη επέκταση του πεδίου φθοράς οπότε και αυτό ξεπερνάει τα 200μm. Από αυτό το σημείο και μετά παρατηρείται ταχύτερη άνοδος των δυνάμεων κοπής μέχρι και την τελευταία μέτρηση όπου έχουμε απότομη πτώση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εργαλείο αστόχησε καταστροφικά αμέσως στην αρχή αυτής που θα ήταν η μέτρηση με α/α 19 οπότε και αναγκαστικά διακόπηκε η λειτουργία της μηχανής. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η δευτερεύουσα ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου μετά την αστοχία. Διακρίνεται η σπασμένη αιχμή.

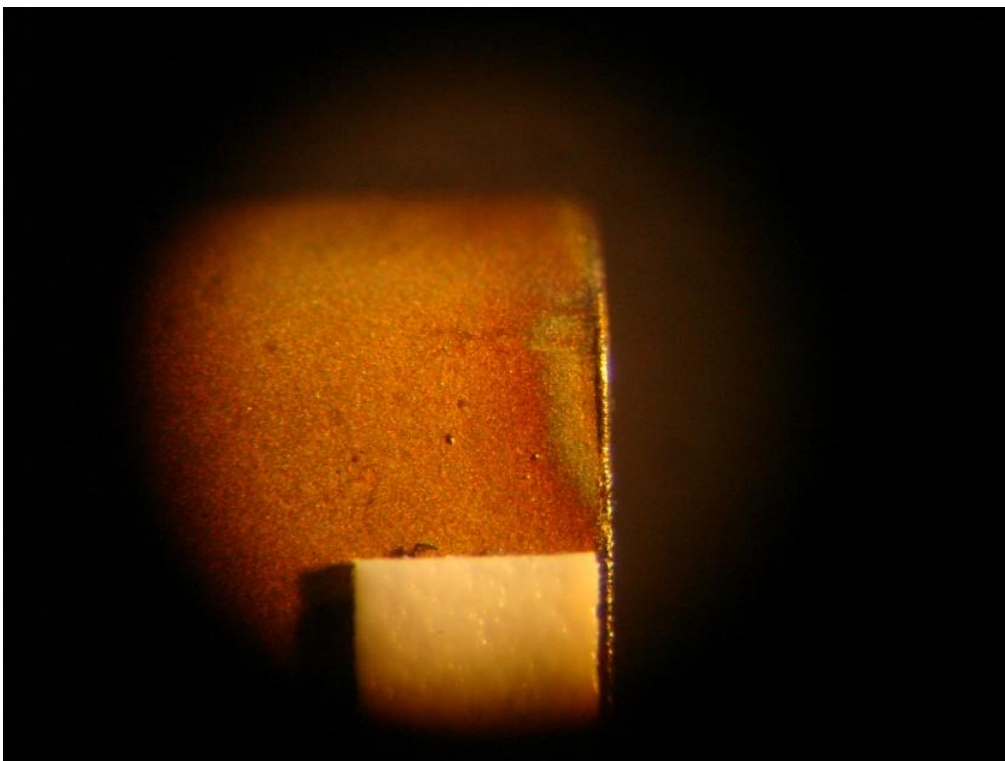


**Κατεστραμμένο εργαλείο έπειτα από τις μετρήσεις με ταχύτητα 160m/min**

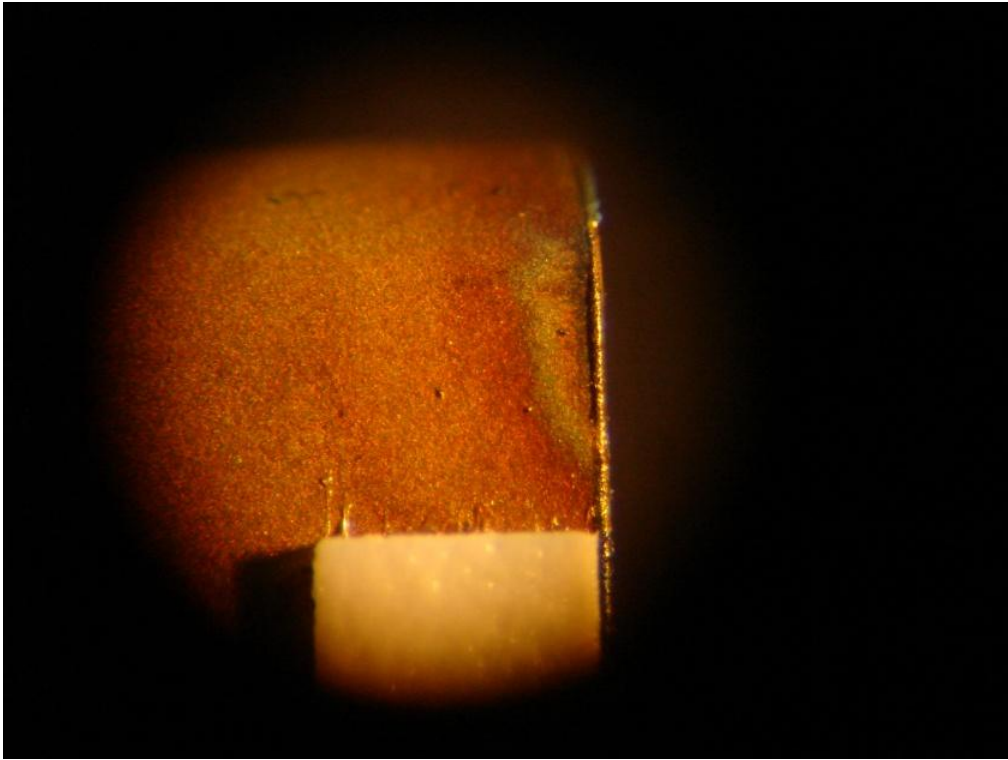
Η απέναντι κόψη του εργαλείου που φαίνεται σπασμένη στην εικόνα είναι αυτή της πλευράς που χρησιμοποιήθηκε για την ταχύτητα των 225 και είχε καταστραφεί στο τέλος των αντίστοιχων μετρήσεων· η εκτίμηση του γράφοντος είναι ότι μπορεί αυτή η προγενέστερη καταστροφική αστοχία της απέναντι κόψης να ευθύνεται για το μέγεθος και την τοποθεσία της συγκεκριμένης θραύσης.

### 3.2 Αποτελέσματα για ταχύτητα κοπής 200m/min

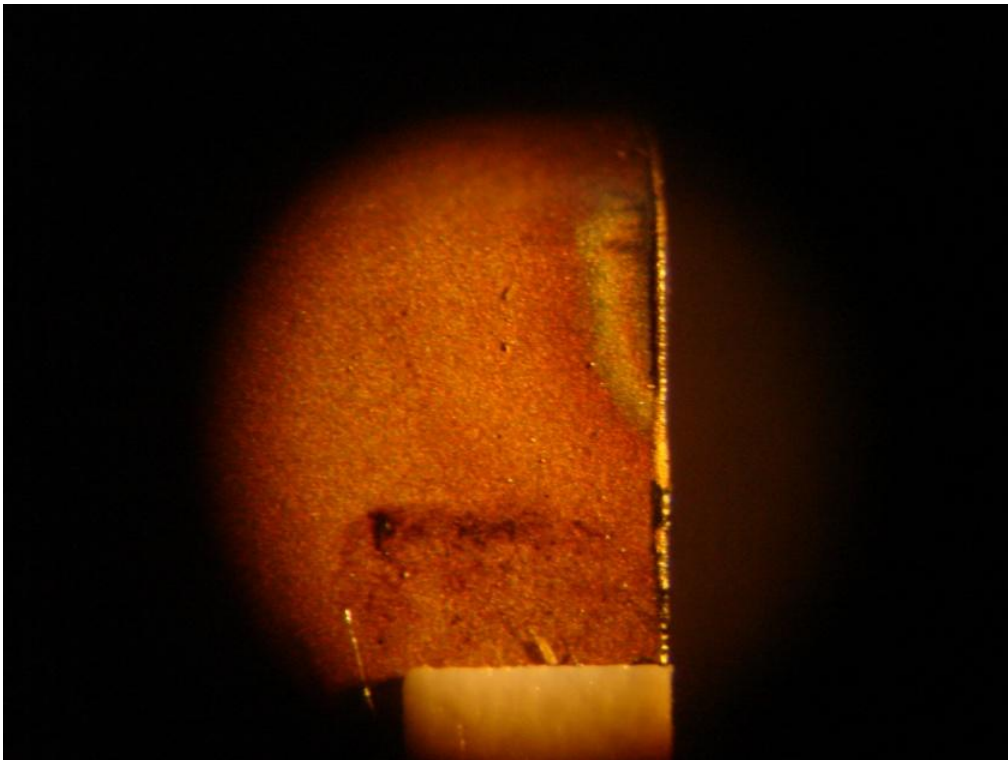
0



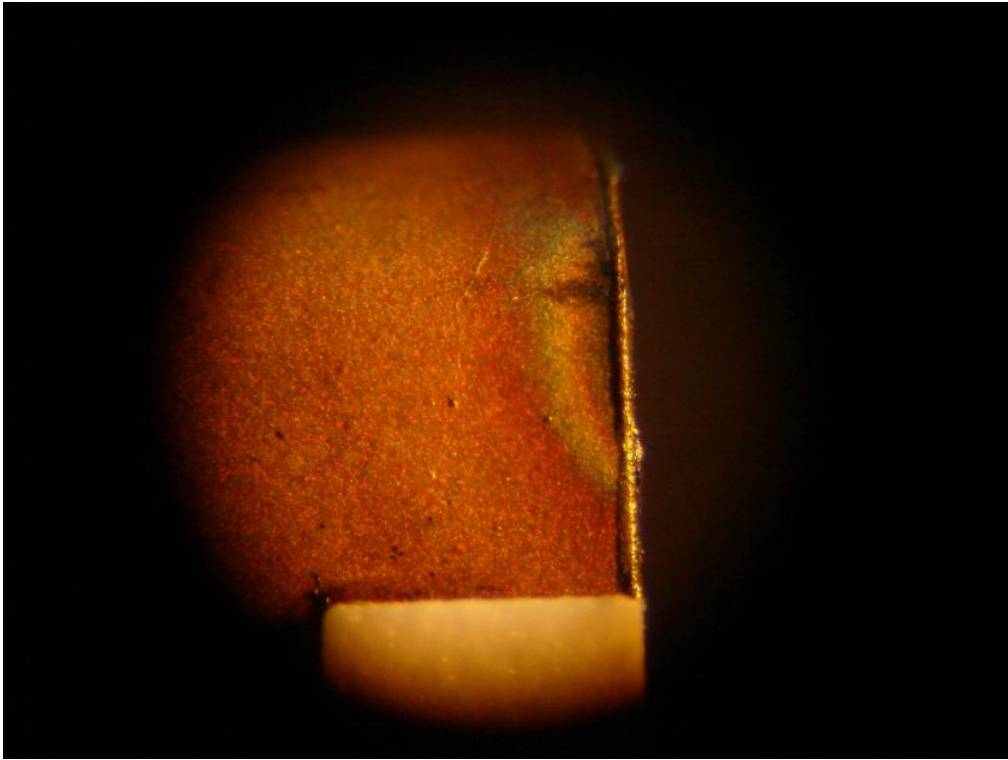
200 (3)



