



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

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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΑΣΤΡΙΤΣΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει ως σκοπό α) την μελέτη των κατεργασιών κοπής, και πιο συγκεκριμένα του μετωπικού φρεζαρίσματος, β) την μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση της συγκεκριμένης κατεργασίας, γ) την προσομοίωση και την μοντελοποίηση της κατεργασίας σε εξειδικευμένο πρόγραμμα στον υπολογιστή, δ) την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, που πήραμε κατά την διάρκεια των πειραμάτων, μέσα από στατιστικό πρόγραμμα ε) την μελέτη της φθοράς του εργαλείου που χρησιμοποιήσαμε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της εργασίας. Αφού λοιπόν αναλύονται τα βασικά στοιχεία των κατεργασιών κοπής, γίνεται η παρουσίαση και μοντελοποίηση των κατεργασιών στο εμπορικό πακέτο Advant Edge. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για την υπολογιστική προσομοίωση των κατεργασιών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και των οποίων οι συνθήκες κοπής επιλέχθηκαν με βάση την μέθοδο Taguchi για την ευκολότερη και πιο αξιόπιστη ανάλυση των κατεργασιών κοπής, μελετώντας κυρίως τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια των κατεργασιών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα άλλο εμπορικό πρόγραμμα, το Minitab, που σκοπό έχει την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που πήραμε από την πραγματοποίηση των πειραμάτων στο εργαστήριο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην εργαλειομηχανή CNC του εργαστηρίου του Τομέα των Κατεργασιών, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Δημήτριο Ε. Μανωλάκο για την τιμή που μου έκανε να μου αναθέσει την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, καθώς και τις πολύ χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις που μου έδωσε ως επιβλέπων καθηγητής και με βοήθησαν να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τους Δρ Άγγελο Μαρκόπουλο και Δρ Νικόλαο Γαλάνη για την πολύτιμη βοήθεια και στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλο το χρονικό διάστημα της πραγματοποίησης της εργασίας. Μέσα από την στενή συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το χρονικό διάστημα και τις γνώσεις που αποκόμισα χάρη σε αυτούς, καταφέραμε να

ολοκληρώσουμε επιτυχώς την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου του Τομέα Κατεργασιών για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν όποτε αυτό κρίθηκε απαραίτητο για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Καστρίτσης Χαράλαμπος

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Περίληψη.....	6
2.	Κατεργασίες Κοπής.....	7
2.1	Γενικά Χαρακτηριστικά Κατεργασιών.....	7
2.2	Κοπή.....	8
2.2.1	Περιγραφή Βασικών Χαρακτηριστικών Κοπής.....	8
2.2.2	Οι Δυνάμεις Κοπής.....	11
2.2.3	Θερμότητα και Θερμοκρασία κατά την Κοπή.....	13
2.3	Συμβατικές Εργαλειομηχανές Κοπής.....	15
2.3.1	Γενικά.....	15
2.3.2	Κινήσεις Συμβατικών Εργαλειομηχανών Κοπής.....	15
2.3.3	Ταξινόμηση Εργαλειομηχανών Κοπής.....	16
2.3.4	Συγκρότηση Εργαλειομηχανών Κοπής.....	17
2.3.5	Φρέζα.....	17
2.3.6	Εργαλειομηχανές CNC.....	19
2.4	Κοπτικά Εργαλεία.....	21
2.4.1	Γενικά Χαρακτηριστικά.....	21
2.4.2	Γεωμετρία Κοπτικών Εργαλείων.....	21
2.4.3	Είδη Κοπτικών Εργαλείων στο Φρεζάρισμα.....	23
2.4.4	Υλικά Κατασκευής Κοπτικών Εργαλείων.....	23
2.4.5	Επικαλύψεις/ Επενδύσεις.....	27
2.4.6	Φθορά Εργαλείου.....	27
2.5	Τραχύτητα Επιφάνειας.....	28
2.6	Απόβλητα/ Γρέζια.....	30
2.6.1	Γενικά Χαρακτηριστικά και Είδη Αποβλήτου.....	30
2.6.2	Χαρακτηριστικά του Αποβλήτου.....	37
2.7	Τα Υγρά Κοπής στις Κατεργασίες Κοπής.....	37
2.8	Συνθήκες Κοπής.....	39
2.8.1	Παράγοντες που επηρεάζουν τις Συνθήκες Κοπής...39	
2.8.2	Φρεζάρισμα.....	41
2.8.3	Χαρακτηριστικά Μεγέθη του Φρεζαρίσματος.....	42
2.9	Κατεργασίες Υψηλής Ταχύτητας.....	43
3.	Υπολογιστική Προσομοίωση με τη χρήση του AdvantEdg.....	45
3.1	Γενικά για την Μοντελοποίηση των Κατεργασιών.....	45
3.2	Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	46
3.3	Συνοπτική Παρουσίαση του Πακέτου AdvantEdge.....	48
3.3.1	Γενικά.....	48
3.3.2	Εισαγωγή Δεδομένων.....	48
3.3.3	Εμφάνιση Αποτελεσμάτων.....	57
3.3.4	Μειονεκτήματα του Πακέτου AdvantEdge.....	59
4.	Πειραματική Διαδικασία.....	61
4.1	Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης Εργαστηρίου.....	61



4.2	Χαρακτηριστικά του Τιτανίου.....	67
4.3	Η Μέθοδος Taguchi.....	70
4.4	Η Πειραματική Διαδικασία Μετωπικού Φρεζαρίσματος.....	73
5.	Στατική Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων με τη χρήση του προγράμματος Minitab.....	78
5.1	Γενικά για το Πρόγραμμα.....	78
5.2	Ανάλυση της Διακύμανσης (ANOVA).....	80
5.2.1	Χαρακτηριστικά της Ανάλυσης της Διακύμανσης.....	80
5.2.2	Αποτελέσματα της Ανάλυσης της Διακύμανσης.....	81
6.	Αποτελέσματα.....	85
6.1	Πειραματικά Αποτελέσματα.....	85
6.2	Υπολογιστικά Αποτελέσματα.....	95
7.	Συμπεράσματα.....	102
7.1	Σύγκριση Αποτελεσμάτων Πειραμάτων- Προσομοιώσεων.....	102
7.2	Πιθανές Αιτίες Απόκλισης Πειραματικών- Υπολογιστικών Τιμών.....	106
7.3	Τελικά Συμπεράσματα για τα Πειράματα και τις Προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν.....	107
8.	Φθορά και Χρόνος Ζωής Κοπτικού Εργαλείου.....	110
8.1	Γενικά Χαρακτηριστικά.....	110
8.2	Φθορά και Είδη Φθοράς Κοπτικού Εργαλείου.....	110
8.3	Ο Χρόνος Ζωής του Κοπτικού Εργαλείου.....	112
8.3.1	Κριτήρια Αστοχίας του Εργαλείου.....	112
8.3.2	Η Σχέση του Taylor.....	113
8.3.3	Παράγοντες Κοπής που επηρεάζουν τη Ζωή του Εργαλείου.....	114
8.4	Μελέτη της Φθοράς του Κοπτικού Εργαλείου κατά τις Κοπές Μετωπικού Φρεζαρίσματος.....	116
9.	Επίλογος.....	122
10.	Βιβλιογραφία.....	124

## 1. Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναφέρεται στη μελέτη των κατεργασιών κοπής, των παραγόντων που επηρεάζουν αυτές τις κατεργασίες καθώς και των μεθόδων βελτιστοποίησης, μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Αρχικά γίνεται εκτενή αναφορά στα χαρακτηριστικά των κατεργασιών κοπής, και πιο συγκεκριμένα του φρεζαρίσματος, των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια των κοπών καθώς και των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται. Επίσης γίνεται αναφορά στις συνθήκες που πραγματοποιούνται οι κατεργασίες κοπής, τα απόβλητα που δημιουργούνται κατά την κοπή καθώς επίσης και τρόπους για την βελτίωση των κατεργασιών βάσει των παραμέτρων τους. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μοντελοποίησης των κατεργασιών, κάνοντας εκτενή αναφορά στο εμπορικό πρόγραμμα προσομοίωσης κατεργασιών κοπής Advant Edge το οποίο χρησιμοποιήσαμε για να μοντελοποιήσουμε τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο, καθώς και μια αναφορά στην μέθοδο Taguchi βάσει της οποίας έγινε η επιλογή των παραμέτρων των πειραμάτων. Στη συνέχεια γίνεται μια εισαγωγή στο εμπορικό στατιστικό πρόγραμμα Minitab, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για να αναλύσουμε στατιστικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας. Επίσης θα προσπαθήσουμε να βρούμε τυχόν αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διάφορων παραμέτρων των πειραμάτων μας, συγκρίνοντας τις τιμές τους στατιστικά. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και των προσομοιώσεων στο Advant Edge, η σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και τα συμπεράσματα που μπορέσαμε να εξάγουμε μετά την ολοκλήρωση όλων των διαδικασιών που απαιτούνταν. Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση της φθοράς που υπέστη το εργαλείο μετά από κάθε πείραμα που πραγματοποιούσαμε στην εργαλειομηχανή CNC. Η ανάλυση αυτή γίνεται μέσα από φωτογραφίες που έχουμε τραβήξει, με την βοήθεια του μικροσκοπίου του εργαστηρίου, μετά από την ολοκλήρωση κάθε πειράματος.

## **2. Κατεργασίες κοπής**

### **2.1 Γενικά χαρακτηριστικά κατεργασιών**

Με τον όρο κατεργασία ονομάζεται κάθε μεταβολή και διαμόρφωση που πραγματοποιείται στην πρώτη ύλη (μέταλλο, πέτρα, ξύλο, τεχνητά υλικά κ.α.). Η συναρμολόγηση των κομματιών, που έχουν κατεργαστεί, με ένα συγκεκριμένο τρόπο έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή βιομηχανικών προϊόντων. Το σύνολο των κατεργασιών που έχουν επινοηθεί και εφαρμόζονται ευρέως στην βιομηχανία, χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- Τις κατεργασίες κοπής ή αφαίρεσης υλικού
- Τις κατεργασίες διαμόρφωσης

Οι κατεργασίες κοπής αποτελούν την βασικότερη μέθοδο διαμόρφωσης μεταλλικών αντικειμένων γιατί έχουν σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες μορφοποίησης. Η διαμόρφωση των αντικειμένων πραγματοποιείται με την βαθμιαία αφαίρεση υλικού με τη βοήθεια εργαλειομηχανών. Η αφαίρεση αυτή του υλικού είναι δυνατόν να γίνει σε μακροσκοπικό επίπεδο με την βοήθεια κοπτικών εργαλείων ή σε μικροσκοπικό επίπεδο με την επίδραση μηχανικών, χημικών ή ηλεκτρικών μέσων.

Στην δεύτερη κατηγορία, η τελική μορφή του προϊόντος από την πρώτη ύλη προκύπτει απευθείας με μία πράξη ή με πολύ μικρό αριθμό πράξεων χωρίς βαθμιαία αφαίρεση υλικού. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλες σχεδόν οι κατεργασίες που γίνονται από τις πρέσες. Σε αυτές τις κατεργασίες μπορούν να συμπεριληφθούν επίσης οι συγκολλήσεις και η χύτευση.

Ανάλογα με τον διαχωρισμό των κατεργασιών, χωρίζονται και οι εργαλειομηχανές σε δύο αντίστοιχες μεγάλες κατηγορίες:

- Εργαλειομηχανές κοπής και αφαίρεσης υλικού: Τόρνος, φρέζα, πλάνη, τρύπανο, λειαντικός τροχός, γριναζοκόπτης, μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης κ.α.
- Εργαλειομηχανές διαμόρφωσης: Μηχανικό ψαλίδι κοπής χαλυβδόφυλλων, πρέσσα, μηχανές κάμψεως λαμαρίνων, σφυριά καμινεύσεως, σωληνοποιητικές μηχανές κ.α.

Στη βιομηχανία όπως είναι φυσικό, δημιουργούνται κατασκευές που προκύπτουν από τον συνδυασμό των κατεργασιών κοπής και διαμόρφωσης, όπως για παράδειγμα τα κομμάτια ενός αυτοκινήτου.

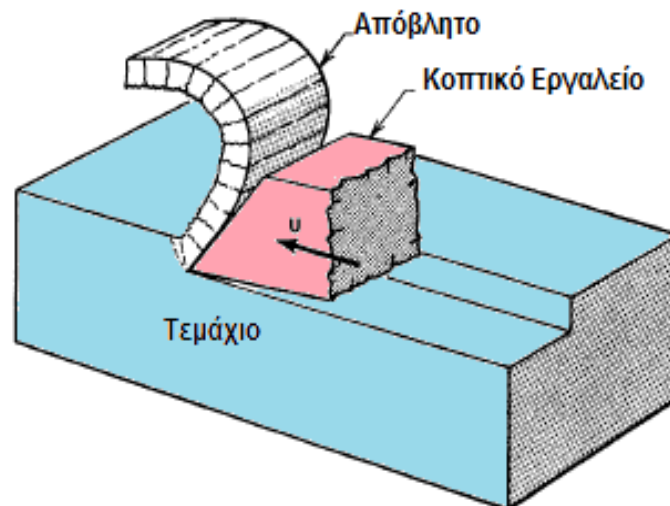
## 2.2 Κοπή

### 2.2.1 Περιγραφή βασικών χαρακτηριστικών κοπής

Οι βασικοί συντελεστές που παίζουν σημαντικό ρολό στη κοπή είναι:

- Το Κατεργαζόμενο Τεμάχιο (ΤΕ)
- Το Κοπτικό εργαλείο (ΚΕ)
- Το Απόβλητο (ή αλλιώς το αφαιρούμενο υλικό)

Οι τρεις παραπάνω βασικοί συντελεστές φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.1:



ΣΧΗΜΑ 2.1 Οι βασικοί συντελεστές της κοπής

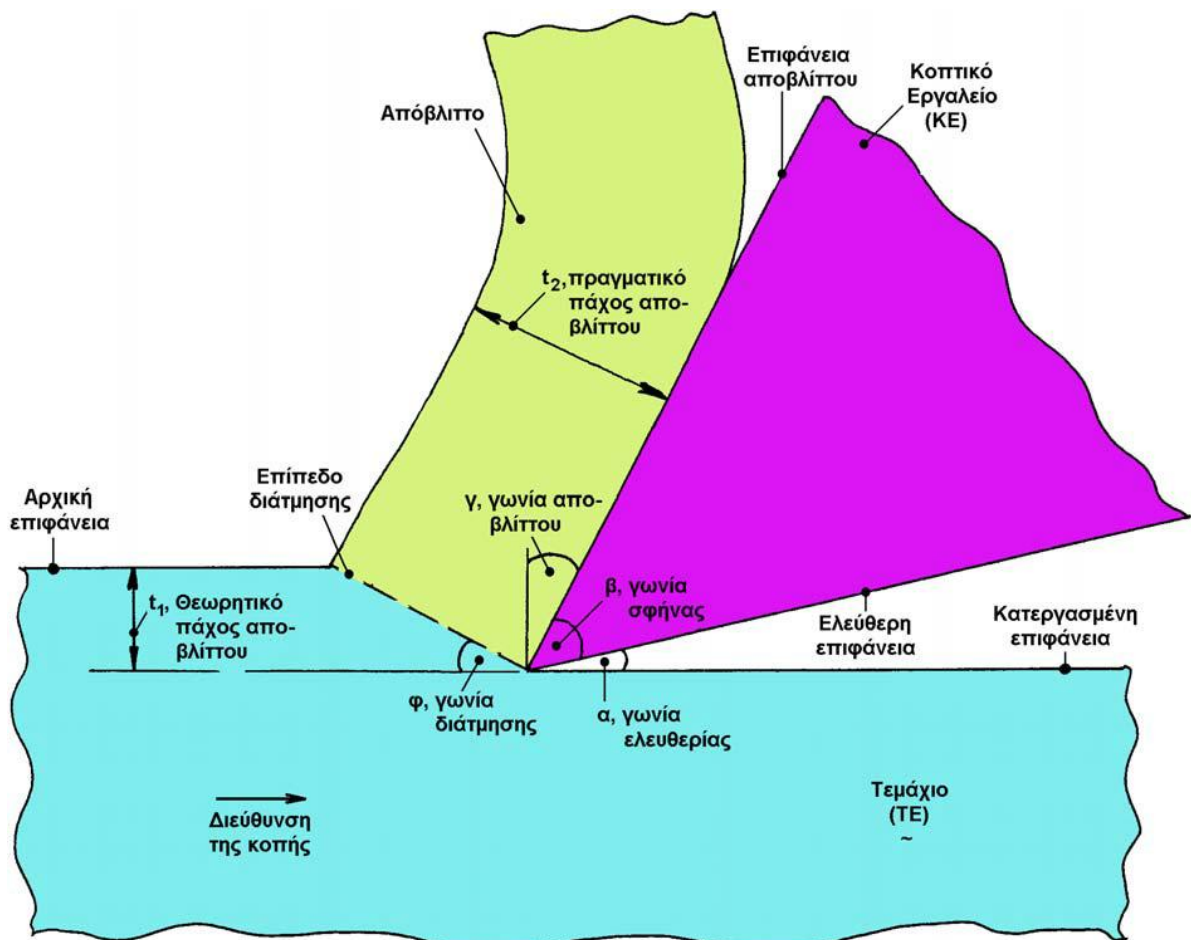
Το ΚΕ κινείται σε σχέση προς το ΤΕ σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα  $u$ , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλητο που κινείται επί του ΚΕ μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του.

Το ΚΕ προσομοιάζεται με σφήνα ευθύγραμμης ακμής που κινείται ως προς το κατεργαζόμενο ΤΕ έτσι ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους και με την αντίστοιχη κάθε φορά μορφή αποβλήτου.

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά ΚΕ (Σχ.2.2):

- Επιφάνεια αποβλήτου: Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλητο κατά την κίνησή του.
- Ελεύθερη επιφάνεια: Είναι η επιφάνεια της σφήνας που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.
- Κόψη: Είναι η ακμή της σφήνας που προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών.
- Γωνία αποβλήτου  $\gamma$ : Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλήτου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του ΚΕ. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.
- Γωνία ελευθερίας  $\alpha$ : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του ΚΕ και την κατεργασμένη επιφάνεια.
- Γωνία σφήνας  $\beta$ : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλήτου. Ισχύει ότι :

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



ΣΧΗΜΑ 2.2 Βασικές έννοιες της κοπής

Ανάλογα με το είδος της κατεργασίας, τα ΚΕ διακρίνονται σε:

- Καθορισμένης γεωμετρίας και απλής σημειακής επαφής, όπου στην αποβολή υλικού μετέχει μία μόνο κόψη του ΚΕ (π.χ. τórνευση, πλάνισμα).
- Καθορισμένης γεωμετρίας και πολλαπλής σημειακής επαφής, όπου μετέχουν στην κοπή συγχρόνως περισσότερες από μία κόψεις του ΚΕ (π.χ. διάτρηση, φρεζάρισμα).
- Μη καθορισμένης γεωμετρίας, π.χ. λειαντικός τροχός.

Κατά την διάρκεια της κοπής δύο είναι οι κινήσεις που συναντάμε:

- Πρωτεύουσα ή κύρια κίνηση: Παρέχεται από την εργαλειομηχανή (ΕΜ) στο ΤΕ ή στο ΚΕ και εξασφαλίζει τοπική σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο με αποτέλεσμα ή την προσέγγισή τους ή την αφαίρεση υλικού στη θέση αυτή. Κατά τη κίνηση αυτή απορροφάται το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής.
- Δευτερεύουσα ή κίνηση πρόωσης: Παρέχεται από την ΕΜ στο ΤΕ ή στο ΚΕ κατά τρόπο συνεχή ή διακοπτόμενο και σε συνδυασμό με την κύρια κίνηση αποδίδει την κατεργασμένη επιφάνεια ΤΕ σε ορισμένο μήκος αυτού. Η κίνηση αυτή απορροφά μικρό ποσοστό της ισχύος κοπής.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά στοιχεία που συναντάμε κατά την διάρκεια της κατεργασίας ενός τεμαχίου σε μια εργαλειομηχανή είναι τα εξής:

Α) Το Βάθος κοπής  $a$ : Είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το ΚΕ μέσα στο υλικό ΤΕ. Μετράται σε mm.

