



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ  
ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΚΑΓΚΕΛΑΡΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

## **Ευχαριστίες**

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς:

Τον καθηγητή Δημήτριο Ε. Μανωλάκο για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής και τη βοήθειά του οποιαδήποτε στιγμή τον χρειάστηκα, τόσο για αυτή την εργασία όσο και στη συνολική παρουσία μου στη σχολή.

Τους διδάκτορες Άγγελο Μαρκόπουλου και Νίκο Γαλάνη για την εποικοδομητική συνεργασία μας και την συμβολή τους στη πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας μου.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου που με βοήθησαν και συνεργάστηκαν μαζί μου όποτε τους χρειάστηκα.

Καγκελάρης Άγγελος

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στη πειραματική και αριθμητική ανάλυση περιφερειακού φρεζαρίσματος κραμάτων τιτανίου. Στο πρώτο κομμάτι γίνεται αναφορά στη θεωρία των κατεργασιών κοπής και των παραμέτρων της με εστίαση στο φρεζάρισμα. Στη συνέχεια αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του τιτανίου και οι δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την κατεργασία του. Γίνεται αναφορά στις εργαλειομηχανές CNC και της μεθόδου Taguchi που χρησιμοποιήθηκε για τον πίνακα των συνθηκών κοπής των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για τη μέτρηση των δυνάμεων. Ακολουθεί η περιγραφή του προγράμματος μοντελοποίησης κατεργασιών κοπής AdvantEdge καθώς και του στατιστικού προγράμματος Minitab. Το τελευταίο μέρος περιλαμβάνει τη σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, την στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, τη μελέτη φθοράς του κοπτικού εργαλείου και τραχύτητας τεμαχίου. Στο τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις και τη βιβλιογραφία.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	6
1. Κατεργασίες και εργαλειομηχανές.....	8
2. Κατεργασίες κοπής	
2.1 Γενικά .....	11
2.2 Προκαταρκτικές έννοιες και ορισμοί για τις κατεργασίες.....	11
2.2.1 Συνθήκες κοπής .....	14
2.2.2 Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου.....	14
2.2.3 Φθορά κοπτικού εργαλείου .....	18
2.2.4 Υγρό κοπής .....	21
2.2.5 Δυναμικά χαρακτηριστικά συστήματος.....	23
2.3 Συμπληρωματικά δεδομένα για τις κατεργασίες κοπής.....	25
2.3.1 Θερμότητα και θερμοκρασία στις κατεργασίες κοπής.....	25
2.3.2 Τραχύτητα.....	28
3. Τιτάνιο	
3.1 Γενικά .....	30
3.2 Κατεργάζοντας το τιτάνιο.....	32
3.3 Υλικά κοπτικού εργαλείου για τη κατεργασία τιτανίου .....	35
4. CNC Εργαλειομηχανές	
4.1 Γενικά .....	38
4.2 Λέγοντας στην εργαλειομηχανή τι θα κάνει.....	38
5. Φρεζάρισμα	
5.1 Γενικά .....	46
5.2 Περιφερειακό φρεζάρισμα .....	46
5.3 Μετωπικό φρεζάρισμα .....	47
5.4 Κινηματική φρεζαρίσματος.....	48
5.5 Στοιχεία και είδη φρεζών .....	49
5.6 Κοπτικά εργαλεία φρεζαρίσματος .....	50
6. AdvantEdge	
6.1 Γενικά .....	52
6.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	52

6.3 Λειτουργώντας το πρόγραμμα.....	54
6.4 Εμφάνιση αποτελεσμάτων.....	59
7. Μέθοδος Taguchi	
7.1 Γενικά .....	61
7.2 Διαδικασία σχεδιασμού πειραμάτων .....	61
7.3 Ορθογωνικοί πίνακες .....	62
8. Minitab	
8.1 Γενικά .....	64
8.2 Ανονα.....	64
8.3 Λειτουργώντας το πρόγραμμα.....	65
9. Πειραματική και υπολογιστική διαδικασία	
9.1 Γενικά .....	66
9.2 Τεμάχιο.....	66
9.3 Συνθήκες κοπής.....	69
9.4 Εργαλειομηχανή.....	70
9.5 Μετρητική διάταξη .....	71
9.6 Κοπτικό εργαλείο .....	71
9.7 Ορίζοντας τις παραμέτρους στο AdvantEdge.....	74
10. Αποτελέσματα	
10.1 Πειραματικής διάταξης.....	76
10.2 Υπολογιστικού προγράμματος AdvantEdge .....	85
11. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	90
12. Συμπληρωματικά αποτελέσματα	
12.1 Φθορά κοπτικού εργαλείου.....	93
12.2 Μέσου ύψους τραχύτητας Ra.....	95
13. Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων	
13.1 Σχετικά με τη σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δυνάμεων κοπής .....	96
13.2 Σχετικά με την στατιστική ανάλυση των πειραματικών δυνάμεων στο Minitab..	100
13.3 Σχετικά με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου .....	101
13.4 Σχετικά με το μέσο ύψος τραχύτητας Ra.....	101
14. Συμπεράσματα .....	102
15. Επίλογος.....	104
16. Βιβλιογραφία.....	105

## Πρόλογος

Η κατεργασία είναι από τις σημαντικότερες διαδικασίες στη ζωή ενός προϊόντος και κατά πολύς επηρεάζει την ποιότητα και, κατά συνέπεια, την τελική αξία και χρησιμότητα του. Με τη πάροδο των χρόνων απέκτησε όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον η ερευνά για τη κατεργασία 'εξωτικών μετάλλων' που ανταποκρίνονται καλύτερα στη κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών της βιομηχανίας [13].

Ένα από αυτά τα μέταλλα είναι και το τιτάνιο. Τα κράματα τιτανίου έχουν πλέον ευρεία εφαρμογή στην αεροναυπηγική, αεροδιαστημική και σε πολλούς άλλους κλάδους λόγω των σπουδαίων μηχανικών ιδιοτήτων τους, της αντοχής τους στη θερμότητα και της αντίστασής τους στη διάβρωση [14].

Ωστόσο, θεωρείται πολύ δύσκολο κατεργάσιμο υλικό και αυτό εξ' αιτίας της υψηλής φθοράς του κοπτικού εργαλείου από τις υψηλές θερμοκρασίες κοπής. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται λόγω της μεγάλης τριβής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου σαν αποτέλεσμα της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του τιτανίου [24]. Συνεπώς γίνεται εύκολα κατανοητό το πόσο ενδιαφέρουσα είναι η μελέτη των παραμέτρων της κατεργασίας του τιτανίου και της σύγκρισής τους με τα αποτελέσματα από τα διάφορα προγράμματα μοντελοποίησης τα όποια καθίστανται όλο και πιο διαδεδομένα.

Οι νέες CNC εργαλειομηχανές και η διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία κοπτικών εργαλείων έχουν βοηθήσει στην εξέλιξη της κατεργασίας του τιτανίου. Παρόλα αυτά, τα υπολογιστικά προγράμματα μοντελοποίησης αποτελούν βασικό εργαλείο για τη μελέτη των κατεργασιών μετάλλων με ιδιομορφίες όπως είναι το τιτάνιο. Γι αυτό είναι σημαντική η μελέτη των παραμέτρων αυτής της κατεργασίας και πιο συγκεκριμένα η μορφή των δυνάμεων που παρουσιάζονται σε μια σειρά δοκιμών σε σύγκριση με τα υπολογιστικά προγράμματα καθώς και η φθορά του κοπτικού εργαλείου που αναπτύσσεται ως συνισταμένη όλων των παραπάνω.

Αυτό είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, η οποία, βασιζόμενη στο πειραματικό μέρος περιφερειακού φρεζαρίσματος τιτανίου, χωρίζεται σε 7 βασικά σκέλη:

1. Αναφορά στις βασικές αρχές των κατεργασιών κοπής κάτι που κρίνεται απαραίτητο ούτως ώστε να κατανοήσουμε επακριβώς τις παραμέτρους που αντιμετωπίσαμε και αναλύσαμε από το πείραμα μας.
2. Ανάλυση των χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων και των εφαρμογών του τιτανίου όσο και της συμπεριφοράς του κατά την κατεργασία του.
3. Περιγραφή και επεξήγηση της πειραματικής διαδικασίας και των μεθόδων

που χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστεί αυτή και καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων (δυνάμεις, φθορά εργαλείου, τραχύτητα επιφάνειας).

4. Στατιστική ανάλυση για εγκυρότητα των μετρήσεων με το στατιστικό πρόγραμμα Minitab.
5. Ανάλυση των πειραματικών δεδομένων με το πρόγραμμα μοντελοποίησης AdvantEdge.
6. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων του προγράμματος μοντελοποίησης, καθώς και μελέτη φθοράς κοπτικού εργαλείου και τραχύτητας τεμαχίου.
7. Εξαγωγή συμπερασμάτων.

## **1. Κατεργασίες και εργαλειομηχανές**

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του ανθρώπου και η προσπάθεια κάλυψής τους με την αξιοποίηση και εκμετάλλευση του μετάλλου, σε συνδυασμό φυσικά και με την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας, έχουν οδηγήσει στον σχεδιασμό και την παράγωγή μεγάλου εύρους μηχανών για όλο το φάσμα των κατεργασιών.

Με τον όρο εργαλειομηχανές αναφερόμαστε στις μηχανές εκείνες μέσω των οποίων ο άνθρωπος είναι ικανός να παράγει προϊόντα. Κατά κανόνα οι εργαλειομηχανές, σταθερές στη θέση λειτουργιάς τους, επεξεργάζονται και αξιοποιούν κυρίως το μέταλλο. Αποδίδουν στο παραγόμενο προϊόν την επιθυμητή μορφή και μέγεθος, είτε με διαμόρφωση(χύτευση, εξαναγκασμένη μορφοποίηση κλπ) είτε με αφαίρεση του πλεονάζοντος υλικού.

Ιδιαίτερη θέση στις σύγχρονες εργαλειομηχανές έχουν οι εργαλειομηχανές CNC. Οι εργαλειομηχανές αυτές λειτουργούν μέσω αριθμητικού ελέγχου. Για κάθε κατεργασία η εργαλειομηχανή προγραμματίζεται μέσω εντολών, από τη κονσόλα της και είναι χαρακτηριστικό ότι οι μηχανές αυτές, σε αντίθεση με τις συμβατικές, δεν έχουν σχεδόν καθόλου μοχλούς χειρισμού, χειροτροχούς κλπ., γιατί όλα γίνονται προγραμματισμένα και αυτόματα(εικόνα 1.1).

Όσο πιο καθορισμένες και ελεγχόμενες είναι οι κινήσεις της εργαλειομηχανής στο σύστημα 'μηχανή-εργαλείο-τεμάχιο', τόσο περισσότερο αποδίδουν στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας ένα προϊόν με απόλυτα ορισμένη μορφή και διαστάσεις.



*Εικόνα 1.1  
Εργαλειομηχανή CNC*

Λόγω του μεγάλου πλήθους τόσο των μεθόδων παραγωγής αλλά και των εργαλειομηχανών που χρησιμοποιούνται στη παραγωγική διαδικασία ενός προϊόντος



καθίσταται δύσκολη η κατάταξη και η κατηγοριοποίησή τους. Στο σχήμα 1.1 επιχειρούμε μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των μεθόδων παράγωγης και των εργαλειομηχανών τους [6] όπου έχουμε:

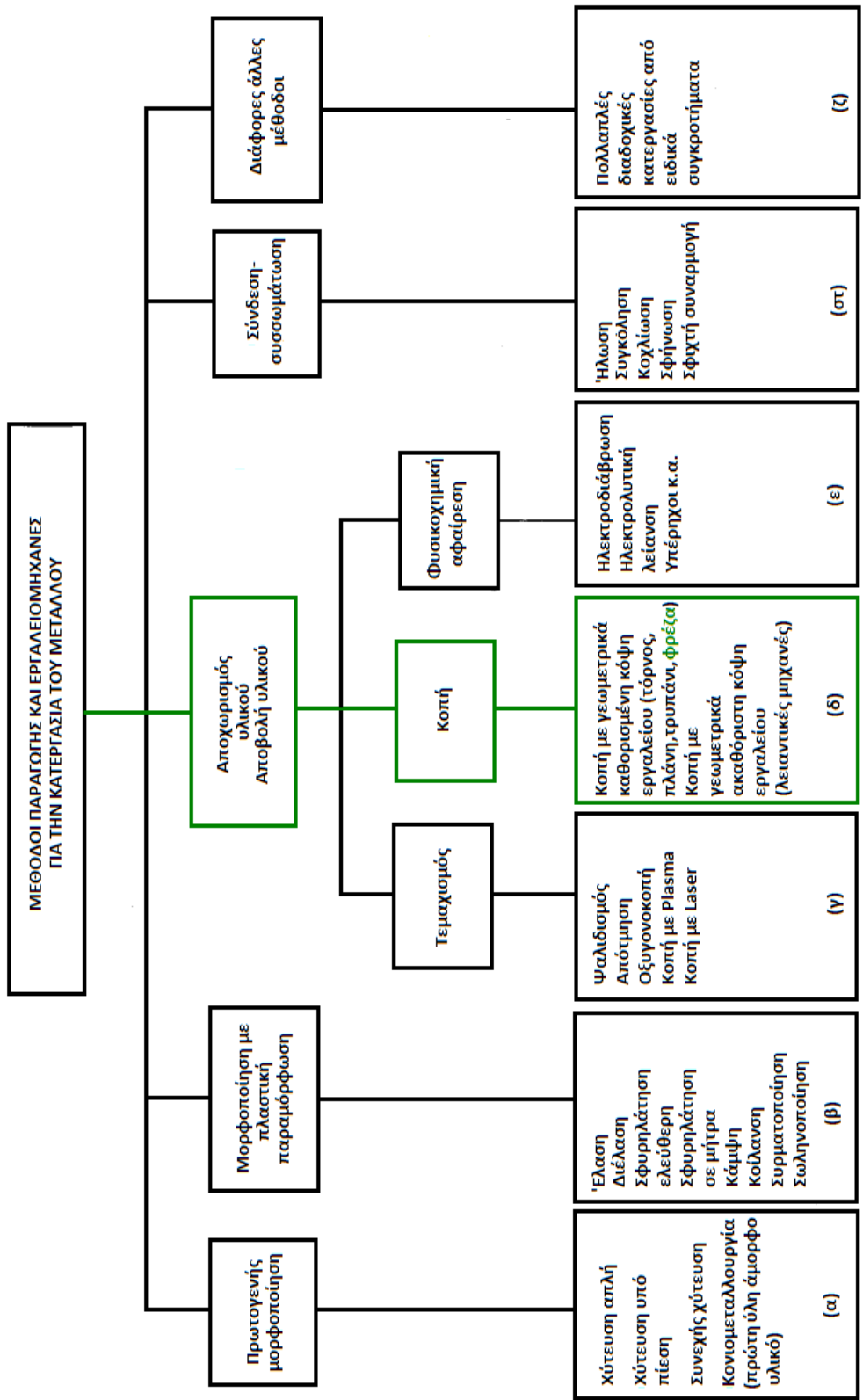
Πρωτογενής μορφοποίηση: Περιλαμβάνει διάφορα είδη χυτεύσεων και κονιομεταλλουργία που οδηγούν σε παραγωγή από ένα άμορφο υλικό ενός ημικαταργασμένου ή τελειωμένου προϊόντος.

Πλαστική παραμόρφωση: Περιλαμβάνει πολλά είδη κατεργασιών όπως φαίνεται και στον πίνακα. Συντελείται σε ημικαταργεσμένα υλικά εν ψυχρώ ή σε κατάσταση πυρακτώσεως.

Αφαίρεση υλικού: Χωρίζεται σε 3 μεγάλες κατηγορίες. Τον τεμαχισμό που αφορά τη κατεργασία της πρώτης ύλης και το χωρισμό της σε μικρότερα κομμάτια χωρίς το σχηματισμό αποβλήτων. Την κοπή, που αφορά και την παρούσα διπλωματική και θα αναπτυχτεί περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο, και περιλαμβάνει βαθμιαία αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο μέχρις ότου αυτό πάρει τις σχεδιαστικές του προδιαγραφές. Περιλαμβάνει, τέλος, και τη φυσικοχημική αφαίρεση από το αρχικό τεμάχιο με στόχο την καθορισμένη μορφή.

Σύνδεση: Η ένωση 2 ή περισσότερων κομματιών και περιλαμβάνει την ήλωση, τη συγκόλληση, τη κοχλίωση, τη σφήνωση και τη σφιχτή συναρμογή.

Άλλες μέθοδοι: Περιλαμβάνει πολλές διαδοχικές κατεργασίες από συγκροτήματα πολλαπλών μηχανών



Σχήμα 1.1  
Κατεργασίες και εργαλείομηχανές

## **2. Κατεργασίες κοπής**

### **2.1 Γενικά**

Με τις κατεργασίες κοπής ως μεθόδου παράγωγης μεταλλικών προϊόντων , αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλήτων(γρέζια) σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλλουν κατά περίπτωση κατεργασίας.

Έτσι, με τις κατεργασίες κοπής προσδίδουμε στο κατεργαζόμενο τεμάχιο την επιθυμητή (προδιαγεγραμμένη) μορφή, τις επιθυμητές διαστάσεις μέσα σε επιτρεπόμενα όρια ανοχών και ακόμη την απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών του τεμαχίου, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά τη χρήση του, για την οποία προορίζεται.

Εξετάζοντας το μέλλον και τις εξελίξεις στο συγκεκριμένο τομέα, και με δεδομένο ότι η κοπή αφαιρεί υλικό το οποίο ήδη έχει κοστίσει αρκετά χρήματα και μετατρέπεται σε μορφή αποβλήτου που είναι παρά πολύ δύσκολο να ανακυκλωθεί, στόχος είναι η μείωση του κόστους της παραγωγής αλλά και των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων κατά την χρησιμοποίηση της τεχνικής της κοπής.

Τα βασικά είδη κατεργασιών κοπής φαίνονται στο σχήμα 1.1. Καθε ένα είδος, έχει και τις δικές του υποκατηγορίες. Η παρούσα διπλωματική θα ασχοληθεί με το φρεζάρισμα, συνεπώς θα υπάρξει αναλυτική περιγραφή όλων των κατηγοριών του.

### **2.2 Προκαταρκτικές έννοιες και ορισμοί για τις κατεργασίες κοπής**

#### **Ορθογωνική Κοπή**

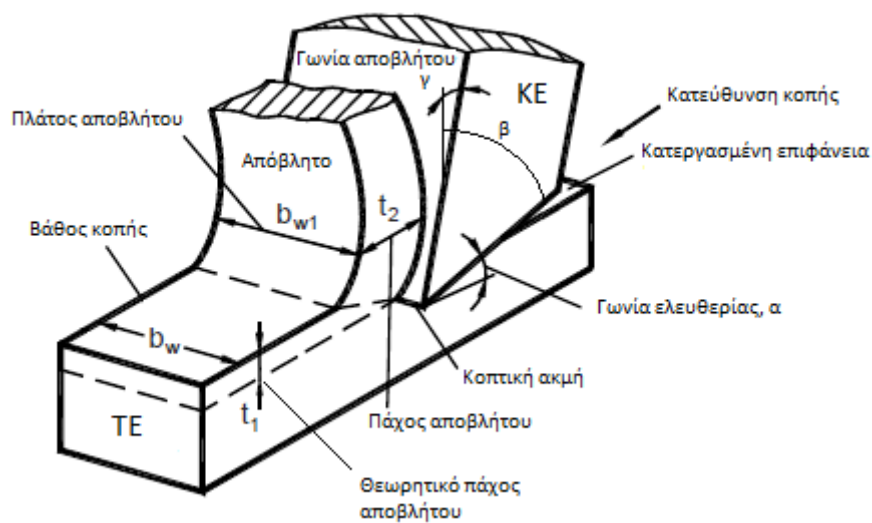
Κατά την ορθογωνική κοπή το κοπτικό εργαλείο έχει μορφή σφήνας, η κόψη του είναι ευθεία, έχει πλάτος μεγαλύτερο από το πλάτος του κομματιού και είναι κάθετη προς τη διεύθυνση κοπής ( διεύθυνση της σχετικής κίνησης εργαλείου και κομματιού) ώστε η σχηματιζόμενη μετά τη κοπή επιφάνεια του τεμαχίου να προκύψει επίπεδη και παράλληλη προς δεδομένο επίπεδο αναφοράς. Το κοπτικό εργαλείο (ή το κομμάτι) εξαναγκάζεται να κινηθεί σχετικά προς το κομμάτι (ή το εργαλείο) έτσι, ώστε ένα επιφανειακό στρώμα του κομματιού(το μέγεθος του στρώματος αυτού εξαρτάται από τη περίπτωση κοπής) να αφαιρείται σε μορφή αποβλήτου. Παραδείγματα ορθογωνικής κοπής στο σχήμα 2.1.

### Λοξή κοπή

Τη συναντάμε κατά κύριο λόγο στην πράξη, τόσο για τις κατεργασίες με εργαλείο με μία κύρια κόψη (π.χ. τórνευση κ.ά.), όσο και για κατεργασίες με εργαλείο πολλών κύριων κόψεων(π.χ. φρεζάρισμα , αυλάκωση κ.λπ.). Κατά τη λοξή κοπή η κόψη του εργαλείου κλίνει ως προς την κάθετο στη διεύθυνση κοπής κατά μια γωνία  $i$ , την οποία καλούμε γωνία λοξότητας της κόψης.

### Μορφολογία κατεργασιών κοπής

Το κοπτικό εργαλείο της ορθογωνιακής κοπής (σχ. 2.1) έχει τις εξής γωνίες:



Σχήμα 2.1

Ορθογωνική κοπή και τα χαρακτηριστικά της μεγέθη

1. Τη γωνία αποβλήτου  $\gamma$ , που σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια αποβλήτου (επιφάνεια, επάνω στην οποία κινείται το απόβλητο) και στην κάθετο προς τη διεύθυνση κοπής. Η γωνία αυτή έχει μεγάλη σημασία στη κοπή των μετάλλων, γιατί παίρνει μέρος στο σχηματισμό του αποβλήτου. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.
2. Τη γωνία ελευθερίας  $\alpha$ , η οποία σχηματίζεται μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του εργαλείου (είναι η επιφάνεια του εργαλείου, που κείται προς το μέρος της κατεργασμένης επιφάνειας του κομματιού) και της διεύθυνσης κοπής. Η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου δεν παίρνει μέρος στο σχηματισμό του αποβλήτου, η γωνία ελευθερίας όμως επηρεάζει τη φθορά του εργαλείου.
3. Τη γωνία σφήνας  $\beta$ , την οποία σχηματίζουν η επιφάνεια αποβλήτου με ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου. Μεταξύ των τριών αυτών γωνιών, που τις ονομάζουμε γωνίες κοπής ισχύει, όπως είναι φανερό, η σχέση:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ}$$

Το πάχος  $t_1$  του στρώματος του μετάλλου που αφαιρείται με τη βοήθεια του εργαλείου είναι γνωστό ως θεωρητικό πάχος αποβλήτου, ενώ το πάχος  $t_2$  που αποκτά το απόβλητο μετά τη κοπή ονομάζεται πραγματικό πάχος αποβλήτου.

Οι κατεργασίες κοπής ως σύστημα

Αναλύοντας τις κατεργασίες κοπής ως σύστημα [10], δηλαδή ως συνδυασμός διαφόρων μονάδων ή χαρακτηριστικών συνιστωσών κατά τρόπο τέτοιο ώστε να απαρτίζουν ένα οργανικό σύνολο, παρουσιάζουμε τις παρακάτω βασικές ενότητες:

- ❖ Συνθήκες κοπής.
- ❖ Γεωμετρική μορφή και υλικό κοπτικού εργαλείου.
- ❖ Κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- ❖ Υγρό κοπής.
- ❖ Δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος εργαλειομηχανής-εργαλείου-τεμαχίου.

### 2.2.1 Συνθήκες κοπής

Αποτελούνται από 3 βασικά μεγέθη:

1. Βάθος κοπής, **a**: Είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο τεμάχιο. Μετράται σε mm.
2. Ταχύτητα κοπής, **υ**: Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της κόψης του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την πρωτεύουσα κίνηση. Συνήθως μετράται σε m/min (σπανιότερα σε m/s).
3. Πρόωση, **s**: Είναι η σχετική κίνηση μεταξύ κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου που προσφέρει με σταθερό ρυθμό στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή. Μετράται σε mm/rev ή mm/ενεργό διαδρομή και κατά τη κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης.

Επίσης έχουμε και την ταχύτητα πρόωσης, **υ<sub>v</sub>** όπου είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της κόψης του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης. Μεταξύ των μεγεθών **s** και **υ<sub>v</sub>** ισχύει η σχέση

$$υ_v = s \cdot n$$

όπου: **n** είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου.

### 2.2.2 Χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου

Όπως είναι λογικό, ο ρόλος που παίζει το κοπτικό εργαλείο σε μια κατεργασία είναι πάρα πολύ σημαντικός και κατ'επέκταση η σωστή επιλογή κοπτικού εργαλείου είναι από τα σημαντικότερα βήματα για μια κατεργασία. Οι προκλήσεις που δημιουργούνται από τις ιδιότητες του τεμαχίου και οι δυνατότητες του κοπτικού εργαλείου πρέπει να συμβαδίσουν. Ουσιαστικά 2 είναι οι παράγοντες τους οποίους εξετάζουμε έτσι ώστε να γίνει η καταλληλότερη επιλογή [13]:

1. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπου, ανάλογα με το είδος του κοπτικού εργαλείου φρεζαρίσματος, αναφέρονται στις διάφορες γωνίες

του εργαλείου μετρούμενες ως προς τους αντίστοιχους άξονες. Θα αναφερθούμε εκτενώς στο πειραματικό μέρος στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.

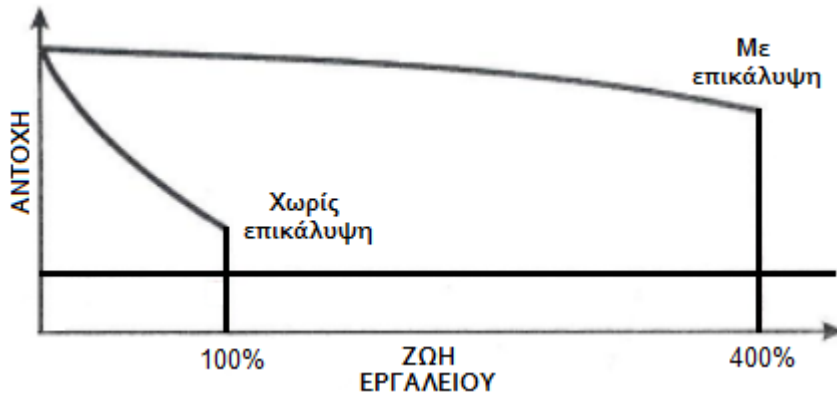
## 2. Το υλικό κατασκευής

Με τη πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη στο τομέα των υλικών, σήμερα έχουμε μια ευρεία γκάμα κοπτικών εργαλείων που καλύπτουν μεγάλο εύρος ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών. Τα κυριότερα υλικά κατασκευής εργαλείων διακρίνονται στα εξής:

- Σκληρομέταλλα (καρβίδια κλπ.)
- Ανθρακούχοι -Κεκραμένοι χάλυβες
- Ταχυχάλυβες (HSS)
- Κεραμικά υλικά
- Υπέρσκληρα υλικά (CBN, διαμάντι κλπ.)

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει αναφορά και στην τεχνική των **επικαλύψεων** στα κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβες και σκληρομέταλλα. Η επικάλυψη είναι μια οικονομική τεχνική που αποσκοπεί στη δημιουργία της εκάστοτε υφής της επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου έτσι ώστε να βελτιώνεται η συμπεριφορά του απέναντι στη φθορά.

Εκτός από τη βελτίωση στη διάρκεια ζωής, οι επικαλύψεις προσφέρουν και βελτίωση της επιφάνειας του κατεργασμένου τεμαχίου. Λειτουργούν σαν λιπαντικό και αυξάνουν την αντοχή. Συνδυασμός επικαλύψεων μεγαλώνει τα πλεονεκτήματα ακόμα περισσότερο. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει ενδεικτικά τη διαφορά που κάνουν οι επικαλύψεις στη διάρκεια ζωής του εργαλείου και στην αντοχή.

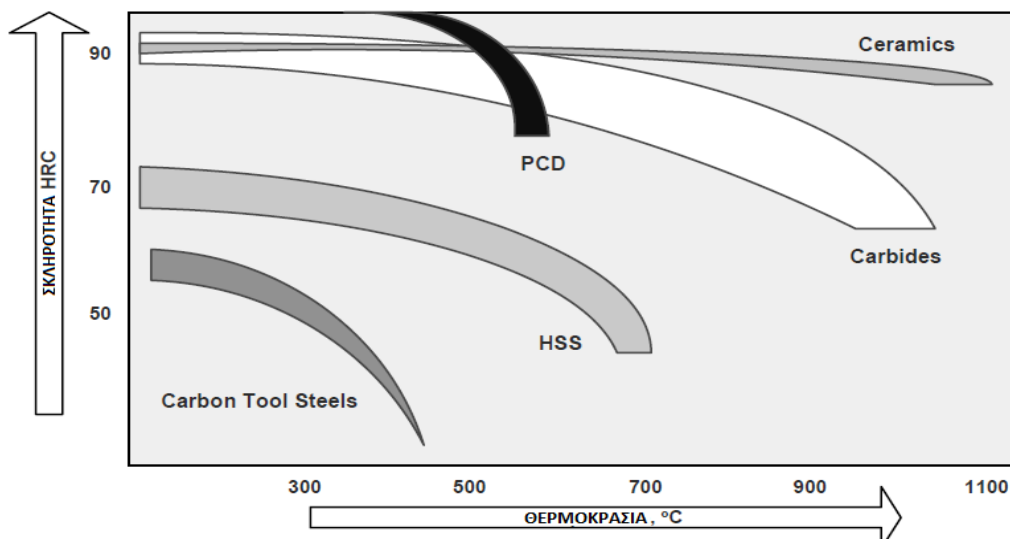


Σχήμα 2.2

Επίδραση επικαλύψεων στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου

Οι 3 πρωταρχικές ιδιότητες του υλικού του κοπτικού εργαλείου είναι:

α.) Σκληρότητα: ορίζεται ως η αντίσταση στη διείδυση. Συσχετίζεται άμεσα με την αντοχή του κοπτικού υλικού. Η ικανότητα της διατήρησης της υψηλής σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες ονομάζεται θερμή σκληρότητα. Το σχήμα 2.3 δείχνει τη σκληρότητα υλικών κοπτικών εργαλείων σε συνάρτηση της θερμοκρασίας.

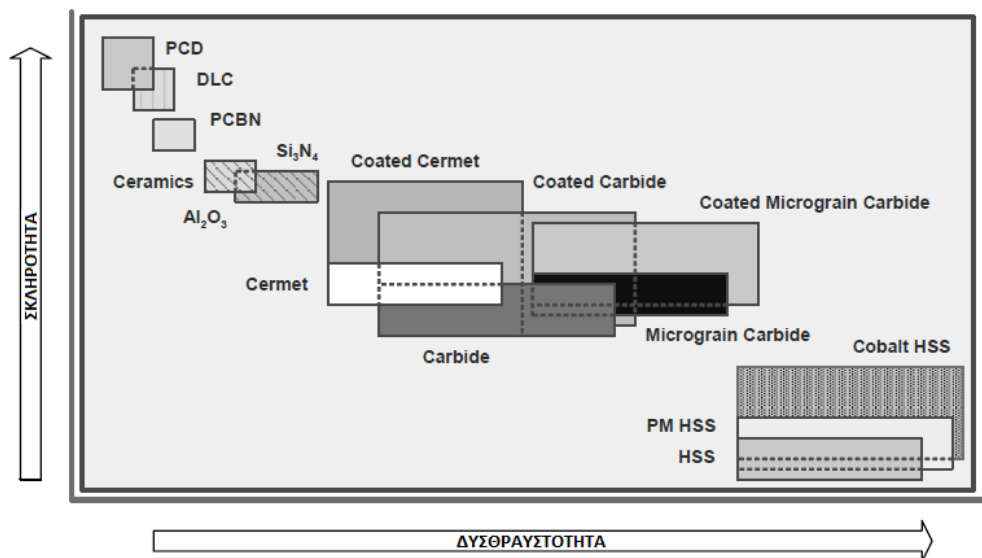


Σχήμα 2.3

Σκληρότητα υλικών κοπτικών εργαλείων σε συνάρτηση της θερμοκρασίας



β.) Δυσθραυστότητα: ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια πριν αστοχήσει. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή σε θραύση ενός υλικού κοπτικού εργαλείου τόσο καλύτερα αντιστέκεται στην αστοχία, στους κραδασμούς στις αποκλίσεις και σε άλλες ατέλειες του συστήματος κατεργασίας. Το σχήμα 2.4 δείχνει ότι σκληρότητα και δυσθραυστότητα δεν συμβαδίζουν. Μια σημαντική τάση στην ανάπτυξη των κοπτικών υλικών είναι η αύξηση της δυσθραυστότητας με παράλληλη διατήρηση της σκληρότητας τους.



Σχήμα 2.4

Σκληρότητα-δυσθραυστότητα κοπτικών εργαλείων σε συνάρτηση της θερμοκρασίας

γ.) Αντίσταση στη φθορά: Ουσιαστικά η αντίσταση στη φθορά ορίζεται ως η επίτευξη αποδεκτής διάρκειας ζωής του εργαλείου προτού γίνει αναγκαστική η αντικατάστασή του. Αν και φαίνεται απλό, αυτό το χαρακτηριστικό είναι μέχρι στιγμής το λιγότερο κατανοητό και αυτό γιατί η αντοχή στη φθορά δεν είναι ένα καθορισμένο χαρακτηριστικό του κοπτικού υλικού. Οι ιδιότητες για τη φθορά του εργαλείου, δυστυχώς, δεν είναι ακόμα επαρκώς σαφείς παρά τις πολυάριθμες θεωρητικές και πειραματικές μελέτες. Η φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι αποτέλεσμα πολύπλοκων φυσικών, χημικών και θερμόμηχανικών φαινομένων. Επειδή διάφοροι μηχανισμοί φθοράς (τριβή, οξείδωση κλπ.) δρουν ταυτόχρονα με κυρίαρχη επιρροή ενός ή περισσότερων από αυτών σε διαφορετικές καταστάσεις, ο εντοπισμός του κυριάρχου μηχανισμού είναι μια πάρα πολύ δύσκολη διαδικασία.

Από τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει υλικό εργαλείου που να συγκεντρώνει όλες αυτές τις ιδιότητες στο μέγιστο βαθμό καθώς μεταξύ τους αλληλοαντιστρατεύονται.