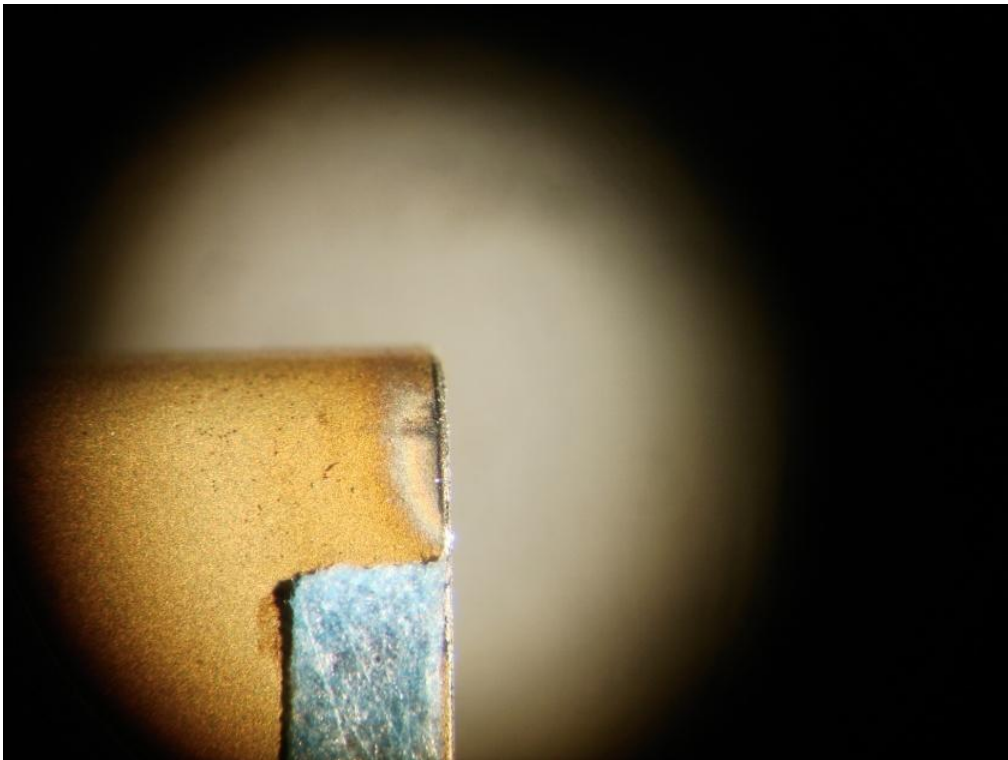
200 (6)



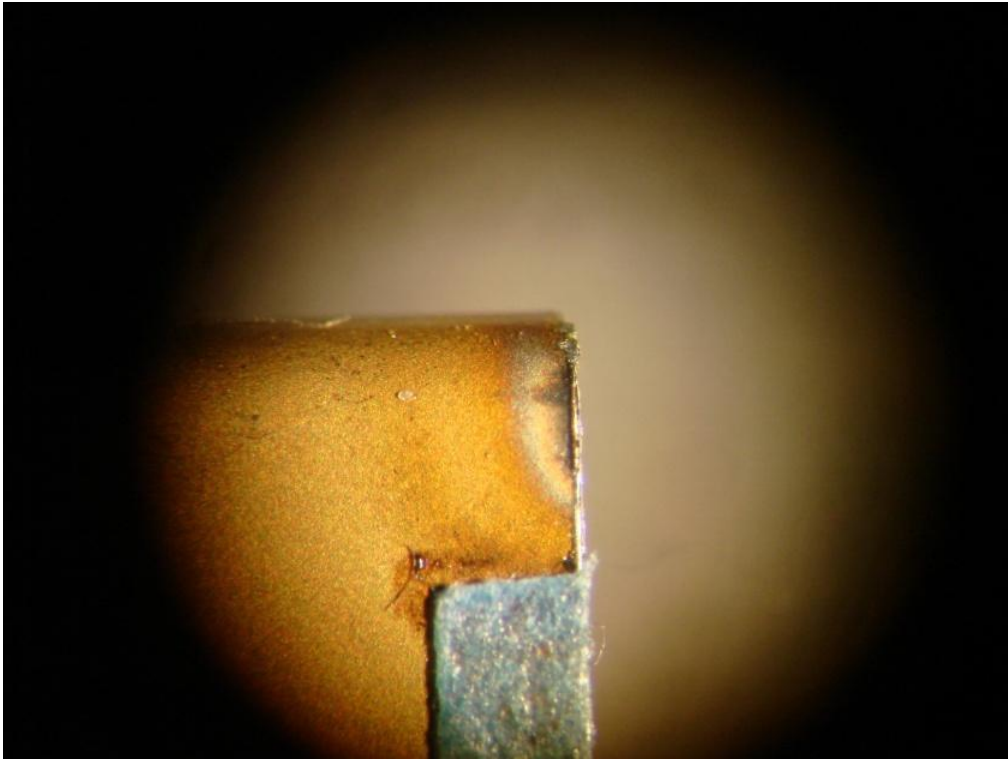
200 (8)



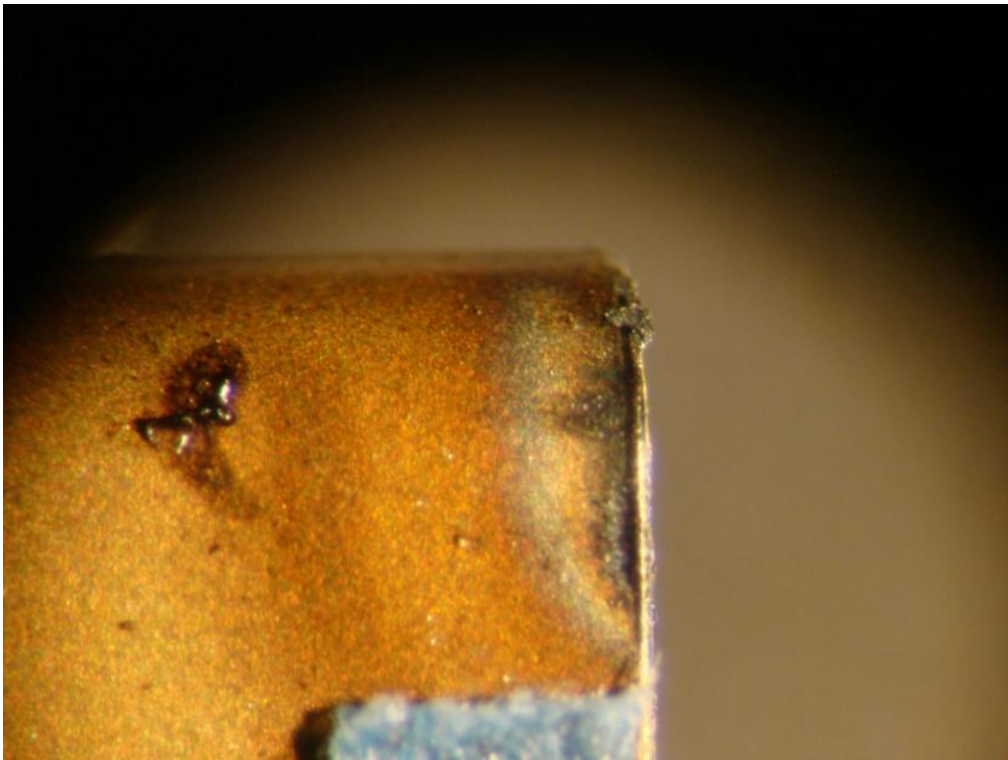
200 (10)



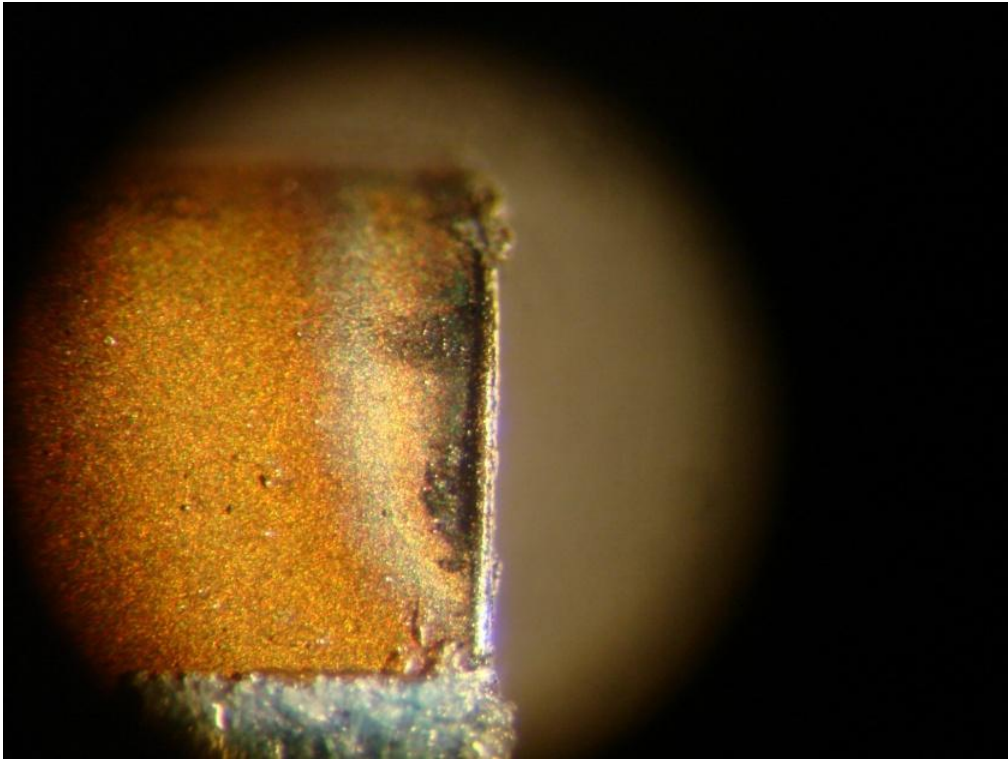
200 (11)