Β) Η Ταχύτητα κοπής  $v$ : Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακμής (κόψης) του ΚΕ ως προς το ΤΕ κατά την πρωτεύουσα κίνηση. Συνήθως μετράται σε m/min (σπανιότερα σε m/s).

Γ) Η Πρόωση  $s$ : Είναι η σχετική μετατόπιση του ΚΕ ως προς ΤΕ ανά περιστροφή ή ενεργό διαδρομή (ΚΕ ή ΤΕ). Μετράται σε mm/rev ή mm/ενεργό διαδρομή και κατά τη κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης.

Δ) Η Ταχύτητα πρόωσης  $v_p$ : Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακμής ΚΕ ως προς το ΤΕ κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης.

Μεταξύ των μεγεθών  $s$  και  $v_p$  ισχύει η σχέση:

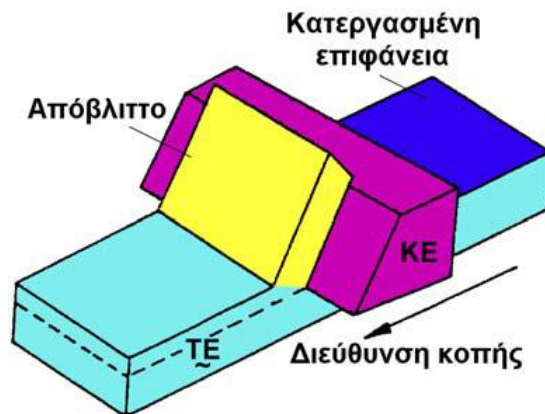
$$v_p = s \cdot n$$

όπου  $n$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ή ο αριθμός ενεργών διαδρομών στη μονάδα χρόνου.

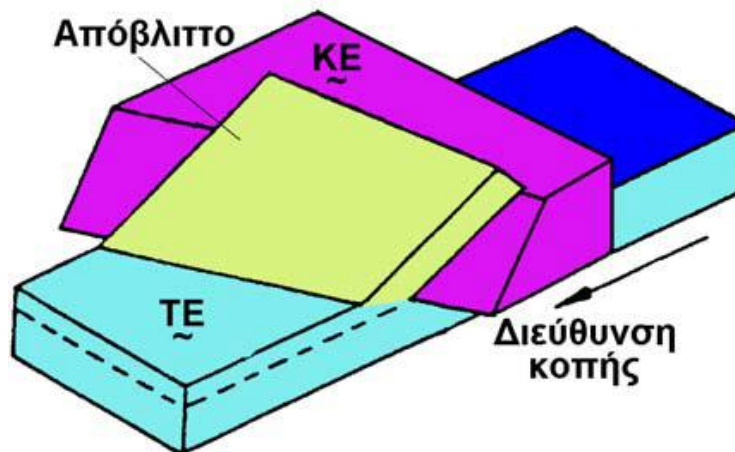
Ανάλογα με την θέση της κόψης του ΚΕ ως προς την διεύθυνση κοπής, διακρίνουμε δύο είδη κοπής (αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 2.4):

A) Ορθογωνική κοπή: Η κόψη του ΚΕ είναι κάθετη ως προς την διεύθυνση κοπής (Σχ. 2.3)

B) Λοξή κοπή: Η κόψη του ΚΕ είναι κεκλιμένη ως προς την διεύθυνση κοπής (Σχ. 2.4)



ΣΧΗΜΑ 2.3 Ορθογωνική Κοπή

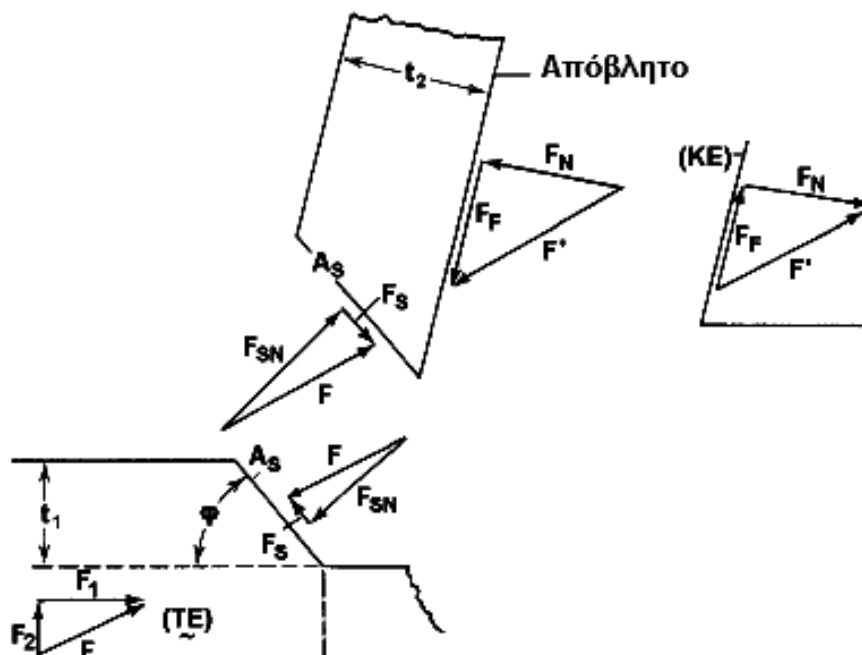


ΣΧΗΜΑ 2.4 Λοξή κοπή

## 2.2.2 Οι Δυνάμεις Κοπής

Θεωρούμε το απόβλητο ως ένα σώμα απόλυτα στερεό και ελεύθερο που οριακά ευρίσκεται σε ισορροπία (Σχ. 2.5) και συγχρόνως σε αλληλεπίδραση με το τεμάχιο (TE) και το κοπτικό εργαλείο (ΚΕ). Οι δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό από το TE και το ΚΕ είναι οι εξής:

- $F_S$  :η αντίσταση του υλικού του ΤΕ σε διάτμηση
- $F_{SN}$  :η κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης (δηλ. κάθετη στην  $F_S$ ).
- $F_F$  :η δύναμη τριβής στη διεπιφάνεια ΚΕ/ αποβλήτου που αντιτίθεται στην κίνηση του αποβλήτου.
- $F_N$  :η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής ΚΕ/αποβλήτου (δηλ. κάθετη στην  $F_F$ ).



ΣΧΗΜΑ 2.5 Οι δυνάμεις που ασκούνται σε δισδιάστατη κοπή

Αν  $F$  είναι η συνισταμένη των  $F_S$  και  $F_{SN}$  και  $F'$  η συνισταμένη των  $F_F$  και  $F_N$ , θα πρέπει να ισχύει για την ισορροπία του αποβλήτου:

$$F = F'$$

Η  $F'$  ονομάζεται **δύναμη κοπής** και αν μεταφερθεί στην ακμή του ΚΕ, μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα ζεύγη δυνάμεων:

- $F_S$  και  $F_{SN}$
- $F_F$  και  $F_N$
- $F_1$  (οριζόντια - κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής) και  $F_2$  (κάθετη στην  $F_1$ - δύναμη άπωσης)

Κατά την λοξή κοπή οι δυνάμεις αναλύονται τρισδιάστατα σε τρεις συνιστώσες της δύναμης  $F$ :  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_3$  οι οποίες μετριοούνται, όπως θα



δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο, με την βοήθεια δυναμόμετρου κατά την διάρκεια των κοπών στην μηχανή.

### 2.2.3 Θερμότητα και θερμοκρασία κατά την κοπή

Η συνολική ενέργεια που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η κοπή ενός μετάλλου, ξοδεύεται σε δυο περιοχές:

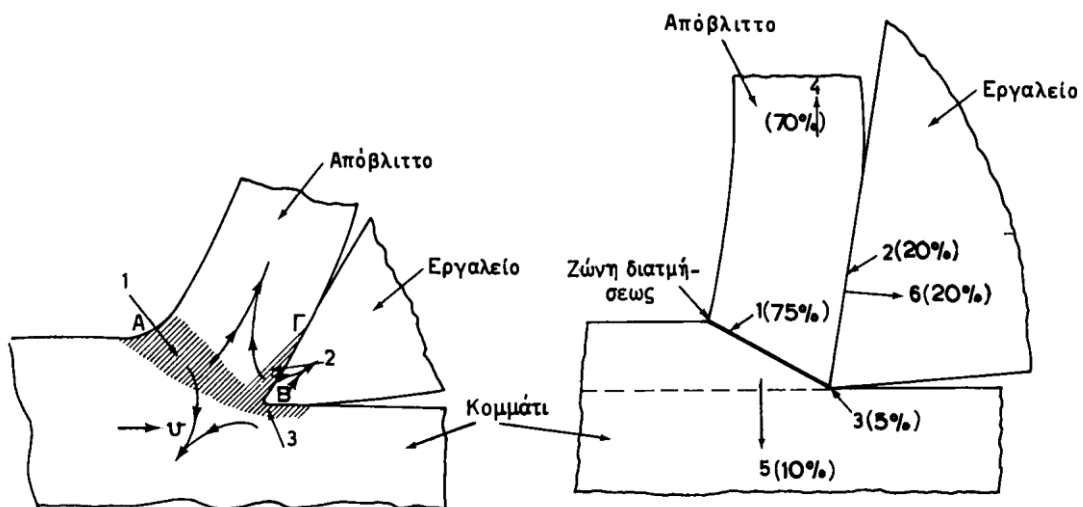
- Στη ζώνη διατμήσεως (1)
- Στη ζώνη τριβής (2)

Υπάρχει όμως και μια τρίτη ζώνη, όχι όμως τόσο σημαντική όσο οι δυο προηγούμενες. Είναι η επιφάνεια (3), όπου εφάπτεται η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου με το κομμάτι. Στη ζώνη αυτή ξοδεύεται ενέργεια από το ένα μέρος για το σχηματισμό της κατεργασμένης επιφάνειας του κομματιού, και από το άλλο για την υπερνίκηση της τριβής που αναπτύσσεται στη ζώνη αυτή, ιδιαίτερα όταν το εργαλείο έχει προχωρημένη φθορά στην ελεύθερη επιφάνειά του.

Επειδή η μηχανική ενέργεια που διαθέτουμε κατά την κοπή χρησιμοποιείται τόσο ως ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη διάτμησης, όσο και ως ενέργεια τριβής στη ζώνη τριβής και στη ζώνη επαφής εργαλείου- κομματιού, μετατρέπεται σχεδόν στο σύνολο της θερμότητας. Έτσι οι τρεις ζώνες κατανάλωσης ενέργειας θα είναι πηγές θερμότητας (βλέπε Σχ. 2.6).

Στο Σχήμα 2.7 βλέπουμε πως κατανέμεται χονδρικά η παραγόμενη θερμότητα στις τρεις ζώνες και πως η θερμότητα αυτή απάγεται στο απόβλητο, στο εργαλείο και στο κομμάτι.

Το μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας παράγεται στη ζώνη διάτμησης και κυμαίνεται ανάμεσα σε 65 με 80%. Επίσης το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 75%, της συνολικής θερμότητας που εκλύεται κατά την διάρκεια της κοπής παραλαμβάνεται από το απόβλητο.



ΣΧΗΜΑ 2.6 Ζώνες όπου παράγεται θερμότητα

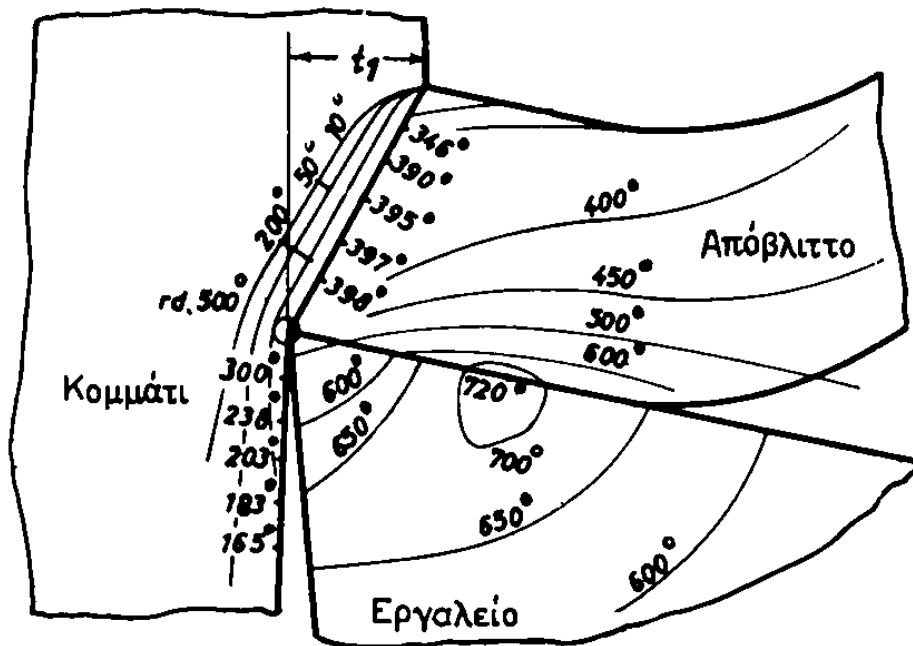
ΣΧΗΜΑ 2.7 Διανομή της παραγόμενης θερμότητας

Λόγω της σημαντικής ποσότητας θερμότητας που εκλύεται κατά την κοπή των μετάλλων, αναπτύσσονται στις ζώνες 1,2 και 3, που αναφέραμε, αρκετά υψηλές θερμοκρασίες ανάλογα με την κάθε περίπτωση κοπής. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες έχουν κατά κύριο λόγο δυο επιπτώσεις: α) μια ευνοϊκή που είναι η μείωση του όριου διαρροής του μετάλλου, άρα μιλάμε για πιο εύκολη κοπή, και β) μια δυσμενή και συνάμα πολύ σημαντική, τη φθορά στο κοπτικό εργαλείο, και άρα την ελάττωση της ζωής του.

Ιδιαίτερα μας ενδιαφέρουν οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην ζώνη τριβής, που σχετίζονται πιο άμεσα με τη φθορά του εργαλείου. Η μέση θερμοκρασία στη ζώνη αυτή, όπως πειραματικά και θεωρητικά έχει βρεθεί, εξαρτάται από το είδος του κατεργαζόμενου υλικού (ειδική θερμότητα, πυκνότητα, συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ειδική αντίσταση κοπής), από την ταχύτητα κοπής και από τη θεωρητική διατομή του αποβλήτου. Πιο συγκεκριμένα, η μέση αυτή θερμοκρασία υψώνεται όσο η ταχύτητα κοπής, η θεωρητική διατομή του αποβλήτου και η ειδικά αντίσταση κοπής του κατεργαζόμενου μετάλλου μεγαλώνει και όσο η ειδική θερμότητα, η πυκνότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού μικραίνει.

Στο παρακάτω Σχήμα 2.8 απεικονίζεται η διανομή θερμοκρασιών στο απόβλητο, στο εργαλείο και στο κομμάτι για την αναφερόμενη στο σχήμα περίπτωση κοπής ενός χάλυβα. Από την διανομή αυτή των θερμοκρασιών, αλλά και από άλλες παρόμοιες διανομές σε άλλα πειράματα, μπορούμε να διατυπώσουμε τις εξής δυο παρατηρήσεις:

- Ότι οι θερμοκρασίες είναι κατά πολύ υψηλότερες στο εργαλείο από ότι είναι στο απόβλητο και φυσικά και στο κομμάτι
- Ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες αναπτύσσονται συνήθως σε θέσεις που απέχουν αρκετά από τη μύτη του εργαλείου. Πολύ συχνά στη θέση των μέγιστων θερμοκρασιών αρχίζει να αναπτύσσεται η φθορά κρατήρα του εργαλείου.



ΣΧΗΜΑ 2.8 Διανομή των θερμοκρασιών στο εργαλείο, στο κομμάτι και στο απόβλητο κατά την κατεργασία ενός σκληρού ανθρακούχου χάλυβα. Οι θερμοκρασίες δίνονται σε °C

## 2.3 Συμβατικές εργαλειομηχανές κοπής

### 2.3.1 Γενικά

Εργαλειομηχανή είναι το σύνολο των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μιας κατεργασίας. Σκοπός της είναι η παροχή της αναγκαίας ισχύος για την εκτέλεση της κατεργασίας, η εξασφάλιση της συγκράτησης του τεμαχίου, η εκτέλεση των σχετικών κινήσεων του τεμαχίου και του εργαλείου καθώς και ο έλεγχος τους για την ορθή εξέλιξη της κατεργασίας. Δύο κύριες κατηγορίες εργαλειομηχανών είναι:

- οι εργαλειομηχανές κοπής και
- οι εργαλειομηχανές διαμόρφωσης (συμπαγούς υλικού και επιπέδου ελάσματος).

Οι πρώτες διακρίνονται σε συμβατικές και μη συμβατικές. Οι πρώτες επιτυγχάνουν κοπή με εκμετάλλευση του μηχανισμού διάτμησης του υλικού στη ζώνη κοπής (μηχανικό φαινόμενο), ενώ οι άλλες επιτυγχάνουν απομάκρυνση του υλικού με εκμετάλλευση υπερήχων, χημικών αντιδράσεων, δέσμης πλάσματος / ηλεκτρονίων κλπ.

### 2.3.2 Κινήσεις συμβατικών εργαλειομηχανών κοπής

Η κύρια κίνηση είναι αυτή που απορροφά το μεγαλύτερο τμήμα ισχύος. Συνήθως είναι περιστροφική και σπανιότερα γραμμική.

Οι βοηθητικές κινήσεις είναι συνήθως προώσεις του τεμαχίου ή/και του εργαλείου. Οι βοηθητικές κινήσεις χαρακτηρίζονται με ένα γράμμα :

- X,Y,Z για γραμμικές κινήσεις σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων και
- A,B,C για περιστροφικές κινήσεις γύρω από τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος κατά τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία.

Κατά ISO ο άξονας Z είναι τοποθετημένος στην κύρια άτρακτο ή (αν δεν υπάρχει) είναι κάθετος στο τραπέζι της μηχανής. Ο άξονας X είναι συνήθως παράλληλος με τη μεγαλύτερη διαδρομή πρόωσης. Οι επιμέρους κανόνες που ακολουθούνται για τον καθορισμό αξόνων ακολουθούν τυποποίηση ISO.

### **2.3.3 Ταξινόμηση εργαλειομηχανών κοπής**

Κατά το είδος κατεργασίας:

- Διάνοιξη οπών όπως δράπανα, φρέζες, τόννοι
- Δημιουργία επίπεδων επιφανειών όπως πλάνες, φρέζες
- Δημιουργία αξονοσυμμετρικών επιφανειών όπως τόννοι
- Δημιουργία πρισματικών και γλυπτών επιφανειών όπως φρέζες
- Δημιουργία επιφανειών ακριβείας όπως λειαντικά
- Δημιουργία οδοντοτροχών και διαιρέσεων όπως φρέζες, γранаζοκόπτες
- Κοπή πρώτης ύλης όπως πριόνια
- Δημιουργία αυλακώσεων, ελικώσεων, στίλβωση όπως ειδικές μηχανές

Κατά το βάρος:

- ελαφρές (< 1 t)
- μέσες (>1t και <10t)
- βαριές (>10τ)

Κατά την ακρίβεια κατεργασίας:

- Συνήθειες (10 μm)
- Ακριβείας (1 μm)
- Υψηλής ακριβείας (0.1 μm)
- Υψίστης ακριβείας (<0.01 μm)

Κατά το βαθμό αυτοματισμού

- Κοινές, με πλήρως χειροκίνητη λειτουργία
- Ημι-αυτόματες, με μηχανικούς αυτοματισμούς πχ τόννοι ρεβόλβερ
- Αυτόματες, των οποίων ειδική κατηγορία είναι οι προγραμματιζόμενες με λειτουργία ελεγχόμενη από πρόγραμμα NC

Κατά το βαθμό εξειδίκευσης

- Γενικής χρήσης, πχ για ευρεία κατηγορία τεμαχίων
- Ειδικής χρήσης, πχ για στενά ορισμένη οικογένεια τεμαχίων
- Αυστηρά ειδικής χρήσης, πχ για ένα ειδικό τύπο τεμαχίου.