Για την επιλογή του κατάλληλου υλικού εργαλείου πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι η σχετική σημασία κάθε ιδιότητας ποικίλει αναλόγως:

1. Της φύσεως του κατεργαζόμενου τεμαχίου, δηλαδή, εκ του κατά πόσο αυτό απαιτεί μεγάλη ή μικρή ακρίβεια κατασκευής και, συνεπώς χαμηλό ή υψηλό κόστος παραγωγής, αντίστοιχα.
2. Του όγκου παραγωγής.
3. Του είδους κατεργασίας κοπής, από το αν η κοπή δηλαδή είναι συνεχής ή διακοπτόμενη και αν η κατεργασία είναι εκχόνδριση ή αποπεράτωση.
4. Των συνθηκών κατεργασίας και της γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.
5. Της γενικής καταστάσεως της εργαλειομηχανής.
6. Των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του κατεργαζόμενου υλικού.(κατεργασιμότητα υλικού)

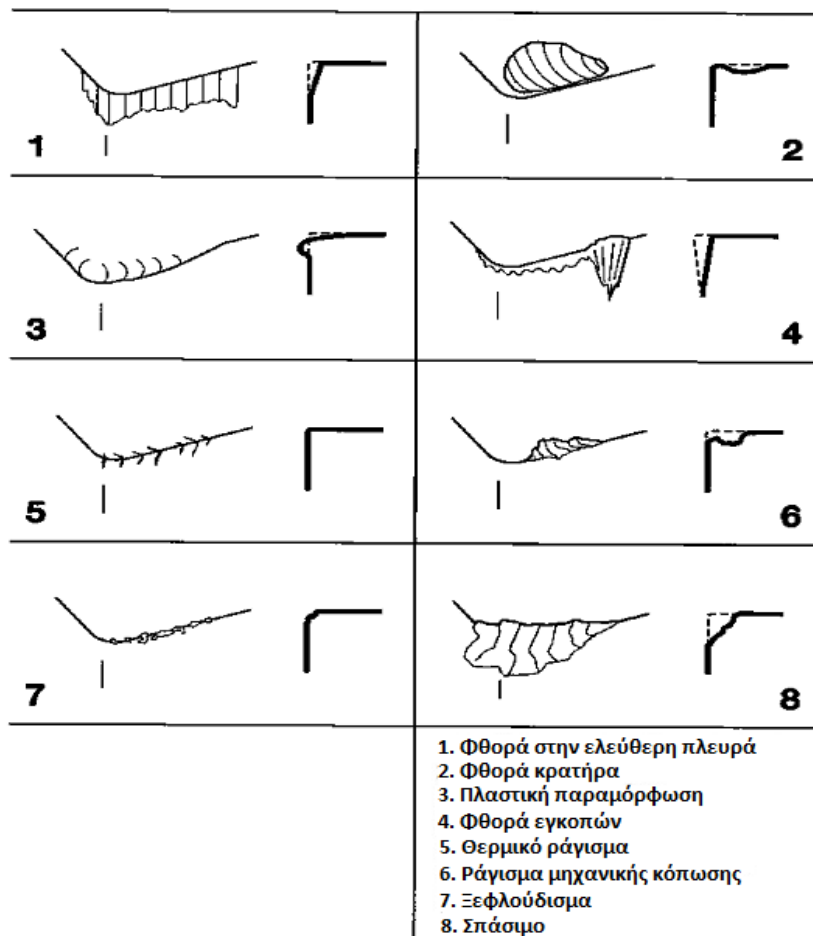
### **2.2.3 Φθορά κοπτικού εργαλείου**

Η φθορά του κοπτικού εργαλείου οδηγεί στην αστοχία του. Με τον ορό αστοχία εννοούμε είτε την πρόωρη αστοχία του (π.χ. θραύση του εργαλείου) είτε την πρόωρη εκτεταμένη φθορά του. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται κάποιοι τύποι αστοχίας και φθοράς σε κοπτικά εργαλεία.

Γενικά, η φθορά εξαρτάται από το υλικό και τη γεωμετρία του εργαλείου, το υλικό του τεμαχίου, τα χαρακτηριστικά της κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση και βάθος κοπής), το υγρό κοπής και τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής.

Κανονικά, η φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι μια σταδιακή διαδικασία. Υπάρχουν 2 βασικές ζώνες φθοράς στο κοπτικό εργαλείο: Φθορά στην ελεύθερη πλευρά και φθορά κρατήρα.

Αυτές οι 2 ζώνες είναι τα κυριότερα μετρήσιμα στοιχεία φθοράς. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6 [13], υπάρχουν 4 περιοχές που εξετάζουμε:



Σχήμα 2.5  
Μορφές φθοράς σε κοπτικά εργαλεία

Περιοχή C: το αρχικό μέρος της κοπτικής πλευράς στο σημείο κοπής του εργαλείου

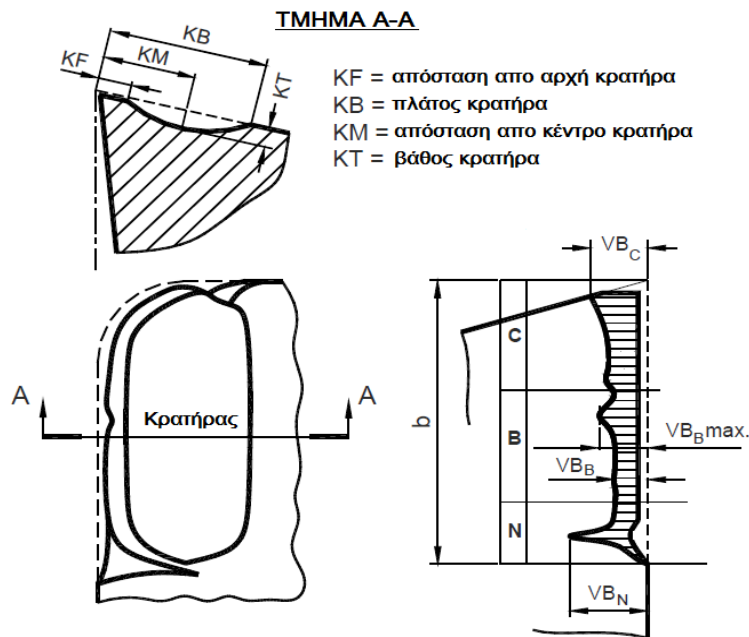
Περιοχή B: είναι το ευθύ κομμάτι που έχει απομείνει στη ζώνη C

Περιοχή A: είναι το μήκος  $b$  όπου φτάνει η φθορά στη κοπτική πλευρά

Περιοχή N: που εκτείνεται πέρα από την περιοχή επαφής μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου για περίπου 1-2mm.

Το πλάτος της φθοράς στην ελεύθερη πλευρά  $VB_B$  μετράται, μέσα στη ζώνη B, από την κάθετη διακεκομμένη (σχήμα 2.6).

Το βάθος του κρατήρα,  $K_T$ , ορίζεται ως η μέγιστη απόσταση μεταξύ του σημείου της κορυφής του κρατήρα και της αρχικής ζώνης B.



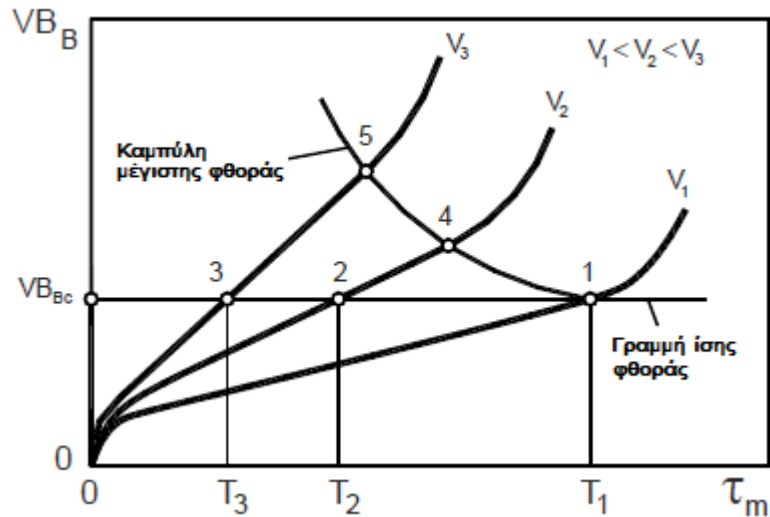
Σχήμα 2.6  
 Βασικές περιοχές φθοράς στα κοπτικά εργαλεία

Η φθορά του κοπτικού εργαλείου μετράται μετά από ανάλυση με τη βοήθεια μικροσκοπίου το οποίο είναι συνδεδεμένο στη τηλεόραση και η οποία με τη σειρά της είναι συνδεδεμένη στον υπολογιστή για τη καταγραφή εικόνων μέσω προγράμματος.

Στην πράξη, η ταχύτητα κοπής είναι πρωταρχικής σημασίας κατά την εξέταση της φθοράς του εργαλείου [1]. Στο σχήμα 2.7, παρουσιάζονται 3 χαρακτηριστικές καμπύλες φθοράς για 3 ταχύτητες κοπής  $V_1, V_2, V_3$  [13].

$T_1$  είναι η διάρκεια ζωής του εργαλείου όταν χρησιμοποιούμε τη ταχύτητα  $V_1, T_2$  για την  $V_2$  και  $T_3$  για την  $V_3$  αντίστοιχα. Επειδή η  $V_3$  είναι η μεγαλύτερη εκ των τριών, συνεπάγεται και γρηγορότερη φθορά εργαλείου. Όταν το μέγεθος της φθοράς φτάσει στα επίπεδα που δείχνει η γραμμή  $VB_c$  τότε θεωρούμε ότι το εργαλείο έχει φθαρεί εντελώς.

Όταν η ποιότητα των τεμαχίων το επιτρέπει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη μέγιστης φθοράς, αντί της  $VB_c$  (γραμμή ίσης φθοράς), ως όριο για την αντοχή του εργαλείου. Ως εκ τούτου, η διαφορά της διάρκειας ζωής του εργαλείου μεταξύ των χαμηλότερων και υψηλότερων ταχυτήτων κοπής γίνεται μικρότερη. Σαν αποτέλεσμα, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερος ρυθμός παράγωγης ειδικότερα στη περίπτωση της κατεργασίας με CNC εργαλειομηχανές.



Σχήμα 2.7  
Καμπύλες φθοράς για διάφορες ταχύτητες κοπής

Τα κριτήρια που προτείνει το ISO3685:1993 για να καθορίσει μέχρι πότε παραμένει αποδοτικό το εργαλείο είναι, ανάλογα το υλικό του εργαλείου, τα εξής:

*Cemented carbides:*

1.  $VB_B = 0.3 \text{ mm}$ , ή
2.  $VB_{B, \max} = 0.6 \text{ mm}$ , αν η φθορά στην ελεύθερη πλευρά δεν είναι συνεχής, ή
3.  $KT = 0.06 + 0.3 f$ , όπου  $f$  είναι η πρόωση.

*HSS and ceramics:*

1. Αστοχία, ή
2.  $VB_B = 0.3 \text{ mm}$ , αν η φθορά στην ελεύθερη πλευρά είναι συνεχής στη περιοχή B ή
3.  $VB_{B, \max} = 0.6 \text{ mm}$ , αν η φθορά στη κύρια κοπτική ακμή δεν είναι συνεχής στη περιοχή B.

## 2.2.4 Υγρό κοπής

Η δράση του υγρού κοπής οφείλεται σε ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες και εκδηλώνεται διαφορετικά ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού, το υλικό και τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και με τις συνθήκες κοπής.

Τα υγρά κοπής χρησιμοποιούνται στη κοπή μετάλλων με σκοπό [17]:

α.) Ψύξη.

Προκειμένου το κοπτικό εργαλείο να ανταποκριθεί στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λόγω τριβής, και με δεδομένο ότι ο περιβάλλον αέρας είναι φτωχό ψυκτικό για το εργαλείο εξ αιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του, συχνά στη κοπή μετάλλων κάνουμε χρήση υγρού κοπής για ψύξη.

β.) Λίπανση.

Εκτός από τη ψύξη, το υγρό κοπής χρησιμοποιείται και ως λιπαντικό στη περιοχή των τριβόμενων επιφανειών μειώνοντας σημαντικά τον συντελεστή τριβής κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της εκλυόμενης θερμότητας και, ως επακόλουθο, τη μείωση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Επιπρόσθετα επιτυγχάνεται και βελτίωση της τραχύτητας.

γ.) Το υγρό να λειτουργήσει ως λιπαντικό και ως ψυκτικό μαζί.

### **Πλεονεκτήματα**

1. Μείωση του μέσου φαινόμενου συντελεστή τριβής στην διεπιφάνεια αποβλήτου - εργαλείου αλλά και στο συντελεστή τριβής στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και τεμαχίου.(Λιπαντική δράση)
2. Μείωση της θερμοκρασίας του εργαλείου, του κομματιού και του αποβλήτου(ψυκτική δράση).Μείωση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου(και κατ επέκταση αύξηση της ζωής του) ως αποτέλεσμα των παραπάνω.
3. Βελτίωση της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου.
4. Μείωση στις δυνάμεις και στην ισχύ της κοπής επιτρέποντας μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής.
5. Απομακρύνει σκόνη και απόβλητα.

### **Μειονεκτήματα**

1. Κάποια υγρά είναι επικίνδυνα για την υγεία του τεχνίτη εάν δεν χρησιμοποιηθούν σωστά και μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα όπως δερματοπάθειες και διάφορα αλλά.
2. Ορισμένα κοπτικά εργαλεία επηρεάζονται από το θερμικό σοκ και άλλα παρουσιάζουν διαβρώσεις και οξείδωση. Η χρήση των υγρών κοπής θα πρέπει να αποφεύγεται για αυτά τα εργαλεία ή να εκλέγονται τα κατάλληλα υγρά με τις αντίστοιχες ιδιότητες.

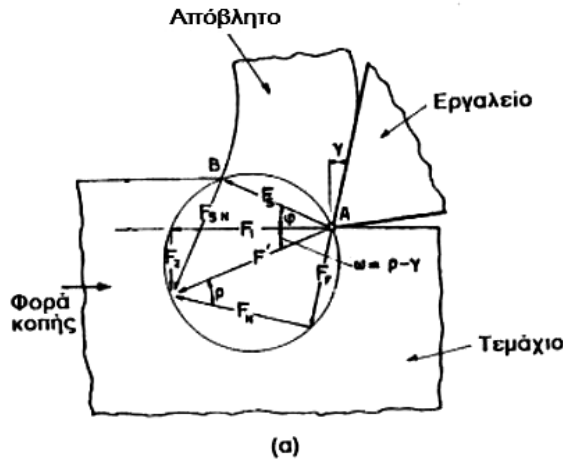


*Εικόνα 2.1*

*Μπέκ ψεκασμού υγρού κοπής σε εργαλειομηχανή*

### **2.2.5 Δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος εργαλειομηχανής-εργαλείου-τεμαχίου**

Για να αρχίσει(και να διατηρηθεί) η κοπή, είναι αναγκαία η επιβολή μιας δυνάμεως επαρκούς μεγέθους και κατάλληλης διεύθυνσεως στο χώρο. Η δύναμη αυτή πρέπει να είναι ικανή να υπερνικήσει την αντίσταση, που παρουσιάζει το κατεργαζόμενο υλικό, σε πλαστική (και ελαστική παραμόρφωση) στις ζώνες παραμορφώσεως και τριβής, όπως και την αντίσταση στο σχηματισμό της νεοκατεργασμένης επιφάνειας. Το σύστημα των δυνάμεων, που αναπτύσσονται κατά το σχηματισμό του συνεχούς αποβλήτου με ορθογωνική κοπή φαίνεται στο σχήμα 2.9 [1].



Σχήμα 2.9

Σύστημα δυνάμεων ορθογωνικής κοπής

Οι δυνάμεις που επενεργούν πάνω στο απόβλητο, αν θεωρήσουμε αρχικά δισδιάστατη ορθογωνική κοπή, και αν το απόβλητο θεωρηθεί σαν σώμα απολύτως στερεό και ελεύθερο ευρισκόμενο σε ηρεμία, είναι οι ακόλουθες:

1. Η αντίσταση σε διάτμηση του υλικού του τεμαχίου  $F_s$  (ή δύναμη διατμήσεως) , που εφαρμόζεται κατά μήκος του επιπέδου διατμήσεως.
2. Η κάθετη προς το επίπεδο διατμήσεως δύναμη  $F_{sn}$  , η οποία αποτελεί κατά κάποιο τρόπο αντίδραση, που ασκείται από το τεμάχιο προς το απόβλητο.
3. Η δύναμη τριβής  $F_f$  , ασκείται κατά μήκος της επιφάνειας επαφής αποβλήτου-εργαλείου και αντιτίθεται στη κίνηση του αποβλήτου.
4. Η κάθετη προς την επιφάνεια επαφής αποβλήτου-εργαλείου δύναμη  $F_n$ .

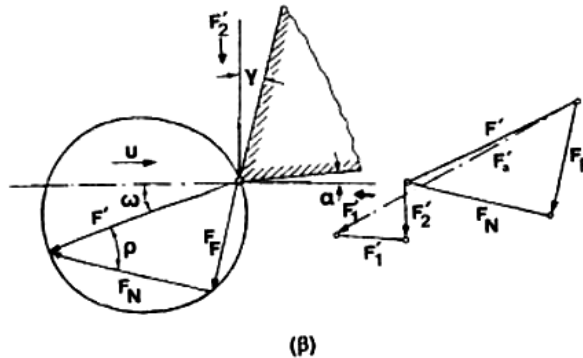
Με τη προϋπόθεση ότι δεν επενεργεί ροπή στο απόβλητο, για τη στατική ισορροπία του, θα πρέπει να ισχύει:

$$F = F'$$

Τελικώς, μπορούμε να πούμε ότι οι δυνάμεις  $F_s$  και  $F_{sn}$  αντικαθίστανται από την συνισταμένη  $F$  και οι  $F_f$  και  $F_n$  από την συνισταμένη  $F'$  οι οποίες είναι ίσες και αντίθετες. Την  $F'$  την ονομάζουμε δύναμη κοπής και την  $F$  την ονομάζουμε αντίσταση κοπής.



Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το σύστημα των δυνάμεων κοπής σε μορφή κυκλικού διαγράμματος. Επίσης περιλαμβάνεται και η λεγόμενη συνιστώσα της δυνάμεως κοπής  $F_1$  που επενεργεί στη κατεύθυνση της σχετικής κινήσεως του τεμαχίου ως προς το εργαλείο όπως και η κάθετη προς αυτήν συνιστώσα της δυνάμεως κοπής  $F'$ , δηλαδή η  $F_2$ .



.....Σχήμα 2.10

Σύστημα δυνάμεων σε μορφή κυκλικού διαγράμματος

Ειδικότερα τώρα, αναλύοντας την περίπτωση του πειράματός μας, με την τρισδιάστατη ανάλυση, καταλήγουμε προφανώς σε τρεις δυνάμεις  $F_1, F_2$  και  $F_3$ . Αυτές οι δυνάμεις μετρήθηκαν με το δυναμόμετρο, το οποίο μέσω διάταξης ενισχυτών και ειδικού software μας έδινε τα μεγέθη κάθε δύναμης στον υπολογιστή, κατά τη διάρκεια των κοπών. Οι δυνάμεις αυτές θα οριστούν με βάση τους άξονες του μηχανήματος.

### 2.3 Συμπληρωματικά δεδομένα για τις κατεργασίες κοπής

#### 2.3.1 Θερμότητα και θερμοκρασία στις κατεργασίες κοπής

Στην κοπή μετάλλων, η καταναλισκόμενη ενέργεια της όλης διαδικασίας σε μεγάλο βαθμό μετατρέπεται σε θερμότητα, που ανυψώνει τη θερμοκρασία του αποβλήτου, του τεμαχίου, και του κοπτικού εργαλείου.

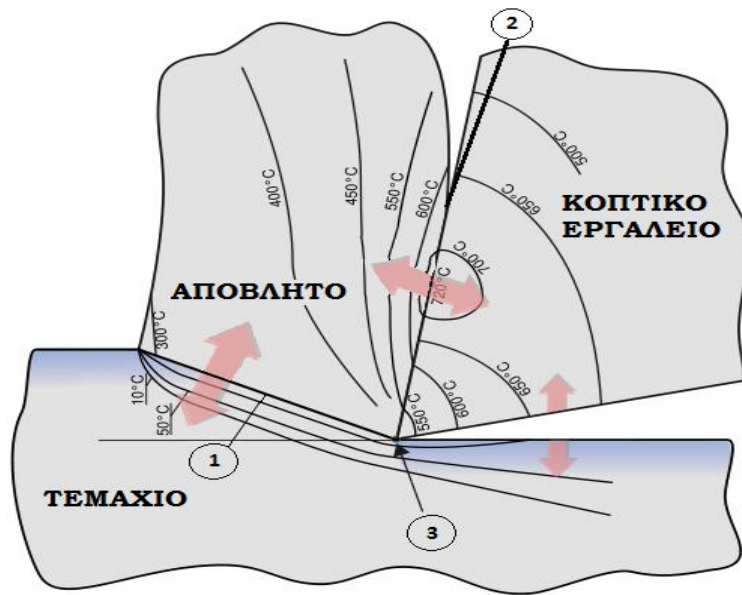
Αυτά τα τρία στοιχεία της διαδικασίας, μαζί με το περιβάλλον (το οποίο περιλαμβάνει το υγρό κοπής), ενεργούν ως καταβόθρες θερμότητας.

Υπάρχουν τρεις ζώνες θερμότητας στις οποίες διαμοιράζεται η ολική ενέργεια. Καταταγμένες ως προς τη θερμότητα που μπορούν να παράγουν φαίνονται στο σχήμα 2.11.

1. Η περιοχή της κύριας διατμητικής ζώνης, όπου η πλαστική παραμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα την κύρια πηγή θερμότητας. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της

θερμότητας παραμένει στο απόβλητο.

2. Η περιοχή επαφής κοπτικού εργαλείου-αποβλήτου όπου επιπλέον πλαστική παραμόρφωση λαμβάνει χώρα στο απόβλητο, και αναπτύσσεται σημαντική θερμότητα λόγω της τριβής ολίσθησης.
3. Η κοπτική ακμή, όπου η νέα παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου τρίβει το εργαλείο.



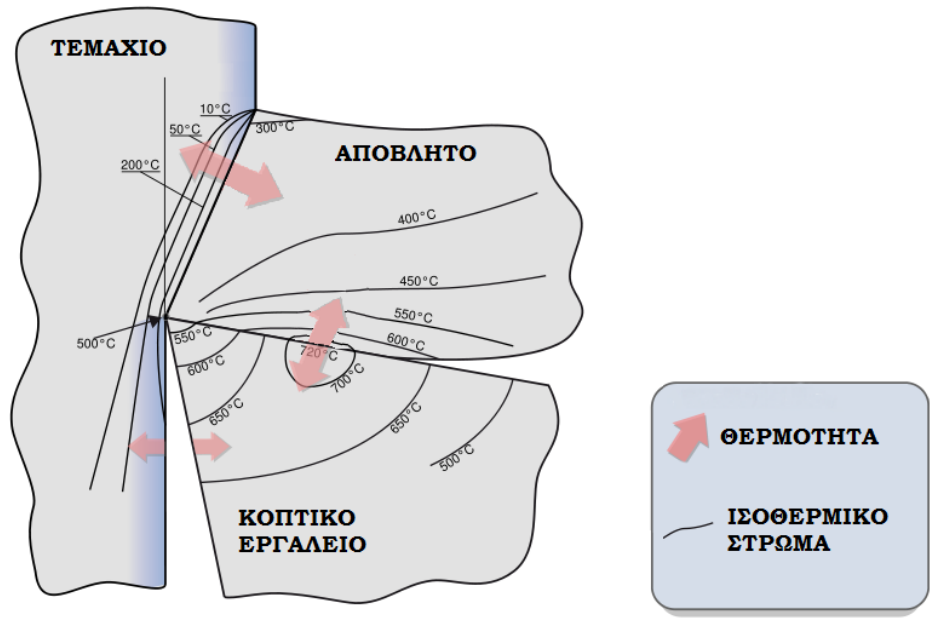
..... Σχήμα 2.11

Οι 3 ζώνες θερμότητας στις οποίες διαμοιράζεται η ολική ενέργεια

Είναι προφανές ότι η θερμοκρασία κυρίως στη ζώνη τριβής εργαλείου - αποβλήτου και κατά δεύτερο λόγο στη διεπιφάνεια εργαλείου - τεμαχίου παίζει ρυθμιστικό κυρίαρχο ρολό στο ρυθμό φθοράς του κοπτικού εργαλείου.

Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει ενδεικτικά τη συναλλαγή θερμότητας σε κοπτικό εργαλείο, απόβλητο και τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας κοπής. Πρέπει όμως εδώ να τονίσουμε ότι στο σχήμα είναι μια γενική εικόνα για το διαμοιρασμό θερμότητας στις κατεργασίες κοπής που ανταποκρίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις και πρέπει να γίνει κατανοητό ότι ανάλογα με το υλικό του τεμαχίου που κατεργάζομαστε, τις συνθήκες κοπής(κυρίως τη ταχύτητα κοπής) και άλλων παραγόντων, αυτοί οι αριθμοί τείνουν να είναι αρκετά διαφορετικοί. Όπως θα αναλύσουμε στη συνέχεια, για τη δική μας περίπτωση, στο κομμάτι αναφοράς μας στο τιτάνιο το μεγαλύτερο μέρος της

θερμότητας μεταβιβάζεται στο κοπτικό εργαλείο και όχι στο απόβλητο. Όλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εκλογή του κατάλληλου υλικού του εργαλείου και τέτοιων παραγόντων κοπής, ώστε να μειώνεται ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου με συνακόλουθη αύξηση της ζωής του.



Σχήμα 2.12  
Συναλλαγή θερμότητας κατά τη διάρκεια κατεργασίας κοπής

### 2.3.2 Τραχύτητα

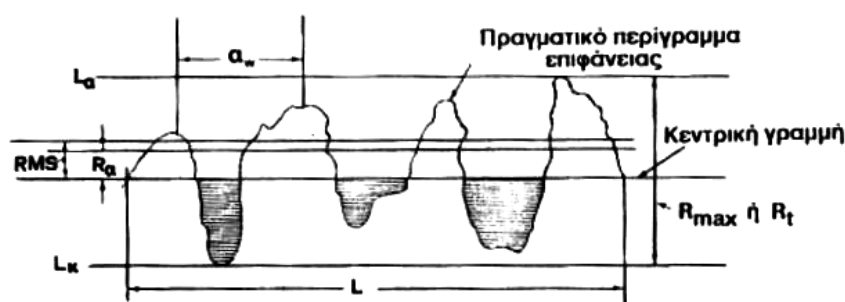
Όταν η επιφάνεια ενός τεμαχίου κατεργάζεται, αποκτά ορισμένες νέες ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που συνιστούν ότι καλούμε ποιότητα επιφάνειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά, βεβαίως δεν τα είχε η επιφάνεια προ της κατεργασίας, δηλαδή ως ακατέργαστη επιφάνεια. Οι μεταβολές, που επέρχονται εν γένει σε ιδιότητες και χαρακτηριστικά με την κατεργασία τους, οφείλονται σε επιρροές, τόσο της κατεργασίας αυτής καθαυτής, όσο και του περιβάλλοντος, με το οποίο κάθε νεοκατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου έρχεται σε επαφή.

Η τραχύτητα αποτελεί κύρια συνιστώσα της ποιότητας μια κατεργασμένης, με κοπή, επιφάνειας που αναφέρεται στα γεωμετρικά 'μικρό'- χαρακτηριστικά της.

Ενδεικτικά αναφέρουμε [1] τομείς που επηρεάζει η τραχύτητα :

- Αντοχή των μετάλλων σε κόπωση
- Αντίσταση στη διάβρωση
- Στη ροή ρευστών κατά μήκος τοιχωμάτων
- Συνθήκες επαφής ανάμεσα σε συνεργαζόμενες επιφάνειες (συντελεστής τριβής, φθορά κλπ.)

Για τη μέτρηση της τραχύτητας χρησιμοποιούμε τραχύμετρα τα οποία βασίζονται στο σύστημα κεντρικής γραμμής. Κατά το σύστημα αυτό έχουμε την κεντρική γραμμή η οποία ισομοιράζει τα επάνω και τα κάτω της εμβαδά ( τα περιεχόμενα ανάμεσα στο πραγματικό περίγραμμα και στην κεντρική γραμμή), μέσα όμως σε καθορισμένο μήκος  $L$ , το οποίο καλούμε δειγματοληπτικό μήκος.



Σχήμα 2.13  
Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της τραχύτητας

Παράλληλα τώρα προς την κεντρική γραμμή, φέρονται δυο ευθείες αναφορές, από τις οποίες η ανώτερη La εφάπτεται στην υψηλότερη κορυφή ενώ η κατώτερη Lk εφάπτεται στη κατώτερη εσοχή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της τραχύτητας είναι :

1. Μέσο ύψος τραχύτητας Ra

Πρόκειται για τη μέση τιμή που προκύπτει από όλες τις αποκλίσεις από την κεντρική γραμμή στο διάστημα του δειγματοληπτικού μήκους.

2. Μέγιστο ύψος τραχύτητας Rt

Η απόσταση μεταξύ των γραμμών La και Lk στο διάστημα του δειγματοληπτικού μήκους.

3. Ύψος Rz

Πρόκειται για τη μέση διαφορά ανάμεσα στις πέντε μεγαλύτερες κορυφές και στις πέντε μεγαλύτερες εσοχές του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας στο διάστημα του δειγματοληπτικού μήκους.

Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι το μέσο ύψος Ra είναι αυτό που αποτελεί το αντιπροσωπευτικό μέγεθος για την αναφορά της τραχύτητας μιας επιφάνειας εφόσον αναφερθεί συγχρόνως και το είδος της κατεργασίας και αυτό γιατί κάθε κατεργασία κοπής προσδίδει χαρακτηριστική μορφή (υφή) στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η τραχύτητα επίσης επηρεάζεται και από μεταβολές των κύριων παραγόντων κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση κ.α.).

Στον πίνακα 2.14 παρουσιάζεται το πρότυπο εύρος τιμών για το μέγεθος Ra για διάφορες ποιότητες κατά ISO.

	Συμβολισμός ποιότητας	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
<b>ISO R1302 1971</b>	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025
	Ra[ $\mu\text{in}$ ]	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1

Πίνακας 2.14  
Πρότυπο εύρος τιμών τραχύτητας Ra

### 3. Τιτάνιο

#### 3.1 Γενικά

Το τιτάνιο και τα κράματά του έχουν πάρα πολλές εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς της μηχανικής, της υγείας, του αθλητισμού, της ασφάλειας και πολλών άλλων. Αυτό συμβαίνει λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του τιτανίου που είναι η πολύ μεγάλη αντοχή του (αναλογικά με το βάρος) η οποία διατηρείται και σε υψηλές θερμοκρασίες, η εξαιρετική ανθεκτικότητα στη διάβρωση, η καλή αντοχή στην οξείδωση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίας και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής.

Η μεγαλύτερη διάδοσή του είναι στην αεροδιαστημική που περιλαμβάνει πάρα πολλές εφαρμογές. Χαρακτηριστικό είναι ότι το 47% του βάρους ενός αεροπλάνου, μαζί με τους κινητήρες του, οφείλεται σε μέρη κατασκευασμένα από τιτάνιο ή κράματα τιτανίου. Ενδεικτικά για την αεροδιαστημική αναφέρουμε: τα πτερύγια των jet κινητήρων, τα περιβλήματα των κινητήρων, τον άξονα του συστήματος προσγείωσης, τον άξονα τοποθέτησης των πτερυγίων ελικοπτέρων, θάλαμοι πίεσεως και καυσίμων για αποστολές διαστήματος και πάρα πολλά άλλα.



Εικόνες 3.1

Εξαρτήματα αεροπλάνων κατασκευασμένα από τιτάνιο

Εκτός όμως από την αεροδιαστημική, πλέον έχουμε εφαρμογές σε πληθώρα κλάδων όπως της υγείας, της παραγωγής ενέργειας, του αυτοκίνητου, του αθλητισμού κ.α. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η τεχνητή καρδιά (εικόνα 3.2), όπου η εξαιρετική ανθεκτικότητα στη διάβρωση από τα υγρά του σώματος και η συμβατότητα του με τα

οστά και του ιστούς συντέλεσαν στην επιλογή του τιτανίου για τη κατασκευή πολλών στοιχείων της [14].



Εικόνα 3.2

Τεχνητή καρδιά με στοιχεία τιτανίου

Επίσης, τα πτερύγια των τουρμπίνων σε σταθμούς συμπαραγωγής, οι βαλβίδες των κινητήρων μαζί με τις αναρτήσεις και τις εξατμίσεις και πολλά άλλα μέρη του αυτοκινήτου ακόμα και μαστούνια του γκολφ και πλαίσια ποδηλάτων είναι στο εύρος των εφαρμογών του τιτανίου. Στις εικόνες φαίνονται κάποια από τα παραπάνω.



Εικόνα 3.3

Διάφορα εξαρτήματα από τιτάνιο

Παρά όμως την αυξημένη χρήση και παραγωγή του τιτανίου και των κραμάτων του, παραμένει ένα ακριβό μέταλλο συγκρινόμενο με άλλα μέταλλα και αυτό οφείλεται κυρίως στη πολυπλοκότητα της εξόρυξής του και τις δυσκολίες στην τήξη και την κατεργασία του. Πολλές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί για να μειώσουν το κόστος αλλά παρόλα αυτά τα περισσότερα εξαρτήματα τιτανίου κατασκευάζονται με τις παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας. Παραδείγματος χάρη, όλα τα εξαρτήματα που

προορίζονται για την αεροδιαστημική προέρχονται από κατεργασίες τόννευσης, φρεζαρίσματος, διάτρησης, λείανσης κ.τ.λ.

Η κατεργασιμότητα του τιτανίου και των κραμάτων του είναι γενικά πολύ κακή λόγω πολλών εγγενών ιδιοτήτων του υλικού. Είναι πολύ χημικά αντιδραστικό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να τείνει να 'συγκολλήσει' το κοπτικό εργαλείο κάτι που οδηγεί σε μεγάλη φθορά και πρώιμη αστοχία του. Η χαμηλή θερμική του αγωγιμότητα αυξάνει τη θερμοκρασία στη ζώνη επαφής εργαλείου-τεμαχίου που επίσης επηρεάζει το κοπτικό εργαλείο αρνητικά. Επιπλέον, η διατήρηση της μεγάλης του αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και ο χαμηλός συντελεστής ελαστικότητας δυσχεραίνουν περαιτέρω τη κατεργασιμότητα.

Η κακή κατεργασιμότητα του τιτανίου έχει οδηγήσει μεγάλες εταιρείες (Rolls Royce, General Electric) να επενδύσουν μεγάλα ποσά χρημάτων για την εξέλιξη τεχνικών κατεργασίας που θα μειώσουν το κόστος. Παρόλα αυτά, λογικές τιμές ρυθμού παράγωγης και εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας μπορεί να επιτευχθεί με τις παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας αν τα μοναδικά χαρακτηριστικά του μετάλλου ληφθούν υπόψη.