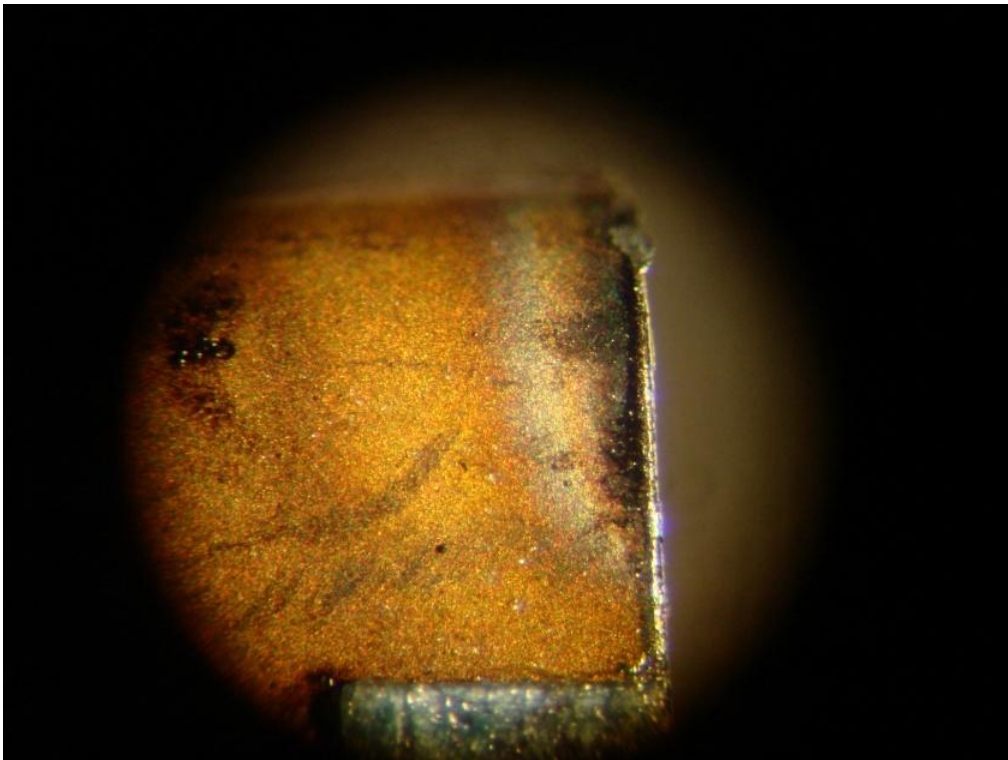
200 (13)



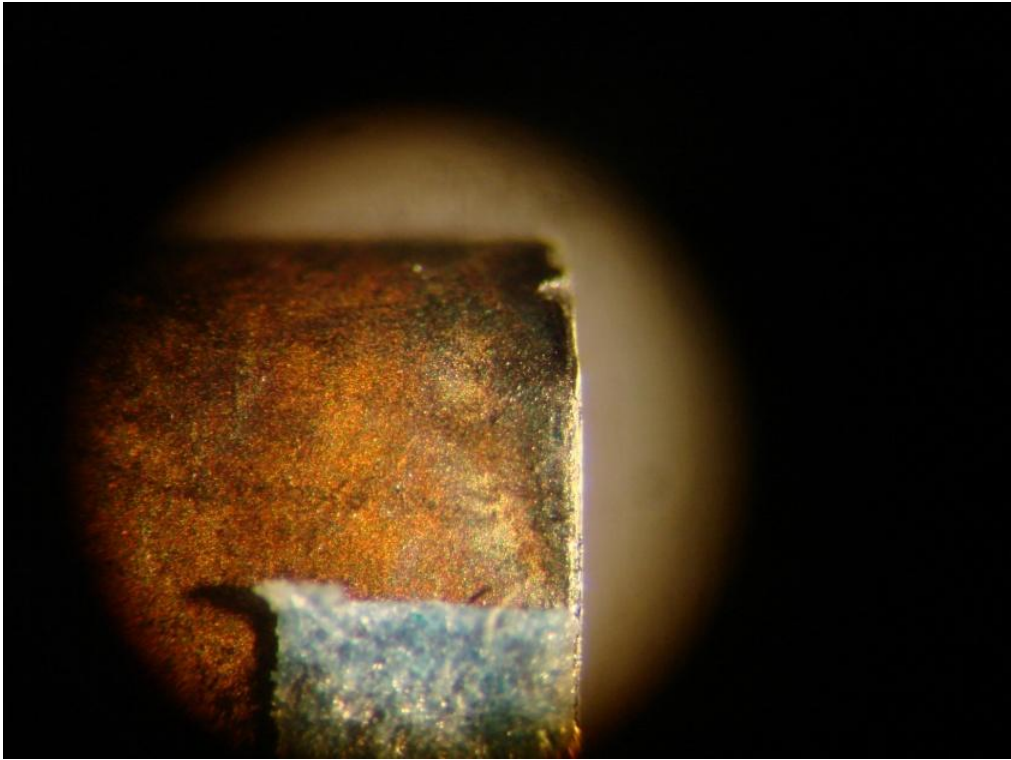
200 (15)



200 (18)



200 (20)

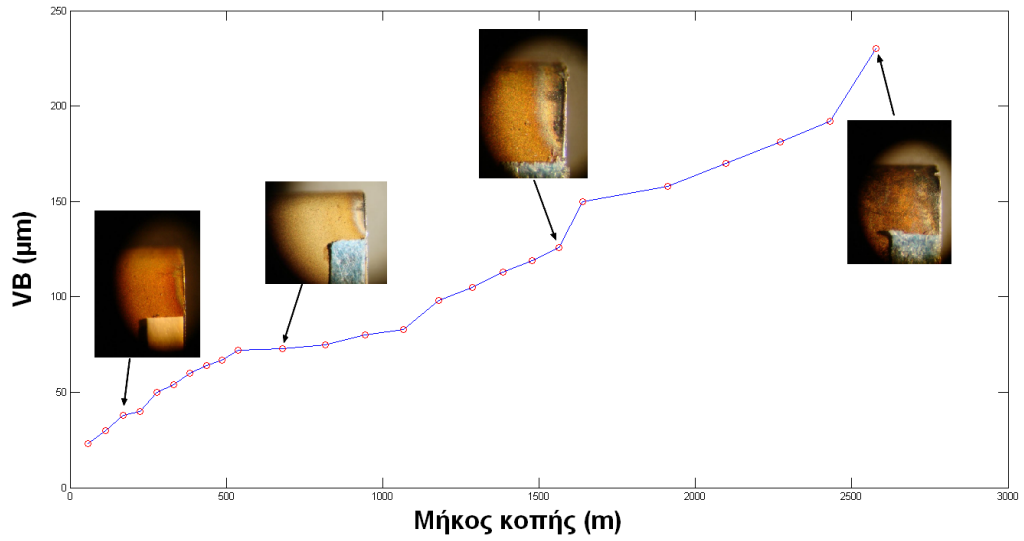


200 (25)

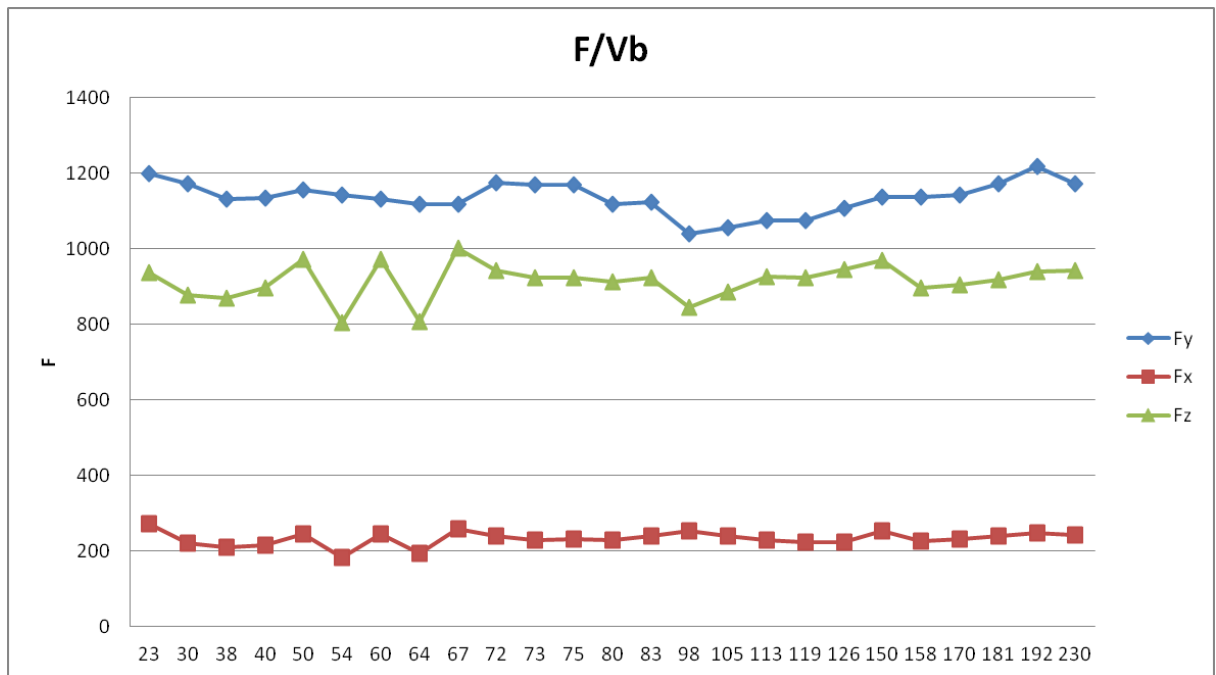


200m/min					
α/α μέτρησης	l m	Vb μm	Fy N	Fx N	Fz N
1	57,318	23	1198,642	272,072	936,900
2	113,832	30	1173,132	221,860	877,143
3	169,540	38	1132,432	209,665	869,832
4	224,443	40	1134,077	214,575	895,468
5	278,542	50	1156,816	245,944	972,401
6	331,835	54	1143,437	181,955	803,998
7	384,323	60	1131,889	245,926	972,815
8	436,006	64	1118,911	192,525	805,951
9	486,884	67	1116,968	257,946	1001,194
10	536,957	72	1174,140	239,154	942,897
11	679,930	73	1170,000	227,494	923,585
12	815,658	75	1169,187	230,629	924,627
13	944,141	80	1117,523	229,177	912,136
14	1065,379	83	1123,004	239,479	923,479
15	1179,371	98	1039,571	253,800	845,084
16	1286,118	105	1057,000	240,000	885,000
17	1385,620	113	1074,914	227,552	925,773
18	1477,877	119	1073,701	223,779	922,440
19	1562,889	126	1105,849	223,410	945,247
20	1640,655	150	1136,992	252,099	970,340
21	1911,845	158	1138,079	225,864	896,482
22	2098,769	170	1142,156	230,162	903,330
23	2271,949	181	1171,062	238,761	918,036
24	2431,384	192	1218,379	247,480	938,438
25	2577,075	230	1171,179	242,092	942,347