### **2.3.4 Συγκρότηση εργαλειομηχανών κοπής**

Αποτελείται από:

#### **A) Τα δομικά στοιχεία:**

- > Σώμα
- > Τράπεζα
- > Εργαλειοφορείο
- > Ολισθητήρες - (γλισιέρες)
- > Κύρια άτρακτος

#### **B) Τα στοιχεία μετάδοσης κίνησης:**

- > Κιβώτιο ταχυτήτων κυρίας ατράκτου
- > Κιβώτιο προώσεων
- > Μηχανισμοί μετατροπής κίνησης
- > Διατάξεις περιοδικής / διακοπτόμενης κίνησης
- > Μηχανισμοί βοηθητικών κινήσεων

#### **Γ) Τα στοιχεία πρόσδεσης:**

- > τεμαχίου
- > εργαλείου

#### **Δ) Τα βοηθητικά συστήματα:**

- > λίπανσης
- > υγρού κοπής

#### **Ε) Το σύστημα ελέγχου και προστασίας :**

- > έναρξη/ παύση / επείγουσα διακοπή λειτουργίας
- > ψηφιακός έλεγχος (CNC)
- > προστασία υπερφορτίσεων κλπ.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει επικεντρωθεί στο φρεζάρισμα γι' αυτό το λόγο παρακάτω αναλύεται η φρέζα:

### **2.3.5 Φρέζα**

Η φρέζα είναι εργαλειομηχανή που χρησιμοποιείται κυρίως για δημιουργία πρισματικών μορφών και αυλακώσεων, ελικώσεων έως και οδοντοτροχών. Ενσωματώνει τη λειτουργικότητα άλλων εργαλειομηχανών όπως η πλάνη, το δράπανο, και σε κάποιο βαθμό ο τόρνος και ο γραναζοκόπτης. Διακρίνονται δύο κύρια είδη φρεζών ανάλογα με τη θέση της κύριας ατράκτου :

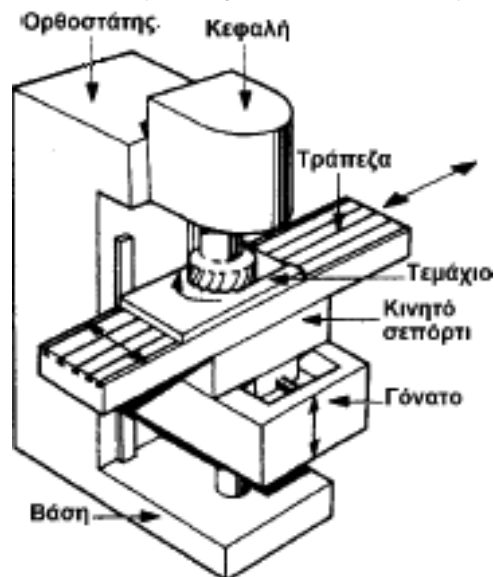
- οριζόντιες και
- κατακόρυφες.

Οι οριζόντιες είναι πιο κοινές και μετατρέπονται σε κατακόρυφες με προσθήκη επέκτασης, της λεγόμενης «προβοσκίδας». Η κύρια κίνηση της φρέζας είναι η περιστροφή της ατράκτου στην οποία βρίσκεται προσαρμοσμένο το κοπτικό εργαλείο είτε με σφήνωση σε εργαλειοφόρο άξονα (οριζόντια μορφή) είτε προσαρμοσμένο σε κωνικό (κατακόρυφη

μορφή). Οι βοηθητικές κινήσεις είναι τρεις και αντιστοιχούν στο τραπέζι, στο εγκάρσιο φορείο και στο κατακόρυφο φορείο (γόνατο).

Το σώμα της μηχανής περικλείει τα κιβώτια ταχυτήτων και προώσεων και ενσωματώνει την άτρακτο. Καταλήγει στο άνω μέρος σε πρόβολο ο οποίος αντιστηρίζει τον εργαλειοφόρο άξονα ή την προβοσκίδα. Στο κάτω μέρος καταλήγει ή είναι ενσωματωμένη με τη βάση. Ο εργαλειοφόρος άξονας εφαρμόζει στον κώνο της ατράκτου και συνήθως συγκρατείται εκεί με τη βοήθεια ντίζας και κοχλία σύσφιξης στο άλλο άκρο του σώματος της μηχανής. Τα κοπτικά εργαλεία προσαρμόζονται στον εργαλειοφόρο άξονα με τη βοήθεια δακτυλιδιών ή/και σφηνών.

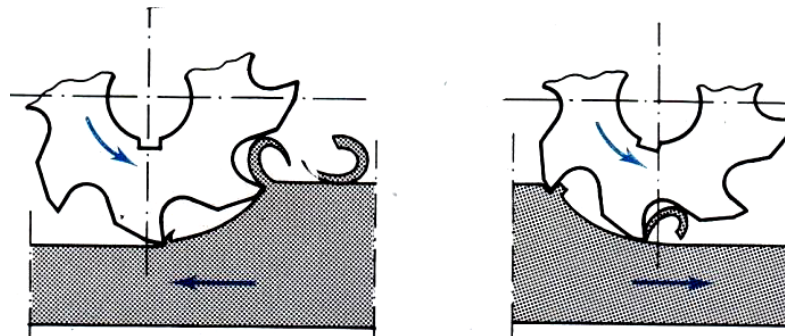
Το κιβώτιο ταχυτήτων συνήθως περιλαμβάνει 12-18 ταχύτητες, σε γεωμετρική πρόοδο με λόγο 1.25 ή 1.5. Στις μοντέρνες φρεζομηχανές οι ταχύτητες των προώσεων δεν κλιμακώνονται, αλλά ακολουθούν συνεχή μεταβολή γιατί υλοποιούνται με υδραυλικό κύκλωμα.



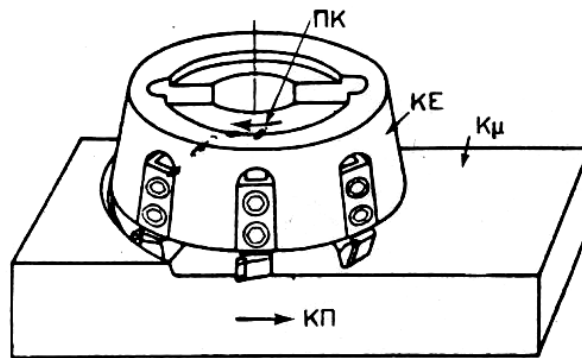
ΣΧΗΜΑ 2.9 Τα κύρια μέρη κατακόρυφης φρεζομηχανής

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

- Περιφερειακό, με τον άξονα του κοπτικού εργαλείου να είναι παράλληλος προς την τράπεζα. Η κίνηση προώσεως (του τεμαχίου) μπορεί να είναι α) αντίρροπη (up milling) ή β) ομόρροπη (down milling) προς την πρωτεύουσα κίνηση.
- Μετωπικό, με τον άξονα του κοπτικού εργαλείου να είναι κάθετος προς την τράπεζα, έτσι η κατεργασμένη επιφάνεια προκύπτει κάθετα στον άξονα της φρέζας.



ΣΧΗΜΑ 2.10 Περιφερειακό Φρεζάρισμα  
Α) Αντίρροπο και Β) Ομόρροπο



ΣΧΗΜΑ 2.11 Μετωπικό φρεζάρισμα

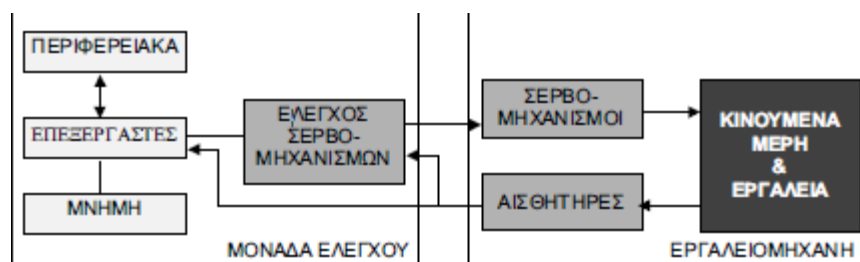
### 2.3.6 Εργαλειομηχανές CNC

Αριθμητικός έλεγχος εργαλειομηχανών είναι ο τύπος ελέγχου που χρησιμοποιεί αριθμητικές τιμές για την αναφορά στη θέση και την κίνηση των αξόνων της μηχανής, για τον ορισμό εργαλείων, στροφών ατράκτου κ.α. Η έννοια ‘άξονας μηχανής’ αναφέρεται σε ένα κινηματικό άξονα που αντιστοιχεί συνήθως σε γραμμική κίνηση, όπως η πρόωση του τραπέζιού μιας φρέζας, ή σε περιστροφική κίνηση, όπως η περιστροφή του διαίρετη της φρέζας. Μία σειρά τέτοιων αριθμητικών τιμών αποτελεί ουσιαστικά το πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου. Τα σημερινά συστήματα ελέγχου CNC (Computer Numerical Control) χρησιμοποιούν επιπρόσθετα αριθμητικές τιμές και για λειτουργίες όπως ο μετασχηματισμός συστημάτων συντεταγμένων, η διαχείριση πινάκων δεδομένων, η αντιστάθμιση διαμέτρου και μήκους εργαλείου κλπ. Αυτές καθώς και οι επιπρόσθετες λειτουργίες γραφικών, επικοινωνίας με άλλους Η/Υ και περιφερειακά αντιδιαστέλλουν τον απλό αριθμητικό έλεγχο (NC) με αυτόν που βασίζεται σε Η/Υ (CNC). Σήμερα πλέον δεν υφίσταται NC με την αρχική του έννοια, αλλά απλά CNC και αυτό εννοούμε πλέον με τον όρο ‘αριθμητικός έλεγχος’.

Σε αντίθεση με τον παλαιότερο μηχανικό, πνευματικό ή υδραυλικό έλεγχο μηχανών και συσκευών, όπου ο ανά-προγραμματισμός ήταν εξαιρετικά χρονοβόρος διότι γινόταν με μετατόπιση οριακών διακοπών, βυσμάτων, καλωδίων κλπ, αλλά και με τις πρώτες μονάδες αριθμητικού ελέγχου όπου η κύρια λειτουργία ήταν η μετατροπή αριθμητικών τιμών σε ηλεκτρικά σήματα, οι μονάδες CNC εκτελούν σχετικά μεγάλης έκτασης επεξεργασία των δεδομένων, κάτι που τους προσθέτει λειτουργικότητα αλλά και πολυπλοκότητα.

Τα κύρια στοιχεία μιας εργαλειομηχανής αριθμητικού ελέγχου (Σχήμα 2.12) είναι τα εξής:

- Οι άξονες της εργαλειομηχανής –συνδυασμός γραμμικών και περιστροφικών, όπου κάθε άξονας νοείται και με την κινηματική του έννοια, αλλά και σαν σύστημα μετάδοσης κίνησης, όπως επίσης και μέτρησης των στοιχείων αυτής της κίνησης (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση).
- Το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει συνήθως έναν αριθμό μικροεπεξεργαστών, RAM, ROM και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την επεξεργασία και διαχείριση του προγράμματος καθώς και ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο των αξόνων.
- Το λογισμικό-λειτουργικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει παραμέτρους μηχανής, περιβάλλον προγραμματισμού, σταθερές ρουτίνες επιμέρους κατεργασιών, ρουτίνες διευκόλυνσης του προγραμματισμού της μονάδας ελέγχου, σύστημα ενδείξεων τρέχουσας κατάστασης, διαγνωστικά βλαβών κλπ
- Διάφορα περιφερειακά για την εισαγωγή του προγράμματος στη μηχανή, την εκτύπωση αρχείων και ενδεχόμενα την παρακολούθηση της λειτουργίας της εργαλειομηχανής.



ΣΧΗΜΑ 2.12 Κύρια στοιχεία συστήματος εργαλειομηχανής αριθμητικού ελέγχου



## 2.4 Κοπτικά εργαλεία

### 2.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Τα κοπτικά εργαλεία καθορισμένης γεωμετρίας που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες που συγκροτούν τη λειτουργικότητά τους :

- σκληρότητα πολύ μεγαλύτερη από αυτή του κατεργαζόμενου τεμαχίου
- διατήρηση των ιδιοτήτων τους σε υψηλές θερμοκρασίες (μεγάλες ταχύτητες κοπής)
- μικρή φθορά κατά τη λειτουργία
- δυνατότητα να μορφοποιηθούν σε συγκεκριμένη «σφηνοειδή» γεωμετρία και
- πρακτικότητα χρήσης (ευκολία προσαρμογής στον εργαλειοδέτη, ευκολία αλλαγής και ρύθμισης, ευχέρεια τροχίσματος κλπ).

Γενικά διακρίνονται δύο περιπτώσεις κοπής, όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως:

- ορθογωνική κοπή, όπου η κοπτική ακμή είναι κάθετη στην ταχύτητας κοπής
- λοξή κοπή όπου η κοπτική ακμή και η ταχύτητα σχηματίζουν γωνία όχι ορθή.

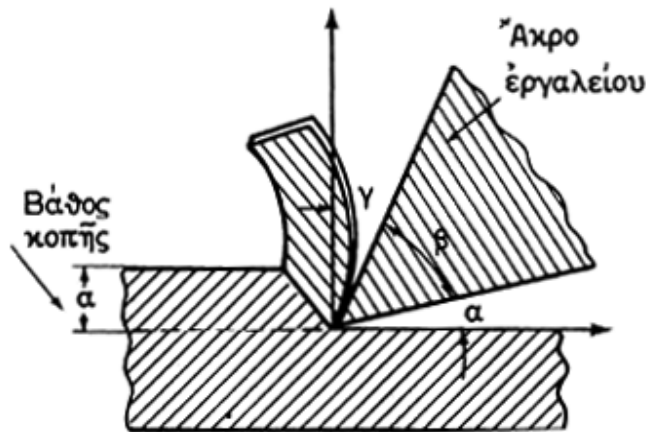
Η ορθογωνική κοπή υλοποιείται στην πράξη σε ειδικές περιπτώσεις, όπως στο πλάνισμα, στην τórνευση με εργαλείο «σχισίματος» κλπ. Η γενική περίπτωση είναι η λοξή κοπή.

### 2.4.2 Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων

Στην ορθογωνική κοπή μια τομή του εργαλείου κάθετη στην κοπτική ακμή χρησιμεύει για τον ορισμό των τριών βασικών γωνιών που εμπλέκονται στην κοπή (βλέπε Σχήμα 2.13):

- **γωνία ελευθερίας α** που σχηματίζεται από την εφαπτόμενη στην κατεργασμένη επιφάνεια και την «πίσω» πλευρά του εργαλείου. Παίρνει περίπου ίδιες τιμές για όλα τα υλικά : 5-8°
- **γωνία αποβλήτου γ** που σχηματίζεται από την κάθετη στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και το «πρόσωπο» του εργαλείου. Για ψαθυρά υλικά λαμβάνει μικρότερες τιμές και όλκιμα μεγαλύτερες. Για μαλακά υλικά μπορεί να φθάσει έως 30° αλλά όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μικραίνει η γωνία σφήνας και «αδυνατίζει» το εργαλείο.
- **Γωνία σφήνας β** που σχηματίζεται μεταξύ του προσώπου και της πίσω πλευράς του εργαλείου. Εξ ορισμού ισχύει:

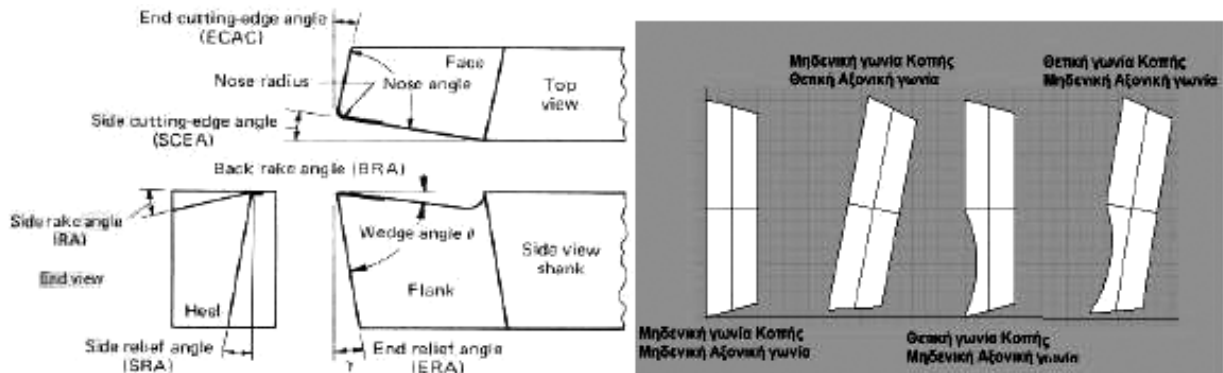
$$\alpha + \beta + \gamma = \pi/2$$



ΣΧΗΜΑ 2.13 Τομή του εργαλείου κάθετα στην κοπτική ακμή

Στη λοξή κοπή δεν έχουμε μόνο 3 γωνίες (όπως στην ορθογωνική κοπή που αναφέραμε παραπάνω), εκτός της ακτίνας καμπυλότητας της ακμής, που να καθορίζει την γεωμετρία αλλά 6 γωνίες. Αυτές είναι οι εξής:

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



ΣΧΗΜΑ 2.14 Γωνίες κοπτικού εργαλείου

Η πίσω γωνία αποβλήτου καθορίζει την διεύθυνση ροής του αποβλήτου, ενώ η πλευρική γωνία αποβλήτου είναι σημαντική για την κατανάλωση ισχύος. Οι γωνίες ελευθερίας ελέγχουν την «παρεμβολή» εργαλείου- τεμαχίου, ενώ οι γωνίες κοπής επηρεάζουν άμεσα τη δύναμη κοπής και την σταθερότητα της κατεργασίας.

### **2.4.3 Είδη κοπτικών εργαλείων στο φρεζάρισμα**

Στο φρεζάρισμα, που μας απασχολεί κυρίως στη παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούνται κατά βάση τρεις τύποι εργαλείου, όλα πολλαπλής σημειακής επαφής :

- **Περιφερειακές φρεζοκεφαλές:** Αυτές χαρακτηρίζονται από την αξονική και την ακτινική γωνία αποβλήτου και ελευθερίας για κάθε οδόντα
- **Μετωπικές φρεζοκεφαλές:** Αυτές έχουν μια επιπλέον γωνία κλίσης της μετωπικά ακραίας κοπτικής ακμής (end cutting edge angle) καθώς και γωνία πλαγιότμησης του κοπτικού άκρου (lead angle)
- **Κονδύλια:** Αυτά έχουν ελικοειδή συνήθως πτερύγια που καταλήγουν σε κοπτικές ακμές με γεωμετρία παρόμοια με αυτή των μετωπικών φρεζοκεφαλών, αλλά με επιπλέον χαρακτηριστικές γωνίες που καθορίζουν την έλικα (helix angle και radial clearance angle).