### **3.2 Κατεργάζοντας το τιτάνιο**

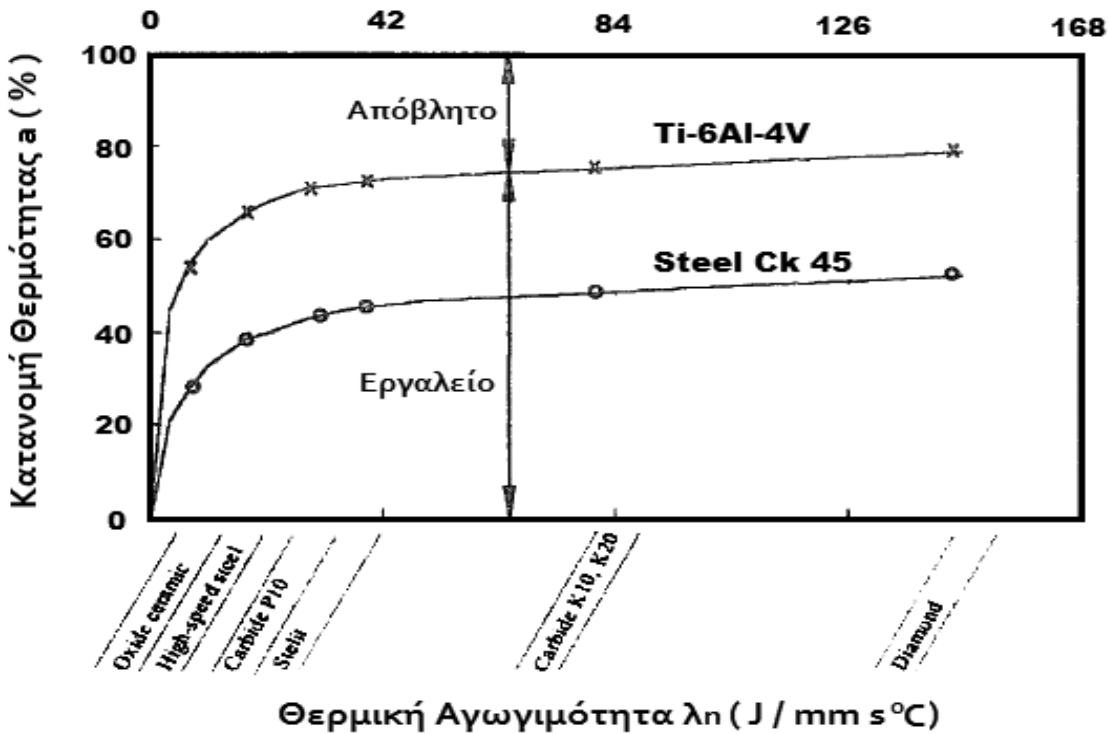
Η πρόοδος στην κατεργασία του τιτανίου δεν έχει ακολουθήσει την ανάπτυξη στις κατεργασίες άλλων υλικών λόγω των αιτιών που έχουμε αναφέρει. Συνεπώς, η επιτυχία σε μια κατεργασία τιτανίου στηρίζεται στην αντιμετώπιση των βασικών προβλημάτων που σχετίζονται με τις εγγενείς ιδιότητες του υλικού όπως αναλύονται παρακάτω [25]:

#### *Υψηλές θερμοκρασίες κοπής*

Είναι πλέον κατανοητό ότι μεγάλες θερμοκρασίες κοπής παράγονται όταν κατεργαζόμαστε κράματα τιτανίου και το γεγονός ότι οι υψηλές θερμοκρασίες δρουν κοντά στη κοπτική ακμή του εργαλείου είναι ο κυρίαρχος παράγοντας για τη γρήγορη φθορά του εργαλείου που παρατηρείται. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 ένα μεγάλο μέρος (περίπου το 80%) της θερμότητας που παράγεται κατά τη διάρκεια κατεργασίας τιτανίου, κράματος Ti-6Al-4V, μεταφέρεται στο εργαλείο γιατί δε μπορεί να απομακρυνθεί με το γρήγορα αποσπώμενο απόβλητο είτε να περάσει στο τεμάχιο λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του τιτανίου η όποια είναι περίπου στο 1/6 των χαλύβων. Περίπου 40% της ενέργειας που παράγεται απορροφάται από το εργαλείο κατά τη κατεργασία χαλύβων. Έρευνα πάνω στη κατανομή της θερμότητας της κοπής τιτανίου έχει δείξει ότι οι καμπύλες



θερμοκρασίας είναι πολύ πιο απότομες και οι θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες πολύ μικρότερες σε μέγεθος και πολύ κοντύτερα στη κοπτική ακμή. Και αυτό, εξ αιτίας του μικρού μεγέθους αποβλήτου που παράγεται και της μικρής ζώνης εργαλείου – αποβλήτου η οποία ουσιαστικά ‘μαζεύει’ όλη τη θερμότητα στο εργαλείο και αυξάνει τη θερμοκρασία του μέχρι τους 1100 °C.



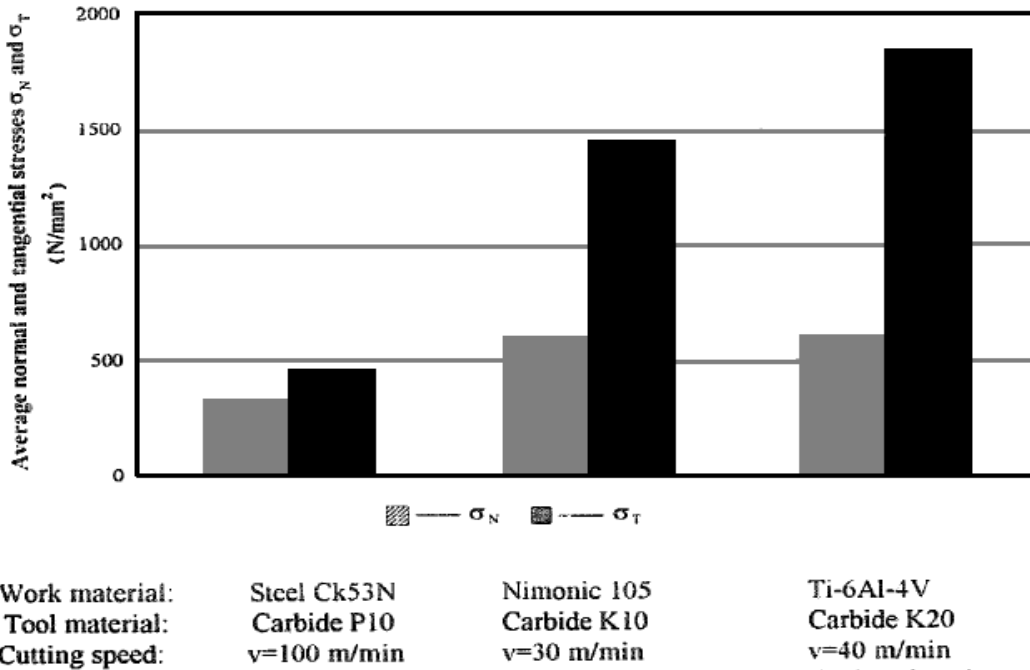
Σχήμα 3.1

Σύγκριση κατανομής θερμότητας τιτανίου-χάλυβα για διάφορα κοπτικά υλικά

### Υψηλές τάσεις κοπής

Οι δυνάμεις κοπής που καταγράφονται όταν κατεργαζόμαστε κράματα τιτανίου είναι παρόμοιες με αυτές που παρατηρούμε όταν κατεργαζόμαστε άλλα μέταλλα, έτσι η κατανάλωση ενέργειας είναι η ίδια, αν όχι μικρότερη. Πολύ μεγαλύτερες μηχανικές τάσεις όμως εμφανίζονται στην γειτονική περιοχή της κοπτικής ακμής κατά τη κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Μελέτες έχουν δείξει μεγάλες τάσεις στο εργαλείο κατά τη κατεργασία Ti-6Al-4V από ότι κατά τη κατεργασία Nimonic 105(κράμα νικελίου) και 3 με 4 φορές μεγαλύτερες από ότι κατά τη κατεργασία χάλυβα Ck 53N (σχήμα 3.2). Αυτό ίσως οφείλεται στην ασυνήθιστα μικρή επιφάνεια επαφής αποβλήτου – εργαλείου (που είναι περίπου το 1/3 της αντίστοιχης

επιφάνειας για χάλυβα στην ίδια πρόωση και στο ίδιο βάθος κοπής) και κυρίως στη μεγάλη ανθεκτικότητα των κραμάτων τιτάνιου στη παραμόρφωση στις υψηλές θερμοκρασίες, η όποια μειώνεται σημαντικά μόνο μετά την υπέρβαση των 800°C.



Σχήμα 3.2

Τάσεις κατά τη κατεργασία χάλυβα-νικελίου-τιτανίου

### Μέτρο ελαστικότητας

Το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του τιτάνιου είναι αιτία για τη δημιουργία επιπλέον προβλημάτων κατά τη κατεργασία, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο των κραδασμών, αλλά και όξυνση των κύριων προβλημάτων όπως η πρόωμη φθορά στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου και η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι κραδασμοί αυτοί φτάνουν σε διπλασία ισχύ σε σχέση με τον ανθρακούχο χάλυβα. Στην ουσία, το εργαλείο αποκρούεται από το ίδιο το τεμάχιο μόλις εισέρχεται μέσα η κοπτική του ακμή δημιουργώντας αυτούς τους κραδασμούς.

### *Χημική αντιδραστικότητα*

Εκτός από τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες, τις πολύ υψηλές τάσεις και τα πολύ υψηλά δυναμικά φορτία κατά τη κατεργασία κραμάτων τιτανίου, τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα τη πλαστική παραμόρφωση και/ή την ταχύτατη φθορά του κοπτικού εργαλείου, έχουμε και τη χημική αντιδραστικότητα του τιτανίου που συμβάλει και αυτή στη φθορά του εργαλείου. Το τιτάνιο και τα κράματα του αντιδρά χημικά σχεδόν με όλα τα υλικά κοπτικών εργαλείων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500°C εξαιτίας της ισχυρής χημικής τους αντιδραστικότητας.

Μεγάλο μέρος τον παραπάνω προβλημάτων μπορεί να περιοριστεί χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία και τις κατάλληλες συνθήκες κοπής ανάλογα με τη κατεργασία που στοχεύουμε να κάνουμε κάθε φορά όπως θα αναλύσουμε παρακάτω.

### **3.3 Υλικά κοπτικού εργαλείου για κατεργασία κραμάτων τιτανίου**

Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε ποια από τα υλικά κοπτικών εργαλείων, όπως αναφέραμε στην ενότητα των υλικών κοπτικών εργαλείων κοπής, είναι κατάλληλα για την κατεργασία κραμάτων τιτανίου.

Όπως αναφέραμε και στη παράγραφο 2.2.2, έχουν σημειωθεί σημαντικές βελτιώσεις στο συγκεκριμένο τομέα που έχουν φέρει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς παράγωγης. Όλες αυτές οι βελτιώσεις έχουν βρει μεγάλη εφαρμογή στη κατεργασία τεμαχίων χυτοσίδηρου, χαλύβων και κραμάτων νικελίου. Καμία όμως από αυτές δεν είχε επιτυχή εφαρμογή στη βελτίωση της κατεργασιμότητας του τιτανίου λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων που απαιτούνται, τα οποία είναι:

- a.) Υψηλή σκληρότητα για την αντίσταση στις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται
- b.) Καλή θερμική αγωγιμότητα
- c.) Χημική ουδετερότητα έτσι ώστε να μειώνεται η τάση αντίδρασης με το τιτάνιο
- d.) Μεγάλη αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση

Κατατάσσοντας τα υλικά κοπτικών εργαλείων τα οποία αναφέραμε πριν, ως προς την εφαρμογή και την καταλληλότητα τους στις κατεργασίες τιτανίου έχουμε τα εξής:

1. Το καρβίδιο του βολφραμίου (WC) με συνδετικό υλικό το κοβάλτιο (Co) έχει αποδείξει την υπέροχη του σε όλες σχεδόν τις κατεργασίες που αφορούν το τιτάνιο. Πολλές μελέτες έχουν καταδείξει τη πολύ καλή απόδοση του βολφραμίου, ανεξάρτητα ποιο είδος φθοράς εμφανίζεται, ειδικότερα για ταχύτητες άνω των 60m/min σε σχέση με άλλα υλικά.
2. Οι ανθρακούχοι και κεκραμένοι χάλυβες έχουν αποδειχθεί ακατάλληλοι για τη κατεργασία των κραμάτων του συγκεκριμένου υλικού εξαιτίας της μεγάλης φθοράς που παρουσιάζουν λόγω της μικρής τους αντοχής σε επαναφορά (δηλαδή της ιδιότητας διατηρήσεως της σκληρότητας με αύξηση της θερμοκρασίας).
3. Οι ταχυχάλυβες (όπως οι M2 και οι M10) έχουν αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστοι στη κατεργασία τιτανίου. Ειδικά αυτοί με τους υψηλούς βαθμούς κραμάτωσης όπως οι M33, M40 και M42 προσφέρουν πάρα πολύ καλά αποτελέσματα, αναλογικά και με το κόστος τους, για μικρές σχετικά ταχύτητες της τάξης των 60m/min.
4. Αν και τα κεραμικά εργαλεία έχουν βελτιωθεί σε ποιότητα και έχουν πλέον μεγαλύτερη εφαρμογή σε δύσκολα κατεργάσιμα υλικά, εξαιτίας της φτωχής θερμικής τους αγωγιμότητας, της σχετικά χαμηλής δυσθραυστότητας και της αντιδραστικότητά τους με το τιτάνιο δε θεωρούνται τόσο κατάλληλα για τη κατεργασία αυτού του υλικού.
5. Τα υπέρσκληρα υλικά όπως το CBN και το διαμάντι έχουν πολύ καλή απόδοση όσο αναφορά το ρυθμό φθοράς κατά τη κατεργασία τιτανίου. Το μόνο μειονέκτημα για το διαμάντι είναι η μειωμένη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες κοπής (άνω των 800°C). Η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη λόγω του μεγάλου κόστους τους.

Είναι φανερό, ότι τα διάφορα εργαλεία έχουν διαφορετικούς μηχανισμούς φθοράς όταν εφαρμόζονται σε κατεργασία τιτανίου. Φθορά κρατήρα, φθορά ελεύθερης επιφάνειας, 'απολέπιση' και αστοχία είναι τα αποτελέσματα του συνδυασμού της υψηλής θερμοκρασίας, των μεγάλων τάσεων και της αντιδραστικότητας του τιτανίου στα παραπάνω υλικά κοπτικών εργαλείων. Ιδιαίτερα στις κατεργασίες υψηλών

ταχυτήτων, λόγω των ακόμα μεγαλύτερων θερμοκρασιών και τάσεων κοντά στη κοπτική ακμή, το φαινόμενο της πλαστικής παραμόρφωσης παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο.

Για να περιοριστεί μεγάλο μέρος των προβλημάτων που παρουσιάζονται πρέπει κατά κανόνα να χρησιμοποιηθεί υγρό κοπής το οποίο θα δράσει σαν ψυκτικό και σαν λιπαντικό, όπως έχουμε εξηγήσει, μειώνοντας τις θερμοκρασίες, τις δυνάμεις κοπής και την επικόλληση αποβλήτων στο τεμάχιο που είναι και τα συνήθη φαινόμενα που παρουσιάζονται με τα κράματα τιτανίου και κατ' επέκταση να βελτιώσουν τη ζωή του κοπτικού εργαλείου.

Στο πειραματικό μέρος, στην ενότητα όπου θα αναλύσουμε τη φθορά του κοπτικού μας εργαλείου θα αντιστοιχήσουμε τα παραπάνω θεωρητικά δεδομένα με τα δικά μας αποτελέσματα.



Εικόνα 3.4

*Jabro-Solid<sup>2</sup> Cutters από την Seco Tools Inc.*

## 4. CNC Εργαλειομηχανές

### 4.1 Γενικά

CNC είναι η διαδικασία που χρησιμοποιείται στις κατεργασίες και εμπεριέχει την χρήση υπολογιστή για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο της εργαλειομηχανής. Το λογισμικό του υπολογιστή μαζί με την κονσόλα ελέγχου του, καθιστούν αυτές τις εργαλειομηχανές πολύ διαφορετικές σε σχέση με τις μη προγραμματιζόμενες και με πολλές επιπλέον δυνατότητες.

Στις κατεργασίες CNC η εργαλειομηχανή λειτουργεί μέσω αριθμητικού ελέγχου. Για κάθε κατεργασία η εργαλειομηχανή προγραμματίζεται μέσω εντολών ,από τη κονσόλα σε συγκεκριμένη γλώσσα( G κώδικας), οι οποίες και ελέγχουν όλα τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας όπως τη πρόωση, τις στροφές, το βάθος κοπής, τη θέση του εργαλείου κ.α.



Εικόνα 4.1

Τυπική κονσόλα εργαλειομηχανής CNC

### 4.2 Λέγοντας στην εργαλειομηχανή τι θα κάνει

Σχεδόν όλες οι σύγχρονες CNC μηχανές χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό χαρακτήρα και αριθμών για το προγραμματισμό των εντολών του συνολικού κώδικα. Κάθε εντολή γράφεται με τις λέξεις που αντιστοιχούν στο πρόγραμμα του CNC. Αυτές οι λέξεις αποτελούνται από ένα γράμμα και έναν αριθμό. Το γράμμα (X,Y,Z,S,F κ.α.) αντιστοιχεί στο είδος της εντολής και ο αριθμός στο αριθμητικό μέγεθος της εντολής.

Ανάλογα με το αρχικό γράμμα, οι εντολές-λέξεις χωρίζονται ενδεικτικά στις εξής παρακάτω [8]:

**G:** Εντολές προπαρασκευαστικής λειτουργιάς. Αφορά τον καθορισμό αρχικών χαρακτηριστικών της κατεργασίας(π.χ. μετρικές ή αγγλοσαξονικές συντεταγμένες, στροφές ), αρχικές εντολές κίνησης(π.χ. ωρολογιακά ή ανθωρολογιακά, γραμμικά ή κυκλικά) κ.α.

**X:** Εντολές θέσης στον άξονα X

**Y:** Εντολές θέσης στον άξονα Y

**Z:** Εντολές θέσης στον άξονα Z

**F:** Εντολές πρόωσης

**S:** Εντολές στροφών ατράκτου

**R:** Εντολές καθορισμού ακτίνας

**T:** Εντολές κοπτικού εργαλείου

**M:** Εντολές βοηθητικής λειτουργίας π.χ. εκκίνηση ατράκτου ωρολογιακά

**H:** Τιμή μήκους εργαλείου

**D:** Τιμή διαμέτρου εργαλείου

Η εργαλειομηχανή εκτελεί το πρόγραμμα είτε ολόκληρο αυτόματα από την αρχική εντολή μέχρι τη τελευταία με μόνη παρέμβαση του χειριστή σε εντολές ταχυτήτων (περιστροφής ατράκτου, πρόωσης κλπ.), είτε σαν ολοκληρωμένο πρόγραμμα όπου μετά από κάθε εντολή όμως το πρόγραμμα σταματά για έλεγχο ορθότητας.

*Βασικές εντολές και προσομοίωση προγράμματος*

G00

Ταχεία κίνηση

G01

Γραμμική κίνηση

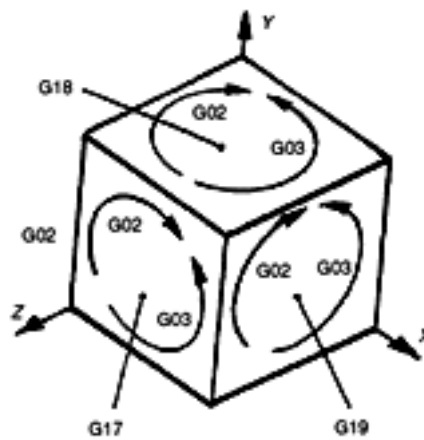
G02-G03 Κυκλική κίνηση ωρολογιακά - ανθωρολογιακά

G04 Αναμονή

G08 Επιτάχυνση

G09 Επιβράδυνση

G17-G18-G19 Επιλογή επιπέδου κίνησης  
(XY επιπέδου-ZX επιπέδου-YZ επιπέδου)



Σχήμα 4.1

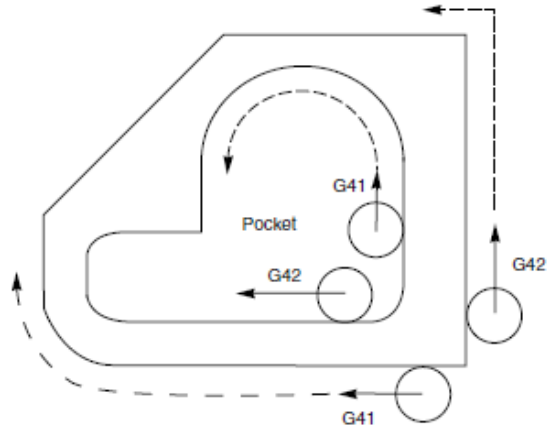
Εντολές επιλογής επιπέδου και είδους κυκλικής κίνησης εργαλείου σε G κώδικα

G20-G21 Αγγλοσαξονικές ή μετρικές μονάδες συντεταγμένων

G40 Ακύρωση αντιστάθμισης

G41-G42 Αντιστάθμιση ακτίνας εργαλείου προς τα αριστερά-δεξιά



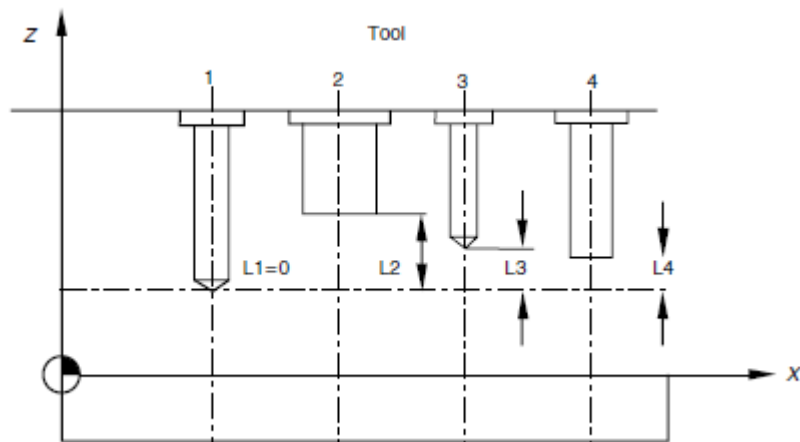


Σχήμα 4.2

Αντιστάθμιση ακτίνας κοπτικού εργαλείου σε G κώδικα

G43-G44

Αντιστάθμιση μήκους εργαλείου προς τα θετικά-αρνητικά Z (σε σχέση με ένα μήκος αναφοράς ενός εργαλείου. Στο σχήμα 4.3 εργαλείο 1)



Σχήμα 4.3

Αντιστάθμιση μήκους κοπτικού εργαλείου σε G κώδικα

G54-G59

Επιλογή συστήματος συντεταγμένων τεμαχίου (αφορά τη θέση μια ιδιοσυσκευής (π.χ. δυναμόμετρο) έτσι ώστε κάθε φορά που δένεται το τεμάχιο να έχει σεταρισμένη θέση)

G81

Διάτρηση οπής

G90-G91	Απόλυτες ή βηματικές συντεταγμένες
G94	Καθορισμός πρόωσης ανά λεπτό
G95	Καθορισμός πρόωσης ανά περιστροφή
G96	Καθορισμός μονάδων γραμμικής-περιφερειακής ταχύτητας ατράκτου m/min
G97	Καθορισμός μονάδων γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ατράκτου rpm
M00	Προσωρινή παύση εκτέλεσης προγράμματος
M01	Προαιρετική παύση εκτέλεσης προγράμματος
M02	Τέλος προγράμματος
M03-M04	Εκκίνηση ατράκτου ωρολογιακά-ανθωρολογιακά
M05	Σταμάτημα ατράκτου
M06	Αλλαγή εργαλείου στο σύστημα κατεργασιών
M07	Εκκίνηση αντλίας υγρού κοπής no2
M08	Εκκίνηση αντλίας υγρού κοπής no1
M09	Σταμάτημα αντλίας υγρού κοπής
M13	Εκκίνηση ατράκτου ωρολογιακά και εκκίνηση αντλίας υγρού κοπής
M14	Εκκίνηση ατράκτου ανθωρολογιακά και εκκίνηση αντλίας υγρού κοπής

M15	Κίνηση +
M16	Κίνηση -
M30	Τέλος προγράμματος και προετοιμασία επανεκτέλεσης

*Στο κομμάτι που θα παρουσιάσουμε τη πειραματική μας διαδικασία θα υπάρξει παρουσίαση του κώδικα που γράψαμε για το δικό μας πείραμα.*



Εικόνα 4.2

Διάταξη εργαλειομηχανής φρεζαρίσματος CNC

### **Πλεονεκτήματα**

1. Οι CNC μηχανές προγραμματίζονται για ένα σχέδιο το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές. Το τελικό προϊόν θα είναι ακριβώς το ίδιο κάθε φορά.
2. Λιγότερο εκπαιδευμένοι/έμπειροι άνθρωποι μπορούν να χειριστούν CNC μηχανές σε αντίθεση με τις χειροκίνητες οι οποίες απαιτούν εξασκημένους τεχνίτες.
3. Οι CNC μηχανές μπορούν να αναβαθμιστούν βελτιώνοντας το software το οποίο κινεί την εργαλειομηχανή.

4. Εκπαίδευση στο χειρισμό της CNC μηχανής είναι δυνατή μέσω του εικονικού προγράμματος. Το εικονικό πρόγραμμα είναι ένας προσομοιωτής της κατεργασίας. Ο χειρίστης εισάγει το κώδικα και αυτή η επιλογή εκτελείται εικονικά.
5. Οι CNC μηχανές μπορούν να προγραμματιστούν από εξελιγμένα σχεδιαστικά προγράμματα (CAD,Pro/Desktop), δίνοντας τη δυνατότητα στον κατασκευαστή να δημιουργήσει προϊόντα που δε μπορούν να κατασκευαστούν από χειροκίνητες εργαλειομηχανές ακόμα και αν τις χειρίζονται έμπειροι και ικανοί χειριστές.
6. Οι CNC μηχανές μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνεχόμενα για 24 ώρες μέσα σε μια μέρα, 365 μέρες το χρόνο και το μόνο που χρειάζονται είναι μια περιοδική συντήρηση.
7. Με τη συμβατότητα με μοντέρνα σχεδιαστικά προγράμματα, ο σχεδιαστής ενός προϊόντος μπορεί να προσημειώσει την ιδέα του χωρίς να χρειάζεται να φτιάξει κάποιο πρωτότυπο μοντέλο κάτι το οποίο είναι χρονοβόρο και έχει κόστος.
8. Ένα άτομο μπορεί να ελέγχει τη λειτουργία πολλών CNC μηχανών συγχρόνως καθότι τις περισσότερες φορές, μόλις προγραμματιστούν μπορούν να αφεθούν μόνες τους μέχρι την ολοκλήρωση τις εργασίας τους. Τις περισσότερες φορές μόνο τα κοπτικά εργαλεία χρειάζονται αντικατάσταση.

### **Μειονεκτήματα**

1. Οι CNC μηχανές είναι πιο ακριβές από τις χειροκίνητες αν και τα κόστη έχουν μειωθεί, και μειώνονται διαρκώς, με το πέρασμα του χρόνου.
2. Λόγω του ότι ο χειρισμός μιας CNC μηχανής χρειάζεται μόνο βασική εκπαίδευση και ικανότητες, σε αντίθεση με το παρελθόν όπου απαιτούνταν πολλά χρόνια εκπαίδευσης για να χειριστείς τις χειροκίνητες μηχανές, αυτό έχει οδηγήσει στην απώλεια πολλών παλιών τεχνικών.
3. Οι CNC μηχανές απαιτούν μικρό αριθμό εργατών για να τις χειριστεί σε αντίθεση με το παρελθόν. Η επένδυση σε CNC μηχανές έχει αυξήσει την ανεργία στο συγκεκριμένο τομέα.

4. Σε πολλές χώρες οι φοιτητές δε διδάσκονται πλέον το χειρισμό χειροκίνητων εργαλειομηχανών με αποτέλεσμα να μην εξελίσσουν και τις συγκεκριμένες ικανότητες που απαιτούνταν παλιότερα όπως των μαθηματικών και των μηχανικών ικανοτήτων.

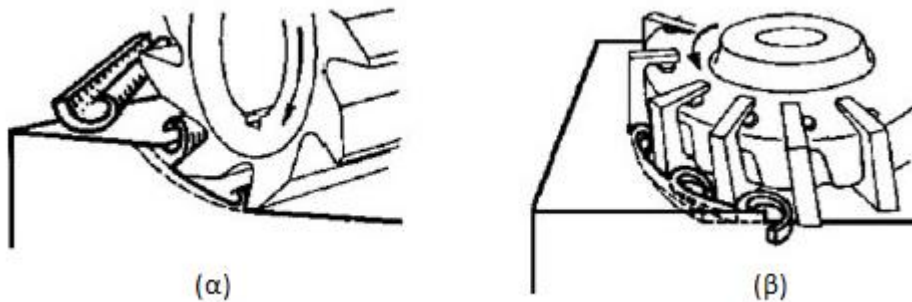
## 5. Φρεζάρισμα

### 5.1 Γενικά

Φρεζάρισμα είναι η αφαίρεση μετάλλου από ένα τεμάχιο με ένα περιστρεφόμενο κοπτήρα. Σε αυτή τη κατεργασία ο ρυθμός αποβολής υλικού ενισχύεται καθώς το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται σε υψηλή ταχύτητα κοπής. Το εργαλείο αυτό διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο. Η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου αποτελεί και την κύρια κίνηση κοπής.

Για τη συνέχεια της κοπής το κατεργαζόμενο κομμάτι, το οποίο είναι δεμένο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, μετατοπίζεται με προκαθορισμένο ρυθμό που είναι η πρόωση. Κατά την διάρκεια της κοπής, τα κοπτικά δόντια του κοπτήρα εισέρχονται και εξέρχονται το καθένα από το κομμάτι μέσα σε ένα μικρό μέρος της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα κοπτικά δόντια να προλαβαίνουν να απάγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά, όπως το εργαλείο της τόννευσης το οποίο εκτελεί συνεχή κοπή. Η κοπή για αυτό τον λόγο στο φρεζάρισμα, λέγεται διακοπτόμενη.

Οι κατεργασίες φρεζαρίσματος μπορούν να χωριστούν σε περιφερειακές και σε μετωπικές.

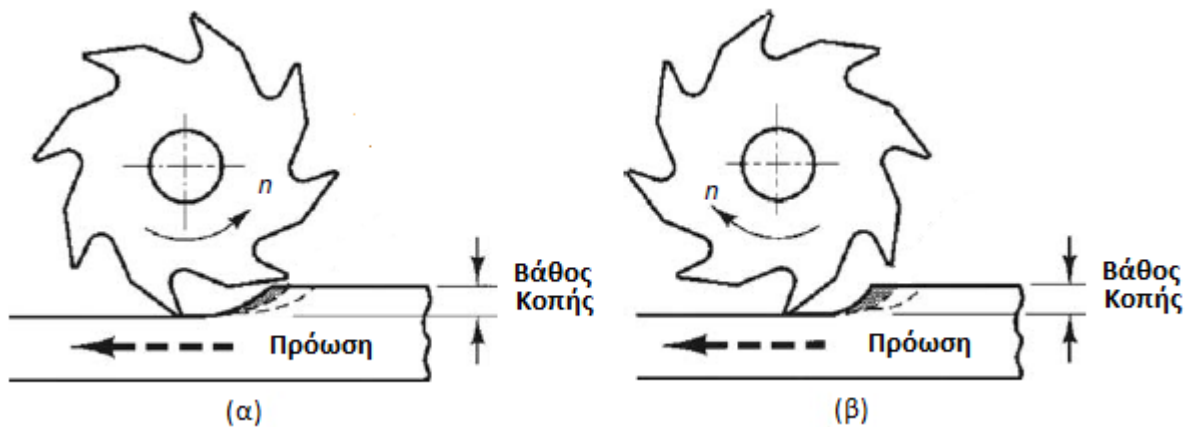


Σχήμα 5.1

(α) Περιφερειακό και (β) μετωπικό φρεζάρισμα

### 5.2 Περιφερειακό φρεζάρισμα

Στο περιφερειακό φρεζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει κυλινδρική μορφή, κόβοντας τα απόβλητα από το τεμάχιο με περιφερειακά διατεταγμένες κοπτικές ακμές. Τα προκύπτοντα απόβλητα έχουν στην περίπτωση αυτή σφηνοειδές σχήμα.



Σχήμα 5.2  
(α) Αντίρροπο και (β) ομόρροπο φρεζάρισμα

Στο περιφερειακό φρεζάρισμα, η πρόωση του τεμαχίου συνήθως είναι αντίθετη στην περιστροφή του εργαλείου αλλά μπορεί να συμβαίνει και το αντίθετο. Η επιλογή αυτή της κίνησης του τεμαχίου διακρίνει το φρεζάρισμα σε ομόρροπο και αντίρροπο (σχήμα 5.2). Στο αντίρροπο φρεζάρισμα, η κοπή ξεκινά από λεπτότερο απόβλητο και καταλήγει σε χοντρό απόβλητο, κάτι που δεν συμβαίνει στο ομόρροπο φρεζάρισμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στο ομόρροπο φρεζάρισμα το κοπτικό εργαλείο να δέχεται ισχυρές καταπονήσεις κατά την είσοδό του στο τεμάχιο και έτσι να αυξάνει ο κίνδυνος θραύσης του. Αντίστοιχα στο ομόρροπο φρεζάρισμα το κοπτικό εργαλείο, όπως προκύπτει από την κινηματική, "πιέζει" το τεμάχιο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι η κοπή είναι πιο σταθερή. Επιπρόσθετα, σε ορισμένα μέταλλα, το αντίρροπο φρεζάρισμα οδηγεί σε σκλήρυνση της κατεργασμένης επιφάνειας και σε κραδασμούς κατά τη κοπή και άμβλυση των δοντιών του κοπτικού εργαλείου.

### **Πλεονεκτήματα αντίρροπου φρεζαρίσματος**

1. Είναι ασφαλέστερο στη κοπή γιατί το εργαλείο δε 'σκαρφαλώνει' στο τεμάχιο.
2. Τα φορτία στα δόντια του κοπτικού εργαλείου ενεργούν σταδιακά.
3. Το κοπτικό εργαλείο δεν επηρεάζεται από την επιφάνεια του τεμαχίου.

### **Πλεονεκτήματα ομόρροπου φρεζαρίσματος φρεζαρίσματος**

1. Επίπεδα τεμάχια που δε μπορούν να συγκρατηθούν εύκολα μπορούν να κατεργαστούν με ομόρροπο φρεζάρισμα.
2. Μπορεί να εφαρμοστεί μεγαλύτερη γωνία ελευθερίας, κάτι το οποίο μειώνει τις απαιτήσεις σε ισχύ.
3. Είναι λιγότερο πιθανή η άμβλυση των δοντιών του κοπτικού εργαλείου.
4. Λιγότεροι κραδασμοί εμφανίζονται κατά την κοπή κάτι που οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας του τεμαχίου.

### **5.3 Μετωπικό φρεζάρισμα**

Στο μετωπικό φρεζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι κάθετος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει, εκτός των περιφερειακών κοπτικών ακμών του, κοπτικές ακμές στο μπροστινό πρόσωπό του.

### **5.4 Κινηματική φρεζαρίσματος**

**Ταχύτητα κοπής :** Η ταχύτητα κοπής στο φρεζάρισμα αντιπροσωπεύει την κίνηση του κοπτικού δοντιού στον χρόνο. Εκφράζει τον ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση (περιστροφή του εργαλείου). Στο φρεζάρισμα τεμαχίου με κοπτικό εργαλείο διαμέτρου **D** [mm], το οποίο περιστρέφεται με **n** στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής **u**, ισούται :

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]}$$

**Πρόωση :** Αντιστοιχεί στην μετατόπιση του τραπεζιού της εργαλειομηχανής και κατά συνέπεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, ανά λεπτό. Η πρόωση, επειδή εκφράζεται σαν η ταχύτητα κίνησης του τραπεζιού της εργαλειομηχανής, καλείται **ταχύτητα πρόωσης**. Η ταχύτητα της πρόωσης, εξαρτάται από το κοπτικό εργαλείο, το κατεργαζόμενο υλικό, το βάθος κοπής και την επιδιωκόμενη ποιότητα επιφάνειας. Η πρόωση στο φρεζάρισμα δίνεται με δύο μορφές :

- **πρόωση ανά λεπτό s :** είναι η μετατόπιση του τραπεζιού σε ένα λεπτό.