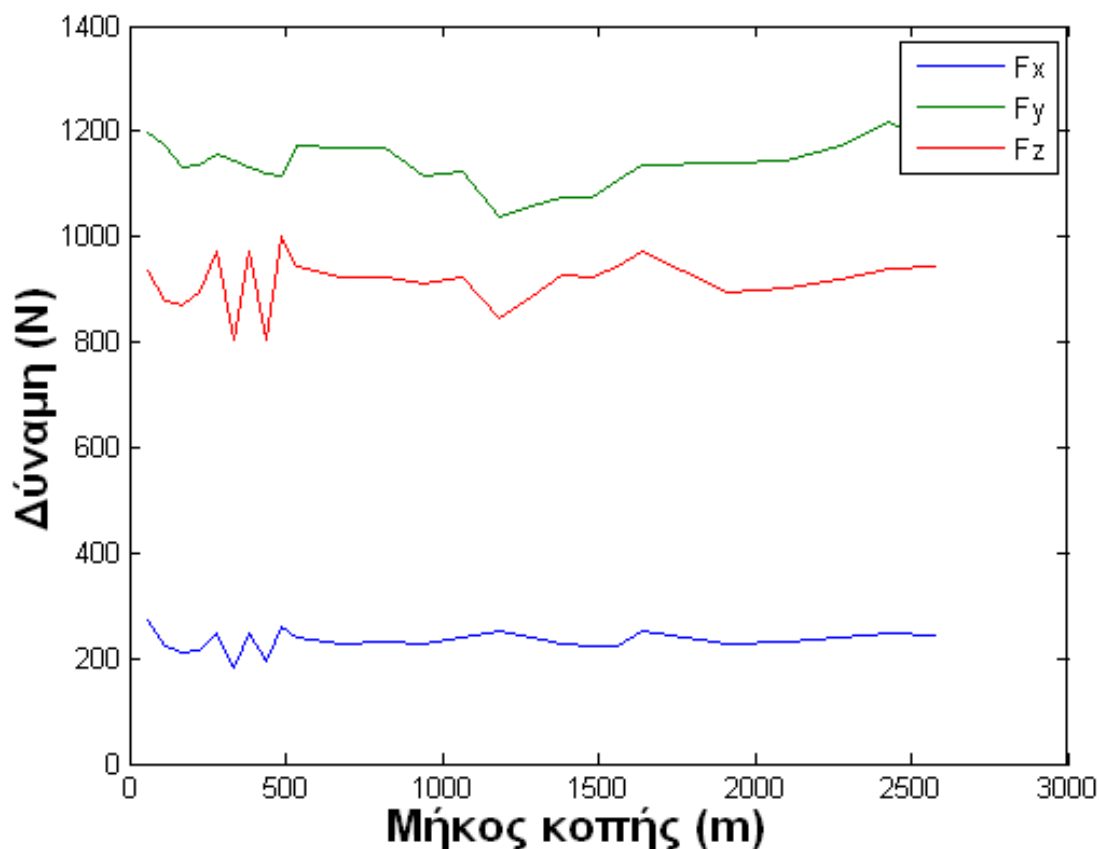
Πίνακας 3.2.1: Έκταση πεδίου φθοράς και τιμές δυνάμεων για τις μετρήσεις με ταχύτητα 200m/min



Διάγραμμα 3.2.1: Έκταση πεδίου φθοράς συναρτήσει μήκους κοπής



Διάγραμμα 3.2.2: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει φθοράς

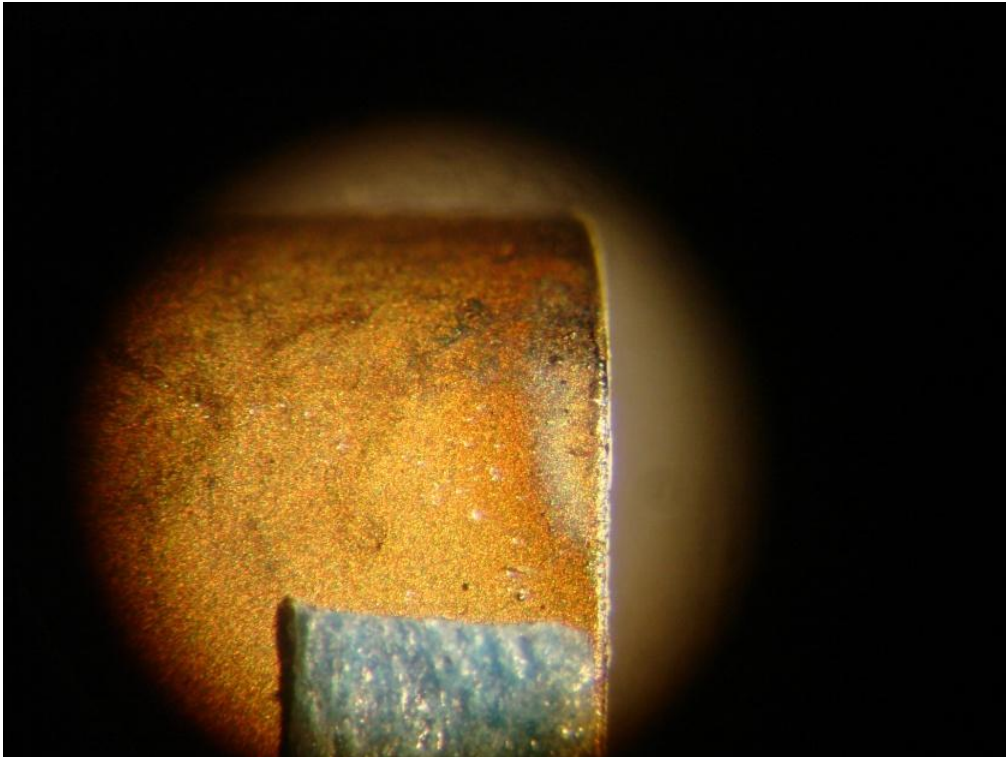


Διάγραμμα 3.2.3: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει μήκους κοπής

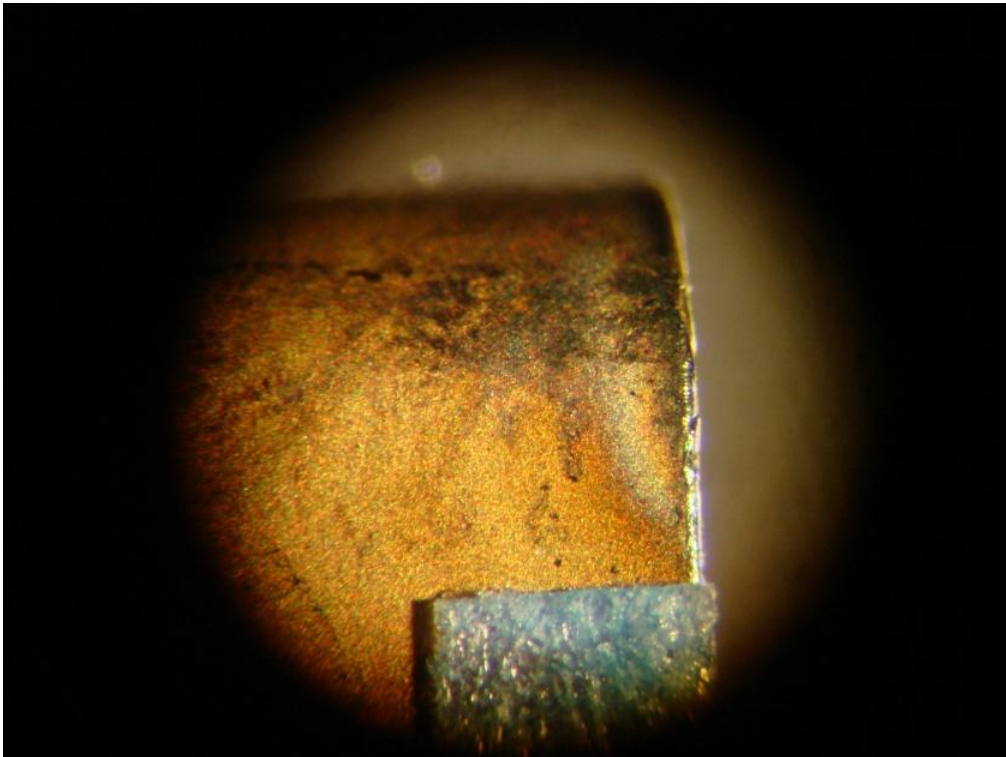
Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων επειδή σε κάποιο σημείο του πειράματος το μήκος της ράβδου που κατεργαζόμαστε ήταν μικρό και λόγω της τακτικής μέτρησης ανά αριθμό πάσων προέκυψαν τελικά περισσότερες. Επίσης σημαντικό είναι ότι οι μετρήσεις δεν σταμάτησαν λόγω αστοχίας αλλά απλώς επειδή φτάσαμε το επιθυμητό μέγεθος της φθοράς.