### **2.4.4 Υλικά κατασκευής κοπτικών εργαλείων**

Σε μια κατεργασία πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή του κοπτικού εργαλείου αλλά και του υλικού κατασκευής του κοπτικού εργαλείου. Οι ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν την επιλογή μας είναι οι εξής:

- Η Σκληρότητα (hardness)
- Η Δυσθραυστότητα (toughness)
- Η Αντοχή στη φθορά (wear resistance)

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές για την κοπή των μετάλλων θα πρέπει να είναι σκληρότερα από το μέταλλο που θα κατεργασθούν και να αντέχουν στις δυνάμεις που θα αναπτυχθούν κατά την κοπή. Ακόμη να διατηρούν τη σκληρότητά τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη θερμοκρασία, επειδή με την κατεργασία ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται μετατρέπεται σε θερμότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της κοπτικής ακμής του εργαλείου. Η αύξηση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο το υλικό που κατεργάζεται είναι σκληρότερο, ή όσο η διατομή του γρεζιού είναι μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα όταν η ταχύτητα κοπής είναι μεγάλη.

Τα διάφορα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα συνήθη εργαλεία κοπής είναι τα εξής:

#### **A) Ανθρακούχοι χάλυβες**

Με περιεκτικότητα σε Άνθρακα ( C) 0,6 έως 1,5% και μικρή περιεκτικότητα σε άλλα στοιχεία (μαγγάνιο, πυρίτιο, χρώμιο κ.α.). Αποκτούν τη σκληρότητα με βαφή στο νερό. Με τους χάλυβες αυτούς κατασκευάζονται τα εργαλεία κοπής που εξυπηρετούν έναν ορισμένο σκοπό και έχουν περιορισμένη χρήση. Τέτοια είναι τα εργαλεία μορφής.

Τα εργαλεία δηλαδή των οποίων η μορφή είναι η ίδια με τη μορφή που πρέπει να αποκτήσει το αντικείμενο μετά την κατεργασία. Είναι τα φθηνότερα από όλα τα άλλα κοπτικά εργαλεία. Το μειονέκτημα των εργαλείων που κατασκευάζονται από ανθρακούχους χάλυβες είναι ότι μόλις θερμανθούν πάνω από τη θερμοκρασία των 200° C χάνουν τη σκληρότητά τους και για τον λόγο αυτό η χρήση τους για μηχανουργικές κατεργασίες σήμερα είναι ασήμαντη.

## **B) Ταχυχάλυβες**

Πρόκειται για χάλυβες ισχυρά κραματωμένους που βάζονται σε λάδι σε στενά ελεγχόμενες συνθήκες. Διατηρούν σκληρότητα, αντοχή και οξύτητα κοπτικής ακμής σε υψηλές θερμοκρασίες άρα και σε υψηλές ταχύτητες κοπής, εξ ου και το πρώτο συνθετικό του ονόματος τους.

Υπάρχουν δύο κύρια είδη ταχυχάλυβων :

- βολφραμίου W (τύπος T), με περιεκτικότητα 12-20%, καθώς και Cr, V, Co ως άλλα κύρια κραματικά στοιχεία.
- μολυβδαινίου Mo (τύπος M) , με περιεκτικότητα 3.5-10%, καθώς και Cr, V, W, Co ως άλλα κύρια κραματικά στοιχεία.

Ο τύπος M έχει καλύτερη αντιτριβική συμπεριφορά από τον τύπο T, μικρότερη παραμόρφωση σε θερμικές κατεργασίες και είναι φθηνότερος. Έτσι καλύπτει πάνω από 80% της παραγωγής ταχυχάλυβων.

Γενικά οι ταχυχάλυβες, λόγω της καλής τους δυσθραυστότητας και αντοχής ενδείκνυνται για χρήση σε διακοπτόμενες κοπές και για εργαλειομηχανές χαμηλής στιβαρότητας. Ταχυχάλυβες κατασκευάζονται με σύντηξη και για καλύτερη ομοιογένεια με κονιομεταλλουργία.

## **Γ) Σκληρομέταλλα**

Η εφεύρεση και η εφαρμογή των σκληρομετάλλων έφερε ουσιαστική επανάσταση στην κοπή των μετάλλων. Τα σκληρομέταλλα δεν είναι κράματα μετάλλων, δηλαδή δεν προέρχονται από σύντηξη μετάλλων και δεν περιέχουν σίδηρο. Είναι μίγματα από καρβίδια του βολφραμίου (WC), του τιτανίου (TiC) και τανταλίου (TaC) με συνδετικό υλικό το κοβάλτιο (Co). Τα σκληρομέταλλα που προκύπτουν από την μίξη αυτή είναι προϊόντα κονιομεταλλουργίας. Τα παραπάνω καρβίδια και το κοβάλτιο μετατρέπονται αρχικά, χωριστά το καθένα, σε σκόνη, κατόπιν αναμιγνύονται, συμπιέζονται σε καλούπια και θερμαίνονται ταυτόχρονα σε υψηλή θερμοκρασία. Από την ταυτόχρονη πίεση και θέρμανση συγκολλούνται και στερεοποιούνται τα μόρια (πυροσυσσωμάτωση) με αποτέλεσμα την παραγωγή των γνωστών πλακιδίων. Οι ιδιότητες των σκληρομετάλλων είναι οι εξής:

- Διατηρούν την σκληρότητά τους σε θερμοκρασία 900° C- 1000° C. Γι' αυτό τον λόγο μπορούν και κόβουν, κατά περίπτωση, με

ταχύτητα κοπής διπλάσια έως πενταπλάσια σε σύγκριση με τον ταχυχάλυβα.

- Μπορούν με σχετικά μικρή ταχύτητα κοπής να κατεργασθούν βαμμένο χάλυβα, πράγμα που δε μπορεί να γίνει με ταχυχάλυβα.
- Έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα να διώχνουν εύκολα από πάνω τους τη θερμότητα. Έτσι η θερμότητα που αναπτύσσεται με την κοπή, απομακρύνεται πριν υπερθερμανθεί η κόψη.
- Εργάζονται χωρίς υγρά κοπής (ξηρά κοπή). Αν όμως χρησιμοποιηθεί υγρό, πρέπει αυτό να είναι άφθονο και να χρησιμοποιείται χωρίς καμία διακοπή γιατί τα σκληρομέταλλα είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Είναι ευαίσθητα σε κραδασμούς και απότομες μεταβολές του φορτίου τους γι' αυτό και σπάζουν εύκολα. Γι' αυτό τα σκληρομέταλλα δεν πρέπει να κόβουν διακοπτόμενη επιφάνεια
- Εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν εργαλεία κοπής με σκληρομέταλλα δεν πρέπει να έχουν τζόγους σε καμία από τις θέσεις στις οποίες μεταβιβάζονται οι δυνάμεις κοπής.
- Η τρόχισή τους απαιτεί μεγάλη προσοχή και πολύ χρόνο. Γι' αυτό τον λόγο η τρόχιση πρέπει να γίνεται στο εργαλειοκατασκευαστήριο από ειδικευμένο προσωπικό.

#### Δ) Κεραμικά

Τυπικά αποτελούνται από 100% σκληρή φάση όπως  $Al_2O_3$  σε μορφή ιδιαίτερα λεπτόκοκκων σωματιδίων με μικρές προσθήκες π.χ. TiC για βελτιστοποίηση ιδιοτήτων. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν και τα βορίδια καθώς και τα cermet (τυπικά 70%  $Al_2O_3$  και 30% TiC). Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η αντοχή τους στη φθορά και η υψηλή τους σκληρότητα καθώς και η χημική τους αδράνεια σε σχέση με τα υλικά κατεργάσιμων τεμαχίων. Όμως έχουν και ένα μεγάλο μειονέκτημα: πολύ μικρή αντοχή και δυσθραυστότητα και έτσι είναι επιρρεπή σε καταστροφική θραύση. Διατίθενται σε μορφή πλακιδίων όπως τα σκληρομέταλλα και χρησιμοποιούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες μη διακοπτόμενης κοπής χωρίς υγρά κοπής για την αποφυγή θερμικού σόκ. Για την αποφυγή αποκολλήσεων και αποφλοιώσεων χρησιμοποιούνται αρνητικές γωνίες αποβλήτου καθώς και εργαλειομηχανές υψηλής στιβαρότητας και ακρίβειας. SiN και Sialons χρησιμοποιούνται με πολύ καλά αποτελέσματα για κοπή χυτοσιδήρου και αεροπορικών κραμάτων. Σημειώνεται ότι τα κεραμικά εργαλεία είναι ακριβότερα των σκληρομετάλλων και φθείρονται γρηγορότερα σε χαμηλές ταχύτητες κοπής.

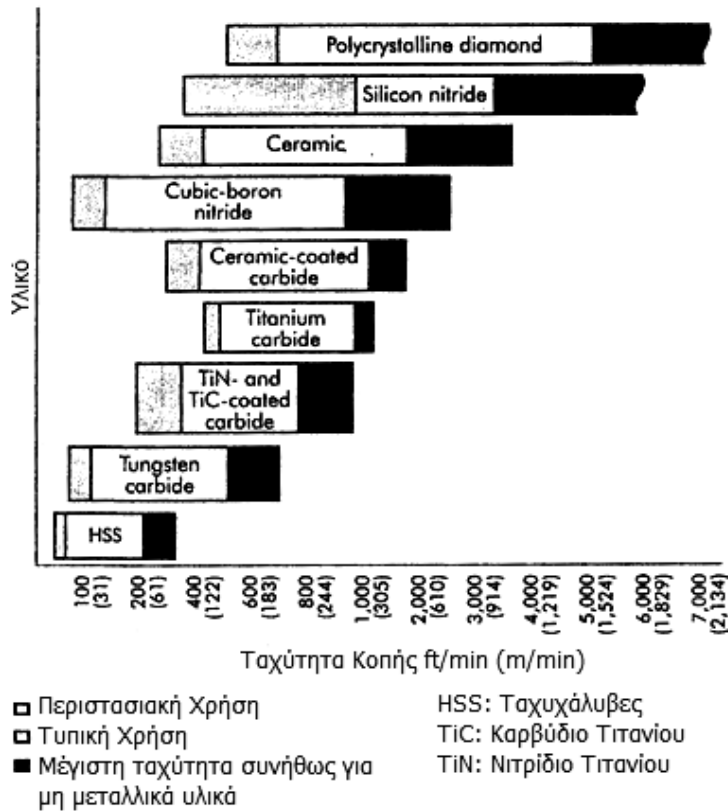
### **Ε) CBN (Κυβικός βοριο-νιτρίτης)**

Πρόκειται για το σκληρότερο υλικό μετά το διαμάντι. Το εργαλείο αποτελείται από υπόστρωμα καρβιδίου που δίνει αντοχή σε «δυναμικές» φορτίσεις και επίστρωμα πολυκρυσταλλικού CBN, που δίνει αντοχή στη φθορά και σκληρότητα. Είναι χημικά αδρανές υλικό ως προς τον σίδηρο και το νικέλιο σε υψηλές θερμοκρασίες, αντίθετα με το διαμάντι. Έχει επίσης αντοχή στην οξείδωση. Είναι, λοιπόν, κατάλληλο για κοπή σκληρομένων σιδηρούχων και υψηλής θερμοκρασίας κραμάτων.

### **Στ) Διαμάντι**

Έχει υψηλότερη σκληρότητα, υψηλή αντοχή στη φθορά, χαμηλό συντελεστή τριβής και θερμικής διαστολής, υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιείται σε κατεργασίες αποπεράτωσης για εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας και ακρίβεια. Χρησιμοποιείται σχεδόν σε κάθε ταχύτητα κοπής, αλλά σε συνθήκες που προσιδιάζουν στην ψαθυρότητά του. Σε μονοκρυσταλλικό υλικό παίζει μεγάλο ρόλο ο προσανατολισμός του κρυστάλλου, αλλά σε πολυκρυσταλλικό συνθετικό διαμάντι η τυχαιότητα κατανομής διευθύνσεων εμποδίζει τη διάδοση ρωγμών και τις μικρο-αποκολλήσεις. Το συνθετικό διαμάντι (στρώμα πάχους έως 1 mm) σε υπόστρωμα σκληρομετάλλου χρησιμοποιείται κυρίως για μη σιδηρούχα κράματα, τυπικά κράματα Al-Si, WC, κεραμικά, πορσελάνη, ενισχυμένα με υαλονήματα πλαστικά και άλλα.

Στο παρακάτω σχήμα 2.15 φαίνεται το διάγραμμα σύγκρισης των υλικών κοπτικών εργαλείων συναρτήσει της ταχύτητας κοπής:



ΣΧΗΜΑ 2.15 Διάγραμμα σύγκρισης υλικών εργαλείων κοπής ανάλογα με την ταχύτητα κοπής που έχουμε

### 2.4.5 Επικαλύψεις/ Επενδύσεις

Μία από τις πολύ σημαντικές αλλαγές στην τεχνολογία των κατεργασιών, είναι η εφαρμογή την επικαλύψεων/επενδύσεων στα κοπτικά εργαλεία που είναι κατασκευασμένα από ταχυχάλυβα και σκληρομέταλλα. Τα υλικά των επικαλύψεων είναι συνήθως κεραμικά είτε καρβίδια ή νιτρίδια του Τιτανίου ( $Al_2O_3$ , TiC, TiN), αναμεμειγμένα με αλουμίνιο (TiAlN) ή και μεταξύ τους (TiCN, TiAlCN). Τελευταία χρησιμοποιείται και το διαμάντι ως υλικό επικάλυψης. Οι επικαλύψεις δεν ξεπερνούν συνήθως τα 10μm σε πάχος αλλά συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της διάρκειας ζωής, της αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία, της σκληρότητας και της αντοχής σε κάθε φθορά. Επίσης μειώνουν την δύναμη κοπής και την θερμότητα που παράγεται από την τριβή με το απόβλητο.

### 2.4.6. Φθορά εργαλείου

Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά κοπτικών εργαλείων είναι πολλοί και διαφέρουν ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες κοπής καθώς και με το ζεύγος υλικών τεμαχίου-εργαλείου. Θα ασχοληθούμε αναλυτικότερα με την φθορά εργαλείου και τον χρόνο ζωής του σε επόμενο κεφάλαιο.

## 2.5 Τραχύτητα επιφάνειας

Στις μηχανουργικές κατασκευές της σύγχρονης τεχνολογίας, η τραχύτητα της επιφάνεια παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση και στην ασφάλεια λειτουργίας των επιφανειών συναρμογής διαφόρων στοιχείων μηχανών και μηχανουργικών κατασκευών (π.χ. οδοντωτοί τροχοί, ολισθητήρες, άξονες- τρύματα κ.α.). Για την σχεδίαση τεμαχίων εκτός από τον προσδιορισμό των ανοχών των διαστάσεων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του βαθμού τραχύτητας των αντίστοιχων επιφανειών.

Η ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένης σε κοπή αναφέρεται:

- Στη γεωμετρία της κατεργασμένης επιφάνειας και
- Στις φυσικές, χημικές και μεταλλουργικές ιδιότητες του υλικού αυτής

Το μέγεθος της τραχύτητας επιφάνειας προσδιορίζεται με μετρήσεις κάθετα προς την κατεργασμένη επιφάνεια για ένα ορισμένο μήκος αυτής.

Η τραχύτητα επιφάνειας χαρακτηρίζεται συνηθέστατα από την αριθμητική μέση απόκλιση  $R_a$  από τη «μέση γραμμή» της επιφάνειας μέσα σε ένα μήκος αναφοράς  $l$ :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

όπου  $y(x)$  το προφίλ της επιφάνειας.

Η τραχύτητα επιφάνειας επίσης μετράται και ως τιμή RMS:

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}}$$

Η τραχύτητα επιφάνειας επίσης μετράται και ως η απόσταση από την ψηλότερη κορυφή έως τη βαθύτερη σε κοιλάδα, συμβολιζόμενη με  $R_{max}$ . Ένας ακόμη τρόπος έκφρασης της τραχύτητας είναι η μέση τιμή των 10 κατ' απόλυτη τιμή μέγιστων αποκλίσεων (5 κορυφών και 5 κοιλάδων) μέσα στο μήκος αναφοράς, συμβολιζόμενη με  $R_z$ .

Η τοπογραφία της επιφάνειας χαρακτηρίζεται και από άλλα μεγέθη :

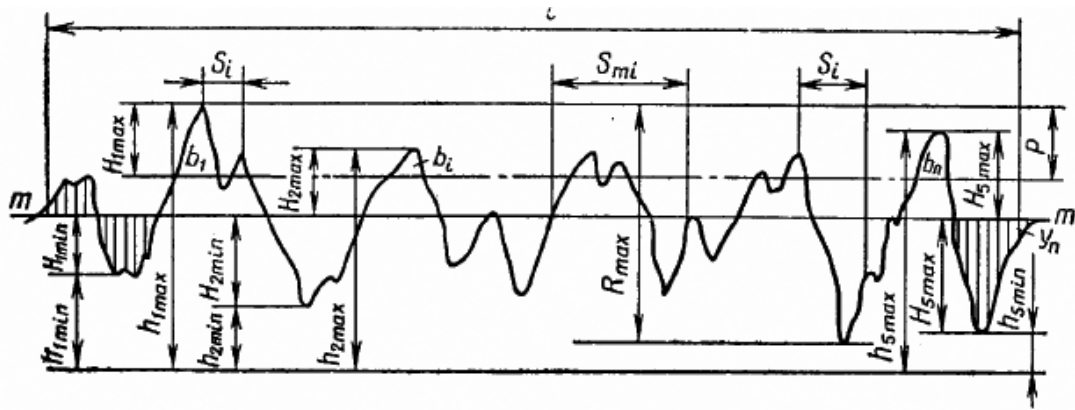
$S_m$  : είναι η μέση απόσταση των ανωμαλιών τραχύτητας

$S$  : είναι η μέση απόσταση των κορυφών

$T_p$  : είναι το σχετικό μήκος του προφίλ της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος αναφοράς:

$$T_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i$$





Η γεωμετρία της δημιουργούμενης επιφάνειας από ένα εργαλείο και συνεπώς η τραχύτητα της εξαρτώνται από τη γεωμετρία επαφής μεταξύ εργαλείου και κατεργάσιμου τεμαχίου.

Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές τραχύτητας επιφάνειας για διάφορες κατεργασίες των μετάλλων.