- **πρόωση ανά δόντι  $s'$**  : είναι η μετατόπιση του τραπεζιού στο διάστημα από την εισχώρηση ενός δοντιού της φρέζας μέχρι την εισχώρηση του επόμενου.

Η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές προώσεις είναι η εξής :

$$s = s' \cdot z \cdot n$$

n στροφές ανά λεπτό

z δόντια

### **5.5 Στοιχεία και είδη φρεζών**

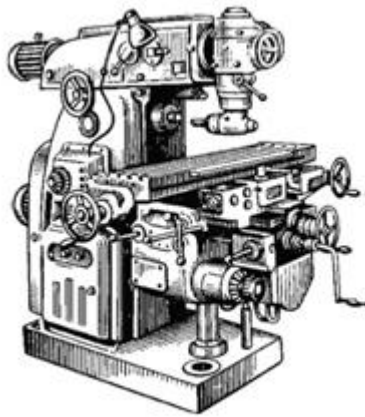
Οι φρεζομηχανές χρησιμοποιούνται για την κατεργασία επίπεδων επιφανειών, διαμορφωμένων επιφανειών, πολύπλοκων και ακανόνιστων περιοχών, κοπή οδοντωτών τροχών, παράγωγη ελικοειδών δοντιών και πολλών άλλων.

Κατατάσσονται ανάλογα με την εφαρμογή τους σε φρεζομηχανές γενικής χρήσης οι οποίες χρησιμοποιούνται για μικρή παράγωγη τεμαχίων και σε ειδικές φρεζομηχανές οι οποίες είναι σχεδιασμένες για την εκτέλεση ενός ή περισσότερων διακριτών διεργασιών σε καθορισμένο τεμάχιο. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται σε μαζική παράγωγη.

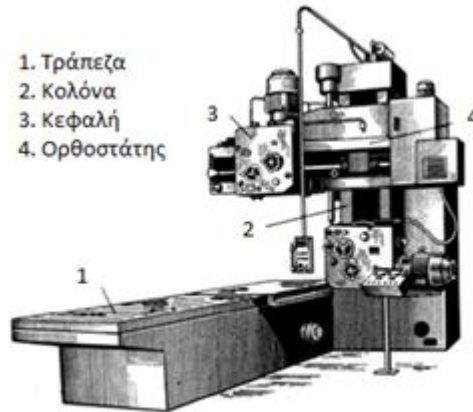
Οι φρεζομηχανές γενικής χρήσης χωρίζονται σε [13]:

1. Φρεζομηχανές τύπου γόνατος όπου χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα κινήσεως της τράπεζας τους κατά μήκος των αξόνων τρισσορθογώνιου συστήματος XYZ. Επιπλέον καθίσταται εφικτή, με κατάλληλες τροποποιήσεις, η χρησιμοποίηση υψηλών ταχυτήτων κοπής για κατεργασία ειδικώς ελαφρών μετάλλων και κραμάτων.
2. Φρεζομηχανές σταθερής κλίνης όπου η τράπεζα έχει τη δυνατότητα κινήσεως προς μια μόνο κατεύθυνση, τη διαμήκη. Οι λοιπές αναγκαίες κινήσεις (εγκάρσια και κατακόρυφος) πραγματοποιούνται από τα υπόλοιπα συγκροτήματα (κεφαλές κ.λ.π.)
3. Φρεζομηχανές τύπου κλίνης όπου έχουν τη δυνατότητα δισδιάστατης μετατόπισης της τράπεζας, δηλαδή κατά τη διαμήκη κατεύθυνση (παράλληλα προς το μέτωπο της εργαλειομηχανής), όπως και κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Κατακόρυφες κινήσεις πραγματοποιούνται από την κεφαλή.

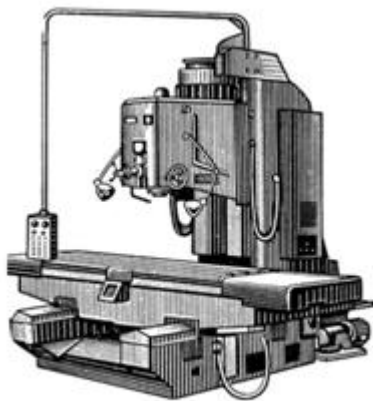
4. Φρεζομηχανές κυκλικής περιστρεφόμενης τράπεζας όπου η τράπεζα κινείται κυκλικά.



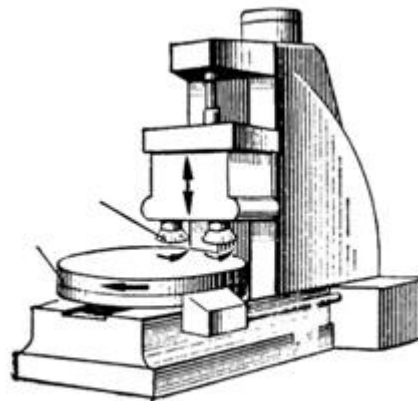
**Γόνατου**



**Τύπου κλίνης**



**Σταθερής κλίνης**

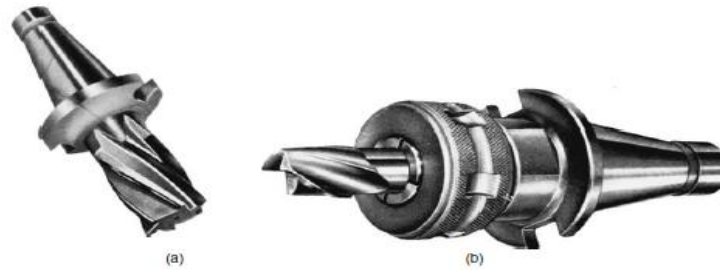


**Κυκλικής περιστρεφόμενης τράπεζας**

*Εικόνα 5.1  
Διάφορα είδη φρεζομηχανών*

## **5.6 Κοπτικά εργαλεία φρεζαρίσματος**

Κάθε κοπτικό εργαλείο φρεζαρίσματος επιλέγεται ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε. Το εργαλείο μπορεί να είναι αυτοφερόμενο και να έχει στη μία του άκρη υποδοχή έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί στην άτρακτο οριζόντιας φρεζομηχανής ή να έχει ευθεία ή κωνική υποδοχή έτσι ώστε να εισχωρήσει αρχικά στον σφιχτηρα ο οποίος στη συνέχεια θα τοποθετηθεί σε οριζόντια ή κάθετη φρεζομηχανή.



Εικόνα 5.2  
Κοπτικά εργαλεία φρεζαρίσματος

Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα βασικά είδη κοπτήρων φρεζαρίσματος.

Είδος φραιζαρίσματος	Είδος κοπήρα (φραιζας)	Μορφή κοπήρα
Περιφερικό	Περιφερικός ή κυλινδρικός	
	Κονδυλοειδής	
	Αυλάκων (τριπλής τομής ή τρικόπος)	
	Δισκοειδής	
	Σχίσματος (πριονόδισκος)	
	Μορφής (μορφοκοπήρας)	
Μετωπικό	Μετωπικός	
	Πρισματικός (οξείας γωνίας)	
	Μετωπικός (ενθετων οδόντων)	
Περιφερικό-Μετωπικό	Περιφερικός (κυλινδρικός)-μετωπικός	

Πίνακας 5.1  
Βασικά είδη κοπτήρων φρεζαρίσματος

## **6. AdvantEdge**

### **6.1 Γενικά**

Το AdvantEdge είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που έχει αναπτυχθεί ειδικά για τη μοντελοποίηση κατεργασιών κοπής και έτσι έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στο σχεδιασμό, το στήσιμο και τη βελτιστοποίηση μιας κατεργασίας αποβολής υλικού. Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθορίσει τις παραμέτρους της κατεργασίας και του κοπτικού εργαλείου με στόχο τη μείωση των δυνάμεων, των θερμοκρασιών και των παραμορφώσεων χωρίς να χρειαστεί να επιχειρήσει πραγματικές δοκιμές. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση χρημάτων και χρόνου παραγωγής που θα χρειάζονταν για το στήσιμο μια δοκιμής σε πραγματικές συνθήκες.

Ακολουθεί μια ανάλυση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και του τρόπου λειτουργίας του ίδιου του προγράμματος.

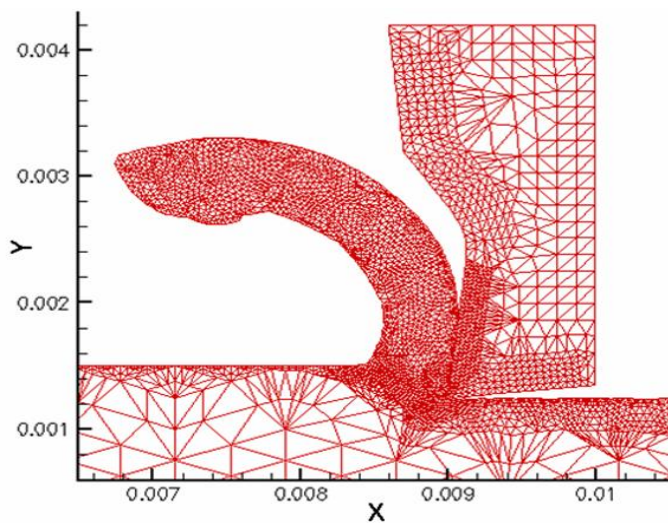
### **6.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων**

Γενικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) είναι μια υπολογιστική μέθοδος η οποία επιλύει με προσεγγιστικές και αριθμητικές μεθόδους τις θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν μία ευρεία

ομάδα προβλημάτων συνεχούς μέσου (πχ. προβλήματα παραμορφώσιμων στερεών, ανάλυσης κατασκευών και δομικών στοιχείων, μετάδοσης θερμότητας, μηχανικής ρευστών, κλπ) τα οποία έχουν αυθαίρετη γεωμετρία, συντοριακές συνθήκες και φόρτιση.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, για να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι που ουσιαστικά χωρίζουν το μεγάλο και ενιαίο πρόβλημα σε μικρά και απλοποιημένα. Η FEM εξάγει από τις οριακές συνθήκες συστήματα εξισώσεων τα οποία επιλύονται με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι, με την επίλυση μεγάλου πλήθους απλοποιημένων εξισώσεων οδηγούμαστε προσεγγιστικά κοντά στη λύση του μεγάλου προβλήματος σε μικρό χρόνο. Η μέθοδος οδηγεί στα αποτελέσματα της πραγματοποιώντας 3 βήματα [9].

Αρχικά πραγματοποιείται η διακριτοποίηση των συνεχών μέσων. Τα αντικείμενα δηλαδή χωρίζονται σε μικρότερα στοιχεία σε σχήμα τετραγώνου ή τριγώνου (σχήμα 6.1) και όλα μαζί απαρτίζουν το πλέγμα. Γίνεται κατανοήτο ότι αύξηση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί και σε καλύτερη προσέγγιση των μέσων αλλά και σε αύξηση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος..



Σχήμα 6.1

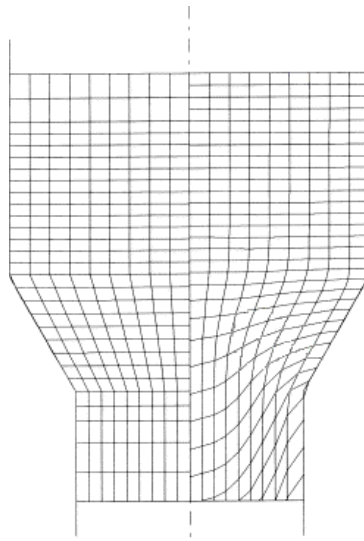
Διακριτοποίηση συνεχών μέσων στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Ακολουθεί ο καθρισμός ιδιοτήτων στα πεπερασμένα στοιχεία που αφορούν το μέσο που μοντελοποιείται και τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το υλικό ή από το περιβάλλον του μοντέλου και τοποθετούνται στις σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος. Στην συνέχεια τοποθετούνται οι φορτίσεις της κατασκευής με τη μορφή οριακών συνθηκών στους κόμβους των στοιχείων που φορτίζονται.

Το τελευταίο βήμα είναι η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων που είναι σε μητρική μορφή, και ο υπολογισμός των βαθμών ελευθερίας των κόμβων οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τους άγνωστους. Με την υπόθεση ότι το πραγματικό σύστημα έχει άπειρους βαθμούς ελευθερίας, όσο πιο πολλά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται τόσο πιο πολύ προσεγγίζεται η πραγματικότητα. Αυξανόμενου, όμως, του αριθμού των στοιχείων αυξάνει και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς μέχρι που φτάνουμε σε ένα σημείο όπου περαιτέρω αύξηση των στοιχείων οδηγεί σε ελάχιστη διαφορά στην ακρίβεια και σε τεραστία διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο.

Για την επίλυση των εξισώσεων στις κοπές, όπου δύο διαφορετικά υλικά, αυτά του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου, βρίσκονται σε επαφή και σχετική κίνηση, εφαρμόζονται κυρίως δύο τεχνικές: η μοντελοποίηση Lagrange και η μοντελοποίηση Euler.(σχήμα 6.2). Κάθε μία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Η μοντελοποίηση Lagrange είναι ιδανική για περιγραφή κατεργασιών σε ελεύθερες επιφάνειες, όπου η διαδικασία πραγματοποιείται στις απαραμόρφωτες άκρες του πλέγματος, αλλά παρουσιάζει αριθμητικά προβλήματα όταν το πλέγμα έχει υποστεί παραμόρφωση και απαιτεί επαναπροσδιορισμό του. Η μοντελοποίηση Euler μπορεί να μην ανταποκρίνεται το ίδιο στις απαραμόρφωτες επιφάνειες αλλά έχει πλεονέκτημα ότι

ανταποκρίνεται σε συνθήκες μεγάλων παραμορφώσεων. Να τονίσουμε σε αυτό το σημείο ότι το AdvantEdge χρησιμοποιεί τη μοντελοποίηση Lagrange.



Σχήμα 6.2

Μοντελοποίηση κατά Euler (αριστερά) και Lagrange(δεξιά)

### **6.3 Λειτουργώντας το πρόγραμμα**

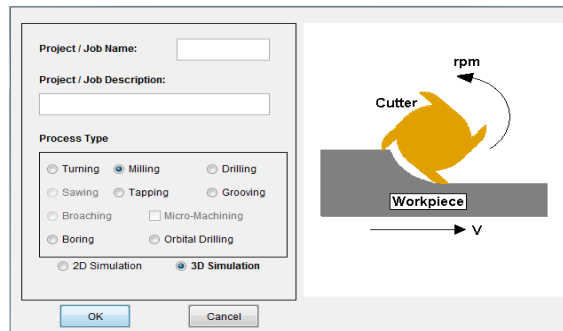
#### **Γενικά**

Ουσιαστικά μια ολοκληρωμένη κατεργασία με το πρόγραμμα, χωρίζεται σε 3 δραστηριότητες. Αρχικά έχουμε τη διαδικασία του στησίματος της κατεργασίας, που θέλουμε να προσομοιώσουμε, που περιλαμβάνει τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου, τα υλικά τεμαχίου και εργαλείου καθώς και τις συνθήκες κοπής. Στη συνέχεια περνάμε στην εκτέλεση των υπολογισμών από το πρόγραμμα με βάση τα στοιχεία που του δώσαμε κατά τη διάρκεια του στησίματος και τέλος έχουμε τη λειτουργία παρουσίασης των αποτελεσμάτων που περιλαμβάνει τις δυνάμεις κοπής, τις θερμοκρασίες κ.λπ.

Στην παρουσίαση του προγράμματος που θα ακολουθήσει θα αναφερθούμε[18] στη περίπτωση της τρισδιάστατης προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική.

### Ορίζοντας τις παραμέτρους

Ξεκινώντας μια νέα τρισδιάστατη μοντελοποίηση, αρχικά καθορίζουμε το είδος της κατεργασίας ανάμεσα από τις επιλογές της τórνευσης, του φρεζαρίσματος, της διάτρησης με ποικίλα κοπτικά εργαλεία και της δημιουργίας σπειρωμάτων (εικόνα 6.1). Παρακάτω, παρουσιάζουμε τα βήματα εισαγωγής δεδομένων με ενδεικτική την περίπτωση του φρεζαρίσματος:

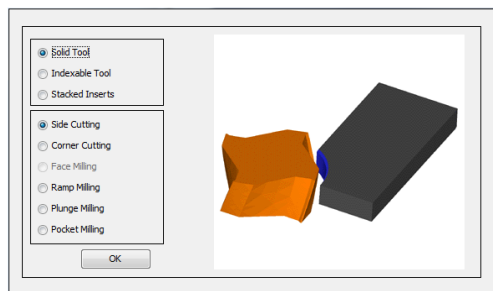


Εικόνα 6.1

Επιλογή είδους μοντελοποίησης και κατεργασίας στο Advantedge

1. Αρχικά, μεταφερόμαστε στις επιλογές φρεζαρίσματος που περιλαμβάνουν:

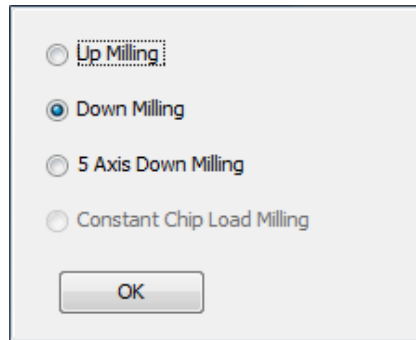
1. Αν το κοπτικό εργαλείο θα είναι ενιαίο ή πολλαπλών πλακιδίων ή με δέσμες πλακιδίων.
2. Αν πρόκειται για περιφερειακό φρεζάρισμα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κοπτική ακμή του εργαλείου ή αν πρόκειται για γωνιακό φρεζάρισμα όπου λαμβάνεται υπόψη η κοπτική ακμή ή αν πρόκειται για φρεζάρισμα με δυνατότητα οριζόντιας και κατακόρυφης πρόωσης ή αν πρόκειται για φρεζάρισμα με δυνατότητα μόνο κατακόρυφης πρόωσης και όχι οριζόντιας, όπου ουσιαστικά πρόκειται για διάτρηση σε φρέζα



Εικόνα 6.2

Επιλογή είδους εργαλείου και φρεζαρίσματος στο Advantedge

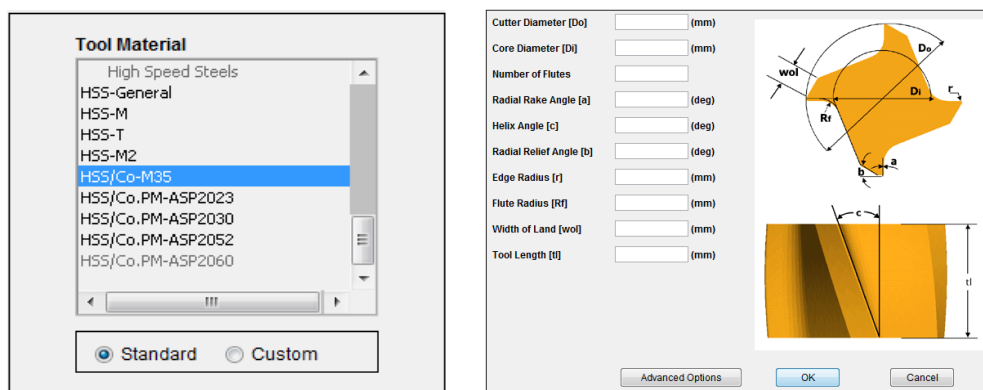
3. Αν πρόκειται για αντίρροπο (up milling) ή για ομόρροπο (down milling) ή για επιλογή συντεταγμένων του άξονα περιστροφής του εργαλείου ως προς το τεμάχιο ή για κοπή με σχηματισμό σταθερού αποβλήτου (δε προσφέρονταν σαν επιλογή).



Εικόνα 6.3

Επιλογή αντίρροπου και ομόρροπου φρεζαρίσματος στο Advantedge

2. Μετά το καθορισμό του είδους φρεζαρίσματος και της μορφής του κοπτικού εργαλείου, σειρά έχει η επιλογή του υλικού του κοπτικού εργαλείου (σχ.) καθώς και των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του όπως είναι διάμετρος πυρήνα, ο αριθμός δοντιών και οι διαφορές γωνίες και το ενεργό μήκος του κοπτικού εργαλείου. Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι αν έχει επιλεγεί το περιφερειακό φρεζάρισμα, τότε υπάρχει ξεχωριστή φόρμα (εικόνα 6.4) εισαγωγής δεδομένων σε σχέση με τα άλλα είδη φρεζαρίσματος για τον λόγο ότι στο περιφερειακό δε θα ληφθεί υπόψη η ακμή του κοπτικού εργαλείου στη κόψη. Επίσης στην επιλογή υλικού κοπτικού εργαλείου είναι δυνατή η εισαγωγή υλικού εκτός της καθορισμένης λίστας.

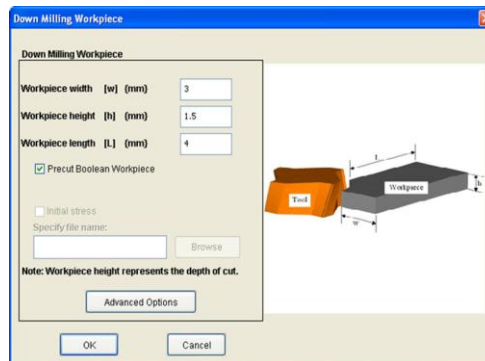


Εικόνα 6.4

Επιλογή υλικού κοπτικού εργαλείου και γεωμετρικών χαρακτηριστικών κοπτικού εργαλείου φρεζαρίσματος στο Advantedge



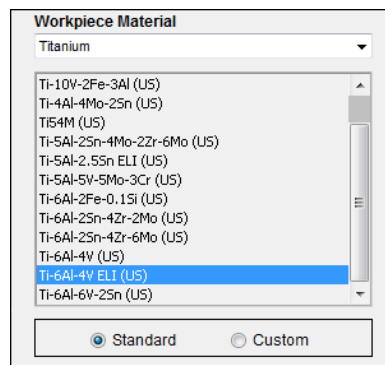
3. Στη συνέχεια ακολουθεί ο ορισμός του τεμαχίου ως προς το υλικό και τις διαστάσεις του. Πρέπει να τονίσουμε εδώ ότι κατά την εισαγωγή των διαστάσεων πρέπει να δοθεί προσοχή σε κάποιους περιορισμούς που παρουσιάζει το πρόγραμμα (π.χ. μεγάλες διαστάσεις τεμαχίου σε συνδυασμό με μικρή πρόωση οδηγεί σε κόλλημα του προγράμματος).



Εικόνα 6.5

Επιλογή διαστάσεων τεμαχίου στο Advantedge

Ως προς το υλικό, επιλέγεται αρχικά το μέταλλο και στη συνέχεια ακολουθούν όλα τα συνήθη κράματα του. Υπάρχει και η δυνατότητα εισαγωγής υλικού εκτός της καθορισμένης λίστας.



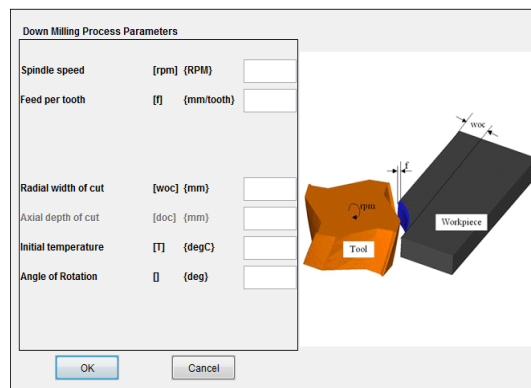
Εικόνα 6.6

Επιλογή υλικού τεμαχίου στο Advantedge

4. Ακολουθεί η εισαγωγή των συνθηκών κοπής, η αρχική θερμοκρασία, καθώς και ο ορισμός των μοιρών στροφής του κοπτικού εργαλείου από την αρχή μέχρι το τέλος της μοντελοποίησης. Αυτή η τελευταία παράμετρος είναι αρκετά σημαντική για την αποδοτικότητα και την επιτυχία της μοντελοποίησης ενός πειράματος. Μεγάλες γωνίες στροφής μπορούν να οδηγήσουν σε δυσλειτουργία του προγράμματος λόγω

της παρουσίας μεγάλου ενιαίου αποβλήτου (δεν είναι δυνατή, στη τρισδιάστατη ανάλυση φρεζαρίσματος, η μοντελοποίηση μικρών και μη ενιαίων απόβλητων όπως συμβαίνει σε υλικά όπως το τιτάνιο) και σύγκυψής του με το τεμάχιο ή σε απειρισμό των δυνάμεων αν η αναλογία διαστάσεων και πρόωσης είναι μικρή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Αν από την άλλη δοθεί πολύ μικρή γωνία στροφής θα πρέπει να υπάρξει προσοχή για το αν έχει γίνει επαρκής διείδυση του εργαλείου στο τεμάχιο έτσι ώστε το δείγμα να είναι επαρκές για το μέγεθος των δυνάμεων.

5.



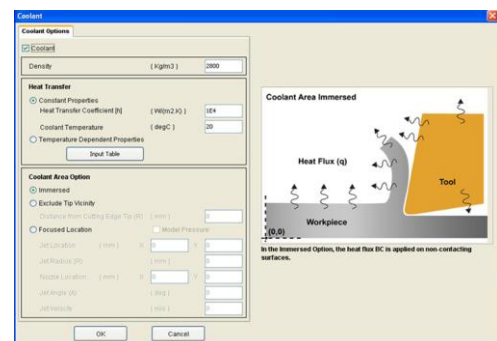
Εικόνα 6.7

Επιλογή συνθηκών κοπής στο Advantedge

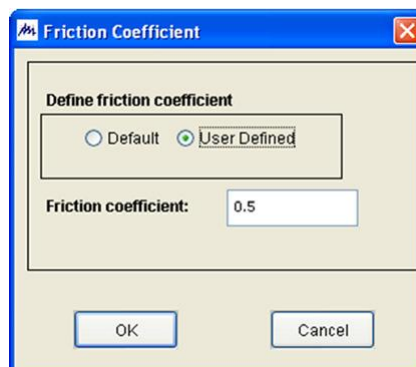
Τέλος θα πρέπει να δοθεί προσοχή και στις μονάδες μέτρησης των συνθηκών κοπής. Ταχύτητα ατράκτου σε στροφές ανά λεπτό, πρόωση σε mm ανά δόντι, βάθος κοπής σε mm και θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

### Συμπληρωματικές δυνατότητες

1. Μία από τις δυνατότητες του προγράμματος είναι και η χρήση υγρού κοπής ως ψυκτικό στη προσομοίωση της κατεργασίας. Πρέπει να οριστεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος είναι ανάλογος με το ψυκτικό υγρό που χρησιμοποιήθηκε, η αρχική θερμοκρασία (θερμοκρασία δωματίου) και τέλος οι επιλογές προσομοίωσης για υγρό κοπής που προσφέρει το πρόγραμμα και είναι οι εξής:



- a. Ψυκτικό υγρό σε όλη την διεπιφάνεια εργαλείου-τεμαχίου και στις επιφάνειες μη-επαφής.
  - b. Ψυκτικό υγρό σε όλη τη περιοχή εκτός από συγκεκριμένα σημεία όπου το ψυκτικό μπλοκάρεται από ειδικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας όπως η παραγωγή αποβλήτου με υπερβολική καμπυλότητα.
  - c. Ψυκτικό υγρό σε στοχευμένα σημεία. Πρέπει να καθοριστούν κατάλληλα ως προς του άξονες τα σημεία στα οποία εφαρμόζεται το ψυκτικό υγρό.
2. Δυνατότητα μεταβολής του συντελεστή τριβής  $\mu$ . Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί συντελεστή τριβής ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση Coulomb  $F_f \leq \mu \cdot F_n$ , όπου  $F_n$  είναι η δύναμη που ασκείται μεταξύ των επιφανειών και  $F_f$  η πραγματική δύναμη που ασκείται λόγω της τριβής. Αν επιθυμούμε να ορίσουμε δικό μας συντελεστή, αυτό γίνεται στο αντίστοιχο παράθυρο εντολών συντελεστή τριβής με επιτρεπόμενες τιμές προφανώς από 0 – 1.



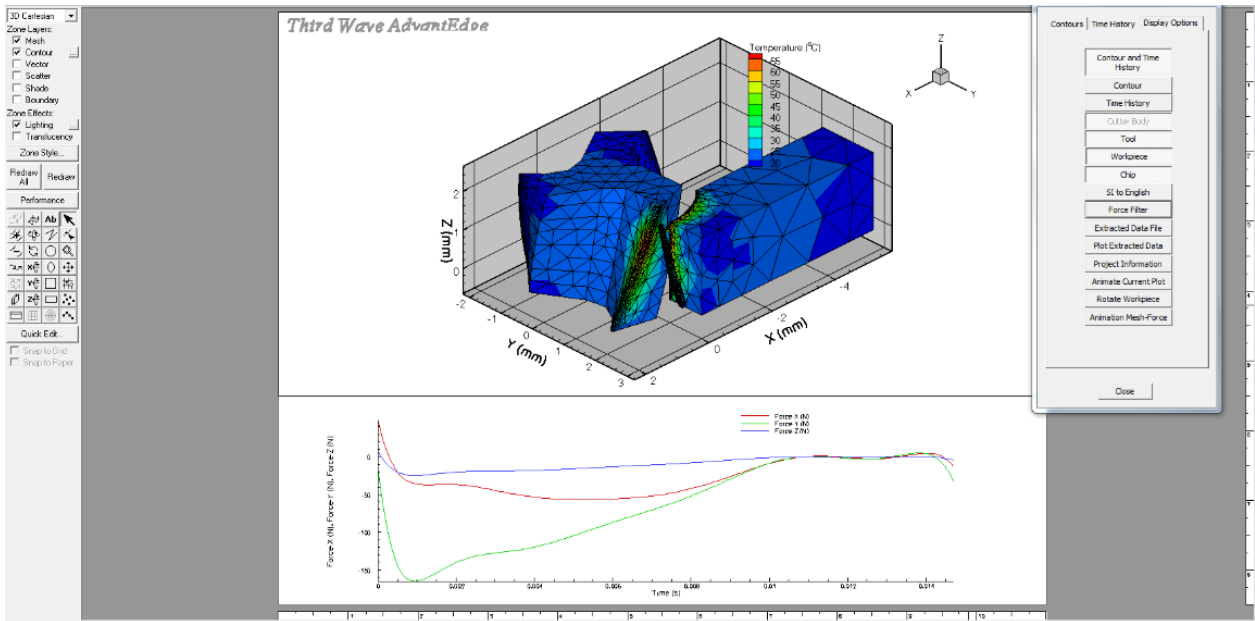
Εικόνα 6.8

Επιλογή συντελεστή τριβής στο Advantedge

#### 6.4 Εμφάνιση αποτελεσμάτων

Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται από το Tecplot όπου έχουμε γραφική απεικόνιση της κατεργασίας μας και πληθώρα επιλογών επ' αυτής που περιλαμβάνει τη κατανομή της θερμοκρασίας, το ρυθμό έκκλησης θερμότητας, τάσεις και παραμορφώσεις καθώς και ταχύτητα ανά άξονα. Οι όψεις, η εστίαση, η περιστροφή και όλα τα συναφή εργαλεία προβολής βρίσκονται στα αριστερά της οθόνης. Κάτω από τη γραφική απεικόνιση παρουσιάζεται το διάγραμμα το δυνάμεων με επιλογή γραφήματος όλων των τιμών αλλά και επιλογή προβολής τις συνάρτησης που προκύπτει από τις τιμές τους (curve fitting) και δείχνει τη τάση στην οποία κινήθηκαν οι δυνάμεις

των αξόνων X,Y,Z κατά την κατεργασία [19]. Όλα τα παραπάνων φαίνονται στην εικόνα 6.9.



Εικόνα 6.9  
Εμφάνιση αποτελεσμάτων από το Tecplot

## **7. Μέθοδος Taguchi**

### **7.1 Γενικά**

Η μέθοδος Taguchi έχει αναπτυχθεί για να βοηθήσει στο σχεδιασμό των πειραματικών διαδικασιών. Βοηθά στο να μεταφερθεί ο σχεδιασμός των πειραμάτων από το χώρο της αυστηρής στατιστικής στο κατασκευαστικό κόσμο. Ο γενικός στόχος της μεθόδου είναι η συλλογή δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για τη παράγωγη προϊόντων μεγάλης ποιότητας με το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό, κατασκευαστικό και χρονικό κόστος.

Ουσιαστικά η μέθοδος ελέγχει πως διαφορετικοί παράμετροι επηρεάζουν τη μέση τιμή και τη διακύμανση του χαρακτηριστικού στοιχείου που μελετάται στο πείραμα μέσω της χρησιμοποίησης ορθογωνικών πινάκων για την οργάνωση των παραμέτρων, και των επιπέδων τους για κάθε μια από αυτές, που επηρεάζουν το στοιχείο που μελετάται. Αντί να πραγματοποιηθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί, η μέθοδος Taguchi εξετάζει ζευγάρια από συνδυασμούς.

### **7.2 Διαδικασία σχεδιασμού πειράματος**

Τα γενικά βήματα της μεθόδου είναι τα εξής [23]:

1. Καθορισμός του στόχου της διαδικασίας δηλαδή του στοιχείου εκείνου που θα μελετηθεί η απόκλιση των τιμών του με βάση την αλλαγή των παραμέτρων που μπορεί αναλόγως να το επηρεάζουν πολύ, λίγο ή καθόλου.
2. Καθορισμός των παραμέτρων που αναφέρονται παραπάνω και επηρεάζουν τη διαδικασία. Οι παράμετροι αυτές είναι μεταβλητές κατά τη διάρκεια του πειράματος και είναι εύκολα ελεγχόμενες. Κάθε τιμή της παραμέτρου ονομάζεται επίπεδο. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων αυξάνεται και ο αριθμός των πειραμάτων που πρέπει να διεξαχθούν.
3. Δημιουργία του ορθογωνικού πίνακα με τιμές των παραμέτρων κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να προκύψουν οι συνθήκες του κάθε πειράματος.