Εδώ πάλι παρατηρούμε σχετικά ομοιόμορφη εξέλιξη του πεδίου φθοράς. Παράλληλα είναι ευδιάκριτοι στις φωτογραφίες και άλλοι τύποι φθοράς όπως επικαθήσεις στην αιχμή και αυλακώσεις στην επιφάνεια του εργαλείου. Όμως οι δυνάμεις της κοπής δεν ακολουθούν μια προφανή αυξητική τάση ούτε ακολουθούν με σαφήνεια την επέκταση της φθοράς.

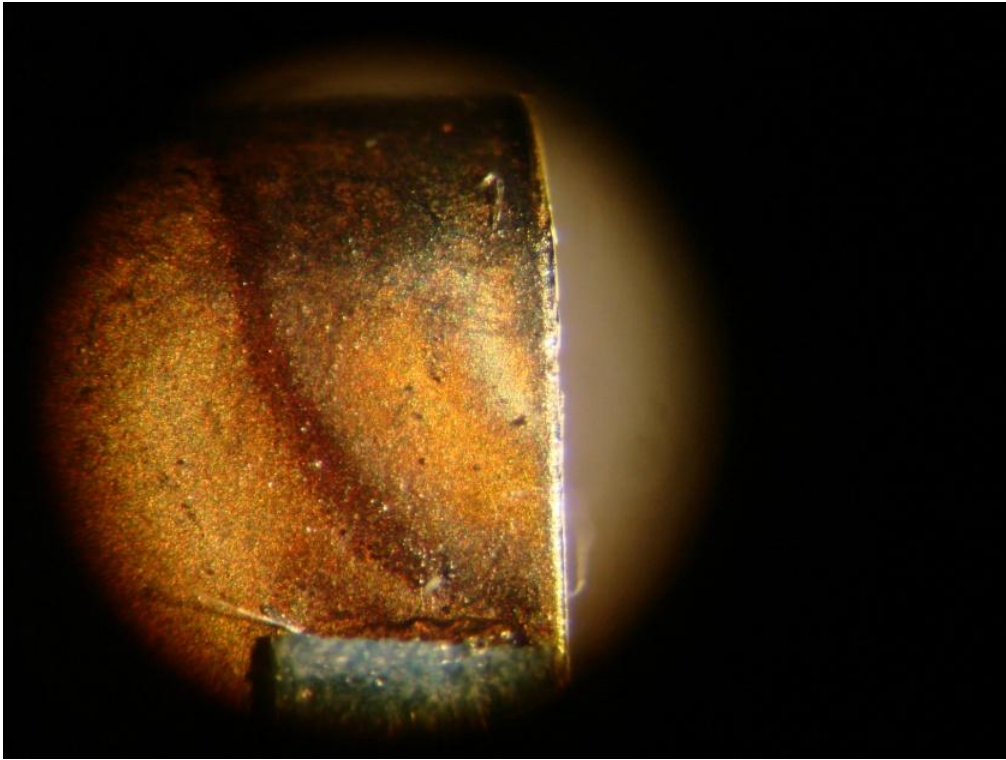
### 3.3 Αποτελέσματα για ταχύτητα κοπής 225m/min



225 (1)



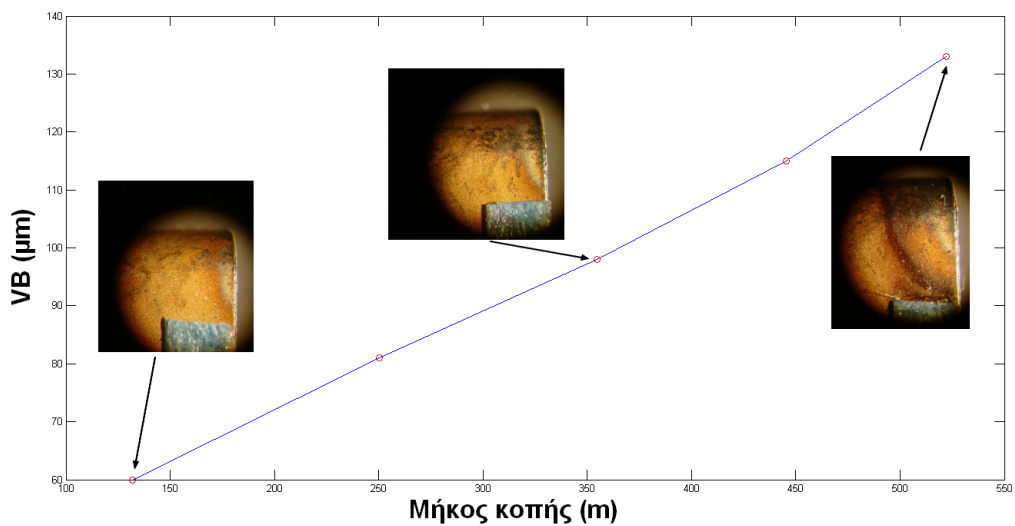
225 (3)



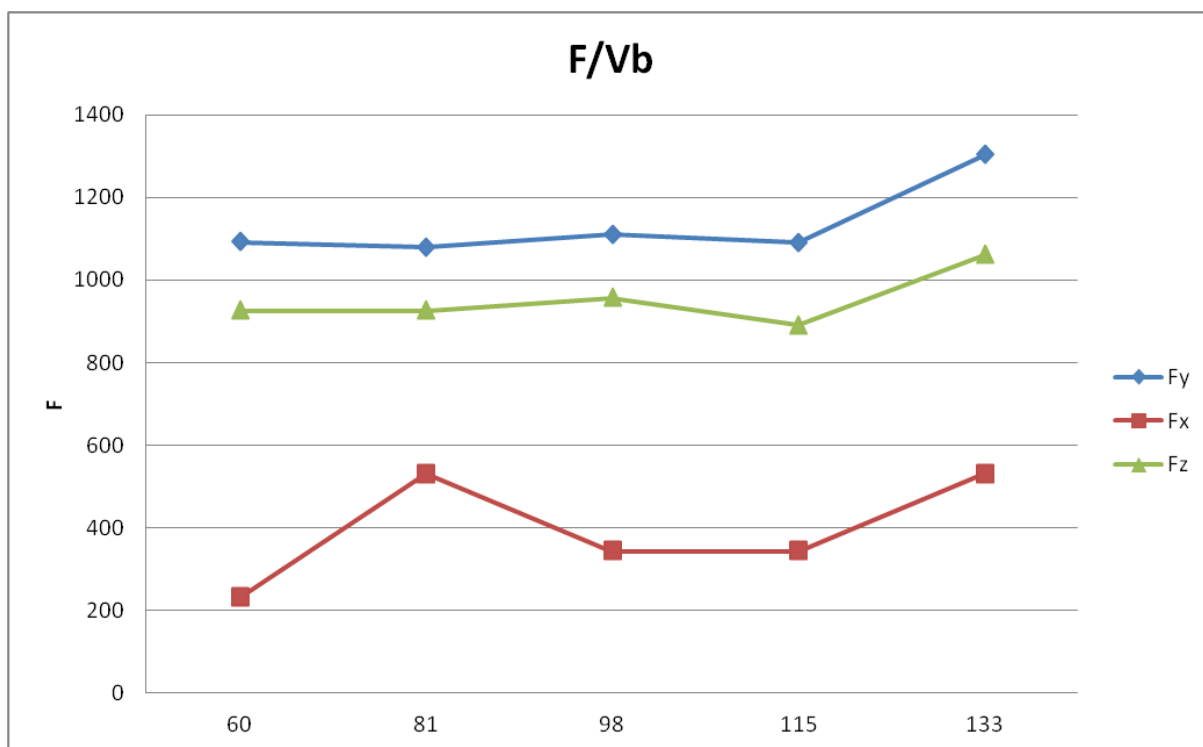
225 (5)

225m/min					
α/α μέτρησης	l m	Vb μm	Fy N	Fx N	Fz N
1	131,950	60	1091,070	230,479	925,342
2	250,150	81	1079,359	530,249	925,945
3	354,608	98	1109,285	343,104	956,089
4	445,322	115	1089,431	343,790	890,469
5	522,292	133	1302,762	530,249	1060,591

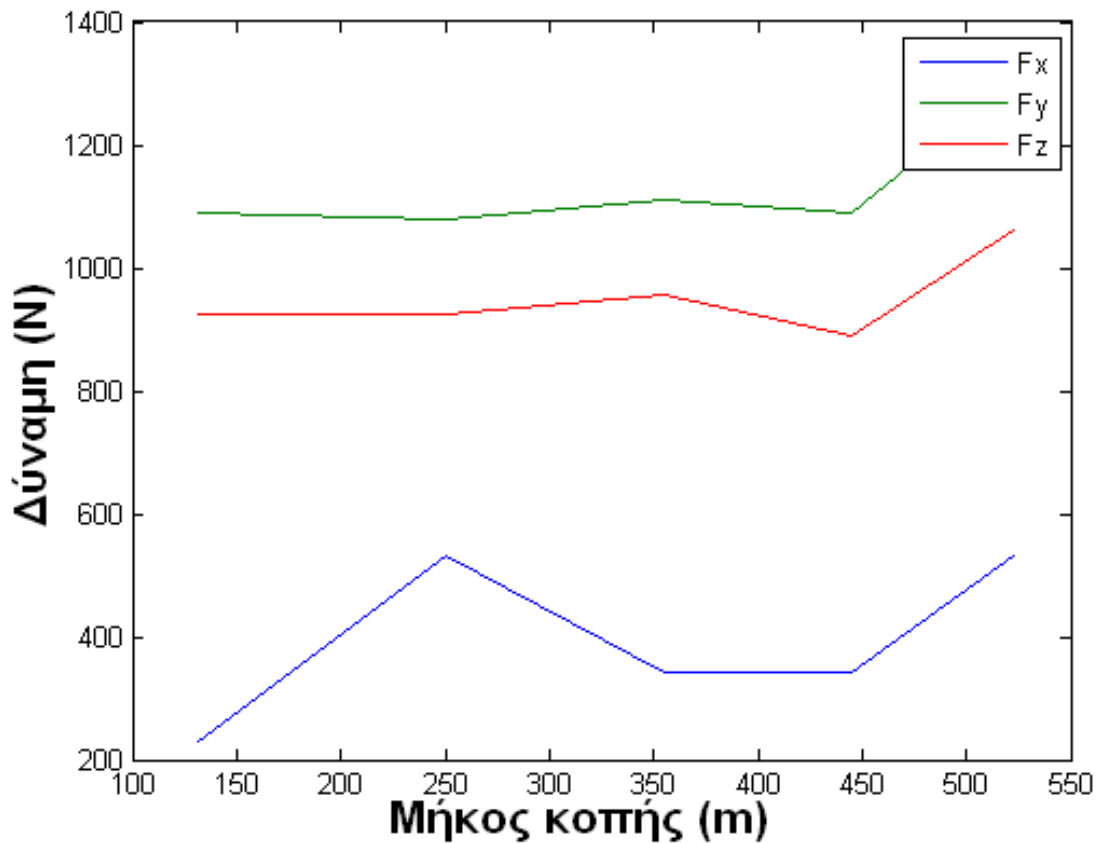
Πίνακας 3.3.1: Έκταση πεδίου φθοράς και τιμές δυνάμεων για τις μετρήσεις με ταχύτητα 225m/min