Κατεργασία	Μέση τραχύτητα ( $\mu\text{in}$ )
<u>Κατεργασίες αποβολής υλικού</u>	
Τόρνευση	2-1000
Φρεζάρισμα	10 -1000
Πλάνιση	15 -1000
Διάτρηση	30 -500
Λείανση	1- 250
Honing	1- 60
Στίλβωση, Lapping	0,5-30
Κοπή με υπερήχους	5- 30
Ηλεκτροδιάβρωση	25- 500
Ηλεκτροχημική κοπή	5- 50
Ηλεκτρολυτική κοπή	4- 30
<u>Κατεργασίες διαμορφώσεως</u>	
Σφυρηλάτηση	60-1000
Ψυχρή έλαση	10-250
Θερμή έλαση	250-2000
Ψυχρή διέλαση	10-100
Θερμή διέλαση	100-500

## 2.6 Απόβλητα/Γρέζια

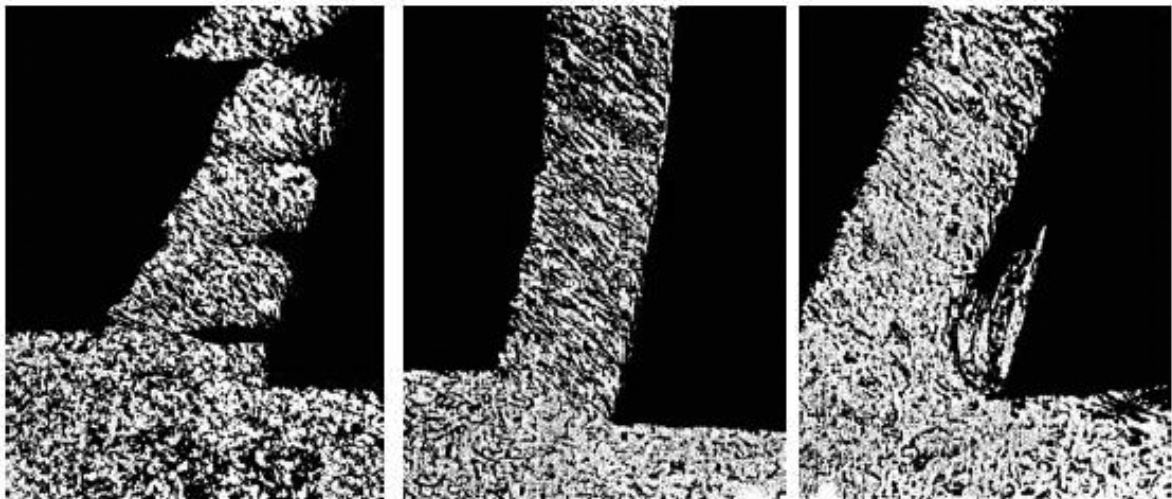
### 2.6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά και Είδη Αποβλήτου

Οι κατεργασίες κοπής έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους το ότι, για την μορφοποίηση των κομματιών, αφαιρείται μέταλλο και ότι το μέταλλο αυτό αφαιρείται σε μορφή αποβλήτων. Το απόβλητο κατά συνέπεια είναι το προϊόν της κοπής των μετάλλων και η μελέτη του μας δίνει την δυνατότητα να βγάζουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα για το φαινόμενο της κοπής των μετάλλων.

Το απόβλητο σχηματίζεται σε διάφορα μεγέθη και παίρνει ποικίλες μορφές ανάλογα με την περίπτωση κατεργασίας.

Υπάρχουν τρία βασικά είδη αποβλήτου:

- Το ασυνεχές απόβλητο
- Το συνεχές απόβλητο
- Το συνεχές απόβλητο με ψευδοακμή

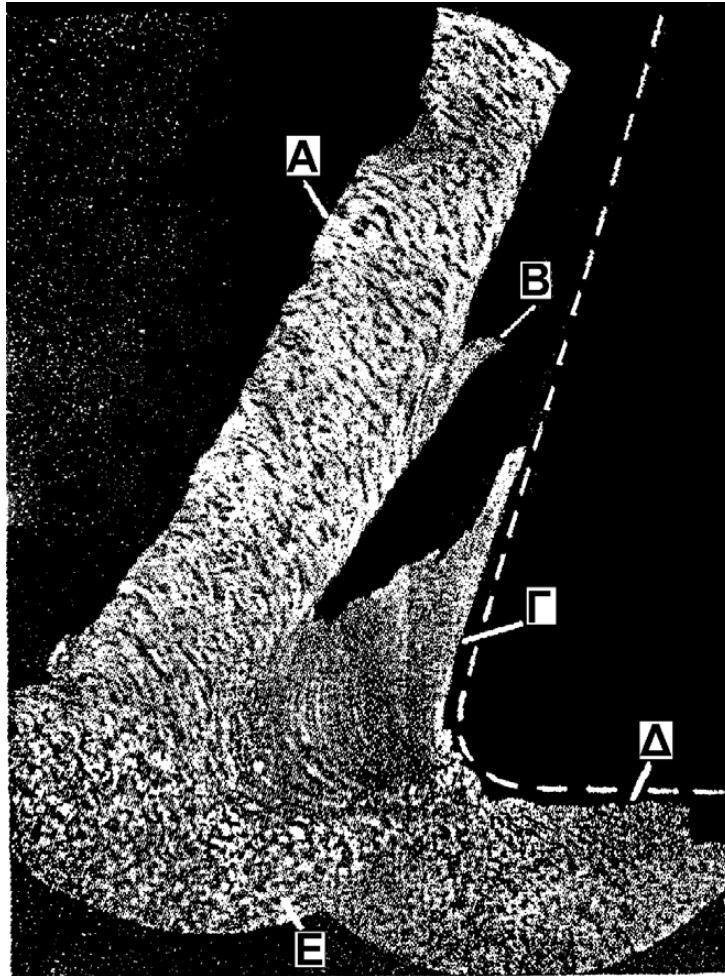


Ασυνεχές απόβλητο

Συνεχές απόβλητο

Συνεχές απόβλητο με  
Ψευδοακμή

ΣΧΗΜΑ 2.16 Τα τρία είδη αποβλήτου



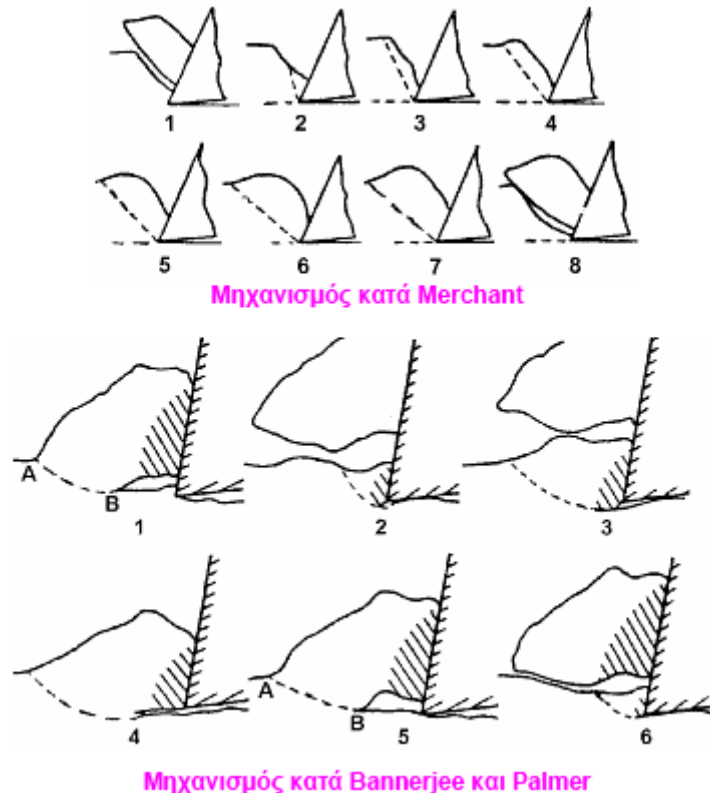
A) Απόβλητο, B) Επικόλλημα στο απόβλητο Γ) Ψευδοακμή Δ) Επικόλλημα στην κατεργασμένη επιφάνεια Ε) Τεμάχιο

### Χαρακτηριστικά του ασυνεχούς αποβλήτου

- Συναντάται κατά την κοπή ψαθυρών υλικών (χυτοσίδηρος, χυτός ορείχαλκος κλπ.)
- Μπροστά από την κόψη του ΚΕ το υλικό ΤΕ παραμορφώνεται ισχυρά και θραύεται στην πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης (ζώνη διάτμησης) σε σχεδόν ομοιόμορφα τμήματα μερικά ή ολικά.
- Ο σχηματισμός αυτός ευνοείται από:
  - Πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής
    - Υπερβολική ελάττωση της γωνίας αποβλήτου συνοδευόμενη από αύξηση του βάθους κοπής και της ταχύτητας πρόωσης
    - Μη χρησιμοποίηση κατάλληλου υγρού κοπής
    - Τυχόν εγκλείσματα στο κατεργαζόμενο υλικό.
  - Οι επιπτώσεις στην κατεργασία από το σχηματισμό ασυνεχούς αποβλήτου μπορεί να είναι:
    - Επιδείνωση της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας (επιφανειακές ανωμαλίες και μικρορωγμές), με δυσμενή επίδραση στην αντοχή σε κόπωση του υλικού ΤΕ.

- Δημιουργία εξαναγκασμένης ταλάντωσης του συστήματος ΕΜ-ΚΕ-ΤΕ, λόγω του περιοδικού τεμαχισμού του αποβλήτου.
- Μικρό μήκος επαφής αποβλήτου/ΚΕ, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρότερων δυνάμεων κοπής αλλά και τον περιορισμό στην επιλογή της γεωμετρίας ΚΕ.

Διάφορες θεωρίες πάνω στο μηχανισμό σχηματισμού ασυνεχούς αποβλήτου περιγράφονται στο Σχ. 2.17:



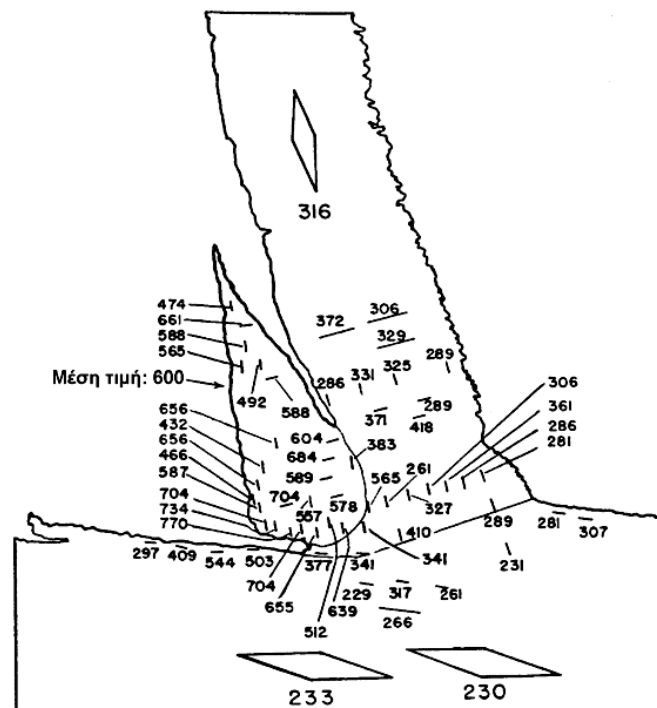
ΣΧΗΜΑ 2.17 Θεωρίες πάνω στο μηχανισμό σχηματισμού ασυνεχούς αποβλήτου

### Χαρακτηριστικά του συνεχούς αποβλήτου

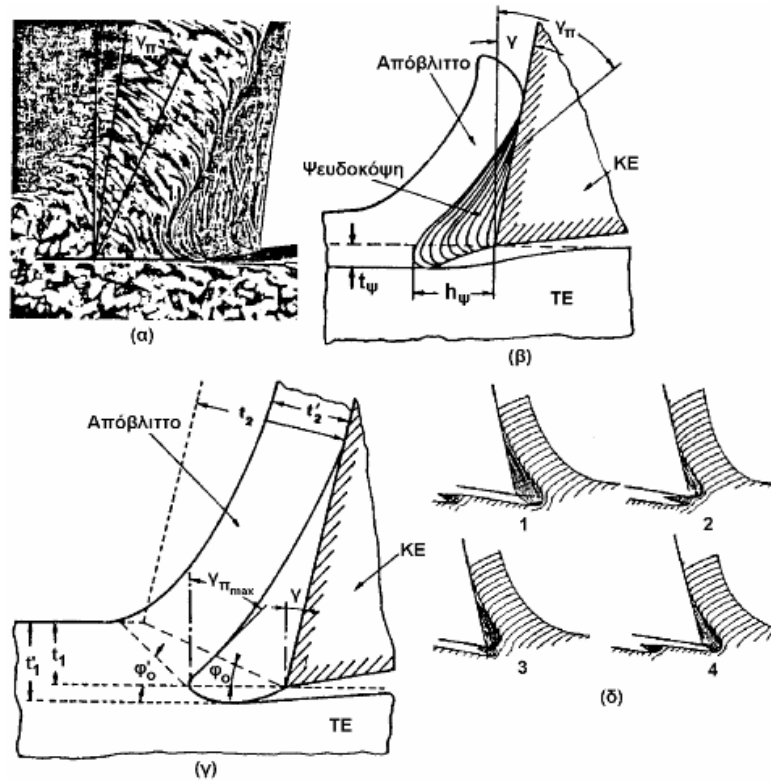
- Συναντάται κατά την κοπή όλκιμων υλικών (π.χ. σφυρήλατος σίδηρος, μαλακός χάλυβας, χαλκός, μόλυβδος κλπ.).
- Το υλικό ΤΕ μπροστά στην κόψη ΚΕ υφίσταται ισχυρή πλαστική παραμόρφωση σε διάτμηση και απομακρύνεται ως συνεχής ταινία κινούμενη πάνω στην επιφάνεια αποβλήτου του ΚΕ.
- Πρόκειται για το πιο επιθυμητό είδος αποβλήτου (βλ. κατωτέρω) όσον αφορά την εξέλιξη, την οικονομία και την ποιότητα της κοπής.
- Αύξηση της γωνίας αποβλήτου και της ταχύτητας κοπής, καθώς και χρήση κατάλληλου υγρού κοπής ευνοούν το σχηματισμό αυτό.

## Χαρακτηριστικά του συνεχούς αποβλήτου με ψευδοακμή

- Η ψευδοακμή είναι υλικό ΤΕ σε σχήμα ασύμμετρης σφήνας που έχει προκύψει λόγω ισχυρής καταπόνησης κατά επάλληλα λεπτά στρώματα, προσφυόμενα στην κόψη του ΚΕ και μεταξύ τους με μηχανισμούς συγκόλλησης πίεσης (συνδυασμός ισχυρών θλιπτικών φορτίων και συνθηκών τριβής με υψηλές θερμοκρασίες).
- Αποτελείται από υλικό εξόχως σκληρό που αυξάνεται συνεχώς σε μέγεθος μέχρι ενός κρίσιμου μεγέθους, οπότε και διασπάται (ψαθυρή συμπεριφορά).
- Τα τεμαχίδια από τη διάσπαση της ψευδοακμής προσκολλώνται στο απόβλητο (προς το μέρος του ΚΕ) ή πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια (χειροτέρευση της ποιότητάς της)
- Η μορφολογία, τα χαρακτηριστικά και ο μηχανισμός σχηματισμού της ψευδοκόψης παρουσιάζονται
- Με την παρουσία της ψευδοκόψης έχουμε μετατόπιση της κοπτικής ακμής του ΚΕ (κακή διαστατική απόδοση του ΤΕ) αλλά συγχρόνως προστατεύεται η πραγματική κόψη (αύξηση της ΔΖ του ΚΕ)
- Απλός τρόπος απομάκρυνσης της ψευδοκόψης επιτυγχάνεται με στιγμιαία απότομη αύξηση της ταχύτητας κοπής.



ΣΧΗΜΑ 2.18 Κατανομή της σκληρότητας στα διάφορα τμήματα του ΤΕ και αποβλήτου κατά τον σχηματισμό συνεχούς αποβλήτου με ψευδοακμή



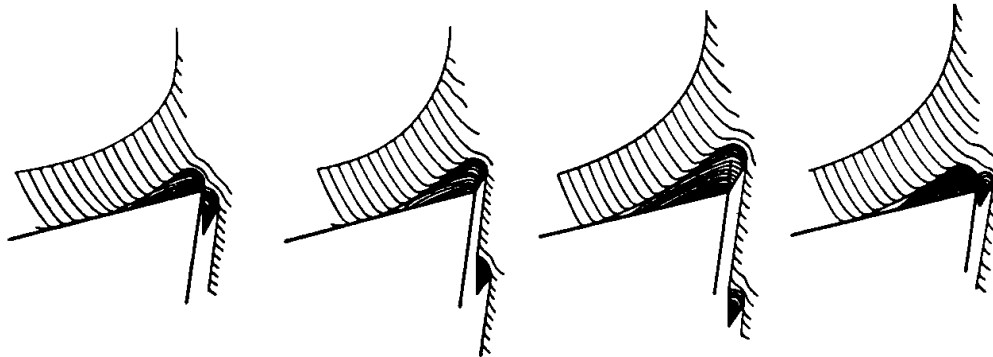
ΣΧΗΜΑ 2.19 Χαρακτηριστικά μεγέθη και μηχανισμός σχηματισμού ψευδοακμής α) Πραγματική γωνία αποβλήτου β) Γεωμετρικά στοιχεία γ) Θεωρητικό μοντέλο του Hoshi δ) Μηχανισμός σχηματισμού

Η δημιουργία της ψευδοακμής παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον για δύο λόγους: Ο πρώτος είναι ότι τα τεμαχίδια της ψευδοακμής τα οποία προσκολλούνται επάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια, του κομματιού, χειροτερεύουν την τραχύτητά της. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι η παρουσία της ψευδοακμής παρουσιάζει τη φθορά, άρα και τη ζωή, του κοπτικού εργαλείου κατά τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε να την ευνοεί και άλλοτε να τη χειροτερεύει. Έτσι αν η ψευδοακμή είναι ασταθής, τότε τα πολύ σκληρά τεμαχίδιά της, που προσκολλούνται στην προς το εργαλείο επιφάνεια του αποβλήτου, φθείρουν το εργαλείο στην επιφάνεια αποβλήτου με τον μηχανισμό αποξέσεως. Αν όμως η ψευδοακμή είναι σχετικά σταθερή, τότε προφυλάσσει το εργαλείο από φθορά. Και αυτό γιατί η ψευδοακμή εκτελεί την εργασία της κόψης του εργαλείου.

Σχετικά με τον σχηματισμό της ψευδοακμής μπορούμε να διατυπώσουμε τον γενικό κανόνα ότι το μέγεθός της μειώνεται:






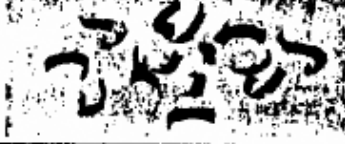
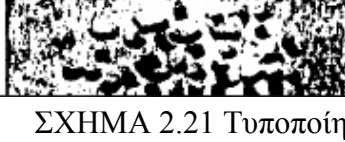
- A) Με αύξηση της ταχύτητας κοπής (σε υψηλές ταχύτητες κοπής η ψευδοακμή μπορεί και να εξαφανισθεί τελείως)
- B) Με αύξηση της τιμής της γωνίας αποβλήτου
- Γ) Με ελάττωση του θεωρητικού πάχους του αποβλήτου ή της προώσεως στις διάφορες κατεργασίες

Δ) Με χρήση του κατάλληλου υγρού κοπής που βελτιώνει τις συνθήκες τριβής εργαλείου-αποβλήτου.



ΣΧΗΜΑ 2.20 Ο κύκλος σχηματισμού και τεμαχισμού της ψευδοακμής

Στην πράξη πολλές φορές (π.χ. στην κοπή όλκιμων μετάλλων ή κραμάτων σε υψηλές ταχύτητες κοπής) σχηματίζεται απόβλητο με μεγάλο μήκος (π.χ. ταινιοειδές ή ελικοειδές βλέπε Σχ. 2.21). Τέτοιας μορφής απόβλητο παρουσιάζει δυσκολίες στην εκτέλεση της κατεργασίας και εγκυμονεί κινδύνους για ατύχημα στον τεχνίτη και βλάβες στο εργαλείο και στην εργαλειομηχανή. Σε τέτοιες περιπτώσεις ελέγχουμε τη μορφή και το μέγεθος του αποβλήτου με κατάλληλη διαμόρφωση του κοπτικού εργαλείου δημιουργώντας γρεζοθραύστες.