### 7.3 Ορθογωνικοί πίνακες

Αναφέραμε προηγουμένως ότι μετά τον καθορισμό των παραμέτρων και των επιμέρους επιπέδων τους, πρέπει να δημιουργηθούν οι αντίστοιχοι ορθογωνικοί πίνακες οι οποίοι θα μας δείξουν τον αριθμό των πειραμάτων που θα διεξαχθούν καθώς και τις τιμές των παραμέτρων ανάλογα με τον αριθμό του πειράματος. Αυτό γίνεται με τα ακόλουθα βήματα:

a) Επιλογή αριθμού πειραμάτων από τον πίνακα 7.1:

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16
3	L9	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27
4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32			
5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50

Πίνακας 7.1

b) Διάταξη επιπέδων παραμέτρων , ανάλογα με τη κατηγορία του προηγούμενου πίνακα, με βάση τα παραδείγματα των ακόλουθων πινάκων:

Έστω η περίπτωση 4 παραμέτρων με 3 επίπεδα (τιμές επιπέδων 1,2,3). Από τον πίνακα φαίνεται ότι μπορούμε με τη μέθοδο να πραγματοποιήσουμε 9 πειράματα από τα 81 ( $=3^4$ ) που θα έπρεπε κανονικά. Η διάταξη των τιμών στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται στο πίνακα. Παρατηρώντας προσεκτικά την εναλλαγή των τιμών ανάλογα με τη στήλη που βρισκόμαστε γίνεται γρήγορα κατανοητό πώς διαμορφώνεται ο πίνακας οποιασδήποτε περίπτωσης. Παραθέτονται έτσι και οι πίνακες των περιπτώσεων 5 παραμέτρων με 4 επίπεδα και 7 παραμέτρων με 2 επίπεδα για άμεση σύγκριση.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ						
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Πίνακες 7.2  
 Παραδείγματα ορθογωνικών πινάκων Taguchi

## **8. Minitab**

### **8.1 Γενικά**

Το minitab είναι ένα στατιστικό πρόγραμμα που επιτρέπει τη στατιστική ανάλυση δεδομένων, που του καταχωρούνται ,και περιλαμβάνει τη δυνατότητα εύρεσης της συναρτησιακής σχέσης μεταξύ μεταβλητών (ανεξάρτητων και εξαρτημένων), την ανάλυση της διακύμανσής τους και πληθώρα άλλων δυνατοτήτων. Στη παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί για να μελετήσουμε το εύρος της διακύμανσης που θα παρουσιάσουν οι τιμές των δυνάμεων με ανεξάρτητες μεταβλητές το βάθος κοπής, τη πρόωση και τις στροφές καθώς επίσης και την συναρτησιακή σχέση κάθε δύναμης με τις παραμέτρους αυτές και τη διακύμανση επ' αυτής. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Εδώ θα γίνει μια πιο εκτεταμένη αναφορά της ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA).

### **8.2 Anova**

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) είναι μία στατιστική μέθοδος όπου ορίζοντας τα δεδομένα μιας μέτρησης ενός πειράματος και ορίζοντας ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές μπορούμε να αναλύσουμε τη μεταβλητότητα που υπάρχει σε αυτά τα δεδομένα και να προσδιορίσουμε ποιες είναι οι μεταβλητές με το μεγαλύτερο συντελεστή σε αυτή τη μεταβλητότητα [21].

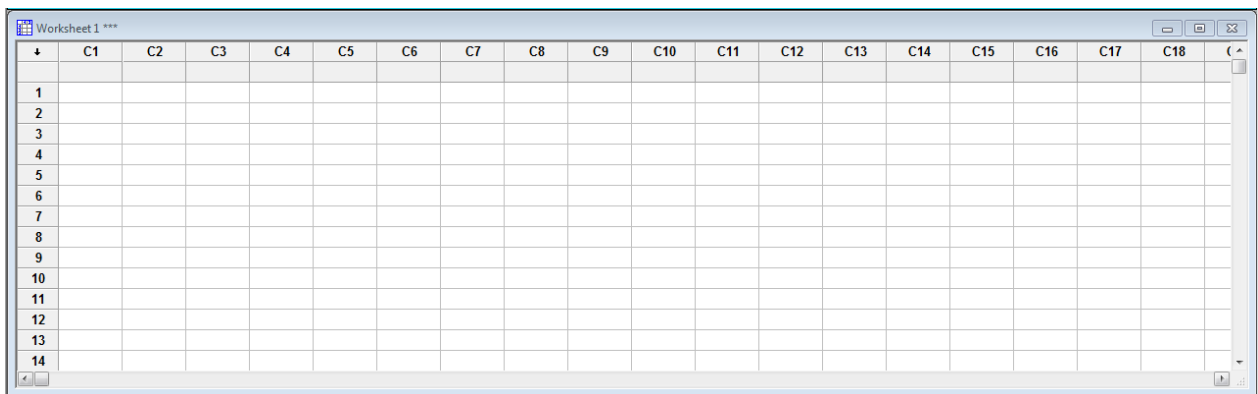
Όταν μελετάμε τα δεδομένα ενός δείγματος, ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε παρατηρήσεις ή σε πειραματικά. Στα πρώτα, δε μπορεί να υπάρξει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της διακύμανσης μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη.

Χαρακτηριστικός δείκτης για αυτό είναι ο δείκτης συντελεστή προσδιορισμού (R Square) ο οποίος εκφράζει το πόσο καλά μπορεί να προβλεφτεί η εξαρτημένη μεταβλητή με βάση τις τιμές της ανεξάρτητης (εξηγεί το ποσοστό της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής που οφείλεται στην επίδραση των ανεξάρτητων) καθώς και ο δείκτης P ο οποίος μας προσδιορίζει τη συνεισφορά κάθε μεταβλητής ξεχωριστά στην μεταβλητότητα. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται σαν παράγοντες και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές.



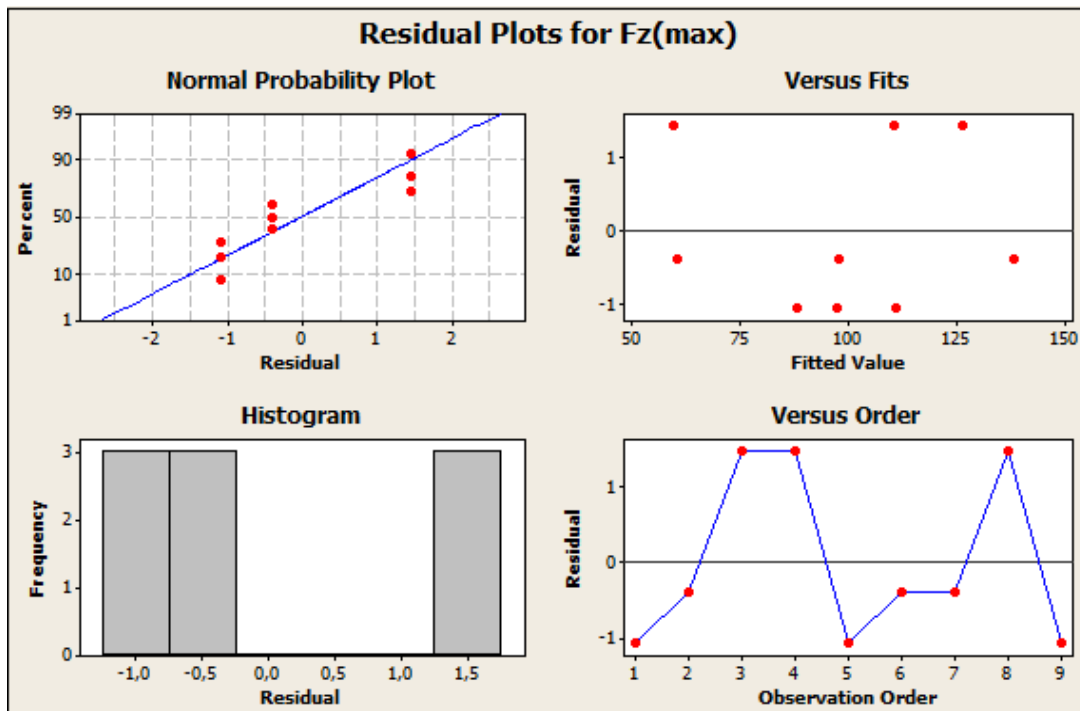
### 8.3 Λειτουργώντας το πρόγραμμα

Για να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε ανάλυση από το πρόγραμμα, πρέπει αρχικά να καταγραφούν στις στήλες εισαγωγής δεδομένων (εικόνα 8.1) οι τιμές ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός στο παράθυρο υπολογισμού Ανονα των ανεξάρτητων και των εξαρτημένων μεταβλητών. Υπάρχει και η πρόσθετη επιλογή για εμφάνιση των διαγραμμάτων διακύμανσης του δείγματος που εξετάζεται έτσι ώστε να υπάρχει και οπτική απεικόνιση του εύρους στο οποίο κινήθηκαν μεταξύ τους οι παρατηρήσεις (εικόνα 8.2) [21].



Εικόνα 8.1

Πίνακας εισαγωγής δεδομένων στο Minitab



Εικόνα 8.2

Διαγράμματα διακύμανσης στο Minitab

## **9. Πειραματική και υπολογιστική διαδικασία**

### **9.1 Γενικά**

Σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο εργαλείο, κατά τη κατεργασία περιφερειακού φρεζαρίσματος με υγρό κοπής, καθώς και της τραχύτητας της επιφάνειας του τεμαχίου και της φθοράς του κοπτικού εργαλείου για τις διάφορες συνθήκες κοπής.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο μηχανουργείο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η κατεργασία της ράβδου τιτανίου. Κοπή του τεμαχίου που θα χρησιμοποιούσαμε και μετά φινίρισμα σε τόρνο. Στη συνέχεια, χρειάστηκε μια σφήνα συγκράτησης κυλινδρικού σχήματος έτσι ώστε να συγκρατηθεί το τεμάχιο στην κυλινδρική εσοχή του δυναμόμετρου, κάτι το οποίο μείωσε τη διάμετρό του.

Ακολούθησε το στήσιμο του μετρητικού εξοπλισμού που περιελάμβανε τη στήριξη του δυναμόμετρου στην τράπεζα της εργαλειομηχανής, τη σύνδεση των καλωδίων με τους ενισχυτές σήματος και αυτούς με τη σειρά τους στον υπολογιστή.

Επόμενο βήμα ήταν το στήσιμο της εργαλειομηχανής ξεκινώντας με την εισαγωγή του υγρού κοπής στο νεπόζιτο, του εργαλείου στο μύλο των εργαλείων και του G κώδικα από την κονσόλα της CNC εργαλειομηχανής. Μετά την περάτωση του κάθε πειράματος εξετάζονταν η φθορά του κοπτικού εργαλείου στο μεταλογραφικό εργαστήριο με τη βοήθεια του μικροσκοπίου και της διάταξης προβολής. Παράλληλα εξετάζονταν και η τραχύτητα των τεμαχίων με τραχύμετρο.

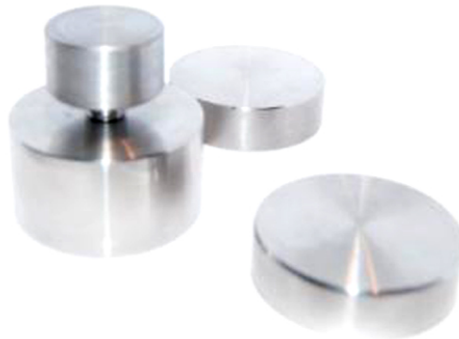
Μετά την καταγραφή των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση στον υπολογιστή και πρόεκυψαν τα διαγράμματα των δυνάμεων κοπής τα οποία στη συνέχεια θα συγκριθούν με τα δεδομένα και τα διαγράμματα που πρόεκυψαν από το πρόγραμμα μοντελοποίησης.

### **9.2 Τεμάχιο**

Πρόκειται για κυλινδρικό τεμάχιο διαμέτρου 50 mm και πάχους 40 mm από κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V ELI. Οι περιεκτικότητες κάθε συστατικού του κράματος φαίνονται στον πίνακα μαζί και με όλες της απαραίτητες πληροφορίες για τις μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητές του. Πρόκειται για ένα κράμα πολύ διαδεδομένο στη βιομηχανία και ένα 'εξωτικό' υλικό κατάλληλο για τη μελέτη.

Το τεμάχιο μας αποκόπηκε από τη συνολική ράβδο και στο χειροκίνητο τόρνο πραγματοποιήθηκε το φινίρισμά του. Λόγω της ανάγκης για συγκράτηση πάνω στη κυλινδρική εσοχή του δυναμόμετρου χρειάστηκε εισαγωγή στο τεμάχιο μέσω σφήνας

ενός κυλινδρικού υποδοχέα με διαστάσεις ίδιες με αυτές της υποδοχής του δυναμόμετρου. Αυτό το γεγονός μείωσε την ακτίνα του υλικού μας από το τεμάχιο και σε συνδυασμό με κάποιες δοκιμαστικές κοπές που πραγματοποιήθηκαν μας ανάγκασε να αλλάξουμε τον αρχικό σχεδιασμό για την κατεργασία υπό το φόβο ότι πιθανόν να μην πραγματοποιηθούν όλα τα πειράματα. Συγκεκριμένα κατεργαστήκαμε στη φρέζα το τεμάχιο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αφαιρεθούν δυο ημικύκλια δεξιά και αριστερά από την κεντρική επιφάνεια και στη συνέχεια, μετά την τοποθέτηση του δυναμόμετρου κάθετα στην τράπεζα της εργαλειομηχανής, να κατεργαστεί αυτή η εσωτερική επιφάνεια περιφερειακά εξασφαλίζοντας ότι θα πραγματοποιηθούν όλα τα πειράματα.



*Εικόνες 9.1  
Δυναμόμετρο και τεμάχιο τιτανίου*

<b>Titanium Ti-6Al-4V ELI</b>	
<b>Physical Properties</b>	
Density	Metric 4.43 g/cc
<b>Mechanical Properties</b>	
Hardness, Brinell	Metric 326
Hardness, Knoop	354
Hardness, Rockwell C	35
Hardness, Vickers	341
Tensile Strength, Ultimate	860 MPa
Tensile Strength, Yield	790 MPa
Elongation at Break	15.0 %
Modulus of Elasticity	113.8 GPa
Compressive Yield Strength	860 MPa
Notched Tensile Strength	1170 MPa
Ultimate Bearing Strength	1740 MPa
Bearing Yield Strength	1430 MPa
Poissons Ratio	0.342
Charpy Impact	24.0 J
Fatigue Strength	140 MPa @# of Cycles 1.00e+7
	300 MPa @# of Cycles 1.00e+7
Fracture Toughness	100 MPa-m <sup>1/2</sup>
Shear Modulus	44.0 GPa
Shear Strength	550 MPa
<b>Electrical Properties</b>	
Electrical Resistivity	Metric 0.000178 ohm-cm
Magnetic Permeability	1.00005
Magnetic Susceptibility	0.00000330
<b>Thermal Properties</b>	
CTE, linear	Metric 8.60 μm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C
	9.20 μm/m-°C @Temperature 20.0 - 315 °C
	9.70 μm/m-°C @Temperature 20.0 - 650 °C
Specific Heat Capacity	0.5263 J/g-°C
Thermal Conductivity	6.70 W/m-K
Melting Point	1604 - 1660 °C
Solidus	1604 °C
Liquidus	1660 °C
<b>Component Elements Properties</b>	
Aluminum, Al	Metric 5.50 - 6.50 %
Carbon, C	<= 0.0800 %
Hydrogen, H	<= 0.0125 %
Iron, Fe	<= 0.250 %
Nitrogen, N	<= 0.0300 %
Other, each	<= 0.100 %
Other, total	<= 0.400 %
Oxygen, O	<= 0.130 %
Titanium, Ti	88.0975 - 91.0 %
Vanadium, V	3.50 - 4.50 %

Πίνακας 9.1  
Ιδιότητες κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V ELI

### 9.3 Συνθήκες κοπής

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η πρόωση, το βάθος κοπής και οι στροφές της ατράκτου της εργαλειομηχανής. Επιλέχθηκαν 3 τιμές από κάθε παράμετρο με γνώμονα ότι έτσι, λόγω της μεθόδου Taguchi, θα πραγματοποιηθούν 9 πειράματα που κρίθηκε ικανοποιητικός αριθμός αναλογιζόμενοι και τις διαστάσεις του προς κατεργασία τεμαχίου. Οι τιμές για τις στροφές της ατράκτου επιλέχθηκαν από το διαδικτυακό κατάλογο του κατασκευαστή του κοπτικού εργαλείου με τις προτεινόμενες τιμές για φρεζάρισμα τιτάνιου με το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο ταχυχάλυβα. Όσον αφορά για τη πρόωση και το βάθος κοπής επιλέξαμε συνήθεις τιμές που αντιστοιχούν για τα δεδομένα που εξετάζουμε. Έχουμε λοιπόν:

Βάθος κοπής(mm): 0,3 0,6 0,9

Στροφές ατράκτου(rpm): 700 850 1000

Πρόωση(mm/min): 75 100 125

Έχουμε δηλαδή 3 παραμέτρους με 3 επίπεδα για κάθε παράμετρο. Έτσι ο πίνακας Taguchi θα είναι διαστάσεων 9x9. Ο βαθμός επηρεασμού κάθε παραμέτρου στις δυνάμεις, κατά το φρεζάρισμα, αναζητήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία και βρέθηκε ότι το μεγαλύτερο βαθμό επηρεασμού έχει το βάθος κοπής, έπεται η ταχύτητα κοπής και τέλος η πρόωση. Με αυτή τη σειρά τοποθετήθηκαν και στο πίνακα που κατασκευάσαμε στα πρότυπα της μεθόδου για να δημιουργήσουμε συνδυασμούς μεταξύ των παραμέτρων και των επιπέδων τους και να δούμε πως ανταποκρίνεται το υπολογιστικό πρόγραμμα σε αυτούς. Ο πίνακας των πειραμάτων και των συνθηκών κοπής φαίνεται παρακάτω:

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ(mm)	ΣΤΡΟΦΕΣ(rpm)	ΠΡΟΩΣΗ(mm/min)
1	0,3	700	75
2	0,3	850	100
3	0,3	1000	125
4	0,6	700	100
5	0,6	850	125
6	0,6	1000	75
7	0,9	700	125
8	0,9	850	75
9	0,9	1000	100

*Πίνακας συνθηκών κοπής πειραματικής διαδικασίας*

## 9.4 Εργαλειομηχανή

Πρόκειται για τη CNC φρέζα MX-45VAE της εταιρείας Okuma. Το εργαλείο στρέφεται από ηλεκτροκινητήρα ισχύος 11 KW ενώ για τη πρόωση των αξόνων X – Y έχουμε κινητήρα 3 KW και για τον άξονα Z κινητήρα 4 KW. Τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται παρακατω.

### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Μήκος τράπεζας 1000 mm  
Πλάτος τράπεζας 430 mm  
Κίνηση άξονα X 760 mm  
Κίνηση άξονα Y 460 mm  
Κίνηση άξονα Z 450 mm  
Αριθμός εργαλείων στο μύλο: 20  
Στροφές ατράκτου:  
από 50 rpm  
έως και 7000 rpm  
Εύρος πρόωσης 1 – 20.000 mm/min  
Συνολικό βάρος 6000 kg  
Ολίκες διαστάσεις:  
Μήκος 2380 mm  
Πλάτος 2200 mm  
Ύψος 2650 mm



Παραθέτουμε το κώδικα με τον οποίο προγραμματίσαμε την εργαλειομηχανή. Αφορά το 9ο πείραμα.

N10 G92 G21	Μετρητικές μονάδες συντεταγμένων
N20 M03 S1000	Ωρολογιακή κίνηση ατράκτου στις 1000 στροφές
N30 G00 X-50 Y30 Z0	Ταχεία κίνηση σε σημείο με συντεταγμένες στους άξονες x,y ίδιες με του σημείου εκκίνησης
N40 G01 Z5.4 F100	Γραμμική κίνηση στο σημείο εκκίνησης πρόωση 100mm/min
N50 G01 Y-30	Γραμμική κίνηση (έναρξη κατεργασίας)

N60 G01 Z-50

Γραμμική κίνηση σε σημείο μακριά από το τεμάχιο με το πέρας της κατεργασίας

N70 G00 Z200

Ταχεία κίνηση ανύψωσης του εργαλείου

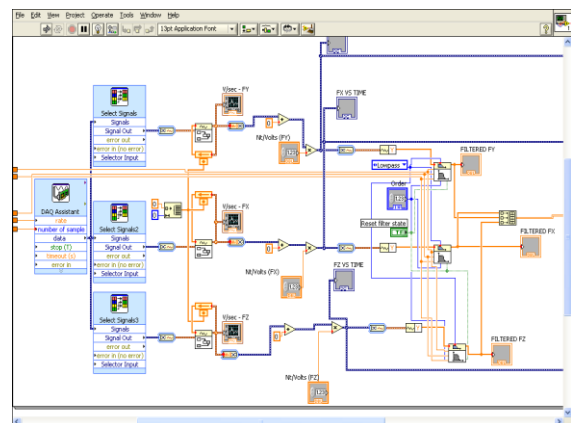
N80 M30

Τέλος προγράμματος και προετοιμασία επανεκτέλεσης

### 9.5 Μετρητική διάταξη

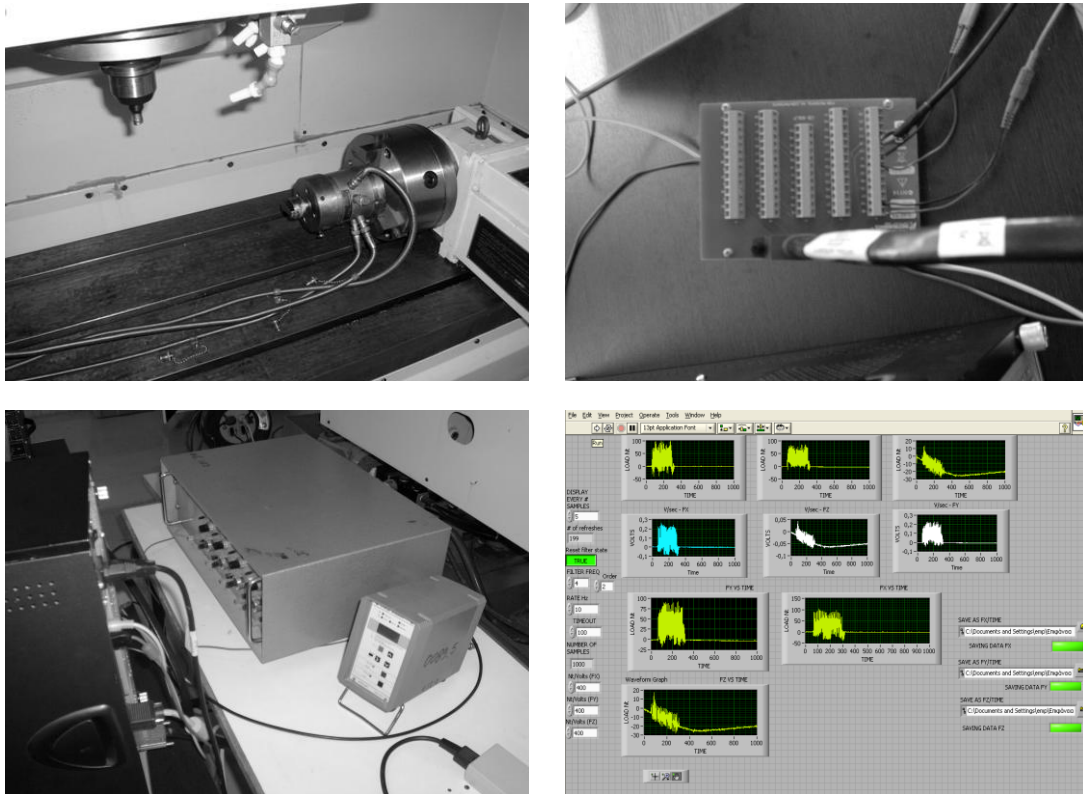
Η μετρητική μας διάταξη περιλαμβάνει το δυναμόμετρο KISTLER-9273, τα καλώδια σύνδεσης από το δυναμόμετρο στους ενισχυτές σήματος, τους ενισχυτές σήματος, την κάρτα σύνδεσης των ενισχυτών με τον υπολογιστή και τέλος το μετρητικό πρόγραμμα υπολογιστών Lab-View. Για την ανάλυση της φθοράς το μικροσκόπιο το οποίο ήταν συνδεδεμένο στον υπολογιστή του μεταλλογραφικού εργαστηρίου και το πρόγραμμα για τη φωτογράφιση του εργαλείου μετά από κάθε πείραμα.

Αρχικά συνδέσαμε κατάλληλα τα καλώδια από το δυναμόμετρο στους ενισχυτές σήματος και μετά στη μετρητική κάρτα έτσι ώστε να μεταφερθούν στον υπολογιστή και στο πρόγραμμα Lab-View. Στο πρόγραμμα έπρεπε να οριστούν κατάλληλα ποιες ήταν οι πηγές δεδομένων από κάθε καλώδιο σύνδεσης(αντιστοιχία Fx-Fy-Fz), σε ποιον ενισχυτή είχαν συνδεθεί και που να αποθηκευτούν έτσι ώστε να γίνει η εξαγωγή τους και η ανάλυση τους στο πρόγραμμα Excel εύκολα. Ο χρόνος μετρήσεων του προγράμματος καθορίζονταν κάθε φορά ανάλογα με το πείραμα προς εκτέλεση καθότι για πειράματα με μεγαλύτερες προώσεις απαιτούνταν λιγότερος χρόνος μέτρησης, Δεξιά απεικονίζεται το παράθυρο καθορισμού των παραπάνω στοιχείων για το πρόγραμμα.



### 9.6 Κοπτικό εργαλείο

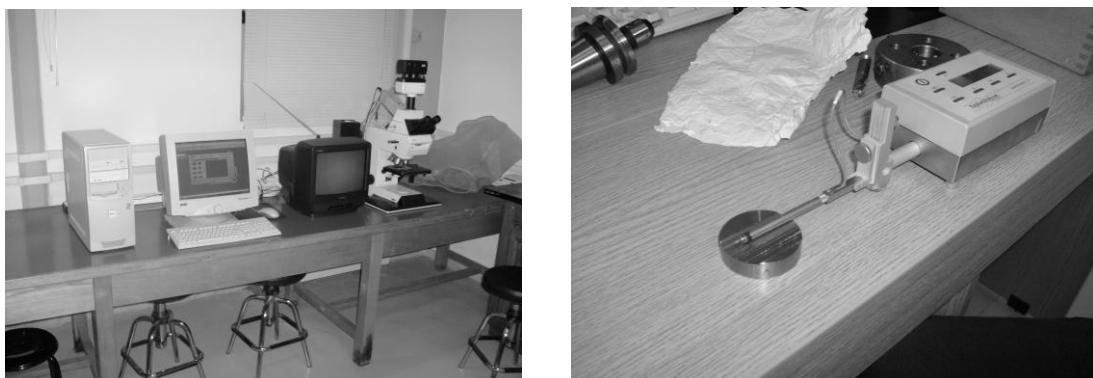
Πρόκειται για κονδύλι ταχυχάλυβα, μοντέλο SVG 1701, 3 δοντιών και διαμέτρου 12 mm, χωρίς επικάλυψη, της εταιρείας Clarkson and Osborn. Η σύστασή του περιλαμβάνει τη προσθήκη κοβαλτίου σε ποσοστό 5%.



Εικόνες 9.2

Από πάνω αριστερά και ωρολογιακά: (α) Τεμάχιο συνδεδεμένο στο δυναμόμετρο στη τράπεζα της εργαλειομηχανής (β) μετρητική κάρτα (γ) ενισχυτές σήματος (δ) Lab-View

Παρακάτω φαίνεται το ηλεκτρονικό τραχύμετρο και η διάταξη μικροσκοπίου, τηλεόρασης και υπολογιστή για τη συλλογή φωτογραφιών του εργαλείου με σκοπό την ανάλυση της φθοράς του.



Εικόνες 9.3

Διάταξη καταγραφής φωτογραφιών από το μικροσκόπιο και τραχύμετρο





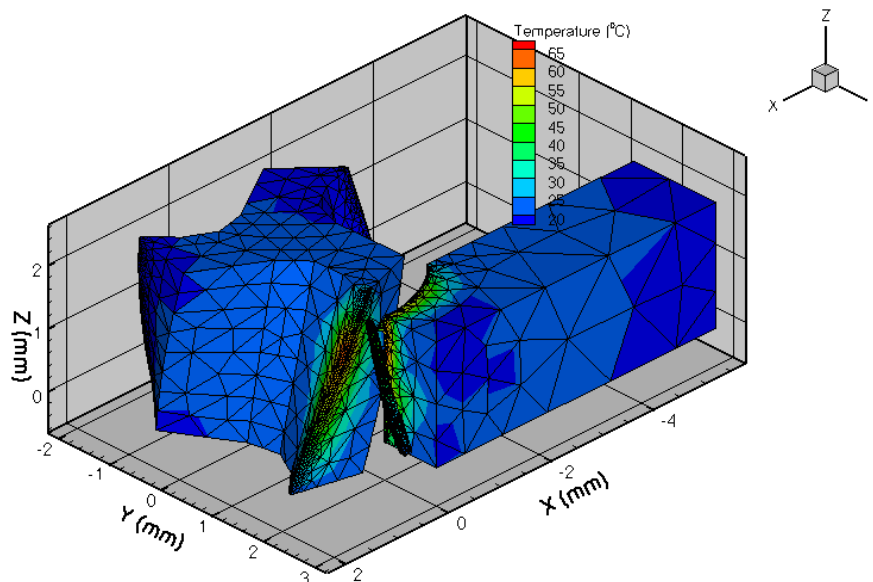
*Εικόνες 9.4  
Το κοπτικό εργαλείο*

### **9.7 Ορίζοντας τις παραμέτρους μας στο Advantedge**

Ακολουθεί μια παράθεση παρατηρήσεων σχετικά με τις ρυθμίσεις που κάναμε για να λειτουργήσουμε το υπολογιστικό πρόγραμμα και στη συνέχεια μια οπτικοποίηση τεμαχίου-εργαλείου και της κατεργασίας έτσι όπως παρουσιάζεται ,μετά την εισαγωγή των δεδομένων του εργαλείου και του τεμαχίου, από το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος και το Techplot.

1. Κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες παραμέτρους, που είναι αναγκαίες να δοθούν στο πρόγραμμα, με αυτές της πειραματικής διαδικασίας με εξαίρεση τις συνολικές διαστάσεις του τεμαχίου και το συνολικό μήκος του εργαλείου και αυτό γιατί οδηγούμασταν κάποιες φορές σε κόλλημα του προγράμματος με τις συνολικές διαστάσεις. Συνεπώς τις περιορίσαμε σε μικρό βαθμό χωρίς να επιφέρει κάποια ουσιαστική αλλαγή. Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα είναι αυτά που είχαμε και στα δικά μας πειράματα.
2. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του υγρού κοπής ορίστηκε από την προεπιλογή που είχε το πρόγραμμα καθώς δεν ήταν δυνατόν να βρεθεί για το δικό μας υγρό κοπής.
3. Το κοπτικό εργαλείο ρυθμίστηκε για συνολική στροφή 60 μοιρών. Καταλήξαμε σε αυτόν το ρυθμό μετά από πολλούς πειραματισμούς και λαμβάνοντας υπόψη πολλές παραμέτρους. Γι αυτό τον αριθμό μοιρών, το πρόγραμμα λαμβάνει 238.000 μετρήσεις και απαιτεί περίπου 3-4 μέρες για κάθε πείραμα για το δικό μας εύρος τιμών πρόωσης. Στις 60 μοίρες, λόγω των συνολικά 3 δοντιών του εργαλείου, προσομοιώνεται μία ολόκληρη είσοδος και έξοδος ενός δοντιού στο τεμάχιο μαζί με το χρόνο που απαιτείται για το να φτάσει το επόμενο δόντι στο τεμάχιο. Αυτό μας δίνει μια ολοκληρωμένη καμπύλη των δυνάμεων που περιλαμβάνει τόσες τις υψηλές δυνάμεις όταν το δόντι βρίσκεται μέσα στο τεμάχιο καθώς και τον μηδενισμό τους όταν βρίσκεται απ έξω. Όλα τα παραπάνω μας οδήγησαν στην επιλογή των 60 μοιρών στροφής του εργαλείου για την προσομοίωσή μας.

4. Τα διαγράμματα του Tecplot που θα παρουσιαστούν περιλαμβάνουν τόσο τις συνολικές μετρήσεις (μαζί με τις παλινδρομήσεις) ,στη διάρκεια της προσομοίωσης όσο και τη πολυωνυμική συνάρτηση που τις εκφράζει ακριβώς από κάτω. Η σύγκριση που θα γίνει στην ανάλυση πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων θα στηρίζεται στη μέγιστη τιμή του διαγράμματος της συνάρτησης με την αντίστοιχη τιμή του διαγράμματος των πειραματικών που παρουσιάστηκε προηγουμένως.
5. Η επιλογή κατεργασίας με ενιαίο εργαλείο μας οδηγεί στη καρτέλα εισαγωγής των χαρακτηριστικών γεωμετρικών στοιχείων του εργαλείου όπου περά από τα βασικά χαρακτηριστικά (συνολική διάμετρος, διάμετρος πυρήνα, αριθμός δοντιών κλπ.) το πρόγραμμα απαιτεί και άλλα χαρακτηριστικά όπως τη γωνία οδόντωσης, την ακτίνα κοπτικής ακμής και άλλα. Αυτά τα χαρακτηριστικά βρέθηκαν από τον διαδικτυακό κατάλογο εργαλείων της Clarkson and Osborn.
6. Η έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Version 5.8-026 2011.