Διάγραμμα 3.3.1: Έκταση πεδίου φθοράς συναρτήσει μήκους κοπής



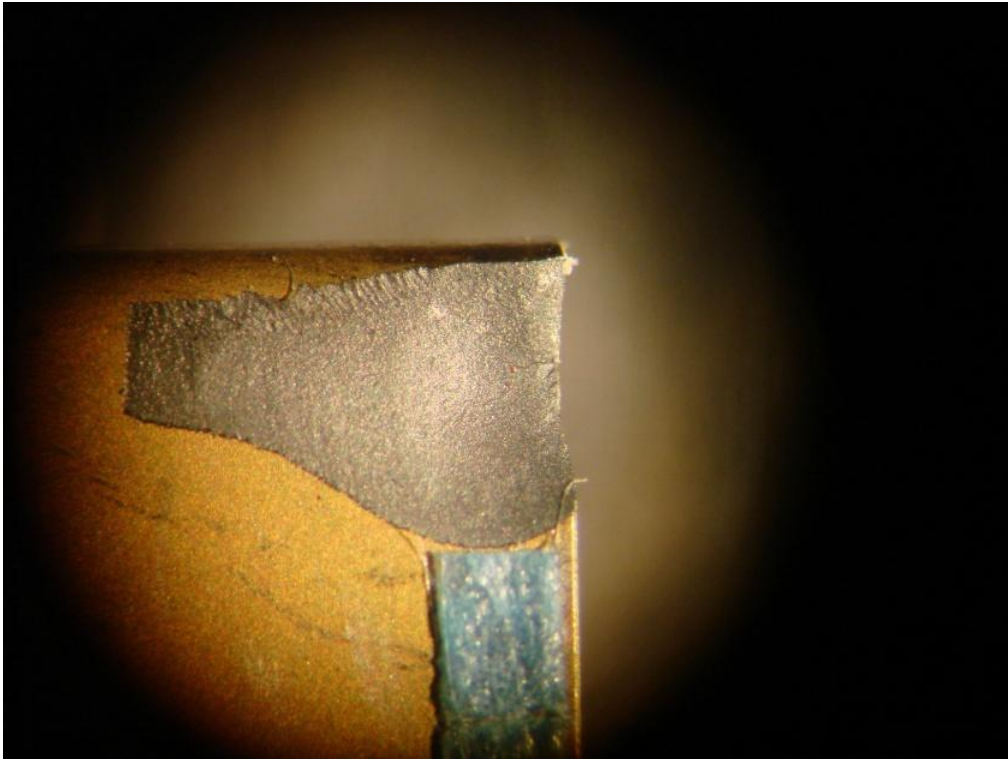
Διάγραμμα 3.3.2: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει φθοράς



Διάγραμμα 3.3.3: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει μήκους κοπής

Σε αυτήν την περίπτωση, το πεδίο φθοράς εξελίσσεται σχεδόν απολύτως γραμμικά μέχρι πριν τη στιγμή της αστοχίας. Παρόλο που οι δυνάμεις της κοπής δεν φαίνεται να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση είτε αύξησης είτε ελάττωσης, παρά μόνο μια απότομη άνοδο πριν την αστοχία, το εργαλείο αστόχησε καταστροφικά πριν ληφθεί επαρκής αριθμός μετρήσεων ώστε να μπορούμε να αποφανθούμε καταληκτικά για το πώς θα εξελίσσονταν οι δυνάμεις στη γενική περίπτωση της περεταίρω κατεργασίας με αυτήν την ταχύτητα.

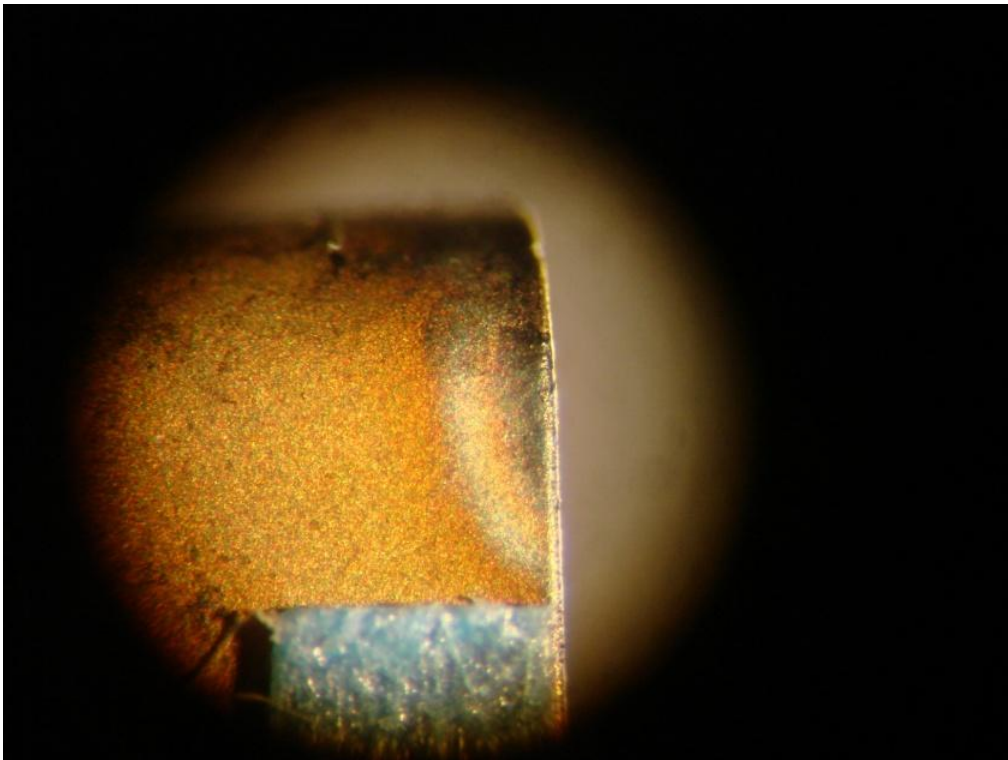
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κόψη του εργαλείου μετά την αστοχία.



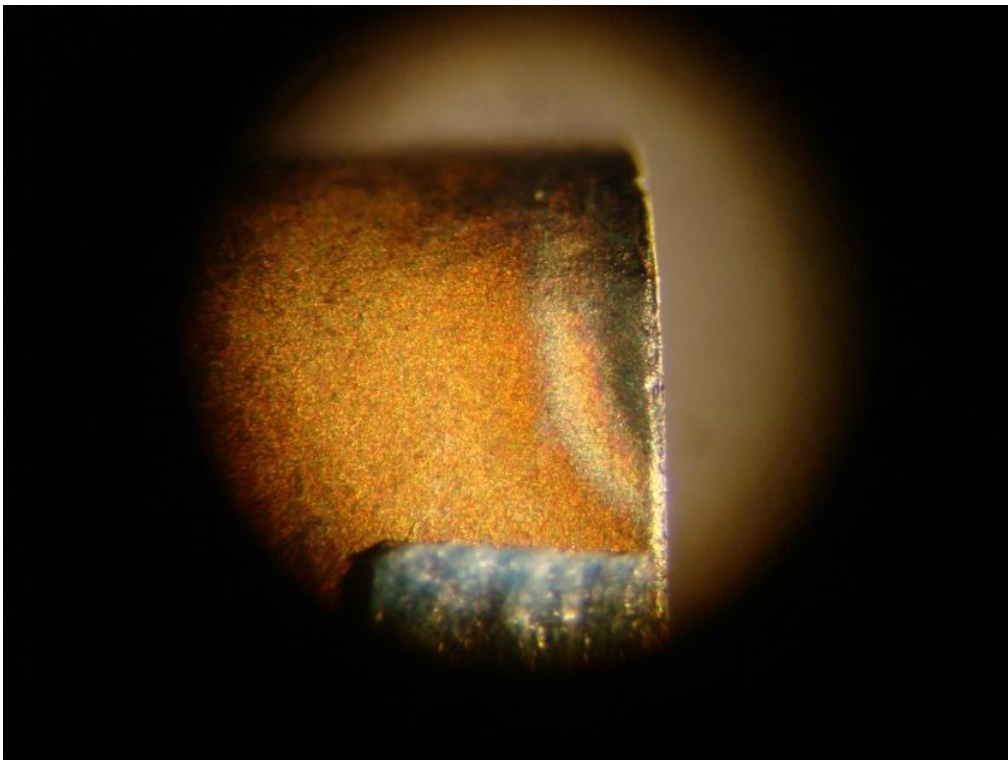
Κατεστραμμένη αιχμή εργαλείου έπειτα από τις μετρήσεις με ταχύτητα 225m/min