Κατηγορία μορφής αποβλήτου	Μορφή αποβλήτου	Όνομασία
1		Ταινιοειδές ευθύ
2		Ταινιοειδές άτακτο
3		Ελικοειδές
4		Ελικοειδές τεμαχισμένο
5		Σπειροειδές τεμαχισμένο
6		Τεμάχια σπειροειδούς
7		Τεμαχίδια αποβλήτου

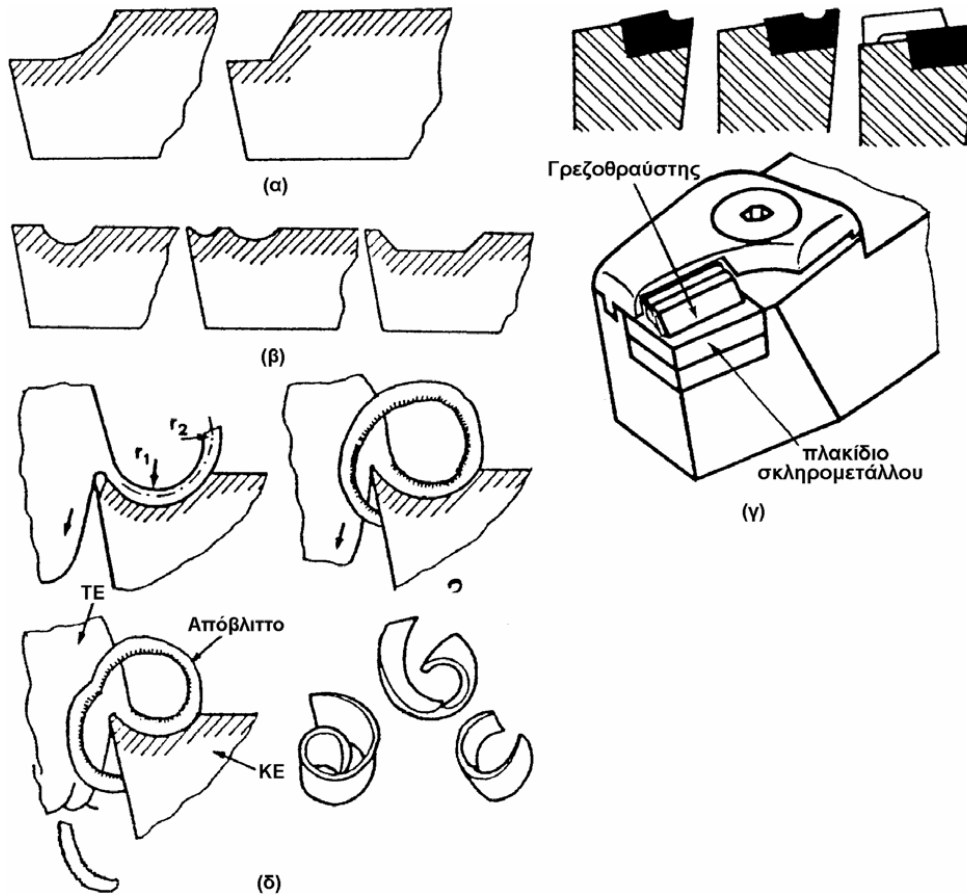
ΣΧΗΜΑ 2.21 Τυποποίηση αποβλήτου

Τα είδη γρεζοθραύστη που υπάρχουν είναι α) τύπου αύλακα και β) τύπου αναβαθμού, δηλαδή με σχηματισμό εμποδίου. Ανάλογη διαμόρφωση επιδιώκεται και στα ΚΕ με πλακίδια σκληρομετάλλου (βλέπε Σχ. 2.22).

Ο τρόπος λειτουργίας του γρεζοθραύστη περιλαμβάνει τα εξής στάδια (βλέπε Σχ. 2.22):

- Το απόβλητο εξαναγκάζεται σε περαιτέρω κάμψη (αύξηση της καμπυλότητάς του  $r_1 < r_2$ )
- Στη συνέχεια, το άκρο του ακουμπά και συμπιέζεται στην ελεύθερη επιφάνεια ΚΕ ή στην ακατέργαστη επιφάνεια ΤΕ
- Με περαιτέρω αύξηση του μήκους αποβλήτου, η εξωτερική του επιφάνεια εφελκύεται ισχυρά και όταν φτάσει στο όριο θραύσης του υλικού, το απόβλητο θραύεται.





ΣΧΗΜΑ 2.22 Είδη και λειτουργία του γρεζοθραύστη α) γρεζοθραύστης τύπου αύλακα β) γρεζοθραύστης τύπου αναβαθμού γ) εφαρμογή γρεζοθραύστη σε ΚΕ σκληρομετάλλου δ) μηχανισμός λειτουργίας του γρεζοθραύστη

## 2.6.2 Χαρακτηριστικά του Αποβλήτου

- Θεωρητικό πάχος αποβλήτου,  $t_1$ : Είναι το αφαιρούμενο πάχος υλικού.
- Πραγματικό πάχος αποβλήτου,  $t_2$ : Είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλητο μετά την κοπή.
- Πλάτος αποβλήτου,  $b$ .
- Θεωρητική διατομή αποβλήτου,  $A_1 = b \cdot t_1$
- Πραγματική διατομή αποβλήτου,  $A_2 = b \cdot t_2$

## 2.7 Τα Υγρά Κοπής στις Κατεργασίες Κοπής

Τα υγρά κοπής χρησιμοποιούνται συχνά στις διάφορες κατεργασίες, κατάλληλα προσαγόμενα στην περιοχή κοπής, για πιο αποδοτική κοπή σε σύγκριση με την λεγόμενη ξηρή κοπή που εκτελείται χωρίς υγρό κοπής. Η δράση του υγρού κοπής οφείλεται σε ορισμένες χαρακτηριστικές του ιδιότητες και εκδηλώνεται διαφορετικά ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού και του κοπτικού εργαλείου και με τις συνθήκες κοπής. Έτσι, ένα υγρό κοπής μπορεί να επενεργήσει είτε ως

λιπαντικό, είτε ως ψυκτικό, και συχνά ως λιπαντικό και ψυκτικό μαζί. Η γνώση των δράσεων αυτών του υγρού κοπής μας είναι πολύ χρήσιμη, γιατί μας διευκολύνει στην εκλογή του με επιτυχία στις διάφορες εφαρμογές.

Αναλυτικότερα, με την χρήση των υγρών κοπής μπορούμε να πετύχουμε:

- Μείωση στο μέσο συντελεστή τριβής στη ζώνη τριβής (και στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και κομματιού σε περιπτώσεις που αναπτύσσεται σημαντική σχετικά ζώνη φθοράς ως απόρροια της λιπαντικής δράσης του υγρού κοπής
- Ελάττωση της θερμοκρασίας του εργαλείου (και του κομματιού) στην περιοχή κοπής με απαγωγή σημαντικού μέρους της θερμότητας που παράγεται κατά την κοπή μέσω της ψυκτικής δράσης του υγρού κοπής
- Μείωση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου (και επιμήκυνση της ζωής του) έμμεσα, ως αποτέλεσμα της ελάττωσης του συντελεστή τριβής και ψύξης του εργαλείου
- Βελτίωση της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας
- Μείωση των δυνάμεων κοπής και της ισχύος κοπής
- Περιορισμό στις στρεβλώσεις του κομματιού που προκαλούνται εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και μεγάλων διαφορών ανάμεσά τους, που παρατηρούνται κατά την κοπή
- Ευκολία στον χειρισμό των έτοιμων κομματιών
- Προστασία του κομματιού και της εργαλειομηχανής από οξείδωση διάβρωση
- Απομάκρυνση των αποβλήτων από την περιοχή κοπής.

Οι βασικές δράσεις του υγρού κοπής είναι οι δύο πρώτες, ενώ οι υπόλοιπες είναι επακόλουθα των πρώτων.

Τα υγρά κοπής, όταν χρησιμοποιούνται στο μηχανουργείο, παρουσιάζουν και ορισμένες ανεπιθύμητες παρενέργειες, που είναι δυνατό ή να κάνουν αδύνατη τη χρήση τους, ή να περιορίζουν το πεδίο εφαρμογών τους. Τέτοιες παρενέργειες είναι οι ακόλουθες:

- Φυσιολογικές παρενέργειες επάνω στον τεχνίτη (τοξικοί ατμοί, δυσάρεστες οσμές, καπνοί, δερματίτιδες κ.α.)
- Επιδράσεις στο υλικό του κομματιού και στα υλικά της εργαλειομηχανής που εκδηλώνονται συνήθως με οξείδωση ή διάβρωση. Υγρά κοπής π.χ. με πρόσθετα υψηλής πίεσης που περιέχουν θείο προσβάλλουν τα κράματα του χαλκού, που τυχόν κατεργαζόμαστε, όπως και τα έδρανα της εργαλειομηχανής, που έχουν ως βάση το χαλκό.

Ορισμένες από τις ανεπιθύμητες παρενέργειες που αναφέραμε μπορούμε να τις περιορίσουμε εκλέγοντας κάθε φορά υγρό κοπής με κατάλληλες ιδιότητες.

Τα υγρά κοπής που μεταχειριζόμαστε είτε:

A) είναι γαλακτώματα είτε

B) είναι απλά λάδια κοπής είτε

Γ) είναι λάδια κοπής με πρόσθετα υψηλής πίεσης

Τα γαλακτώματα χρησιμοποιούνται όπου η ψυκτική δράση του υγρού κοπής είναι η πιο σημαντική απαίτηση, ενώ τα απλά λάδια κοπής και τα λάδια κοπής με πρόσθετα υψηλής πίεσης βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις, όπου μας ενδιαφέρει κυρίως η λιπαντική επενέργεια του υγρού κοπής.

## **2.8 Συνθήκες Κοπής**

Οι συνθήκες κοπής που επικρατούν κατά την διάρκεια της κατεργασίας παίζουν σημαντικό ρόλο, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Οι βασικές συνθήκες κοπής περιλαμβάνει το βάθος κοπής, την ταχύτητα κοπής, την πρόωση και την ταχύτητα πρόωσης, όπως ήδη έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο (2.2.1). Σε αυτήν την παράγραφο είναι σημαντικό να αναφέρουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των παραπάνω συνθηκών στην κάθε κατεργασία.

### **2.8.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις Συνθήκες Κοπής**

#### **A) Θερμοκρασία Κοπής**

Η θερμοκρασία, που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της κοπής, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την κατεργασία. Μας ενδιαφέρει τόσο οι μέγιστες τιμές της, όσο και η κατανομή της στο εργαλείο, στο απόβλητο και στην κατεργασμένη επιφάνεια. Υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται όταν:

- Έχουμε μεγάλες συνθήκες κοπής – ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής, πρόωση- γιατί το εργαλείο πρέπει να κόψει μεγαλύτερο μέρος από το τεμάχιο σε λιγότερο χρόνο. Έτσι η θερμότητα δε διαχέεται σε επαρκή βαθμό
- Έχουμε υψηλή σκληρότητα του τεμαχίου, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται και παραμορφώνει το υλικό του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη
- Δεν χρησιμοποιούμε υγρό κοπής
- Έχουμε μεγάλη γωνία κοπής
- Έχουμε μικρές γωνίες ελευθερίας και αποβλήτου
- Έχουμε υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα ή με μικρή μάζα.
- Έχουμε μικρή γωνία καμπυλότητας διότι συγκεντρώνεται η θερμότητα σε μικρότερη επιφάνεια αφού η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη.

### **B) Δύναμη κοπής**

Κατά την διάρκεια της κατεργασίας αναπτύσσονται τρεις κύριες δυνάμεις κοπής, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενη παράγραφο. Όμως η βασική δύναμη που μας ενδιαφέρει είναι η δύναμη κοπής που είναι παράλληλη στην πρωτεύουσα κίνηση. Αυτή η δύναμη μεγαλώνει:

- Όσο μειώνεται η ταχύτητα κοπής, όταν αναφερόμαστε σε υψηλές ταχύτητες κατεργασίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου
- Όσο αυξάνεται η πρόωση και το βάθος κοπής, αφού κόβεται μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου σε λιγότερο χρόνο. Η δύναμη κοπής αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με το βάθος κοπής, ενώ κατά την πρόωση δεν εμφανίζεται τόσο σημαντική μεταβολή
- Όσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του κατεργαζόμενου υλικού
- Όσο μικρότερες είναι οι γωνίες κοπής και αποβλήτου
- Όσο αυξάνεται η ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του κοπτικού εργαλείου

### **Γ) Ακρίβεια της κατεργασίας**

Η ποιότητα της επιφάνειας του κατεργασμένου τεμαχίου και η ακρίβεια της κατεργασίας επηρεάζεται δυσχερώς από την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνήθως αυτό συμβαίνει σε υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα. Όπου η θερμότητα παραμένει στην κατεργασμένη επιφάνεια και προκαλεί ανωμαλίες. Στα υλικά που έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χάλυβας, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει αρνητικά την κατεργασία. Αντίθετα με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η δύναμη κοπής και η επιφάνεια παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια. Η

αύξηση της θερμοκρασίας έχει κάποια όρια, ανάλογα με το εκάστοτε υλικό.

Στο φρεζάρισμα, που μας απασχολεί στη παρούσα διπλωματική εργασία, κατά το οποίο περιστρέφεται το εργαλείο, θα περιμέναμε ότι με τη μείωση της δύναμης κοπής που προκαλείται από αύξηση της ταχύτητας, να μειώνονται και οι ταλαντώσεις στο κοπτικό εργαλείο και στη μανέλα του. Όμως στην πραγματικότητα όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, τόσο περισσότεροι κραδασμοί δημιουργούνται. Οι δυνάμεις που δημιουργούν αυτές τις ταλαντώσεις αυξάνονται συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής και ταυτόχρονα μειώνεται η ποιότητα της επιφάνειας και η ακρίβεια της κατεργασίας.

Στη επόμενη παράγραφο αναλύεται η κατεργασία του φρεζαρίσματος που μας απασχολεί στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

### **2.8.2 Φρεζάρισμα**

Το φρεζάρισμα είναι κατεργασία κοπής, κατά την οποία αφαιρείται υλικό από το κομμάτι υπό μορφή μεμονωμένων αποβλήτων. Το κοπτικό εργαλείο, που ονομάζεται κοπτήρας ή φρέζα, έχει πολλές κύριες κόψεις οι οποίες διαμορφώνονται στα δόντια που φέρει περιφερειακά ή περιφερειακά και μετωπικά ο κοπτήρας. Κάθε δόντι κόβει ένα ξεχωριστό απόβλητο με μεταβλητό πάχος ύστερα από συνδυασμό της περιστροφικής κίνησης της φρέζας γύρω από το σταθερό άξονα της (πρωτεύουσα κίνηση) και της ευθύγραμμης μεταφορικής κίνησης του κομματιού (κίνηση προώσεως) κάθετα προς τον άξονα της φρέζας. Η κίνηση προώσεως είναι συνεχής και κάθε δόντι δεν κόβει συνεχώς, άλλα μόνο επί ορισμένο μέρος της περιόδου κίνησης της φρέζας, που αντιστοιχεί σε ορισμένη γωνία περιστροφής.

Το φρεζάρισμα διακρίνεται σε:

- **Περιφερειακό** και σε
- **Μετωπικό**

Με το περιφερειακό φρεζάρισμα κατεργαζόμαστε επίπεδες επιφάνειες παράλληλες προς τον άξονα της φρέζας. Η φρέζα φέρει δόντια στην περιφέρειά της με την κόψη τους παράλληλη (φρέζα με ίσια δόντια) ή υπό γωνία (φρέζα με ελικοειδή δόντια) ως προς τον άξονά της. Κατά το περιφερειακό φρεζάρισμα είναι δυνατόν η κίνηση προώσεως (κίνηση του κομματιού) να είναι αντίρροπη ή ομόρροπη προς την πρωτεύουσα κίνηση της φρέζας. Έτσι διαμορφώνονται αντίστοιχα δύο μέθοδοι για το περιφερειακό φρεζάρισμα:

- Το αντίρροπο φρεζάρισμα και
- Το ομόρροπο φρεζάρισμα

Κατά το μετωπικό φρεζάρισμα, η φρέζα έχει δόντια με κόψεις περιφερειακά και μετωπικά και η κατεργασμένη επιφάνεια προκύπτει κάθετα στον άξονα της φρέζας.

Με το φρεζάρισμα μπορούμε, εκτός από επίπεδες επιφάνειες, να κατεργαστούμε και διάφορες καμπύλες επιφάνειες με φρεζάρισμα μορφής και αντιγραφής όπως ακόμα να κόψουμε οδοντώσεις και σπειρώματα.

Στην επόμενη παράγραφο, ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη και πρακτικοί υπολογισμοί του φρεζαρίσματος.

### 2.8.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη του Φρεζαρίσματος

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φρεζαρίσματος είναι τα εξής:

- η ταχύτητα κοπής  $V_k = \pi * d * n / 1000$  (m/min) όπου  $d$  η διάμετρος του εργαλείου και  $n$  οι στροφές ανά λεπτό της ατράκτου
- η πρόωση ανά οδόντα  $s$  ή  $f_z$  (mm/tooth) που είναι η μετατόπιση του τεμαχίου μεταξύ των δύο χρονικών στιγμών εισόδου διαδοχικών δοντιών στο υλικό και αντιστοιχεί στο μέγιστο πάχος αποβλήτου
- η πρόωση ανά λεπτό  $S$  ή  $f$  (mm/min) που προκύπτει ως:  
 $S = s * Z * n$  όπου  $Z$  ο αριθμός δοντιών της φρέζας
- το βάθος κοπής  $t$  (mm) το οποίο ελέγχει τον αριθμό των πάσων - ακτινικά για την απομάκρυνση του καθορισμένου συνολικού πάχους υλικού. Για ξεχόνδρισμα με φρέζες ταχυχάλυβα το βάθος κοπής είναι 2-4 mm ενώ για αντίστοιχα κονδύλια μπορεί να φθάσει τη διάμετρο του κονδυλιού (100% engagement)
- το πλάτος κοπής  $w$  (mm) το οποίο ελέγχει το βαθμό βύθισης του εργαλείου αξονικά στο υλικό. Αυτό εξαρτάται από το μήκος της κόψης, αλλά και από τις δυνάμεις κοπής που μπορεί να αντέξει το εργαλείο χωρίς ταλάντωση

Η επιλογή των παραπάνω μεγεθών γίνεται με βάση συγκεκριμένου περιορισμούς. Ανάλογα με το υλικό του τεμαχίου και του εργαλείου συνιστώνται συγκεκριμένες τιμές ταχύτητας κοπής και πρόωσης ανά οδόντα (με ένα οδόντα σε επαφή με το τεμάχιο ανά πάσα στιγμή) από τους κατασκευαστές εργαλείων, π.χ. για χυτοσίδηρο και κυλινδρικές φρέζες από ταχυχάλυβα 15-30 m/min και 0,18-0,22 mm/οδόντα ενώ για φρέζες με ένθετα πλακίδια σκληρομετάλλου 6-100 m/min και 0,06-0,10 mm/οδόντα.

## 2.9 Κατεργασίες Υψηλής Ταχύτητας

Με τον όρο κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων, εννοούμε τις υψηλές ταχύτητες που μπορούν να αναπτύξουν οι άξονες της εργαλειομηχανής κατά τη διάρκεια της κοπής. Η κατεργασία υψηλών ταχυτήτων απαιτεί μεγάλη αποτελεσματικότητα από το κοπτικό εργαλείο, το σύστημα συγκράτησης, το εργαλείο κοπής και την κοπτική ακμή. Ολόκληρο το σύστημα πρέπει να υπακούει στις γενικές προδιαγραφές οι οποίες θα προσφέρουν την υψηλή ακρίβεια κοπής και την ευστάθεια που απαιτείται για την επίτευξη μικρών ανοχών. Οι κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων συνεπάγονται ανάπτυξη μεγάλων τασικών πεδίων. Ως εκ τούτου, τα κοπτικά εργαλεία πρέπει να προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα στο επίπεδο κοπής. Επίσης, οι κοπτικές λεπίδες θα πρέπει να προσφέρουν υψηλή αντοχή σε θερμικά σοκ και υψηλή χημική σταθερότητα διότι στις κατεργασίες αυτού του είδους παράγονται υψηλές θερμοκρασίες και ακόμα μεγαλύτερης θερμοκρασίας απόβλητα, σχεδόν πυρωμένα. Η τελική ποιότητα επιφανείας των τεμαχίων και η διαστασιολογική τους ακρίβεια, εξαρτώνται από την αντοχή των κοπτικών σε φθορά και την σταθερότητα της κοπτικής τους ακμής. Σε περιπτώσεις συνεχής κοπής και για συνήθη βάθη κοπής, τα σύνθετα κεραμικά υλικά προτιμούνται έναντι των CBN λόγω της καλύτερης τιμής που παρουσιάζουν στη σχέση κόστους/απόδοσης. Αντίθετα σε περιπτώσεις μεγάλης εναλλαγής του βάθους κοπής ή σε διακοπτόμενες κοπές τα κοπτικά εργαλεία από CBN αποδίδουν καλύτερα.