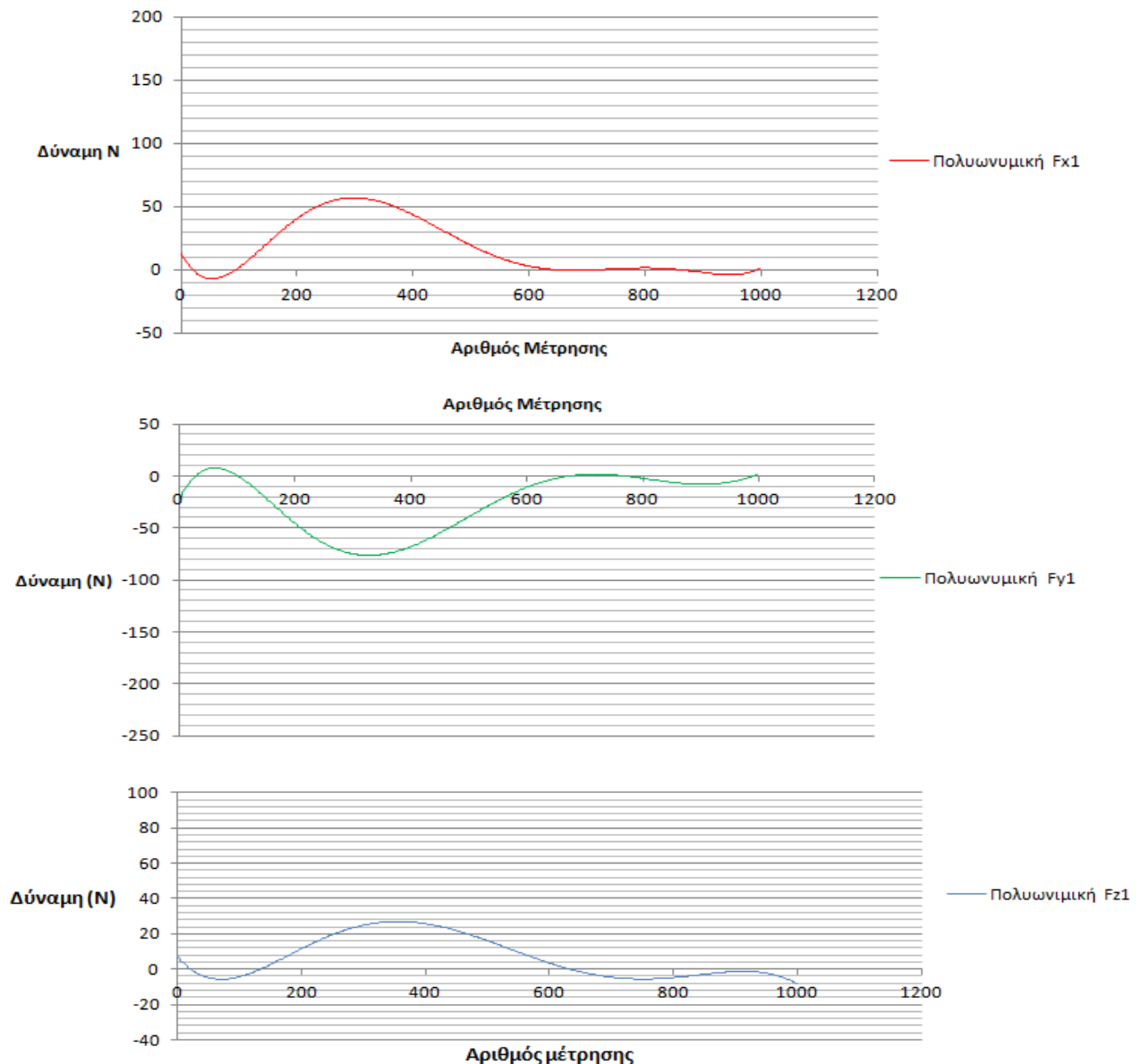
Εικόνα 9.5

Οπτική απεικόνιση της κατεργασίας μας από το Tecplot

## 10. Αποτελέσματα

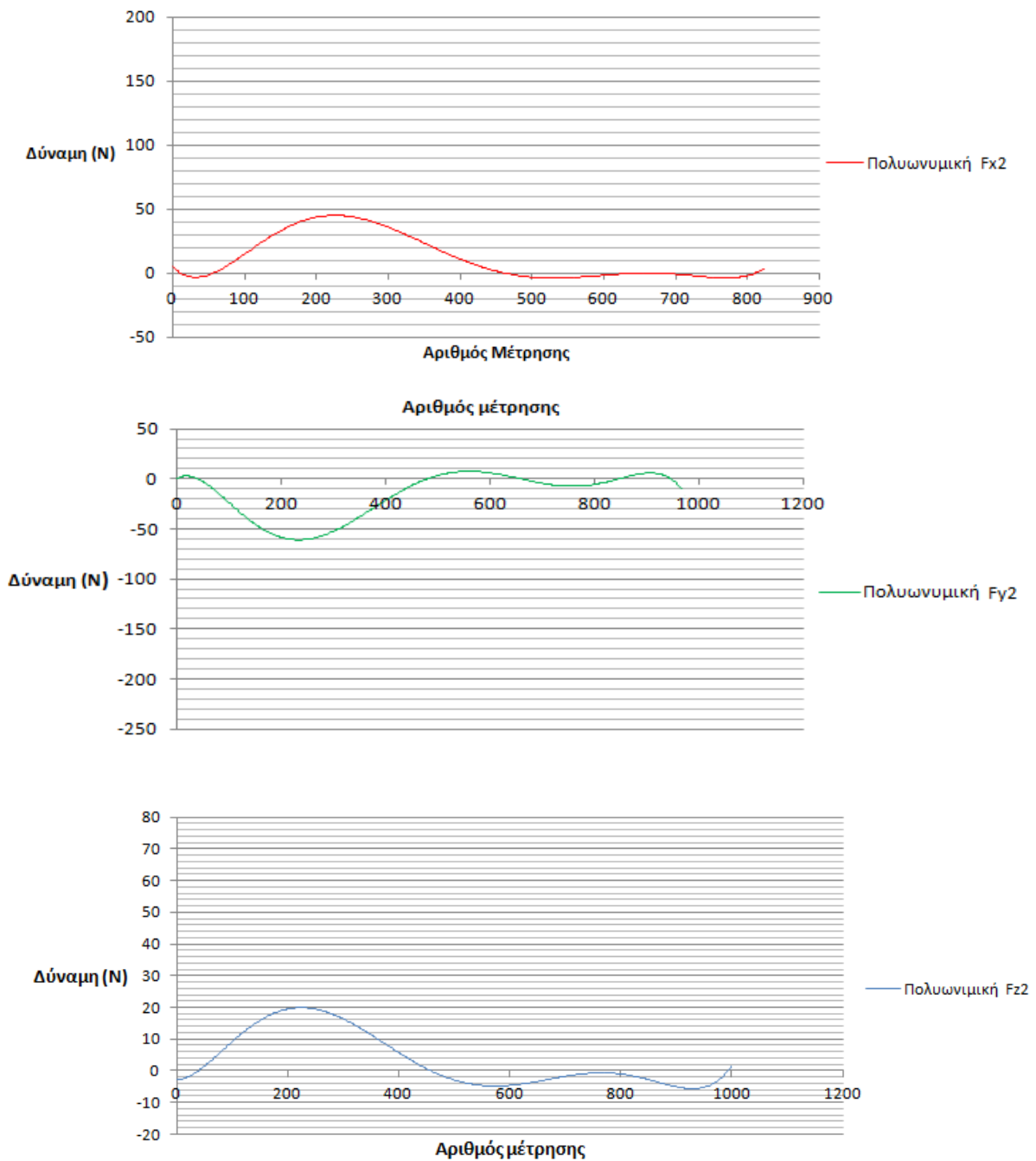
### 10.1 Πειραματικής διαδικασίας

Ακολουθεί η παράθεση της πολυωνυμικής γραμμής τάσης των αποτελεσμάτων των δυνάμεων κάθε πειράματος που μετρήσαμε κατά τη πειραματική διαδικασία:



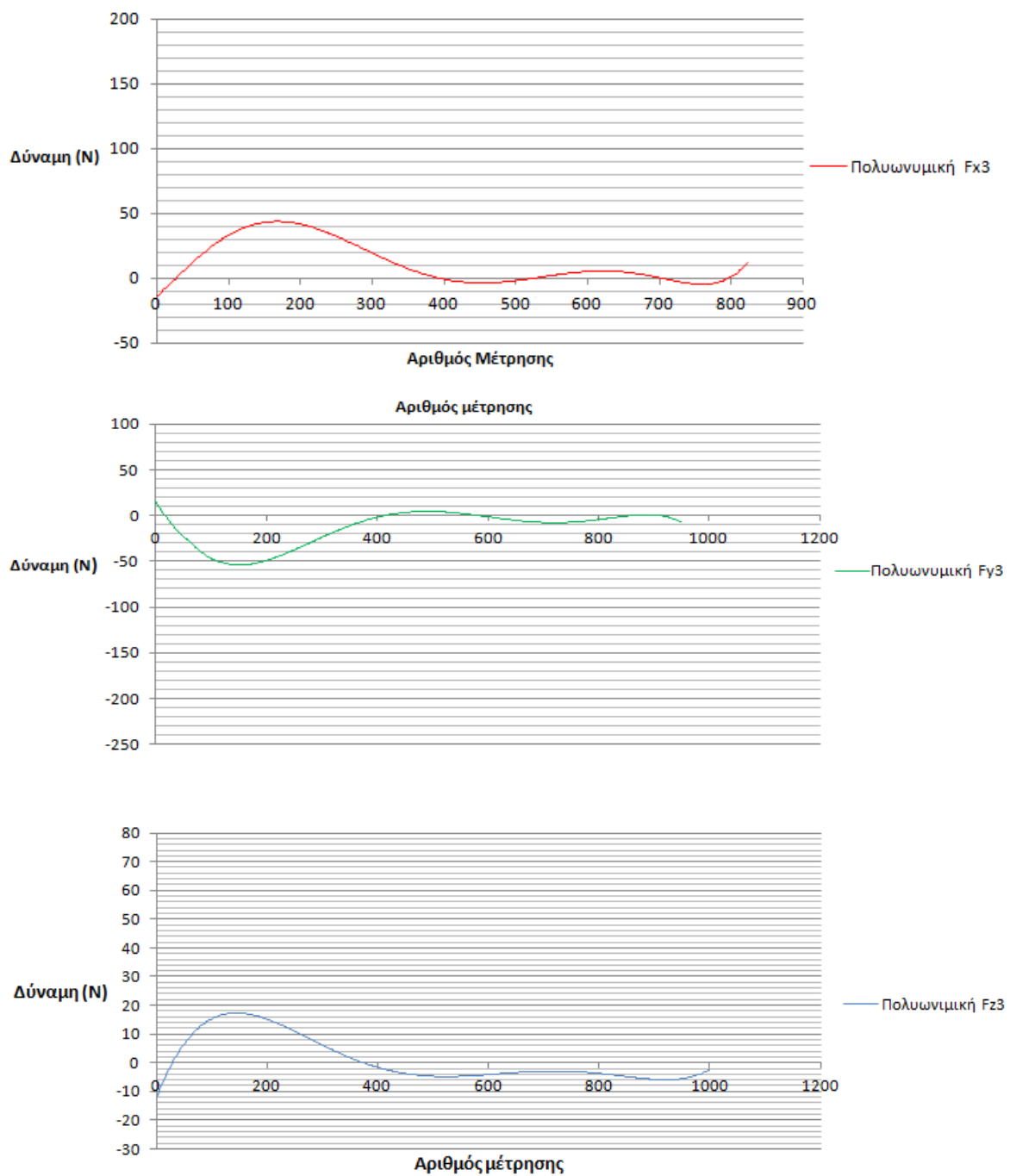
Σχήμα 10.1

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
 Πρώτο πείραμα: Βάθος κοπής 0.3mm, Στροφές 700 rpm, Πρόωση 75 mm/min



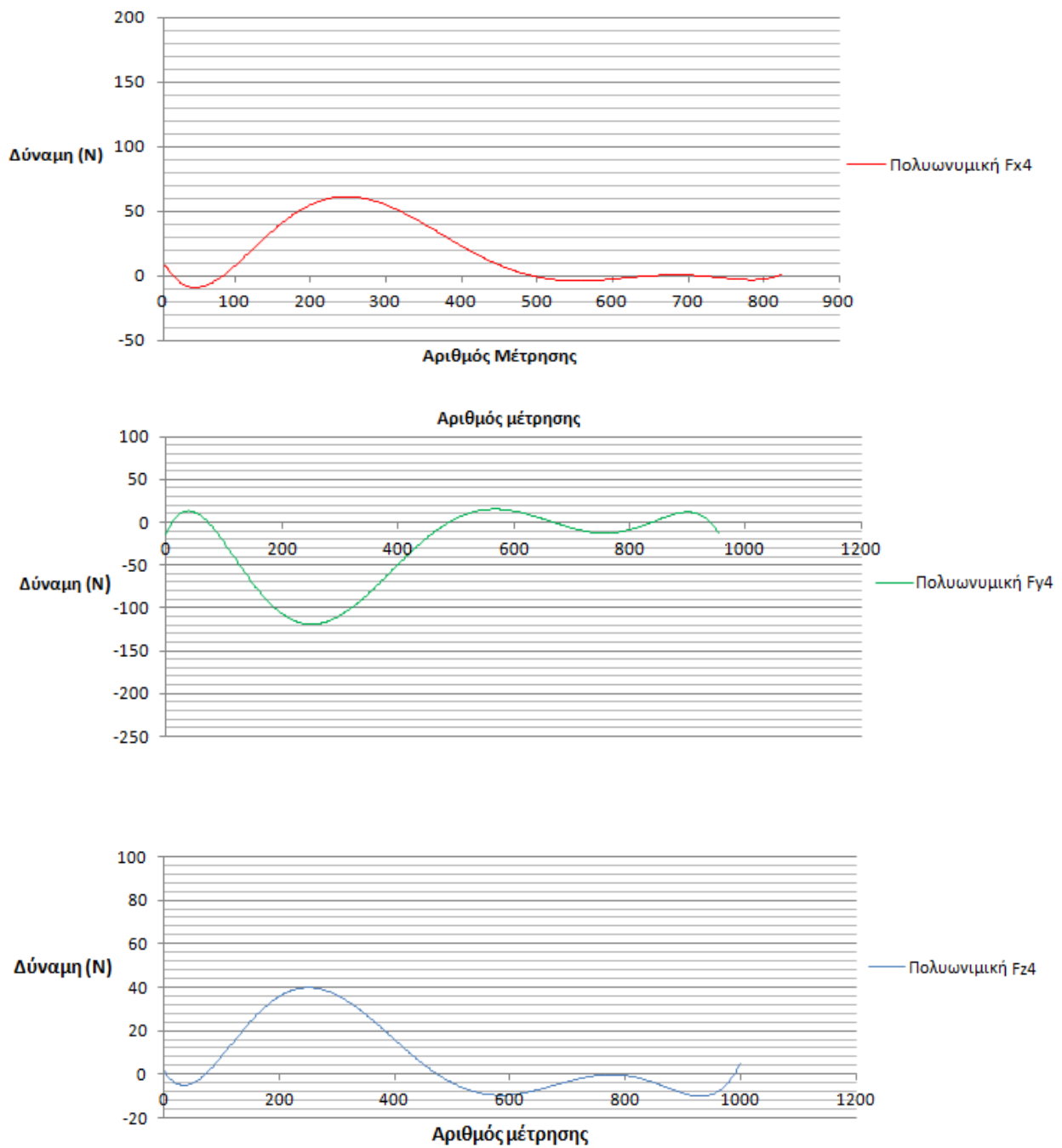
Σχήμα 10.2

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
Δεύτερο πείραμα: Βάθος κοπής 0.3mm, Στροφές 850 rpm, Πρόωση 100 mm/min



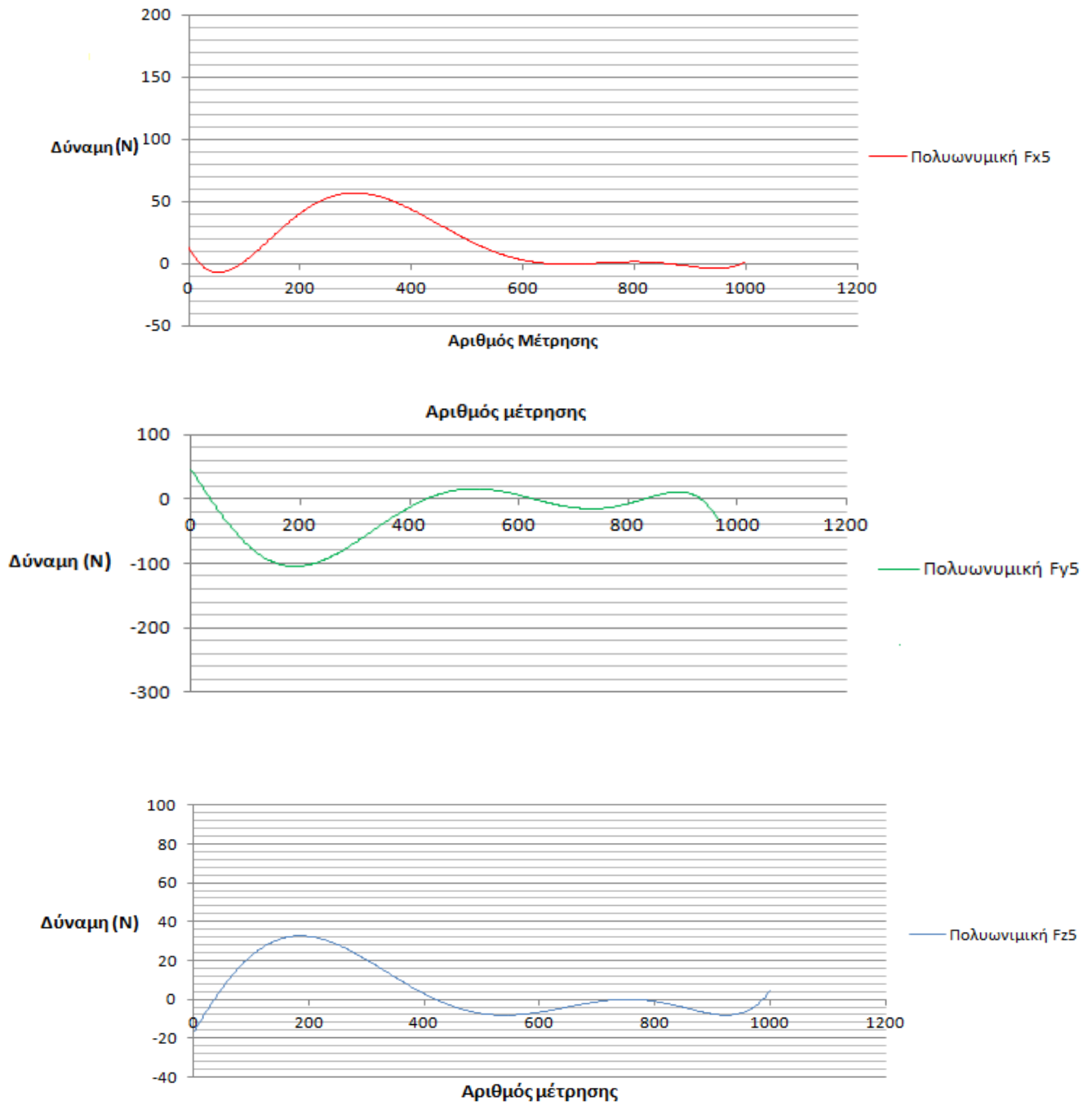
Σχήμα 10.3

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
Τρίτο πείραμα: Βάθος κοπής 0.3mm, Στροφές 1000 rpm, Πρόωση 125 mm/min



Σχήμα 10.4

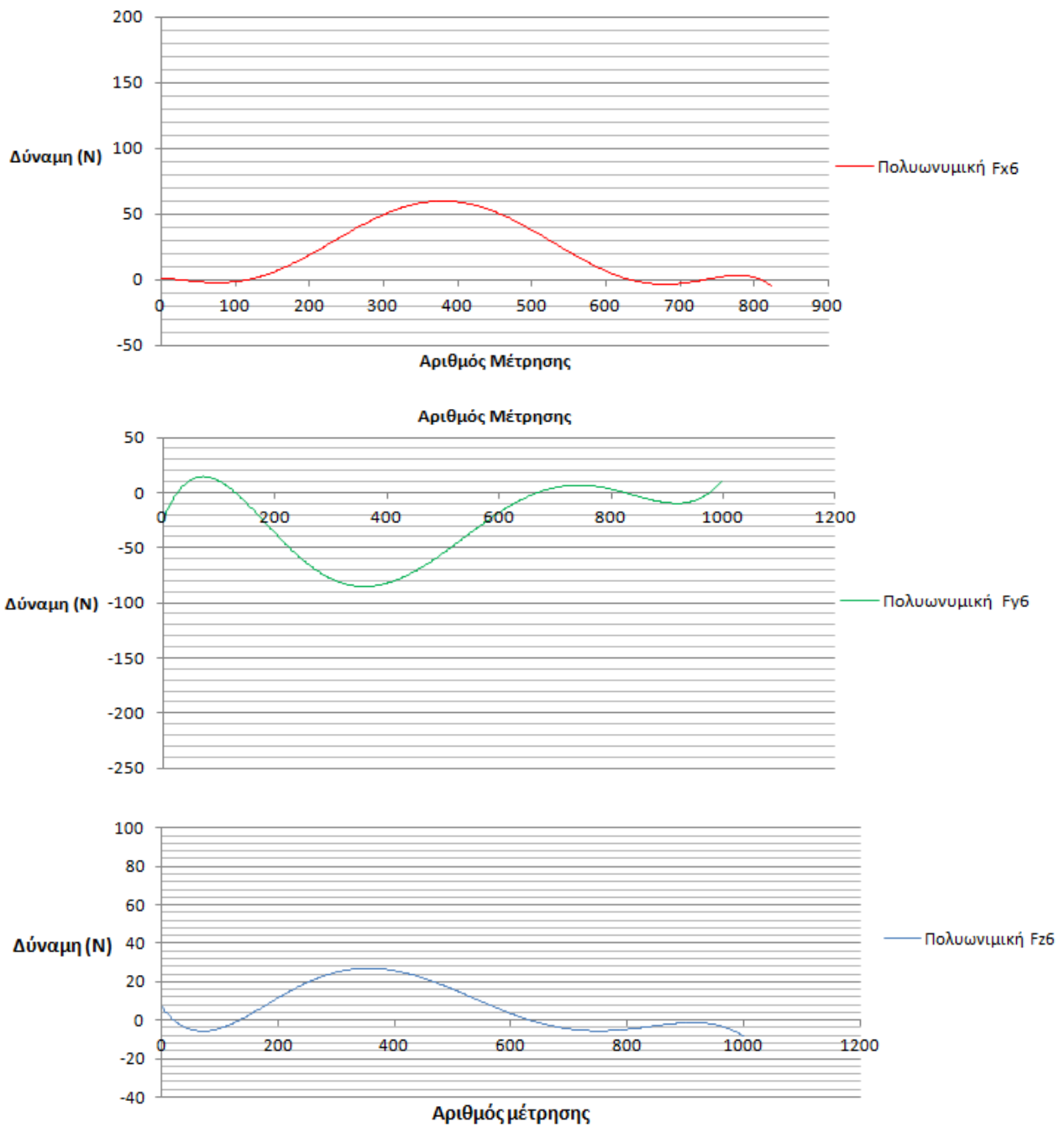
Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
Τέταρτο πείραμα: Βάθος κοπής 0.6mm, Στροφές 700 rpm, Πρόωση 100 mm/min



Σχήμα 10.5

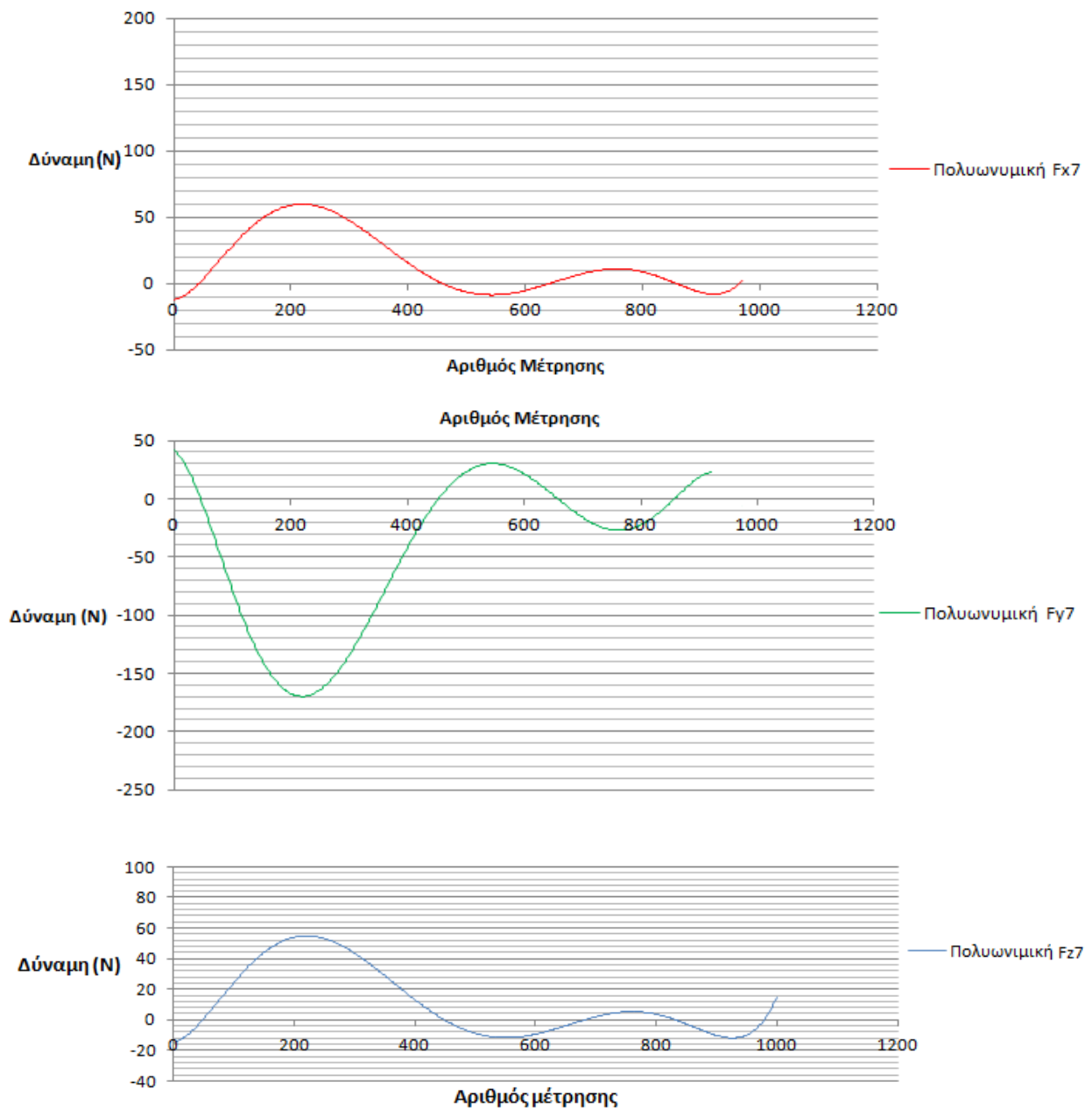
Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
Πέμπτο πείραμα: Βάθος κοπής 0.6mm, Στροφές 850rpm, Πρόωση 125 mm/min





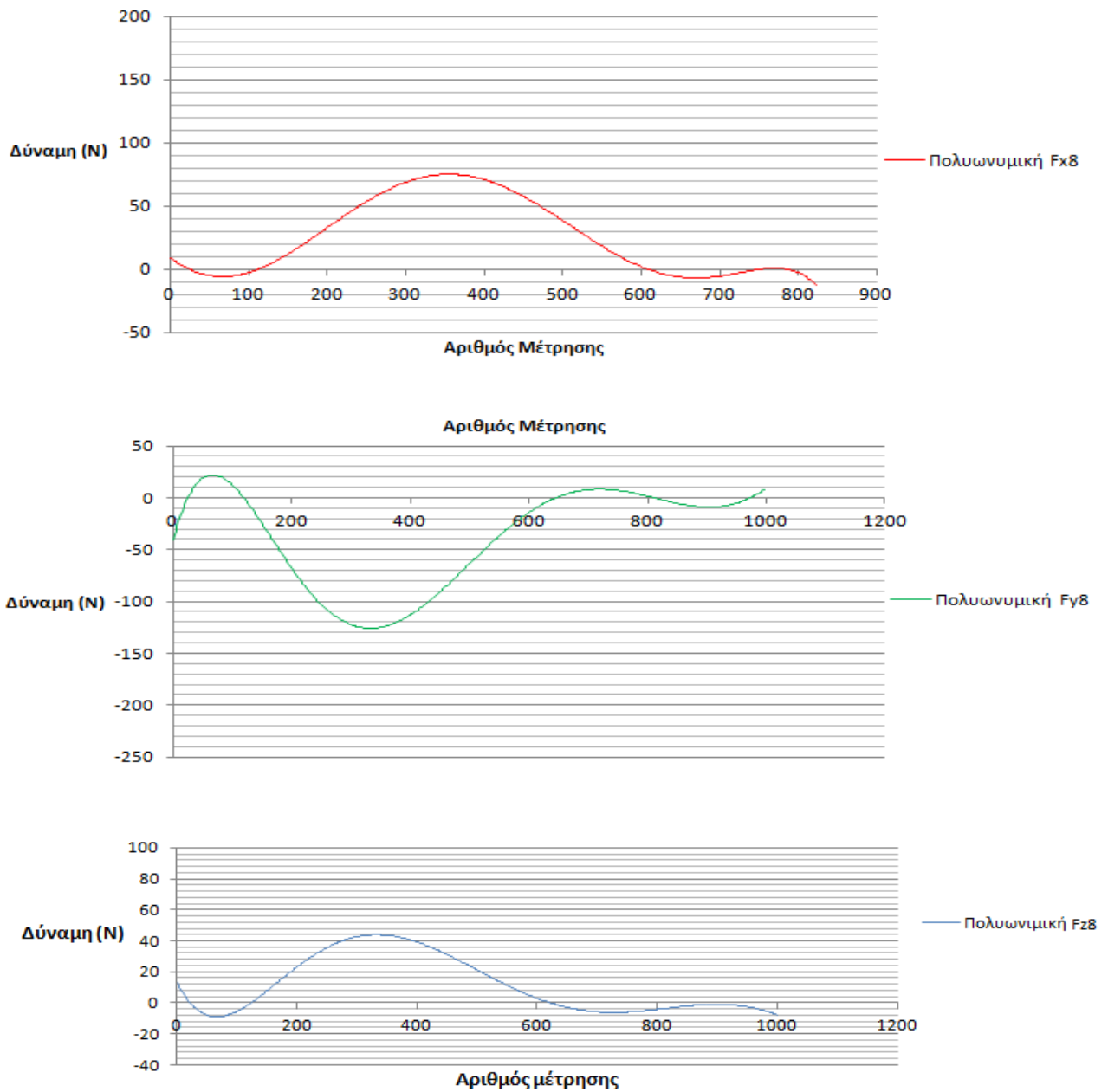
Σχήμα 10.6

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης Έκτο πείραμα: Βάθος κοπής 0.6mm, Στροφές 1000 rpm, Πρόωση 75 mm/min



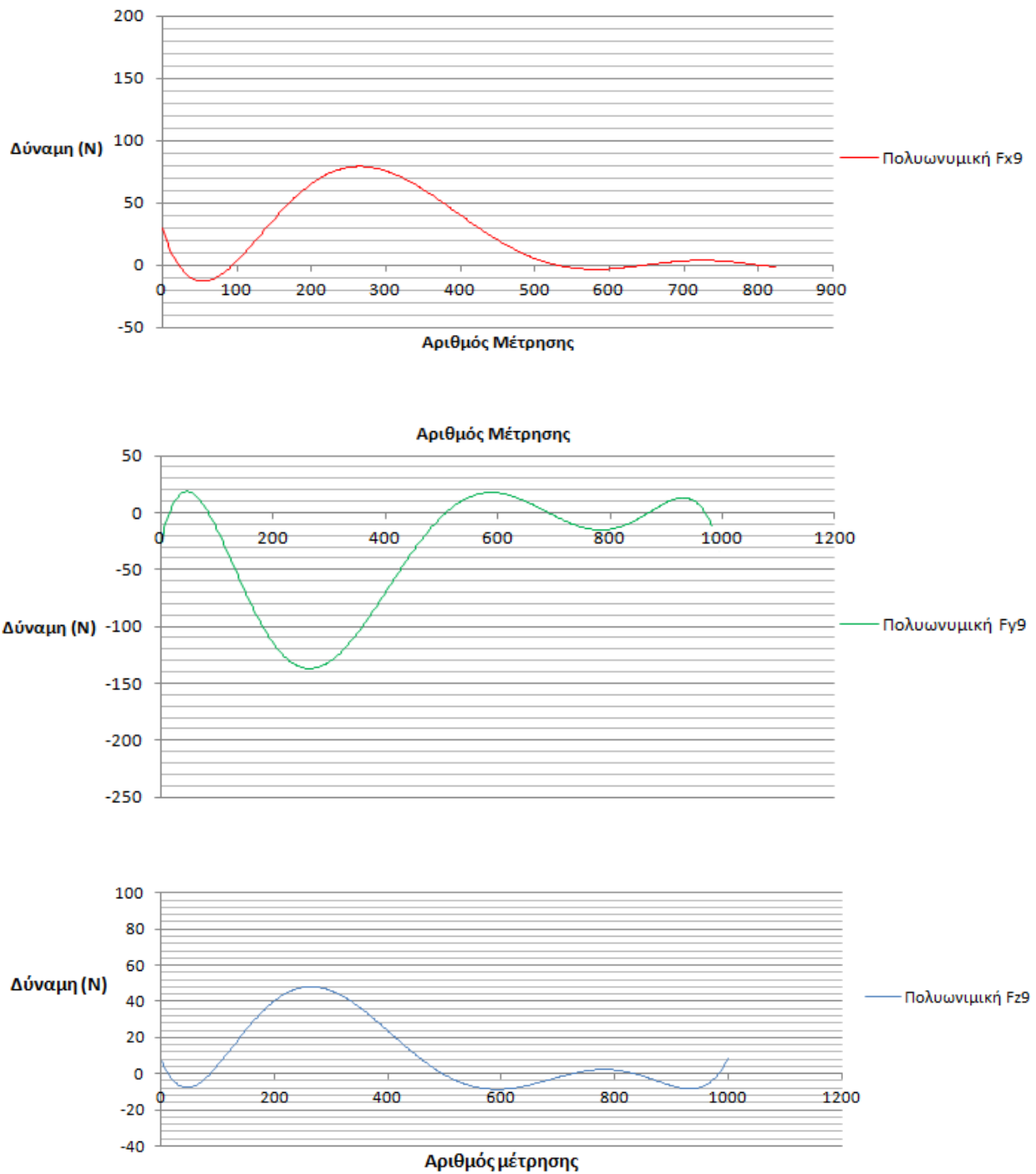
Σχήμα 10.7

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
Έβδομο πείραμα: Βάθος κοπής 0.9mm, Στροφές 700 rpm, Πρόωση 125 mm/min



Σχήμα 10.8

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης  
Όγδοο πείραμα: Βάθος κοπής 0.9mm, Στροφές 850 rpm, Πρόωση 75 mm/min

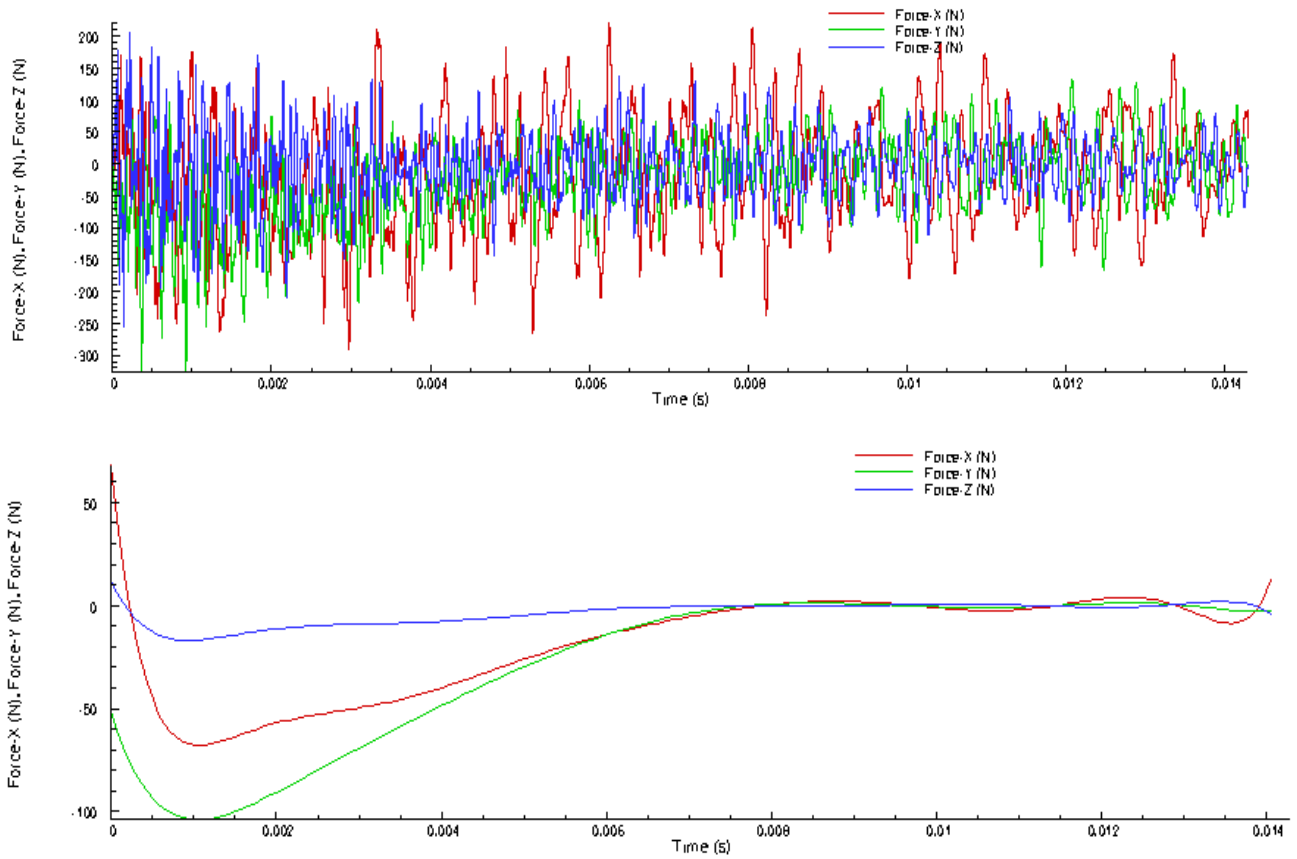


Σχήμα 10.9

Διαγράμματα γραμμών τάσης δυνάμεων σε συνάρτηση του αριθμού μέτρησης Ένατο πείραμα: Βάθος κοπής 0.9mm, Στροφές 1000 rpm, Πρόωση 100 mm/min