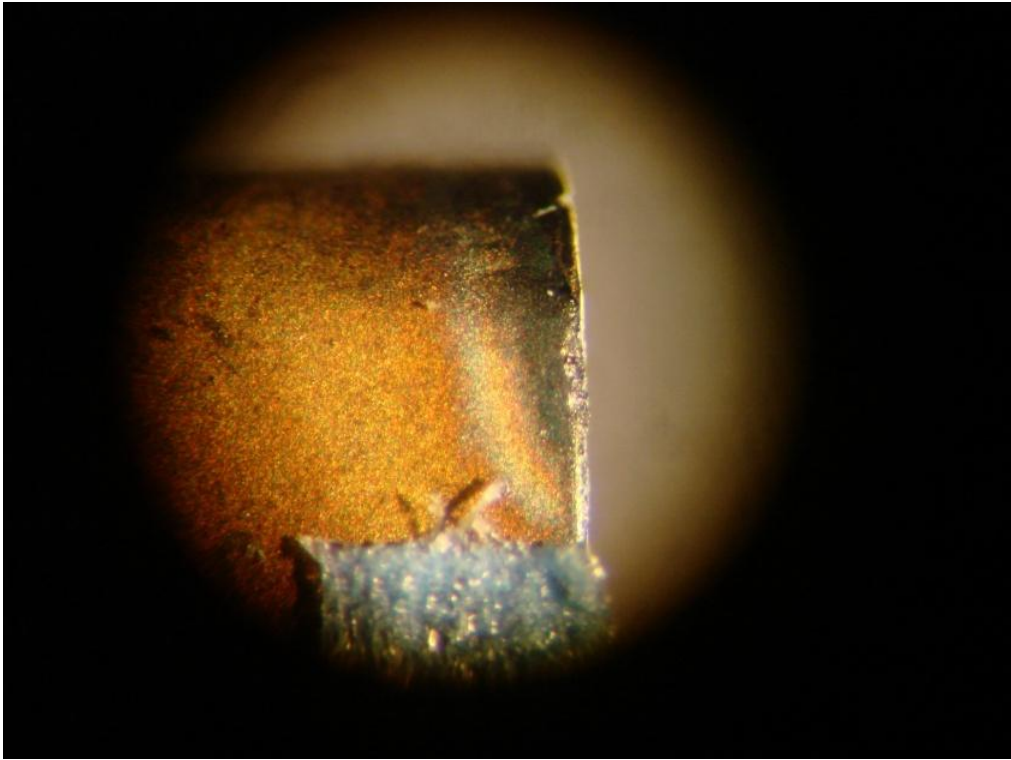
### 3.4 Αποτελέσματα για ταχύτητα κοπής 250m/min



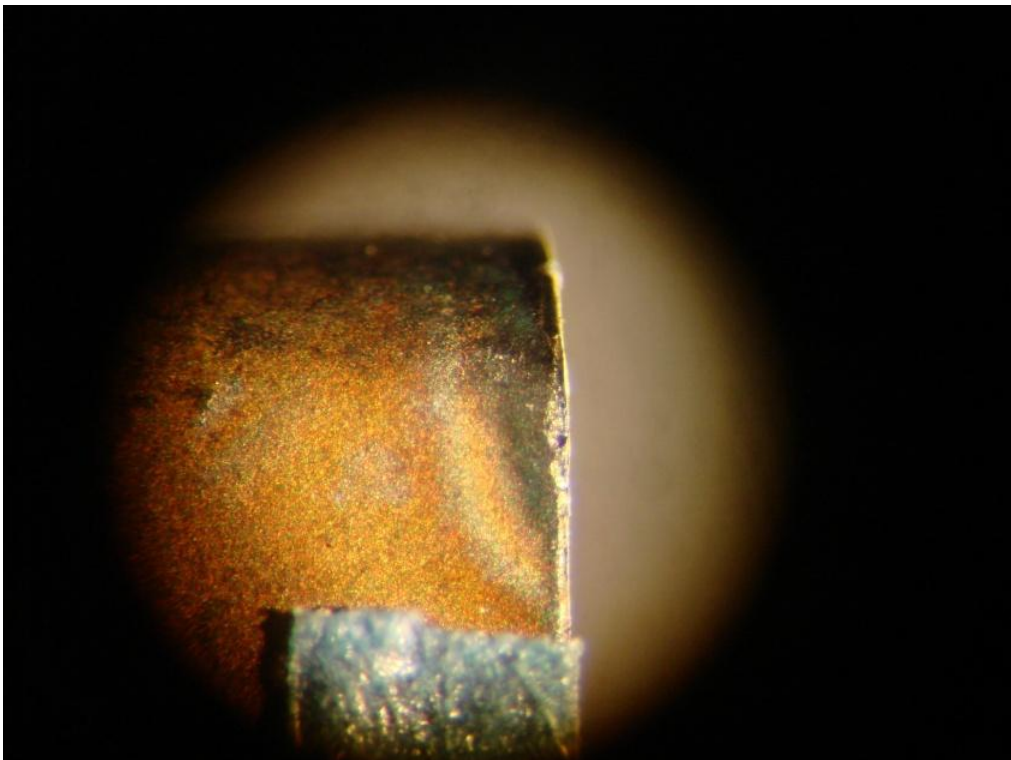
250 (1)



250 (2)



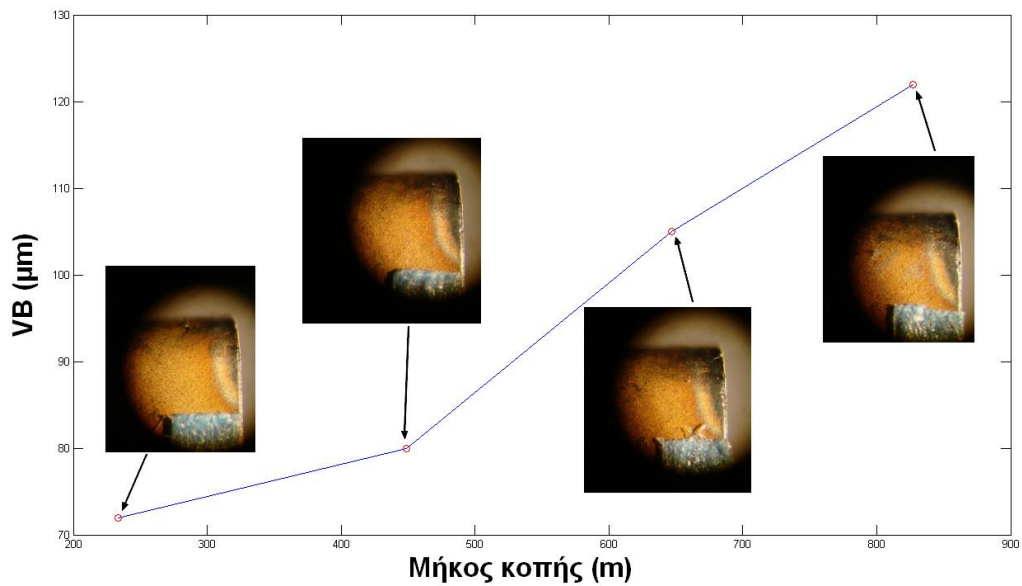
250 (3)



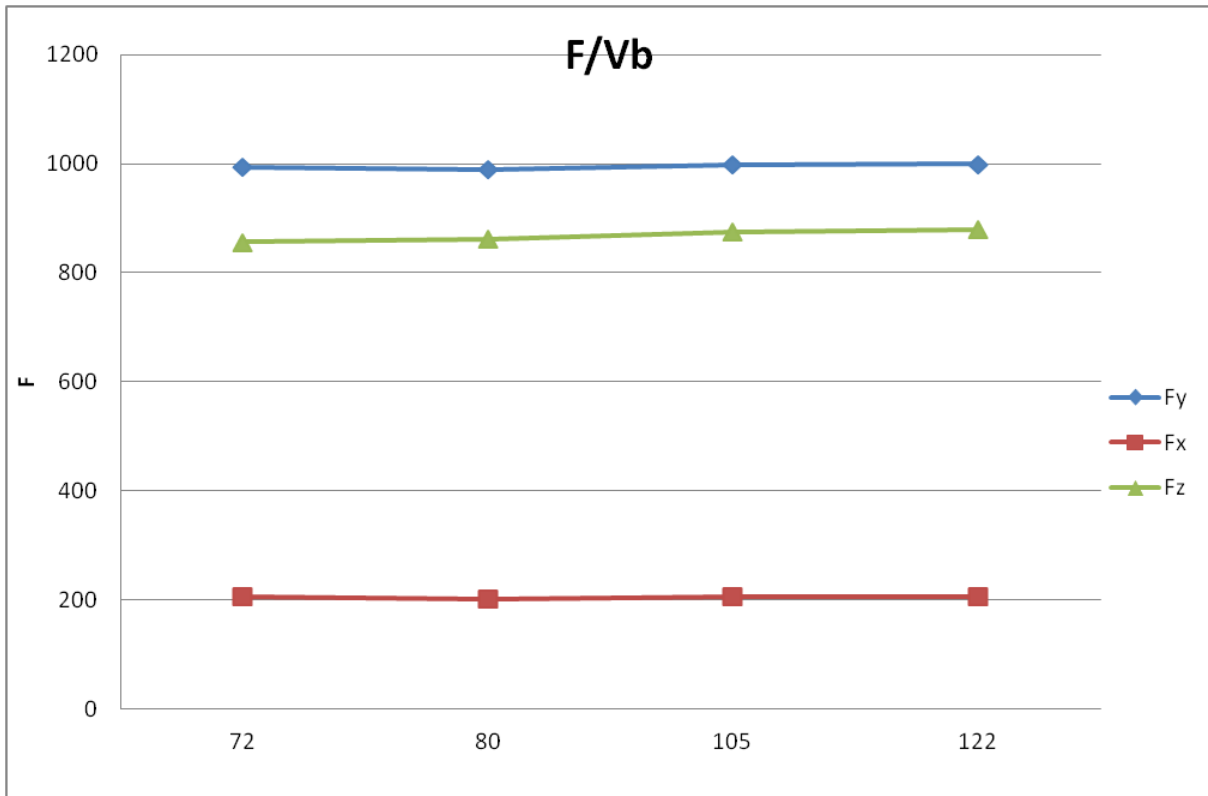
250 (4)

250m/min					
α/α μέτρησης	l m	Vb μm	Fy N	Fx N	Fz N
1	233,263	72	993,545	206,513	855,951
2	448,854	80	989,214	201,798	861,561
3	646,774	105	998,153	206,465	874,348
4	827,022	122	999,133	206,996	879,820