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

Σήμερα, η υψηλή ταχύτητα, ορίζεται από την περιστροφική κίνηση του άξονα της εργαλειομηχανής από 15.000 έως 25000 rpm. Αυτή η περιστροφική ταχύτητα όμως δεν αναφέρεται στην ταχύτητα κοπής, έτσι ο όρος **υψηλή ταχύτητα κοπής** είναι πιο πρακτικός και σήμερα για μεταλλικά υλικά κατεργασίας κυμαίνεται από 100 έως 500 m/min. Αυτές οι ταχύτητες πριν λίγα χρόνια φάνταζαν απαγορευτικές, όμως με την μελέτη των μηχανισμών υψηλής ταχύτητας κοπής, φάνηκε ότι μεγάλο μέρος της θερμότητας που αναπτύσσεται, βοηθάει στην πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου, με αποτέλεσμα η κατεργασία να γίνεται ευκολότερη και με μικρότερες δυνάμεις. Με την συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής, το απόβλητο δέχεται σχεδόν σταθερό ποσοστό αυτής της θερμότητας και έτσι το κοπτικό εργαλείο δέχεται και αυτό σταθερό ποσοστό θερμότητας, σε αντίθεση με τις μικρές ταχύτητες κοπής όπου

όσο αυτές αυξάνονται, τόσο περισσότερο καταπονείται θερμικά το εργαλείο.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που υπήρχε με τις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας, ήταν η ακρίβεια των εργαλειομηχανών και κατά πόσο μπορούσαν αυτές να χειριστούν αυτές τις υψηλές ταχύτητες. Με την χρήση όμως των εργαλειομηχανών CNC, όπου η εισαγωγή των συνθηκών και ο έλεγχός τους γίνεται με αριθμητικά δεδομένα, παρέχεται η απαιτούμενη ακρίβεια στις κατεργασίες (έως και της τάξης 1  $\mu\text{m}$ ).



### **3.Υπολογιστική προσομοίωση με τη γρήση του Advant Edge**

#### **3.1 Γενικά για την μοντελοποίηση των κατεργασιών**

Οι κατεργασίες κοπής, που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας αφού περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό αλληλοεπηρεαζόμενων παραγόντων που επηρεάζουν σημαντικά και διαφοροποιούν το αποτέλεσμα της κατεργασίας. Το μειονέκτημα αυτό μαζί με το γεγονός ότι σε κάθε πείραμα δεν είναι δυνατόν να διατηρηθούν όλες οι παράμετροι ίδιες, καθιστούν πολλές φορές τα πειράματα μη επαναλήψιμα και μη συγκρίσιμα μεταξύ τους. Επιπλέον, τέτοιου είδους πειράματα χρειάζονται πολύ χρόνο για να διεξαχθούν και στοιχίζουν πολύ ακριβά αφού απαιτούν ιδιαίτερο και ακριβό εξοπλισμό.

Τα προβλήματα αυτά έρχονται να λύσουν τα μοντέλα- κατασκευές προσομοίωσης της θεωρητικής πραγματικότητας, τα οποία κάνοντας απλοποιητικές παραδοχές πλησιάζουν σε κάποιο βαθμό στην πραγματική κατάσταση. Ο ρόλος του μοντέλου είναι να προβλέψει τη φυσική συμπεριφορά με γνωστές συνθήκες. Με ένα μοντέλο μπορεί κανείς γρήγορα και με αρκετή ακρίβεια να κάνει τις απαραίτητες δοκιμές και να τις συγκρίνει μεταξύ τους βλέποντας την επίδραση κάθε παραμέτρου, με κάποιο άλλο αντίστοιχο μοντέλο ή ακόμη και με πραγματικές πειραματικές τιμές. Τα μοντέλα επίσης προσφέρουν σημαντική βοήθεια στην κατανόηση της διαδικασίας που μοντελοποιούν. Το μειονέκτημα που έχουν είναι ότι πρέπει να προσέξει ο κατασκευαστής του μοντέλου να μην κάνει απλοποιητικές παραδοχές που θα έρχονται σε αντίθεση με την πραγματική κατάσταση και θα προκαλούν μεγάλο σφάλμα. Συνήθως, η μελέτη των κατεργασιών οδηγεί στην ανάπτυξη ενός μοντέλου το οποίο έχει ένα σχετικά περιορισμένο πεδίο εφαρμογής, με δεδομένες οριακές συνθήκες. Ο αυστηρός ορισμός του μοντέλου, από την πλευρά του μηχανικού είναι ότι «πρόκειται για μια σύντομη αναπαράσταση μιας διαδικασίας που σκοπό της έχει να συνδέσει το αίτιο με το αποτέλεσμα». Η διαδικασία κατασκευής ενός μοντέλου και η εύρεση μαθηματικών σχέσεων που το διέπουν λέγεται μοντελοποίηση (modeling) και η πιο σημαντική του εφαρμογή λέγεται προσομοίωση (simulation). Η προσομοίωση είναι η διαδικασία του να εισάγει κανείς στο μοντέλο τα αίτια και αυτό να δώσει κάποιο αποτέλεσμα, πρόκειται δηλαδή για μια απομίμηση της πραγματικής κατάστασης.

Το κάθε αποτέλεσμα που προκύπτει από την μοντελοποίηση συγκρίνεται με το πραγματικό για να επιβεβαιωθεί η ορθότητά του. Το πόσο κοντά είναι τα δύο αποτελέσματα φανερώνει την ποιότητα του μοντέλου. Αν το μοντέλο είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα, τότε μπορεί να εφαρμοστεί για να προβλέψει τα αποτελέσματα των πειραμάτων και να οδηγήσει σε χρήσιμα και συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι μοντελοποίησης και αντίστοιχα είδη μοντέλων. Τα φυσικά, τα εμπειρικά, τα αναλυτικά, τα αριθμητικά και τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης είναι ίσως τα σημαντικότερα, με τα δύο τελευταία να είναι τα πιο σύγχρονα και η ανάπτυξή τους είναι συνυφασμένη με την ανάπτυξη των Η/Υ.

Τα φυσικά μοντέλα προκύπτουν από βασικές φυσικές αρχές. Καθορίζοντας τα προς μελέτη μεγέθη, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και την εμπειρία γύρω από την υπό μελέτη κατεργασία, συνδυάζονται οι κατάλληλες σχέσεις και προκύπτει ένα ποιοτικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό καθορίζεται πλήρως από μαθηματικές σχέσεις που έρχονται σε συμφωνία με τους φυσικούς νόμους. Αντίθετα, τα εμπειρικά μοντέλα, καθορίζονται μέσω των μεταβλητών που έχουν προσδιοριστεί κατά την διάρκεια πειραμάτων. Ανάλογα με τα μεγέθη που είναι επιθυμητό να προσδιορίζει το μοντέλο γίνεται μια σειρά από κατάλληλα πειράματα, καταγράφονται τόσο οι είσοδοι, οι παράμετροι των οποίων την επίδραση μελετάται, όσο και οι έξοδοι, τα αποτελέσματα, δηλαδή, του συστήματος. Αφού καθοριστεί ένα είδος σχέσεων που θα χρησιμοποιηθεί, υπολογίζονται οι συντελεστές και το μοντέλο επιβεβαιώνεται και με άλλα πειράματα.

Τα φυσικά μοντέλα μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν για διάφορες καταστάσεις αφού έχουν γενική ισχύ αλλά περιορίζονται από τις διάφορες απλοποιητικές παραδοχές που έχουν γίνει κατά την κατάστρωσή τους. Τα εμπειρικά μοντέλα εφαρμόζονται για τις συνθήκες που έχουν παρατηρηθεί και δεν έχουν γενική ισχύ. Μπορούν, όμως, να δώσουν γρήγορα αποτελέσματα αφού είναι κατά βάση πιο απλά από τα θεωρητικά με σχετικά καλή ακρίβεια.

Υπάρχουν όμως και πολλά αριθμητικά μοντέλα όπως αυτά των συνοριακών στοιχείων, των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων. Στην επόμενη παράγραφο αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, που θα μας απασχολήσει σε αυτήν την διπλωματική εργασία.

### **3.2 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων**

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ή αλλιώς Finite Element Method (FEM) είναι μια αριθμητική διαδικασία για την ανάλυση συνεχών μέσων και κατασκευών. Η χρήση της συνιστάται για προβλήματα που δεν μπορούν να λυθούν με τις κλασικές απλές αριθμητικές μεθόδους. Η μέθοδος αυτή, ουσιαστικά, εξάγει πολύπλοκα συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων μέσα από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, και τα οποία επιλύονται με τη χρήση Η/Υ. Τα αποτελέσματα που εξάγονται με

τη μέθοδο αυτή, ύστερα από την επίλυση πολλών εξισώσεων, είναι εξαιρετικά ακριβή αλλά και σε σύντομο χρόνο και με χαμηλό κόστος.

Η ανάλυση που ουσιαστικά πραγματοποιεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, χωρίζεται σε τρία βήματα:

- Το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου, δηλαδή η διαίρεση του σε μικρότερα στοιχεία, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Όσο πιο πολλά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται τόσο πιο μεγάλη προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι απλής γεωμετρίας και είναι πιο εύκολο να αναλυθεί από ότι μια ολόκληρη κατασκευή. Η διακριτοποίηση μιας δισδιάστατης κατασκευής περιλαμβάνει την κατασκευή πλέγματος, το χωρισμό της, δηλαδή, σε μικρά τμήματα, συνήθως τετράπλευρα ή τρίγωνα, τα οποία αποτελούν τα πεπερασμένα στοιχεία. Τα τμήματα αυτά ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους. Για παράδειγμα, στα θερμικά προβλήματα κάθε κόμβος έχει ένα βαθμό ελευθερίας, τη θερμοκρασία. Έτσι, ένα μοντέλο με  $n$  κόμβους έχει  $n$  βαθμούς ελευθερίας. Για τη σωστή μοντελοποίηση της κατασκευής πρέπει να δοθούν κατάλληλες οριακές συνθήκες στους κόμβους για να «αντιλαμβάνονται» το γεγονός ότι είναι συνδεδεμένοι με κάποιον διπλανό κόμβο και ότι όλα τα πεπερασμένα στοιχεία αποτελούν την προς μελέτη επιφάνεια. Με την ίδια λογική που χρησιμοποιείται για το πέρασμα από τη μονοδιάστατη στη δισδιάστατη ανάλυση, μπορεί να γίνει η μετάβαση στη τρισδιάστατη ανάλυση, με αντίστοιχα πλέγματα και μορφές πεπερασμένων στοιχείων.
- Στο δεύτερο βήμα δίνονται ιδιότητες 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 που οι άγνωστοι αντιπροσωπεύουν τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Με τον τρόπο αυτό είναι γνωστή η τιμή κάθε βαθμού ελευθερίας οπουδήποτε υπάρχει κόμβος στο μοντέλο. Το πραγματικό σύστημα έχει άπειρους βαθμούς ελευθερίας, για αυτό το λόγο όσο πιο πολλά πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται τόσο πιο πολύ προσεγγίζεται η πραγματικότητα. Αυξανόμενου, όμως, του αριθμού των στοιχείων αυξάνει και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς, ενώ η αύξηση των πεπερασμένων στοιχείων δεν συνεπάγεται

πάντα και καλύτερα αποτελέσματα. Συνήθως η αύξηση του πλήθους των πεπερασμένων στοιχείων από ένα σημείο και μετά αυξάνει ελάχιστα την ακρίβεια ενώ αυξάνει δραματικά τον χρόνο επίλυσης.

### **3.3 Συνοπτική παρουσίαση του πακέτου Advant Edge**

#### **3.3.1 Γενικά**

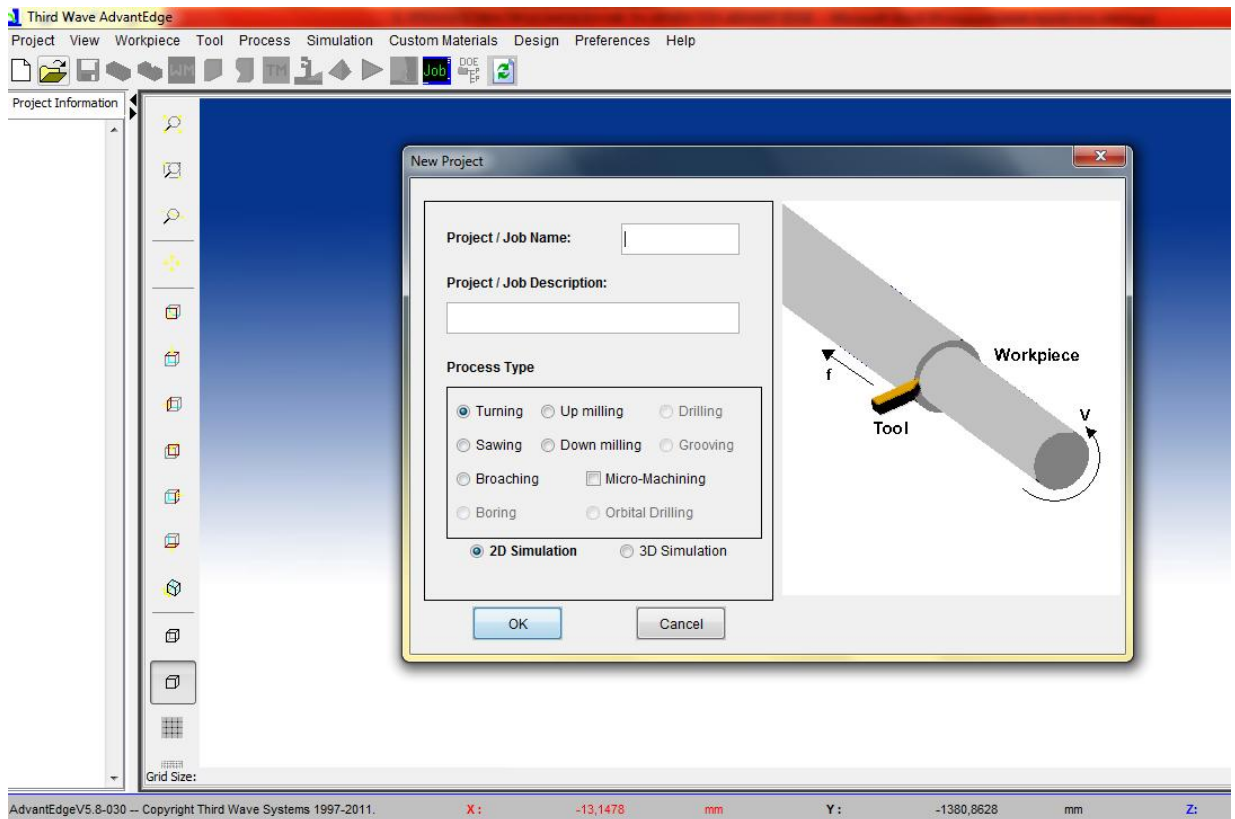
Το πρόγραμμα AdvantEdge ανήκει στην εταιρεία Third Wave Systems. Είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση κατεργασιών κοπής. **Για την πραγματοποίηση αυτών των λειτουργιών χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**, στην οποία αναφερθήκαμε στη προηγούμενη παράγραφο. Η πρώτη έκδοση του εμπορικού αυτού πακέτου κυκλοφόρησε το 1995. Η τελευταία έκδοση που κυκλοφόρησε στην αγορά, και την οποία χρησιμοποιήσαμε για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, είναι η V5.8-026 του 2011. Το AdvantEdge χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lagrange για τη μοντελοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και τις τεχνικές της μεθόδου αυτής. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι τριγωνικά και κατασκευασμένα σύμφωνα με τη μέθοδο Delauney.

Το AdvantEdge είναι το πιο διαδεδομένο και ταυτόχρονα θεωρείται το φιλικότερο προς τον χρήστη εμπορικό πακέτο προσομοίωσης κατεργασιών κοπής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρήστης οφείλει μόνο να εισάγει τα δεδομένα για το τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο καθώς και τις συνθήκες κοπής. Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται μέσα σε ένα απλό περιβάλλον και η επιλογή τους μέσα από εύχρηστους καταλόγους, όπως θα δούμε και παρακάτω. Το πρόγραμμα στη συνέχεια, υπολογίζει και παρουσιάζει τα αποτελέσματα της κατεργασίας που επιλέξαμε. Η χρήση του προγράμματος στην βιομηχανία, θεωρείται επιτακτική στις μέρες μας, καθώς μπορεί να δώσει πληροφορίες για διάφορα μεγέθη της κοπής που δεν μπορούν να υπολογιστούν κατά την διάρκεια πειραματικών κοπών.

Το γραφικό περιβάλλον του AdvantEdge θα μελετηθεί σε 2 μέρη: α) Η εισαγωγή των δεδομένων και β) Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων.

#### **3.3.2 Εισαγωγή δεδομένων**

Ανοίγοντας το πρόγραμμα, ο χρήστης καλείται να δώσει ένα όνομα στην κατεργασία που θα πραγματοποιήσει και να επιλέξει ανάμεσα σε προσομοίωση δύο ή τριών διαστάσεων (Σχήμα 3.1).



ΣΧΗΜΑ 3.1 Επιλογή 2D/3D προσομοίωσης και είδος κατεργασίας

Στις προσομοιώσεις δύο διαστάσεων, ο χρήστης επιλέγει ανάμεσα σε:

- A) Τόρνευση
- B) Ομόρροπο Φρεζάρισμα
- Γ) Αντίρροπο φρεζάρισμα
- Δ) Πριόνισμα
- E) Άνοιγμα αυλακιών
- Στ) Μικρο-κατεργασία (όταν η πρόωση είναι μικρότερη από ένα μικρό ανά περιστροφή).