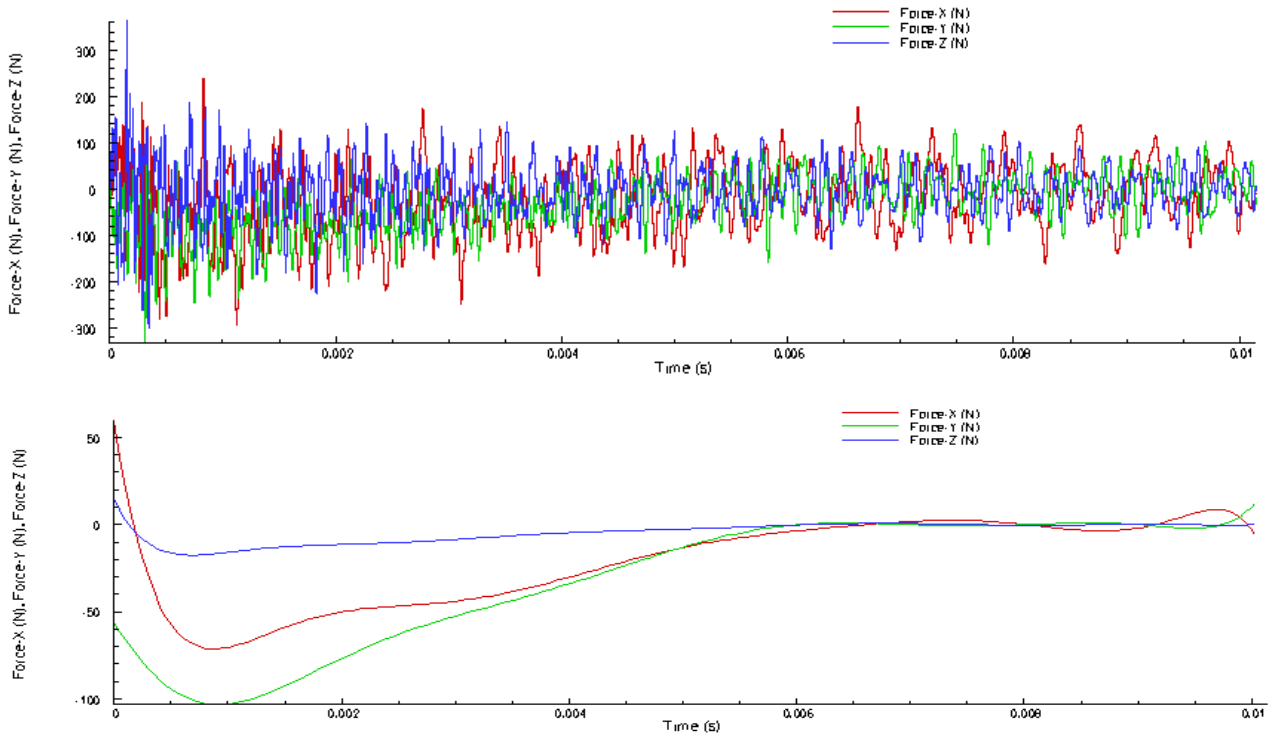
## 10.2 Υπολογιστικού προγράμματος Advantedge

Ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων των δυνάμεων κάθε πειράματος που πήραμε από το πρόγραμμα παρουσίασης Tecplot του AdvantEdge:



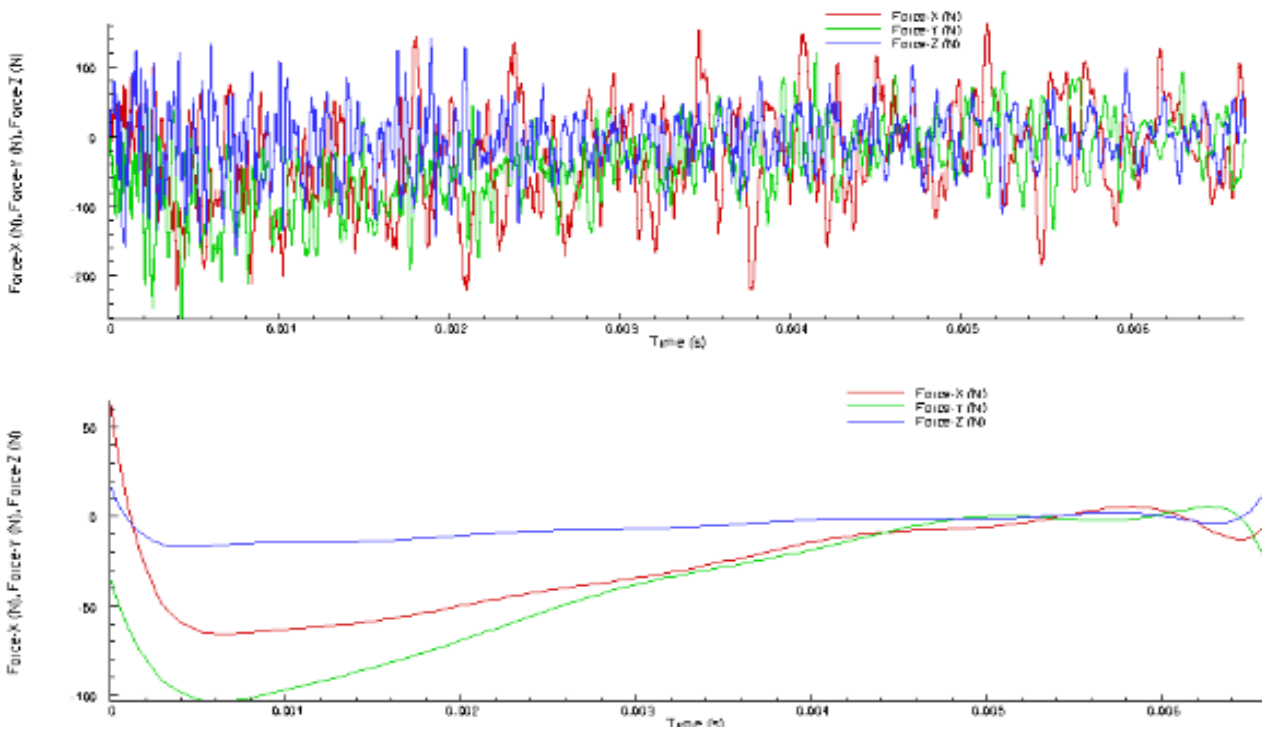
Σχήμα 10.2.1

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του πρώτου πειράματος



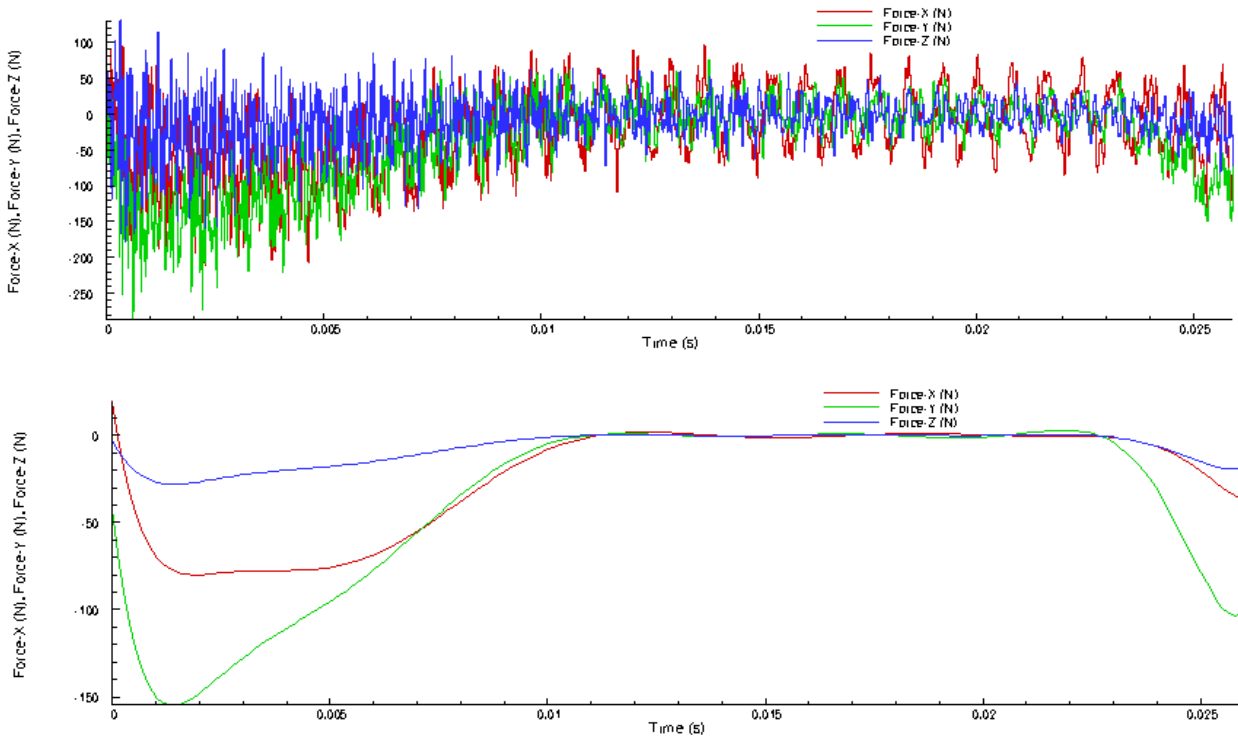
Σχήμα 10.2.2

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του δεύτερου πειράματος



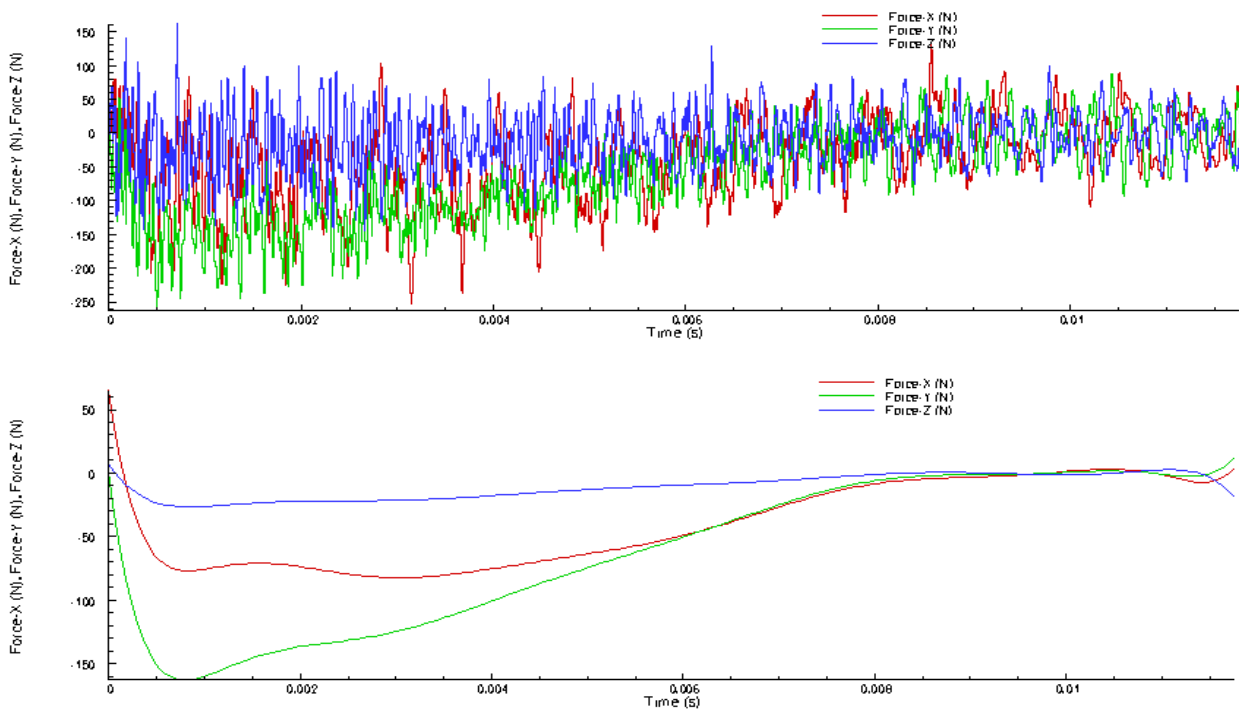
Σχήμα 10.2.3

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του τρίτου πειράματος



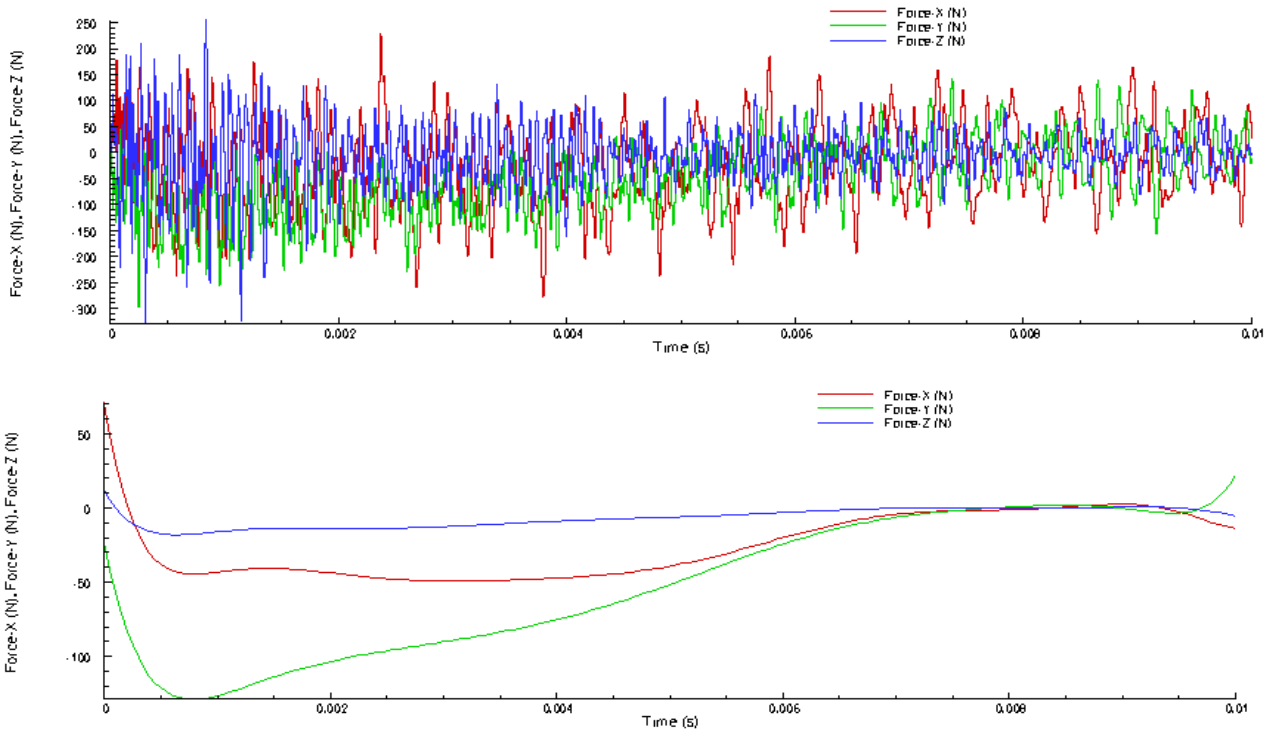
Σχήμα 10.2.4

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του τέταρτου πειράματος



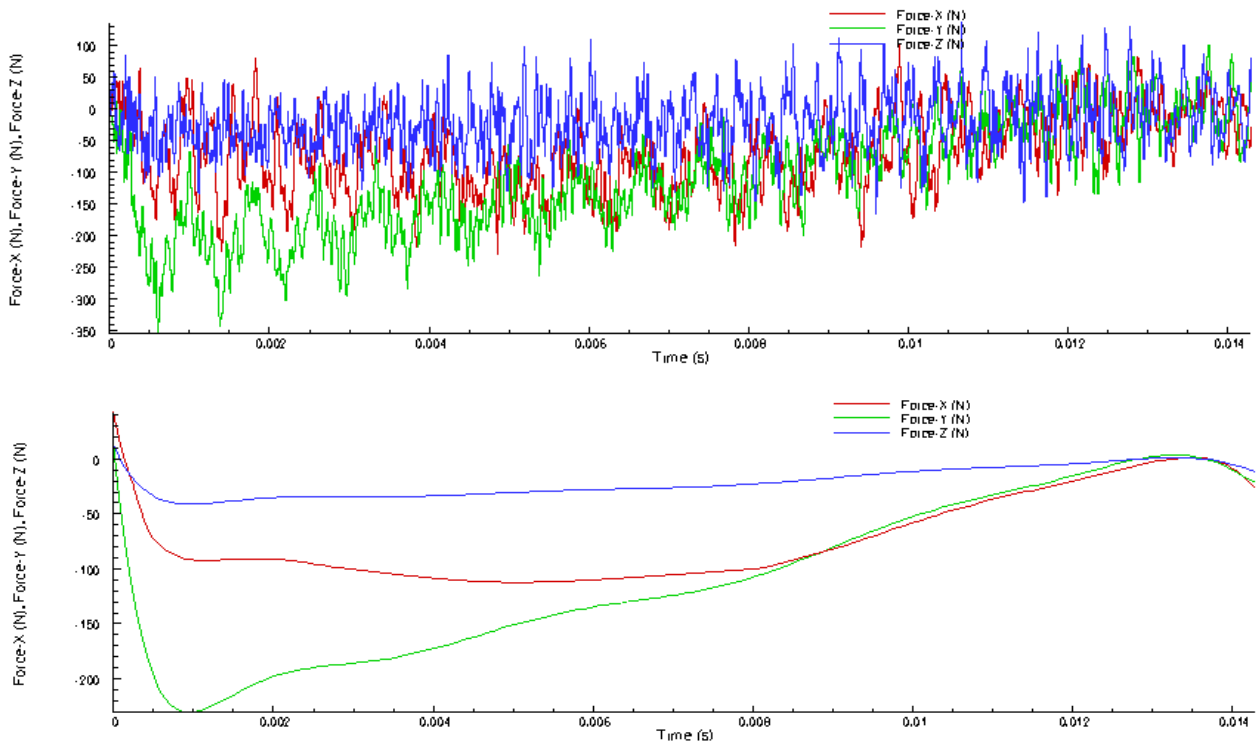
Σχήμα 10.2.5

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του πέμπτου πειράματος



Σχήμα 10.2.6

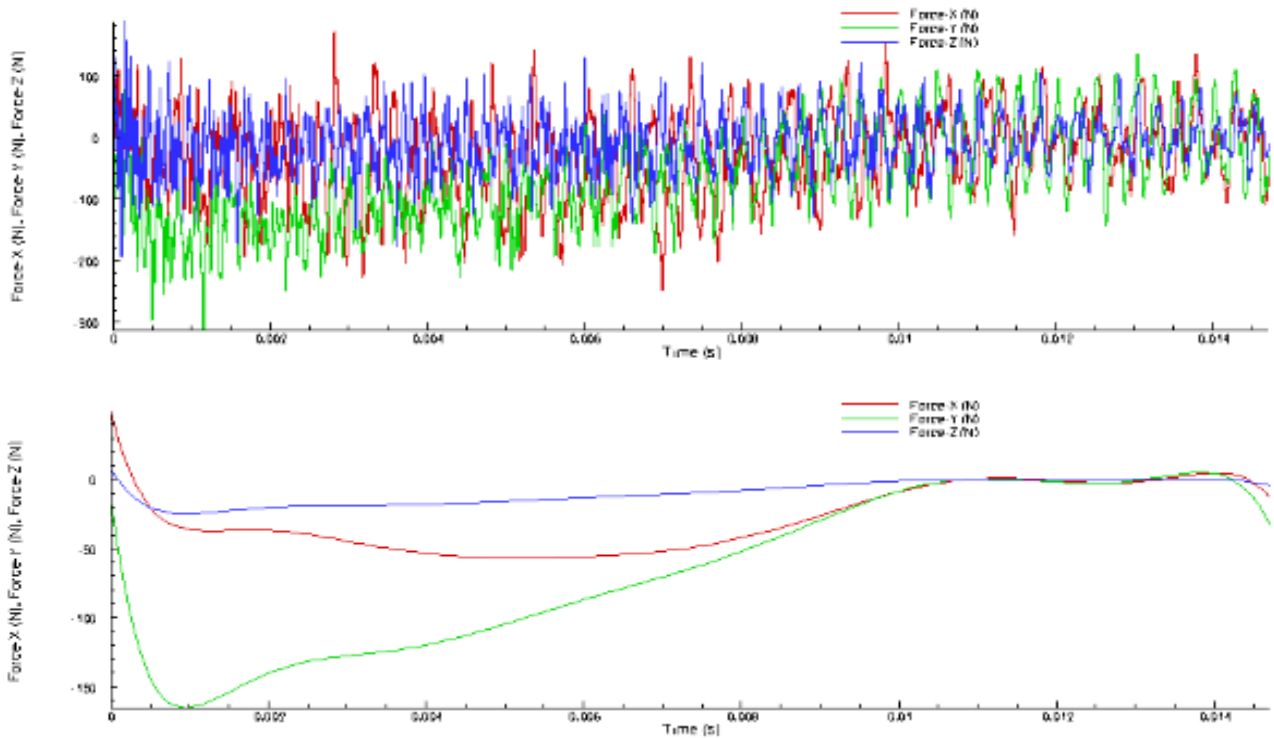
Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του έκτου πειράματος



Σχήμα 10.2.7

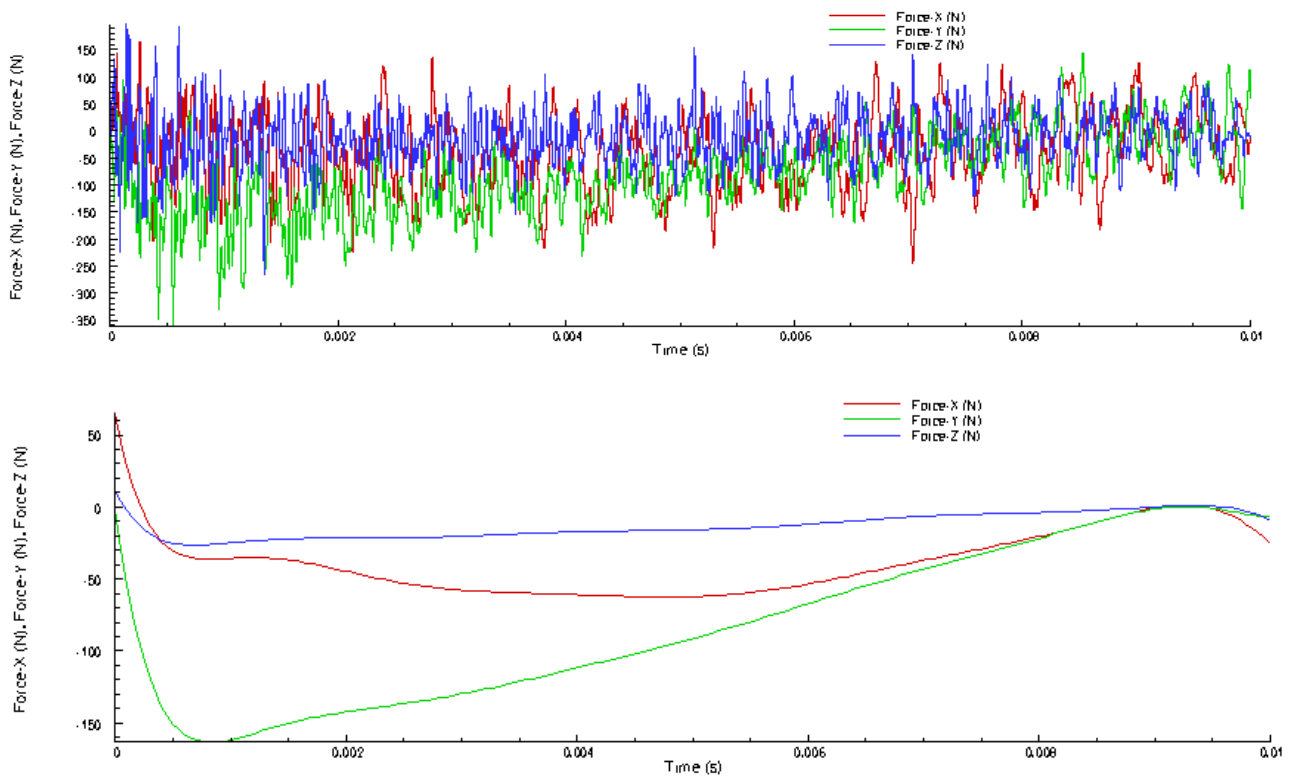
Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του έβδομου πειράματος





Σχήμα 10.2.8

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του όγδου πειράματος



Σχήμα 10.2.9

Διαγράμματα δυνάμεων (πάνω) και γραμμών τάσης δυνάμεων(κάτω) σε συνάρτηση του χρόνου στη προσομοίωση του ένατου πειράματος

## 11. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δυνάμεων. Να τονίσουμε ότι παίρνουμε τις μέγιστες τιμές που καταγράφονται από τη γραμμή τάσης των δυνάμεων:

ΔΥΝΑΜΗ	ADVANTEDGE(N)	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ(N)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Fx1	68	58	17,20%
Fx2	71	45	36,61%
Fx3	66	42	36,36%
Fx4	79	62	21,51%
Fx5	77	57	25,97%
Fx6	50	59	-15,25%
Fx7	110	60	45,45%
Fx8	50	75	-33,33%
Fx9	60	80	-25,00%

ΣΥΝΟΛΙΚΑ	28,50%
----------	--------

ΔΥΝΑΜΗ	ADVANTEDGE(N)	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ(N)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Fy1	105	78	25,71%
Fy2	102	60	41,10%
Fy3	103	51	50,50%
Fy4	153	118	22,87%
Fy5	161	103	36,02%
Fy6	128	87	32,03%
Fy7	230	170	26,08%
Fy8	165	128	22,42%
Fy9	162	139	14,00%

ΣΥΝΟΛΙΚΑ	30,10%
----------	--------

ΔΥΝΑΜΗ	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ(N)	ADVANTEDGE(N)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Fz1	23	17	26,10%
Fz2	20	19	5,00%
Fz3	18	17	5,50%
Fz4	40	28	30,00%
Fz5	33	28	15,15 %
Fz6	28	18	35,71%
Fz7	51	41	15,68%
Fz8	42	25	40,47%
Fz9	48	28	41,60%

ΣΥΝΟΛΙΚΑ	23,91%
----------	--------

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ Fx-Fy-Fz	27,5%
-------------------------------------	-------

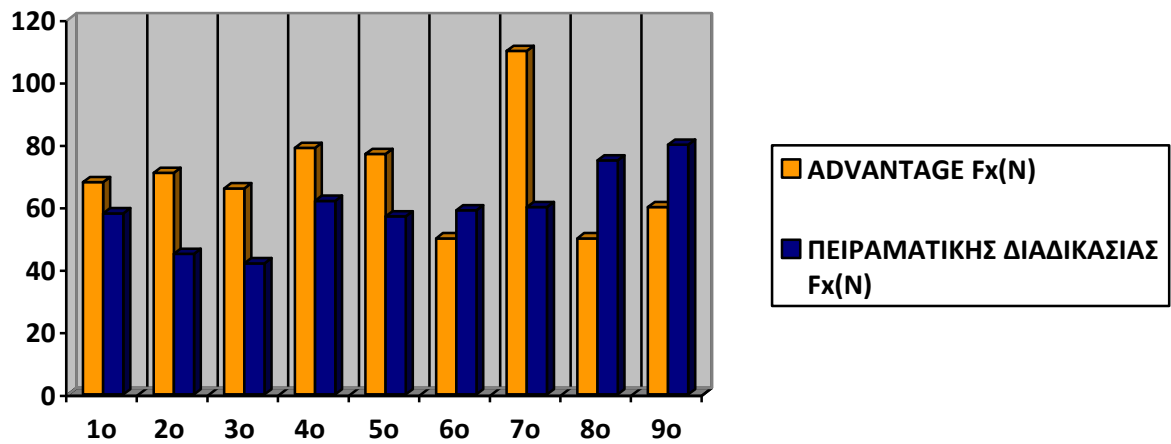
Ορίζοντας και ως  $F_{ci}$  την συνισταμένη δύναμη των  $F_{xi}$ ,  $F_{yi}$  όπου  $i$  ο αριθμός του πειράματος, κατασκευάζουμε και τον ακόλουθο πίνακα:

$$F_{ci} = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2} \text{ (N)}$$

ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ	ADVANTEDGE(N)	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ(N)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Fc1	125,09	97,22	22,24%
Fc2	124,27	75	49,27%
Fc3	122,33	66,13	42,46%
Fc4	172,19	133,29	22,50%
Fc5	178,46	117,72	33,90%
Fc6	137,41	105,11	23,50%
Fc7	254,95	180,27	29,20%
Fc8	172,41	148,35	13,81%
Fc9	172,75	160,37	7,30%

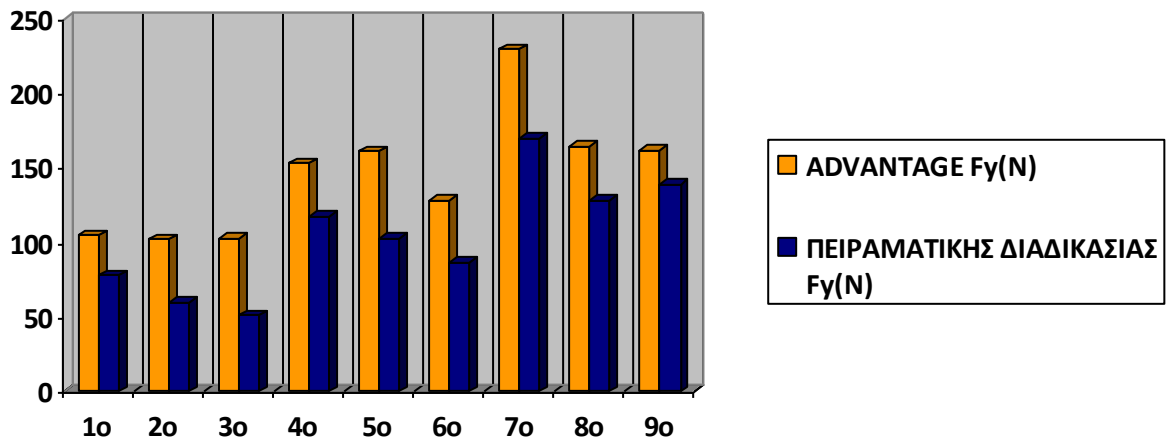
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	27,13%
----------	--------

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ Fc-Fz	25,52%
-------------------------	--------



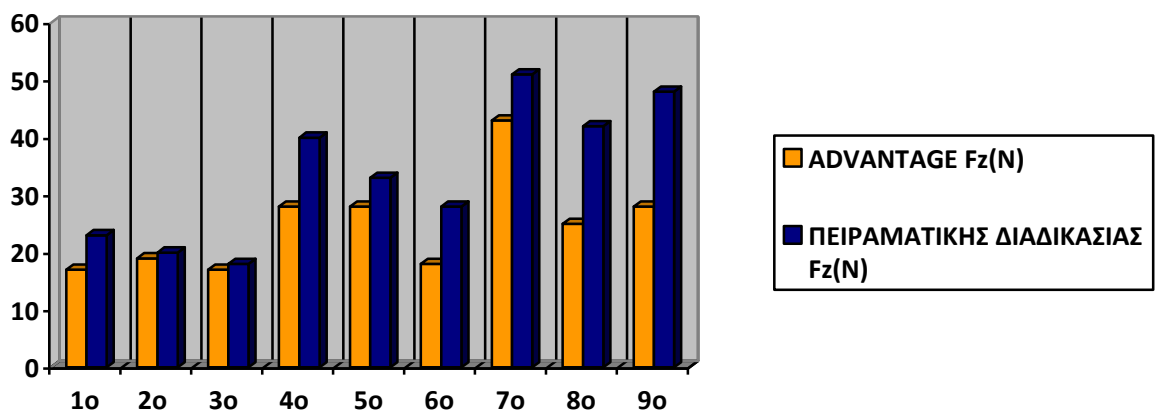
Σχήμα 11.1

Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών τιμών  $F_x$



Σχήμα 11.2

Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών τιμών  $F_y$



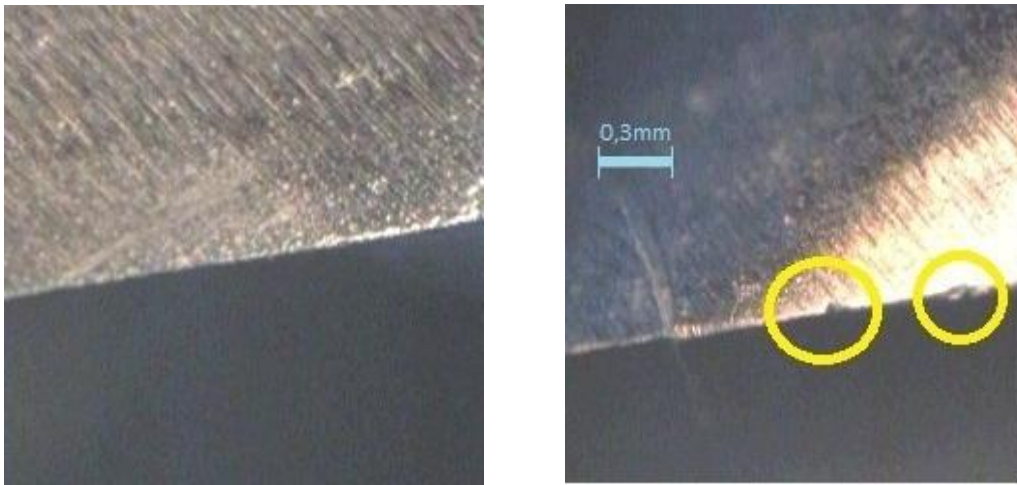
Σχήμα 11.3

Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών τιμών  $F_z$

## 12. Συμπληρωματικά αποτελέσματα

### 12.1 Φθορά κοπτικού εργαλείου

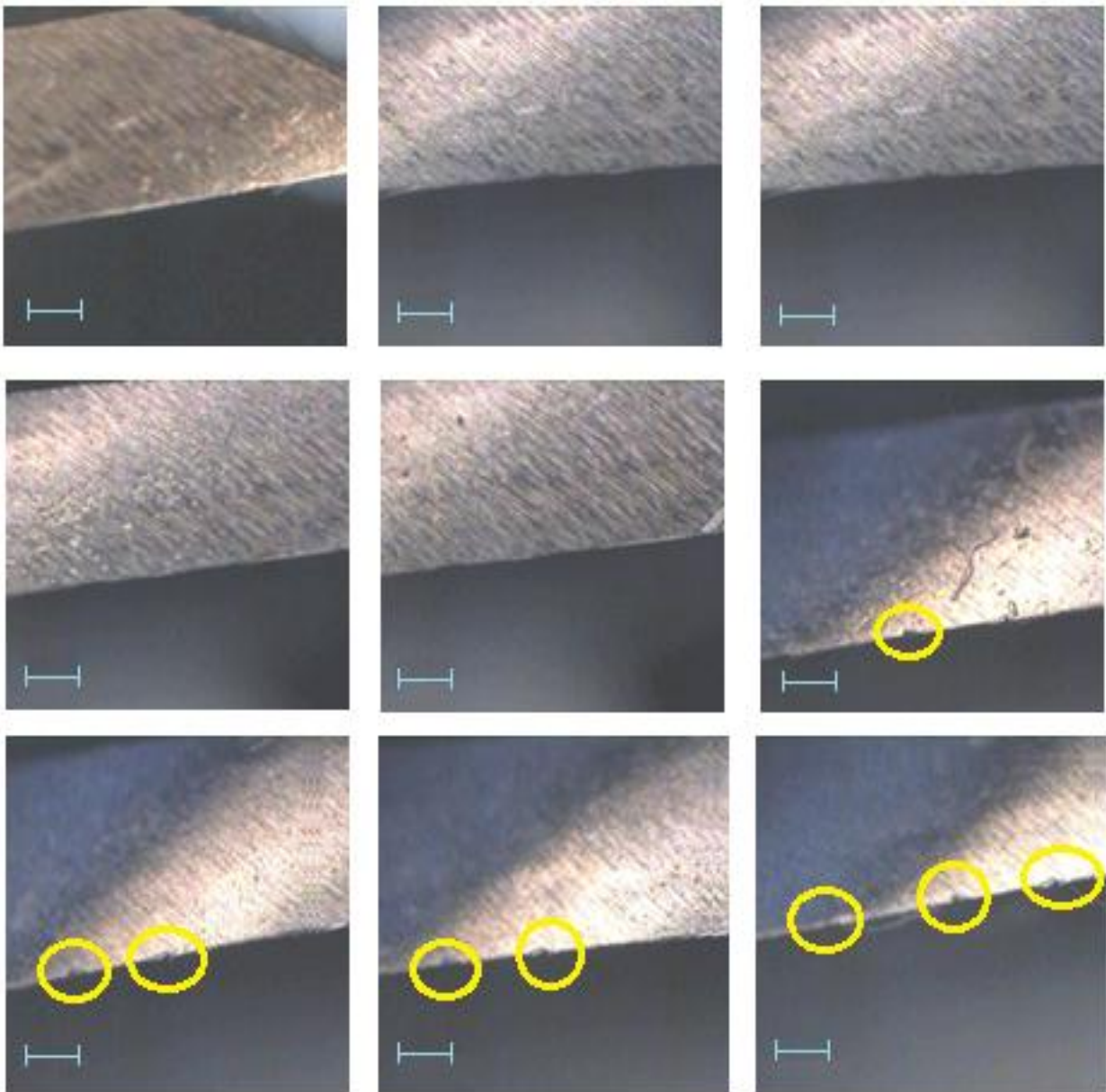
Στις φωτογραφίες που ακολουθούν θα παρουσιάσουμε το είδος της φθοράς που παρατηρήσαμε στο κοπτικό εργαλείο μετά το φρεζάρισμα του τιτανίου. Υπενθυμίζουμε τα είδη της φθοράς αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.5 και το κοπτικό μας εργαλείο είναι χάλυβας με πρόσμιξη κοβαλτίου.



Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η σύγκριση της ελεύθερης πλευράς του εργαλείου πριν αρχίσουν τα πειράματα(αριστερά) και μετά το πέρα και της 9<sup>ης</sup> κατεργασίας(δεξιά).

Λόγω της διάταξης του μικροσκοπίου δεν κατέστη δυνατόν να φωτιστεί η ελεύθερη πλευρά(flank) του εργαλείου παρά μόνο η επιφάνεια αποβλήτου. Μετά από οπτική παρατήρηση όμως, σε συνδυασμό και με το γεγονός ότι όλη φθορά παρουσιάζεται στην άκρη της κοπτικής γραμμής του εργαλείου, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η φθορά εκτείνεται το ίδιο στην ελεύθερη επιφάνεια του όπως και στην επιφάνεια αποβλήτου που παρουσιάζεται στις φωτογραφίες.

Έτσι, παρατηρούμε ότι έχουμε φθορά της ελεύθερης πλευράς(flank wear) και απουσία της φθοράς κρατήρα ή μη εμφανή φθορά κρατήρα καθότι είναι πιθανό να παρουσιάζεται στο ίδιο σημείο και να μην μπορεί να γίνει διακριτή. Κατά πάσα πιθανότητα όμως έχουμε απουσία κρατήρων. Επίσης είναι σημαντικό να αναφέρουμε τη σημασία του ψυκτικού υγρού και αυτό γιατί δεν εμφανίζονται θερμικά ραγίσματα. Στη δεξιά εικόνα διακρίνεται και η αντιστοιχία του μεγέθους των 0,3mm στη σμίκρυνση της φωτογραφίας. Τόσο είναι το μέγεθος του ορίου της καταστροφικής καταπόνησης για τη φθορά στη κοπτική πλευρά σε εργαλείο ταχυχάλυβα.



Εικόνες 12.1

*Από αριστερά προς τα δεξιά: Η εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου αυξανόμενου(ανά γραμμή) του βάθους κοπής και αυξανόμενης(ανά στήλη) της ταχύτητας κοπής για τα 9 πειράματα*

Στις εικόνες παρατηρείται η αύξηση της φθοράς αυξανόμενης της ταχύτητα κοπής και του βάθους κοπής. Στη πρώτη γραμμή εικόνων φαίνεται η φθορά για βάθος κοπής 0,3mm, στις 3 επόμενες για βάθος κοπής 0,6mm και τέλος για βάθος κοπής 0,9mm. Αντίστοιχα η πρώτη στήλη περιλαμβάνει τη μικρότερη ταχύτητα κοπής, η δεύτερη στήλη τη μεσαία ταχύτητα κοπής και η τρίτη στήλη τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής.

Μέσα στο κίτρινο κύκλο είναι τα σημάδια φθοράς του εργαλείου και οι γαλάζιες γραμμές δηλώνουν το μέγεθος των 0,3mm στην ανάλυση που βρίσκεται η φωτογραφία

,που αποτελεί το κριτήριο καταστροφικής καταπόνησης για flank wear εργαλείου ταχυχάλυβα.

Είναι χαρακτηριστική η αύξηση της φθοράς στη τελευταία τριάδα(με το μεγαλύτερο βάθος κοπής) και η αύξηση της φθοράς με αύξηση της ταχύτητας κοπής( σύγκριση στις στήλες 2 και 3).

## 12.2 Μέσο ύψος τραχύτητας επιφάνειας Ra

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του μέσου ύψους τραχύτητας όπως καταγράφηκαν από το τραχύμετρο κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας:

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ(mm)	ΣΤΡΟΦΕΣ(rpm)	ΠΡΟΩΣΗ(mm/min)	Ra(μm)
1	0,3	700	75	0,55
2	0,3	850	100	0,70
3	0,3	1000	125	0,88
4	0,6	700	100	0,91
5	0,6	850	125	0,98
6	0,6	1000	75	0,48
7	0,9	700	125	1,1
8	0,9	850	75	0,52
9	0,9	1000	100	0,62

Πίνακας 12.1

Αποτελέσματα μέσου ύψους τραχύτητας Ra για τα 9 πειράματα

Είναι φανερή η εξάρτηση της τραχύτητας από τη πρόωση. Παρατηρούμε ότι ανά τριάδα πειραμάτων, όπου έχουμε αλλαγή στο βάθος κοπής, οι τιμές της τραχύτητας ακολουθούν τη τάση των τιμών της πρόωσης. Οι μέγιστες τιμές της Ra καταγράφηκαν στα πειράματα 3,5,7 όπου είχαμε τη μεγαλύτερη πρόωση και οι ελάχιστες στα πειράματα 1,6,8 όπου είχαμε τη μικρότερη πρόωση.

### 12.3 Αποτελέσματα δυνάμεων κοπής στο Minitab

Παράθεση αποτελεσμάτων Ανονα μεταξύ των μέγιστων τιμών των δυνάμεων που καταγράφηκαν κατά τη πειραματική διαδικασία και ορίστηκαν ως εξαρτημένες μεταβλητές και των συνθηκών κοπής που ορίστηκαν ως ανεξάρτητες. Η επιλογή για τις μέγιστες τιμές έγινε ούτως ώστε να αναλύσουμε καταγεγραμμένες τιμές και όχι τιμές που να έχουν προκύψει από πολυωνυμική συσχέτιση τιμών καθότι εξετάζουμε την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων καταγραφής.

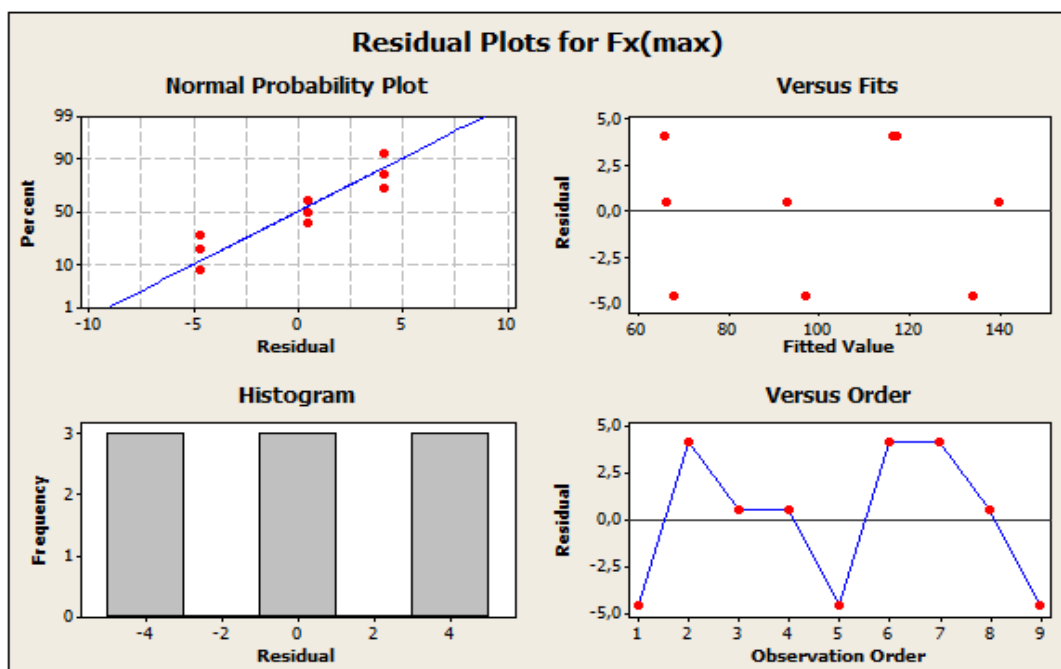
#### Ανονα μεταξύ μέγιστης δύναμης Fx και βάθους κοπής, στροφών, πρόωσης:

Factor	Type	Levels	Values
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	fixed	3	0,3; 0,6; 0,9
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	fixed	3	700; 850; 1000
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	fixed	3	75; 100; 125

Analysis of Variance for Fx(max),

Source	DF	SS	MS	F	P
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	2	952,74	476,37	8,07	0,122
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	2	1076,78	538,39	9,12	0,108
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	2	4847,84	2423,92	41,06	0,024
Error	2	118,06	59,03		
Total	8	6995,42			

R-Sq = 98,31%



Σχήματα 12.1 ανάλυσης διακύμανσης Fx(max)



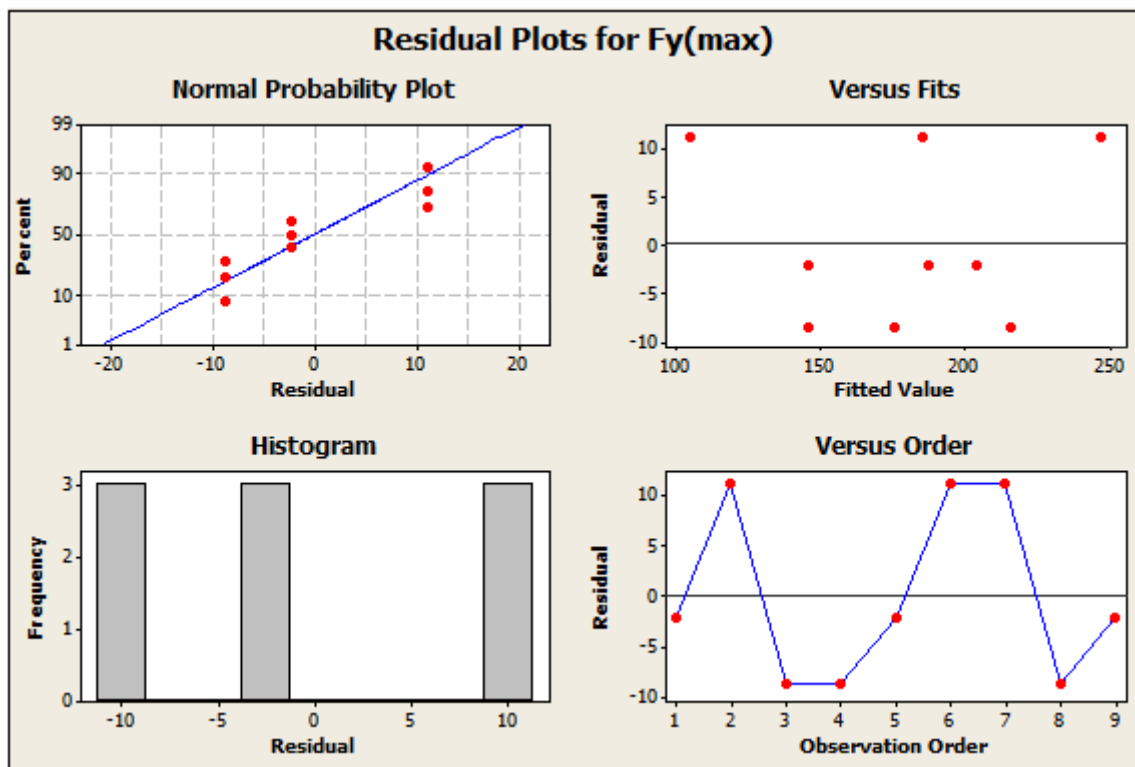
**Απονα μεταξύ μέγιστης δύναμης Fy και βάθους κοπής, στροφών, πρόωσης:**

Factor	Type	Levels	Values
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	fixed	3	0,3; 0,6; 0,9
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	fixed	3	700; 850; 1000
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	fixed	3	75; 100; 125

Analysis of Variance for Fy(max),

Source	DF	SS	MS	F	P
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	2	5619,8	2809,9	9,11	0,101
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	2	6273,5	3136,7	10,17	0,090
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	2	49343,5	24671,8	79,99	0,012
Error	2	616,9	308,4		
Total	8	61853,7			

**R-Sq = 99,01%**



Σχήματα 12.2 ανάλυσης διακύμανσης Fy(max)

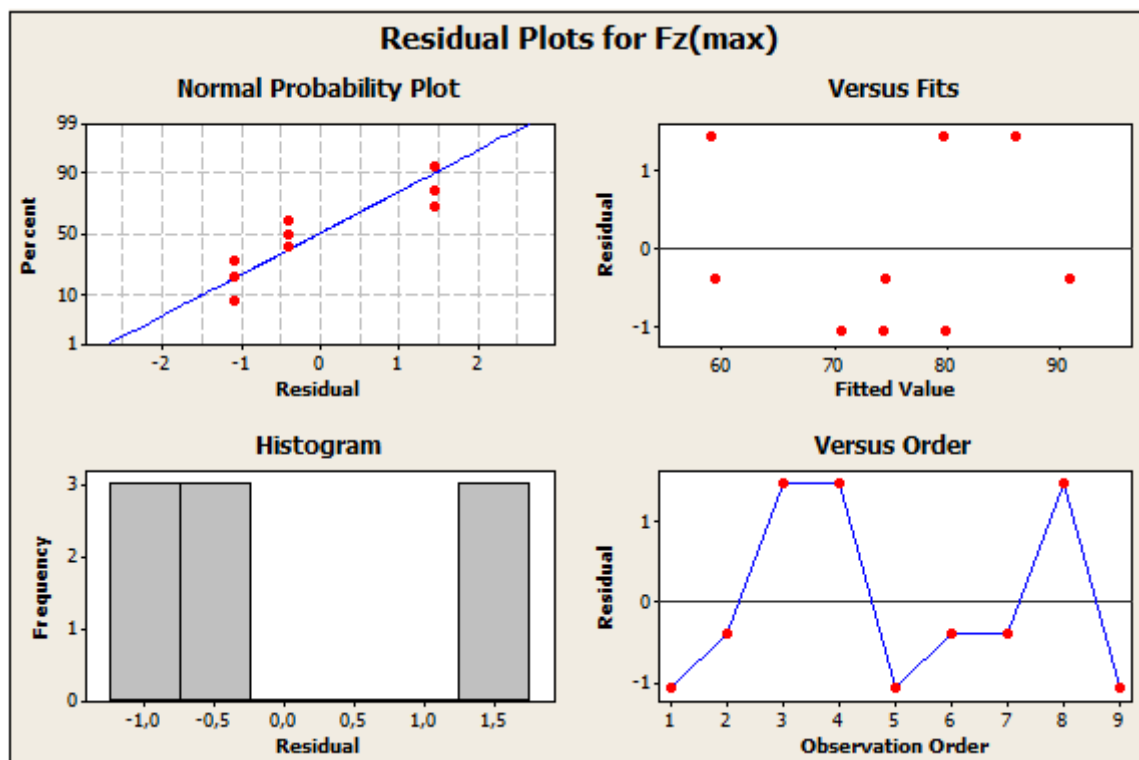
**Απονα μεταξύ μέγιστης δύναμης Fz και βάθους κοπής, στροφών, πρόωσης:**

Factor	Type	Levels	Values
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	fixed	3	0,3; 0,6; 0,9
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	fixed	3	700; 850; 1000
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	fixed	3	75; 100; 125

Analysis of Variance for Fz(max), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	SS	MS	F	P
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	2	4744,67	2372,34	459,98	0,002
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	2	865,67	432,83	83,92	0,012
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	2	150,57	75,28	14,60	0,064
Error	2	10,32	5,16		
Total	8	5771,22			

**R-Sq = 99,82%**



Σχήματα 12.3 ανάλυσης διακύμανσης Fz(max)

### **13 Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων**

Ακολουθεί η παράθεση παρατηρήσεων, και επεξηγήσεων για αυτές τις παρατηρήσεις, που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

#### **13.1 Σχετικά με τη σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών δυνάμεων κοπήs**

- Παρατηρούμε ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων του Advantedge της τάξεως του 22% κατά μέσο όρο για τη δύναμη  $F_z$  και 28%-30% κατά μέσο όρο για τις δυνάμεις  $F_x$ - $F_y$  αντίστοιχα. Η απόκλιση για την  $F_z$  κρίνεται ιδιαίτερως ικανοποιητική καθότι είναι κατά πολύ εντός των ορίων 5%-25% του στατιστικού λάθους. Για τις άλλες δυο δυνάμεις η απόκλιση είναι μεγαλύτερη αλλά δεν απέχει κατά πολύ από το όριο του 25% που θεωρούμε ως το όριο της αρκετά καλής σύγκλισης. Πιθανές αιτίες που μπορεί να εμφανίζεται αυτή η απόκλιση είναι:

- 1) Οι ιδανικές συνθήκες πειράματος τις οποίες προσομοιώνει το πρόγραμμα από τη μία πλευρά και οι πραγματικές συνθήκες, με όλα τα σφάλματα τα οποία αυτές εμπεριέχουν, στις οποίες πραγματοποιήθηκε το δικό μας πείραμα.
- 2) Χαμηλή ακρίβεια καταγραφής της μετρητικής μας διάταξης. Μια πιο ακριβής καταγραφή με περισσότερες μετρήσεις στη μονάδα του χρόνου ίσως να μείωνε την απόκλιση των δυνάμεων. Η πιο ακριβής καταγραφή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με άλλη διάταξη δυναμόμετρου-καλωδίων-ενισχυτών-προγράμματος υπολογιστή έτσι ώστε να περιοριστεί το πρόβλημα.
- 3) Προβλήματα που αφορούν το ίδιο το υπολογιστικό πρόγραμμα. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι υπάρχουν πολλά σημεία αμφιβολίας για τα αποτελέσματα που παρουσιάζει το πρόγραμμα και αυτά έχουν να κάνουν: [1] ακατάλληλη μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών [2] απλουστεύσεις και παραδοχές του μοντέλου τριβής ολίσθησης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα [3] αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις κατά την επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου για εξοικονόμηση χρόνου [4] σφάλμα διακριτοποίησης [5] σφάλματα που αφορούν τον

επαναπροσδιορισμό του πλέγματος. [6] μοντελοποίηση επίδρασης υγρού κοπής.

- 4) Η επιλογή για ταχύτερη ολοκλήρωση προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε. Είναι πιθανόν να επέφερε μια απόκλιση στις τιμές από ότι με το standard mode. Πάντως αξίζει να αναφέρουμε ότι στις συγκρίσεις που πραγματοποιήσαμε μεταξύ των δυο, δε παρατηρήσαμε διαφορά μεγαλύτερη του 4%.
  - 5) Η διαφορά στα δεδομένα που έχει προεπιλεγμένα το πρόγραμμα για το υλικό του τεμαχίου, όπως η σκληρότητά του, είναι πιθανόν να διαφέρουν από τα πραγματικά του δικού μας τεμαχίου. Επιπρόσθετα για το εργαλείο, δεν ήταν δυνατό να ληφθεί υπόψη η φθορά του από προηγούμενες κατεργασίες.
- Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι η σωστή πρόβλεψη, από το πρόγραμμα, της αύξησης των τιμών των δυνάμεων όταν είχαμε αντίστοιχη αύξηση των πειραματικών τιμών λόγω της αύξησης του βάθους κοπής. Το πρόγραμμα επομένως είχε μια πολύ καλή ποιοτική πρόβλεψη της αυξητικής τάσης των δυνάμεων με αύξηση του βάθους κοπής.
  - Υπάρχει αμφιβολία για τη προσομοίωση της χρήσης του υγρού κοπής για τις προσομοιώσεις 3,,7 λόγω των ασυνήθιστα μεγάλων θερμοκρασιών συγκριτικά με τις υπόλοιπες προσομοιώσεις. Από τη διεθνή βιβλιογραφία, τα συγκριτικά αποτελέσματα με ή χωρίς προσομοίωση υγρού κοπής είναι της τάξης του 10%.
  - Δυστυχώς στη διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αντίστοιχες συγκρίσεις για περιφερειακό φρεζάρισμα τιτάνιου έτσι ώστε να έχουμε ένα σημείο αναφοράς. Από προσομοιώσεις άλλων κατεργασιών πάντως [25] παρατηρούμε ότι μεγάλες αποκλίσεις(>30% συνολικά) είναι αρκετά συχνές για κάποιες από τις δυνάμεις που εξετάζονται. Έτσι η συνολική απόκλιση που παρουσιάζουμε στη δική μας ανάλυση είναι μεν σημαντική σαν απόλυτος αριθμός αλλά μέσα στα αποδεκτά όρια.
  - Η απόκλιση υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\frac{|F_{\text{πειραματική}} - F_{\text{υπολογιστική}}|}{F_{\text{max}}}, \text{ με } F_{\text{max}} \text{ τη μεγαλύτερη από τις 2 δυνάμεις.}$$

### **13.2 Σχετικά με την ανάλυση των πειραματικών δυνάμεων στο Minitab**

- Τα αποτελέσματα από τη στατιστική ανάλυση μέσω Minitab έδειξαν μικρή διακύμανση των τιμών μεταξύ των δυνάμεων και των συνθηκών κοπής. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R-Squared), ο οποίος όπως έχουμε αναφέρει καταδεικνύει το πόσο καλά μπορούν να προβλέψουν οι συνθήκες κοπής τις δυνάμεις, κινήθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα και για τις 3 δυνάμεις.
- Μικρότερη απόκλιση παρουσιάστηκε για τη δύναμη  $F_z$ . Οι δυνάμεις  $F_x$ ,  $F_y$  βρίσκονται στα ίδια επίπεδα ικανοποιητικού συντελεστή προσδιορισμού. Όσο αναφορά στο δείκτη επηρεασμού  $P$ , κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής, είχαμε επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα με τις ανώτερες τιμές, που αφορούν το βάθος κοπής σε  $F_x$ ,  $F_y$ , να είναι στο όριο του 0.1 που θεωρείται ικανοποιητική τιμή.

### **13.3 Σχετικά με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου**

- Όπως αναφέραμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, είχαμε φθορά στην ελεύθερη επιφάνεια (flank wear) και πιθανή απουσία οποιουδήποτε άλλου είδους φθοράς.
- Είναι εμφανές, από την παράθεση των εικόνων και την ανάλυση τους, η αύξηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου τόσο με την αύξηση του βάθους κοπής όσο και της ταχύτητας κοπής.
- Μια επιπρόσθετη ανάλυση της φθοράς σε σχέση με τις συνθήκες κοπής, που την αναφέρουμε ως πρόταση για το μέλλον, θα ήταν να πραγματοποιηθεί με τη χρησιμοποίηση 9 κοπτικών εργαλείων και κρατώντας σταθερό κάθε φορά τον ένα παράγοντα κοπής. Έπειτα ανάλυση στο μικροσκόπιο και ανάλυση των αποτελεσμάτων σε γράφημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το σχήμα 2.7 στο κεφάλαιο της θεωρίας φθοράς κοπτικού εργαλείου.

### **13.4 Σχετικά με το μέσο ύψος τραχύτητας $R_a$**

- Όπως αναφέρθηκε και στην αντίστοιχη ενότητα, παρατηρήθηκε σημαντικότερη εξάρτηση των τιμών της τραχύτητας από τις τιμές της πρόωσης. Οι μέγιστες τιμές της  $R_a$  καταγράφηκαν στα πειράματα 3,5,7 όπου είχαμε τη μεγαλύτερη πρόωση και οι ελάχιστες στα πειράματα 1,6,8 όπου είχαμε τη μικρότερη πρόωση.

## **14. Συμπεράσματα**

Μέσω της θεωρίας που αναφέρθηκε στα πρώτα κεφάλαια είχε γίνει κατανοητή η δυσκολία στη κατεργασία του τιτανίου και η ανάγκη ανάλυσής της. Η πειραματική διαδικασία περιφερειακού φρεζαρίσματος πάνω σε συνήθεις συνθήκες κοπής, που πρόεκυψαν μετά από βιβλιογραφική μελέτη, οδήγησε στα αποτελέσματα των δυνάμεων και της φθοράς εργαλείου τα οποία και αναλύθηκαν τόσο αυτούσια όσο και, κυρίως, συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του υπολογιστικού προγράμματος προσομοίωσης AdvantEdge.

Όσον αφορά τη ποσοτική σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε ότι οι συνολικές αποκλίσεις, της τάξεως του 22%-25%, που παρουσιάστηκαν για τις δυνάμεις κοπής είναι μέσα στα αποδεκτά και αναμενόμενα όρια και έχουν να κάνουν με λόγους που αφορούν τόσο το ίδιο το AdvantEdge όσο και γενικότερα τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση κατεργασιών. Λόγοι που αφορούν τη μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών και το απλουστευμένο μοντέλο τριβής ολίσθησης σε συνδυασμό με σφάλματα διακριτοποίησης και επαναπροσδιορισμού του πλέγματος. Προέκυψε επίσης μια πολύ καλή ποιοτική ανάλυση ,από το πρόγραμμα, της αυξητικής τάσης των δυνάμεων με την αύξηση του βάθους κοπής.

Είναι σημαντικό να τονιστεί και το μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου(συνολικά 62 μέρες συνεχούς λειτουργίας του) που χρειάστηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα για την ολοκλήρωση κάθε πειράματος και επιβράδυνε σημαντικά την ολοκλήρωση της ανάλυσης. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκαν και προβλήματα που αφορούσαν στη προσομοίωση του υγρού κοπής κάποιων πειραμάτων και κολλημάτων του προγράμματος για άγνωστους λόγους. Στα θετικά του προγράμματος η φιλικότητα προς το χρήστη, αφού η μορφή καταχώρησης των δεδομένων καθώς και το εγχειρίδιο λειτουργίας γίνονταν εύκολα κατανοητά .

Όσον αφορά τη φθορά του κοπτικού εργαλείου τονίζεται η αύξηση της φθοράς τόσο με αύξηση του βάθους κοπής όσο και της ταχύτητας κοπής. Πρέπει να αναφερθεί ο σημαντικός ρόλος του ψυκτικού υγρού. Όπως φαίνεται από την ανάλυση των εικόνων του κοπτικού εργαλείου μετά από κάθε πείραμα προκύπτει έντονη φθορά στα τελευταία πειράματα (που είχαν και το μεγαλύτερο βάθος και ταχύτητα κοπής ) και απουσία φθοράς θερμικού ραγίσματος, κάτι που μας κάνει εμφανή τη σημασία του ψυκτικού υγρού. Για την τραχύτητα παρατηρήσαμε πολύ μεγάλη εξάρτηση από τη πρόωση.

Ως προς τις μετρήσεις που καταγράψαμε στη πειραματική διαδικασία θα ήταν ιδανικός ένας μεγαλύτερος αριθμός μετρήσεων στη μονάδα του χρόνου ωστόσο και ο αριθμός που πάρθηκε στο πείραμά μας κρίνεται ικανοποιητικός. Η ανάλυση Anova, των μετρήσεων, από το Minitab επιβεβαιώνει για την ακεραιότητα καταγραφής των

δυνάμεων συγκριτικά με τις αλλαγές στις συνθήκες κοπής καθότι όλες οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού (R-Squared) και του δείκτη P ήταν ικανοποιητικές.

## **15. Επίλογος**

Η ευρεία εφαρμογή των κραμάτων τιτανίου σε πάρα πολλούς τομείς της καθημερινότητά μας άλλα συγχρόνως και οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στη κατεργασία του λόγω των ιδιοτήτων του, καθίστα αναγκαία τη περαιτέρω ανάλυση των παραμέτρων κοπής του και την αποτελεσματικότητα των προγραμμάτων προσομοίωσης των κατεργασιών που πλέον έχουν γίνει πολύ διαδεδομένα. Στη παρούσα διπλωματική μελετήσαμε τη κατεργασία περιφερειακού φρεζαρίσματος τιτανίου συγκρίνοντας πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα(με χρήση του προγράμματος Advantedge) και αναλύοντας τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η πειραματική μας διαδικασία, που οργανώθηκε με βάση συνήθεις τιμές συνθηκών κοπής και τιμές που ορίζονταν από το κατασκευαστή του εργαλείου, κατέγραψε αποδεκτές τιμές όπως παρουσίασε η ανάλυση διακύμανσης Anova. Συγκρινόμενες με τις τιμές που καταγράφηκαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα, παρουσίασαν απόκλιση μέσα στα αποδεκτά όρια που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς επίσης και άλλα συμπεράσματα σχετικά με τη ποιοτική σύγκλιση αυξανόμενου του βάθους κοπής. Για τη φθορά του κοπτικού εργαλείου, που μελετήθηκε μετά από ανάλυση στο μικροσκόπιο, παρουσιάστηκαν συμπεράσματα για το είδος της καθώς και της επίδρασης της ταχύτητας και του βάθους κοπής.

Εν κατακλείδι το αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό καθώς πραγματοποιήσαμε μια μελέτη κατεργασίας και την αντιστοιχία της με ένα πολύ διαδεδομένο υπολογιστικό πρόγραμμα, για ένα πάρα πολύ ενδιαφέρον υλικό, που δεν είναι τόσο συχνή στη διεθνή βιβλιογραφία.



## **16. Βιβλιογραφία**

- [1] Λάζαρος Ε. Λαζαρίδης, « Μηχανουργική Τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1990
- [2] Πέτρος Γ. Πετρόπουλος, « Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο 2», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1994
- [3] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 1», 1998
- [4] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 2», 1999
- [5] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 4», 1999
- [6] Ελευθέριος Δ. Παπαδανιήλ- Μιχαήλ Μ. Σφαντζικόπουλος, « Μηχανουργική Τεχνολογία- Εργαστήριο 2», Ίδρυμα Ευγενίδου, 2006 »
- [7] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών:Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Φοίβος, 1996
- [8] Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιακός, «Computer Numerical Control-Computer Aided Manufacturing», 2001
- [9] Άγγελος Μαρκόπουλος, «Κατεργασίες Αποβολής Υλικού Λίαν Υψηλής Ακρίβειας», Διδακτορική Διατριβή, 2006
- [10] Σημειώσεις από το μάθημα «Κατεργασίες 2» του καθηγητή Δ.Μανωλάκου:
- i. Το Πρότυπο Ορθογωνικής κοπής
  - ii. Τριβή- Θερμότητα- Υγρά Κοπής
  - iii. Φθορά και Διάρκεια Ζωής ΚΕ
  - iv. Λοξή Κοπή
  - v. Στοιχεία Εργαλειομηχανών Κοπής
  - vi. Φρεζάρισμα
- [11] Σημειώσεις από το μάθημα «Εισαγωγή στη Μηχανουργική Τεχνολογία» του καθηγητή Γ. Βοσνιάκου:
- i. Εργαλειομηχανές- Κοπτικά Εργαλεία- Γεωμετρία
  - ii. Κοπτικά Εργαλεία- Υλικά
  - iii. Μηχανουργικές Επιφάνειες

[12] Σημειώσεις από το μάθημα «Εργαλειομηχανές» του καθηγητή Γ. Βοσνιάκου:

- i. Τυπικές Εργαλειομηχανές CNC
- ii. CNC- DNC
- iii. Συγκρότηση Εργαλειομηχανών

[13] J. Paulo Davim, «Machining- Fundamentals and Recent Advances», Springer, 2008

[14] Christoph Leyens and Manfred Peters, «Titanium and Titanium alloys. Fundamentals and Applications», DGM, 2003

[15] Helmi A. Youssef- Hassan El-Hofy, «Machining Technology-Machine Tools and Operations», CRC Press, 2008

[16] S. Kalpakjian, “Manufacturing Engineering and Technology” Proceedings of the 2000 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '00), Takamatsu, Japan, October 30 - November 5 2000, pp. 245-250.

[17] ASM HANDBOOK, ‘VOLUME 16: Mschining’, ASM INTERNATIONAL, March 1997

[18] AdvantEdge Manual

[19] TecPlot User`s Manual

[20] <http://www.clarkson-osborn.com>

[21] Minitab Tutorials

[22] Stephanie Fraley, Mike Oom, Ben Terrien, JohnZalewski, “Design of experiments via Taguchi methods: Orthogonal arrays”, ControlsWiki, 2006

[23] Design of Experiments: Taguchi Methods, Peter Woolf, University of Michigan Textbook

[24] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, ‘Titanium alloys and their machinability – a review’, October 1995

[25] P. Roud1, M. Zetek, I. Cesákova, J. Sklenicka, P. Kozmin ‘Using of fem for chip formation and cutting force prediction when drilling tool steel AISI D3’, University of West Bohemia, Pilsen, Czech republic, March 2011