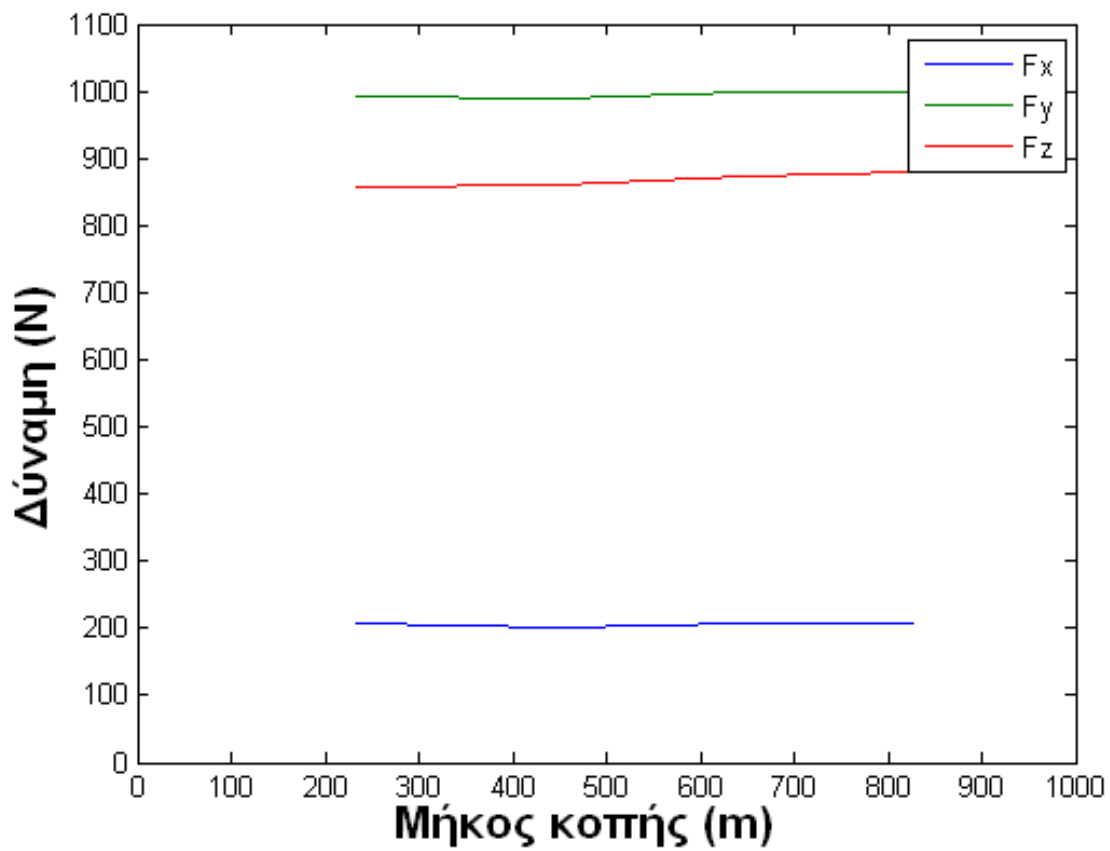
Πίνακας 3.4.1: Έκταση πεδίου φθοράς και τιμές δυνάμεων για τις μετρήσεις με ταχύτητα 250m/min



Διάγραμμα 3.4.1: Έκταση πεδίου φθοράς συναρτήσει μήκους κοπής



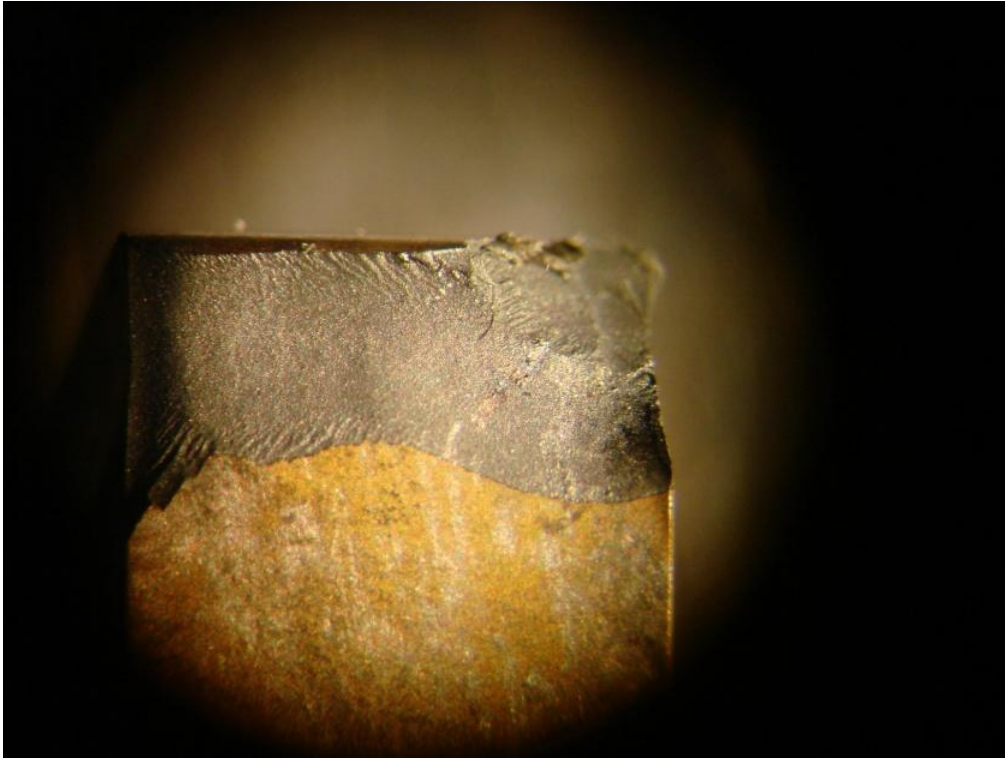
Διάγραμμα 3.4.2: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει φθοράς



Διάγραμμα 3.4.3: Δυνάμεις κοπής συναρτήσει μήκους κοπής

Και εδώ όπως και στην προηγούμενη ταχύτητα, η έκταση του πεδίου φθοράς ακολουθεί σχεδόν γραμμική ανοδική πορεία μέχρι την αστοχία. Δεν φαίνεται σοβαρή μεταβολή στις δυνάμεις κοπής.

Παρατίθεται πάλι μια φωτογραφία του εργαλείου μετά την καταστροφική αστοχία.



Κατεστραμμένο εργαλείο έπειτα από τις μετρήσεις με ταχύτητα 250m/min

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Παρατηρήσεις πάνω στα πειραματικά αποτελέσματα

Καταρχάς φαίνεται από την καταστροφική αστοχία των εργαλείων και στις δύο υψηλότερες ταχύτητες (πάνω από 200m/min) ότι η παρακολούθηση της έκτασης του πεδίου φθοράς δεν αποτελεί από μόνη της αξιόπιστο τρόπο εκτίμησης της εναπομείνουσας διάρκειας ζωής του εργαλείου. Συνιστάται ο συνυπολογισμός άλλων τύπων φθοράς και άλλων μηχανισμών των οποίων η δράση είναι εντονότερη στις μεγάλες ταχύτητες. Η εποπτική εκτίμηση του τύπου της φθοράς που κατά κύριο λόγο οδήγησε στην αστοχία του εργαλείου σε αυτές τις ταχύτητες ήταν πρακτικά αδύνατη καθώς είχε αποκοπεί μεγάλο κομμάτι της αιχμής.

Όσον αφορά στο σκοπό του πειράματος καθεαυτόν, η υπόθεση ότι μπορεί να εκτιμηθεί η έκταση του πεδίου φθοράς μέσω της μέτρησης των δυνάμεων της κοπής φαίνεται να είναι βάσιμη για μεσαίες ταχύτητες κοντά στα 160m/min όπου και παρατηρήσαμε την κύρια δύναμη κοπής να αυξάνεται παράλληλα με την επέκταση του πεδίου φθοράς. Παρόλο που αυτή η σειρά μετρήσεων σταμάτησε στην καταστροφή του εργαλείου, το πεδίο φθοράς είχε ήδη ξεπεράσει τα 300μm, τιμή που μάλλον δεν θα άγγιζε καν σε μια πρακτική εφαρμογή, αν σκεφτεί κανείς ότι σύμφωνα με τον κανονισμό ISO-3586 το πεδίο φθοράς -αν αυτό είναι ομοιόμορφο- δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει τα 300μm.

Για ταχύτητες που πλησιάζουν τα 200m/min τα πειραματικά δεδομένα δεν επαρκούν για να φτάσουμε σε ασφαλές συμπέρασμα· ίσως να χρειάζονται αισθητήρες με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα ή ευαισθησία προκειμένου να έχουμε μια πληρέστερη εικόνα της αναζητούμενης συσχέτισης πεδίου φθοράς-δυνάμεων κοπής σε τέτοιες ταχύτητες.

Οπωσδήποτε χρειάζονται περαιτέρω πειράματα και μάλιστα καλύτερα σχεδιασμένα προκειμένου να επιβεβαιωθεί καταληκτικά η υπόθεση αυτή. Το συγκεκριμένο πείραμα αλλά και η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων διεξήχθησαν υπό τεχνικούς περιορισμούς που αναμφίβολα περιόρισαν την ακρίβεια των παρατηρήσεών μας. Η γνώμη του γράφοντος είναι ότι η υπόθεσή μας αξίζει να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος και ότι τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας -αν αυτή πραγματοποιηθεί- θα οδηγήσουν σε χρήσιμες πρακτικές εφαρμογές.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Stephenson, Agapiou-*Metal cutting theory and practice*-2006
- [2] Boothroyd, Knight-*Fundamentals of machining and machine tools*-1989
- [3] Childs, Maekawa, Obikawa, Yamane-*Metal machining theory and applications*-2000
- [4] Yoram, Tsu-Ren, A.Galip-*Flank Wear Estimation Under Varying Cutting Conditions*-1991
- [5] Thamizhmanii, Hasan-*Relationship between Flank wear and Cutting Force on the Machining of Hard Martensitic Stainless Steel by Super Hard Tools*-2010
- [6] Olortegui-Tume, Kwon-*Tool wear mechanisms in machining*-2007
- [7] Segreto, Simeone, Teti- *Multiple Sensor Monitoring in Nickel Alloy Turning for Tool Wear Assessment via Sensor Fusion*-2013
- [8] Siddhpura, Paurobally- *A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process*-2015
- [9] Jianwen-Hu, Chou- *Characterizations of cutting tool flank wear-land contact*-2007