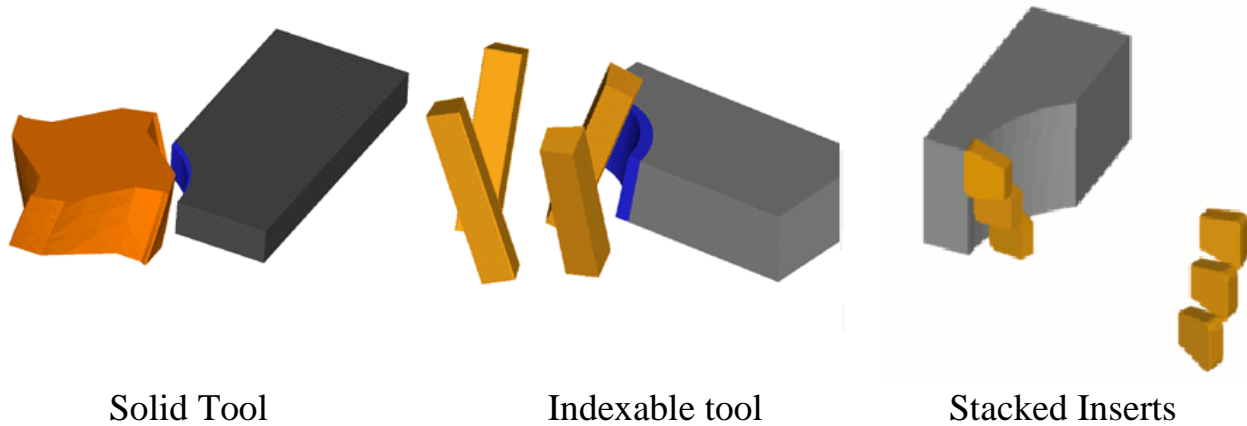
Στις προσομοιώσεις τριών διαστάσεων, οι επιλογές είναι οι εξής:

- A) Εσωτερική Τόρνευση
- B) Εξωτερική Τόρνευση
- Γ) Φρεζάρισμα
- Δ) Διάτρηση με δράπανο
- E) Διάτρηση με άλλα κοπτικά εργαλεία
- Στ) Σχηματισμός σπειρωμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζουμε το φρεζάρισμα τριών διαστάσεων.

Αφού επιλέξουμε την κατεργασία του φρεζαρίσματος τριών διαστάσεων, καλούμαστε να επιλέξουμε το είδος του εργαλείου που θα χρησιμοποιήσουμε. Οι τρεις επιλογές είναι οι εξής (Σχήμα 3.2):

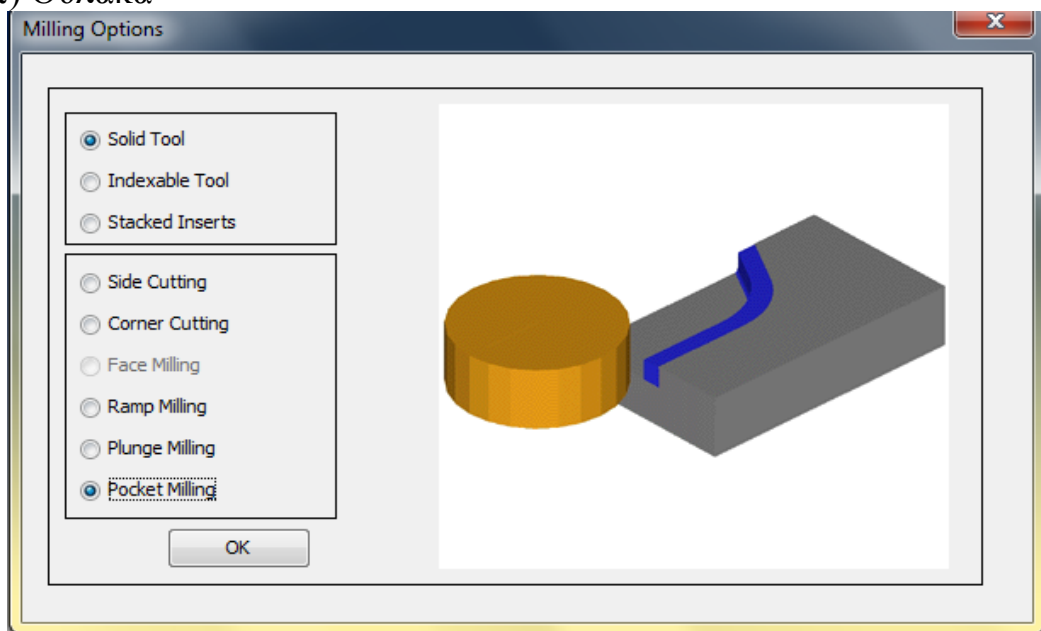
- A) Ενιαίο Εργαλείο- Solid Tool
- B) Εργαλείο Πολλαπλών Πλακιδίων- Indexable tool
- Γ) Εργαλείο με Δέσμες Πλακιδίων- Stacked Inserts



ΣΧΗΜΑ 3.2 Τα τρία είδη εργαλείου για το φρεζάρισμα

Στη συνέχεια επιλέγουμε το είδος φρεζαρίσματος που θέλουμε, ανάλογα με την κίνηση του εργαλείου ως προς το τεμάχιο (Σχήμα 3.3):

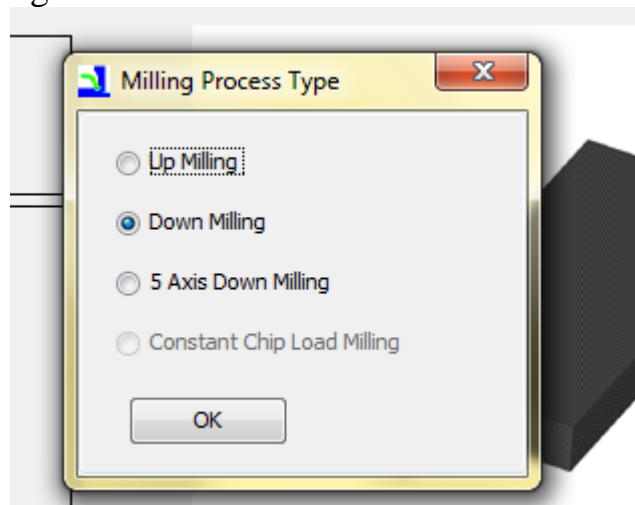
- A) Πλάγιο
- B) Περιφερειακό
- Γ) Μετωπικό
- Δ) Διάνοιξης αυλακιού
- E) Οπής
- Στ) Θύλακα



ΣΧΗΜΑ 3.3 Τα είδη φρεζαρίσματος

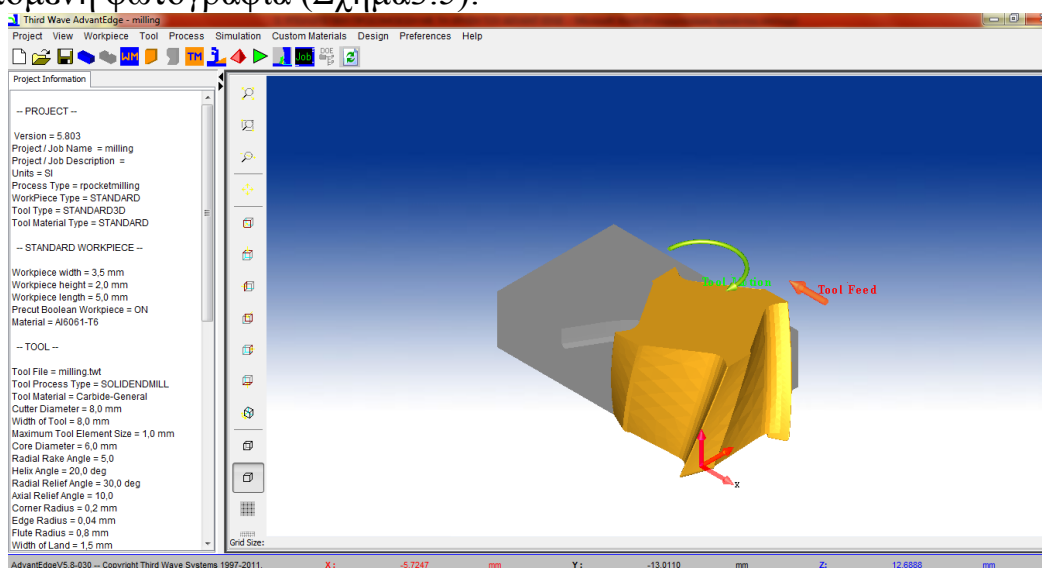
Ανάλογα με το είδος φρεζαρίσματος που θα επιλέξει ο χρήστης, το πρόγραμμα ανοίγει μια νέα καρτέλα για να επιλέξει ανάμεσα σε (Σχήμα 3.4):

- Α) Αντίρροπο φρεζάρισμα- Up Milling
- Β) Ομόρροπο φρεζάρισμα- Down Milling
- Γ) Ομόρροπο φρεζάρισμα με επιλογή με καρτεσιανές συντεταγμένες του άξονα περιστροφής του εργαλείου ως προς το τεμάχιο- 5Axis Down Milling
- Δ) Παραστατική απεικόνιση της επιφάνειας του τεμαχίου για συνεχή κοπή του πλακιδίου, και άρα σχηματισμό συνεχούς αποβλήτου- Constant Chip Load Milling



ΣΧΗΜΑ 3.4 Είδη περιφερειακού φρεζαρίσματος

Η εικόνα που εμφανίζεται στην οθόνη του Υ/Η, ανάλογα με τις επιλογές που κάνει ο χρήστης, είναι της μορφής που φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία (Σχήμα3.5):



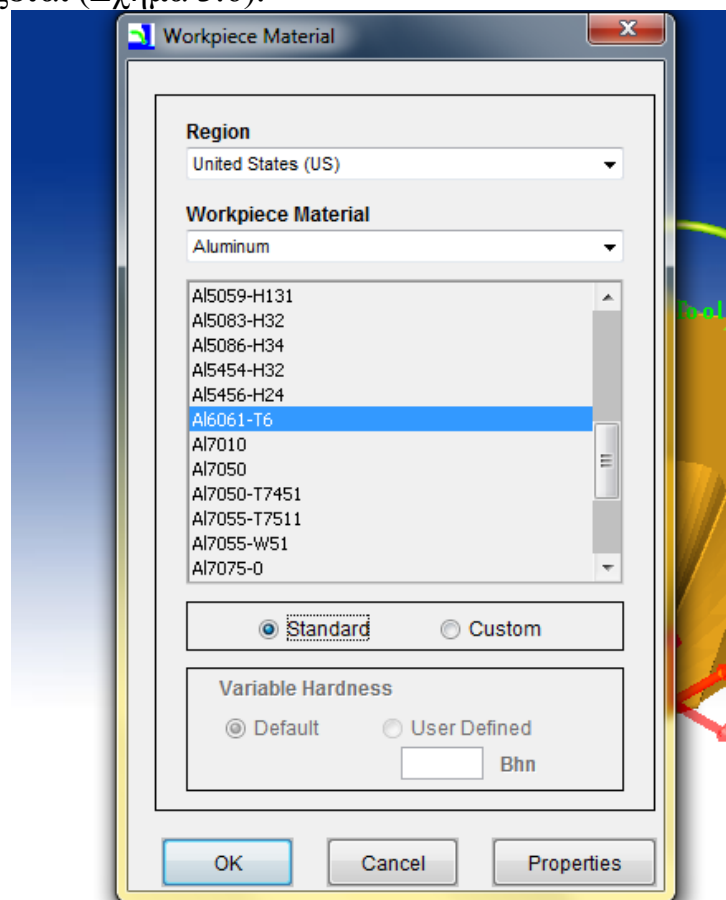
ΣΧΗΜΑ 3.5 Περιβάλλον Εργασίας Φρεζαρίσματος

Στο περιβάλλον εργασίας, όπως φαίνεται και στην παραπάνω φωτογραφία, παρατηρούμε:

- Πάνω, τη γραμμή με τα μενού για την επιλογή των συνθηκών και χαρακτηριστικών της κατεργασίας
- Αριστερά, τα χαρακτηριστικά που έχουμε επιλέξει ως τώρα για την τρέχουσα κατεργασία
- Στο κέντρο, το σχέδιο της προσομοίωσης. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται το τεμάχιο και με χρυσαφί το κοπτικό εργαλείο. Αριστερά του σχεδίου, εμφανίζεται το μενού με τις επιλογές του εικονοσκοπίου.

Από την επιλογή Project της γραμμής εργασιών, μπορούμε να ανοίξουμε ή να αποθηκεύσουμε ένα αρχείο καθώς και να επιλέξουμε τις μονάδες μέτρησης ανάμεσα σε SI ή Αγγλικές. Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων με την σειρά που εμφανίζονται στη γραμμή με τα μενού.

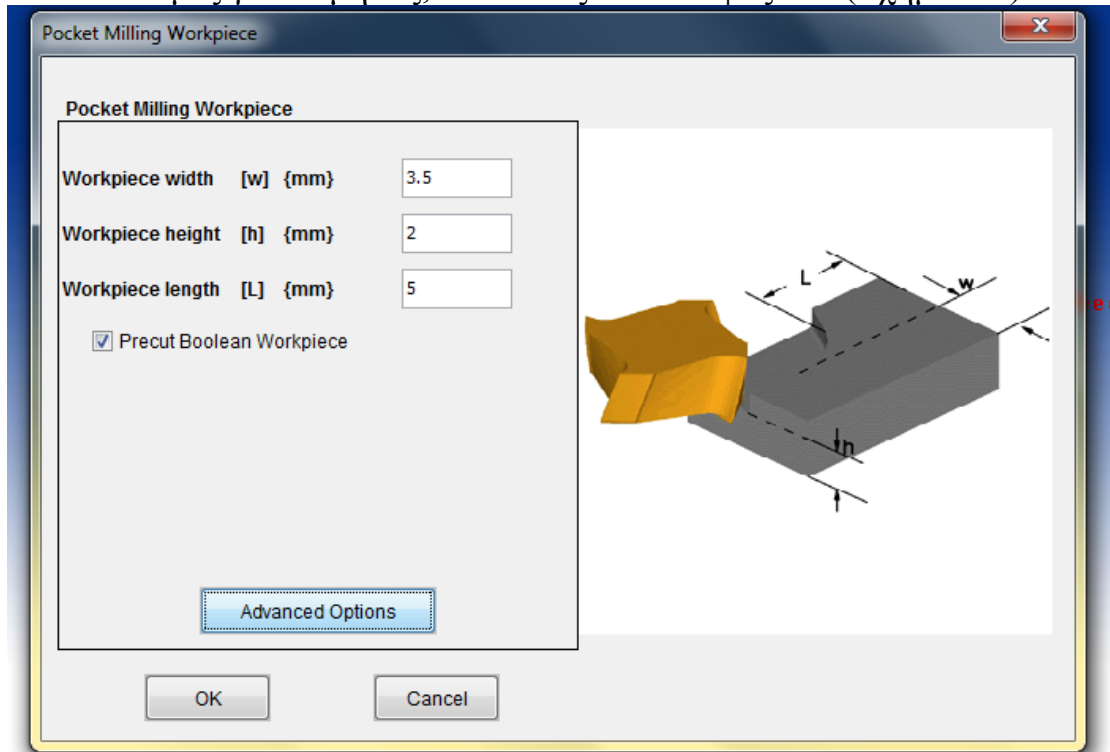
- Ξεκινάμε με το τεμάχιο που θα επεξεργαστούμε ( workpiece ). Επιλέγουμε πρώτα το υλικό του τεμαχίου ( workpiece material ), το οποίο διαλέγουμε μέσα από τον ειδικό κατάλογο που μας εμφανίζεται (Σχήμα 3.6).



ΣΧΗΜΑ 3.6 Επιλογή υλικού τεμαχίου

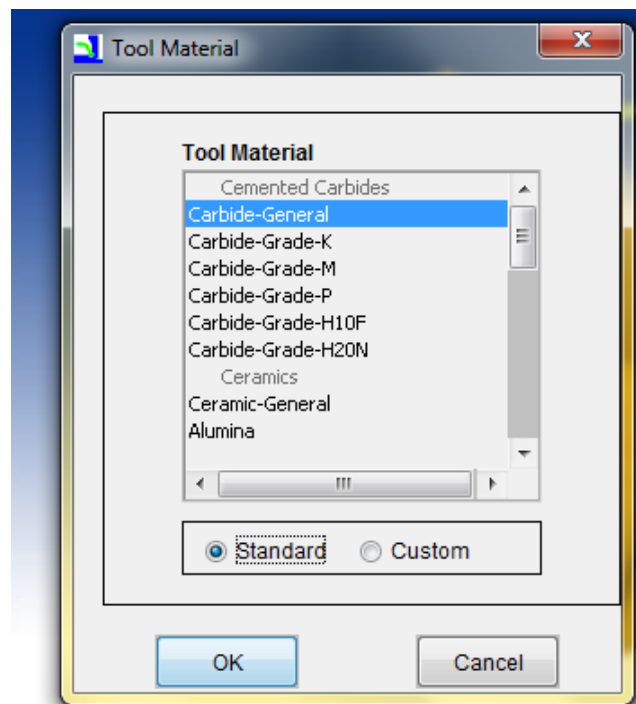


Το τεμάχιο έχει καθορισμένο ορθογωνικό σχήμα και ο χρήστης καλείται να δώσει τιμές για το μήκος, το πλάτος και το ύψος του (Σχήμα 3.7).



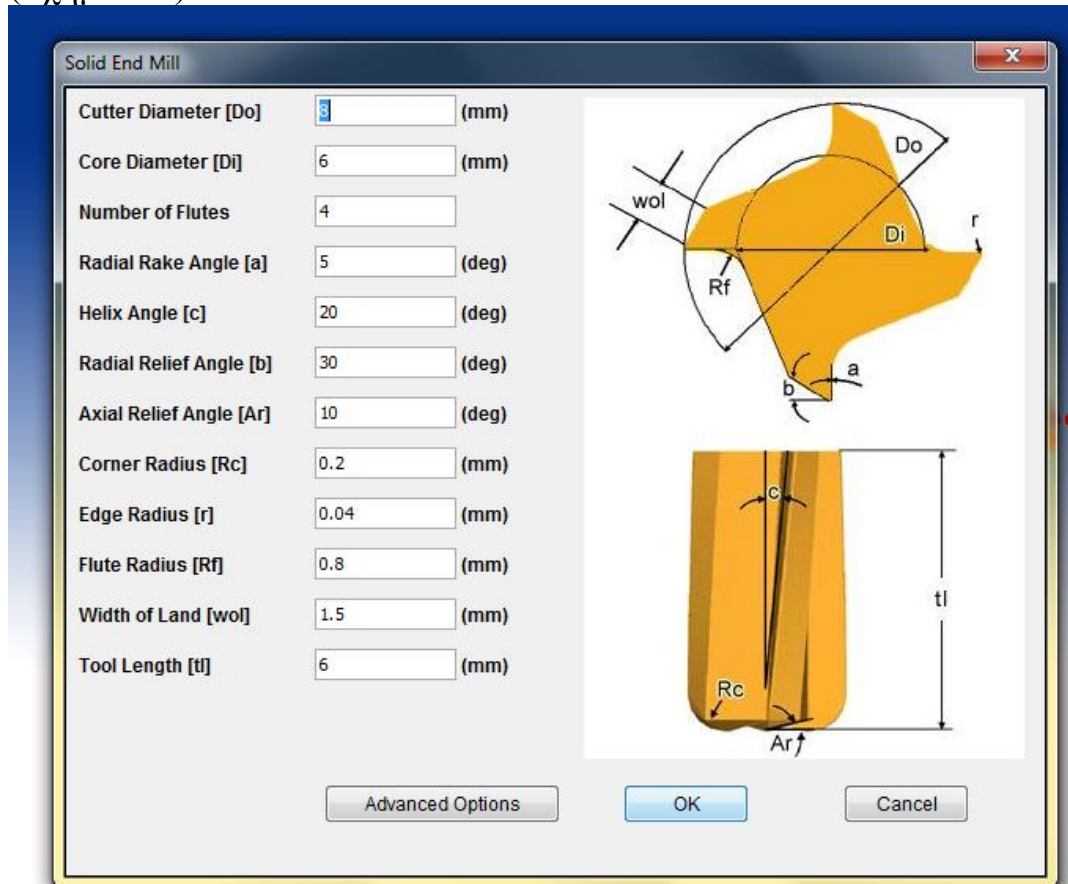
ΣΧΗΜΑ 3.7 Καθορισμός διαστάσεων τεμαχίου υπό κατεργασία

—Συνεχίζουμε με το κοπτικό εργαλείο (tool). Επιλέγουμε ξανά μέσα από ειδικό κατάλογο το υλικό του κοπτικού εργαλείου (tool material) (Σχήμα 3.8).



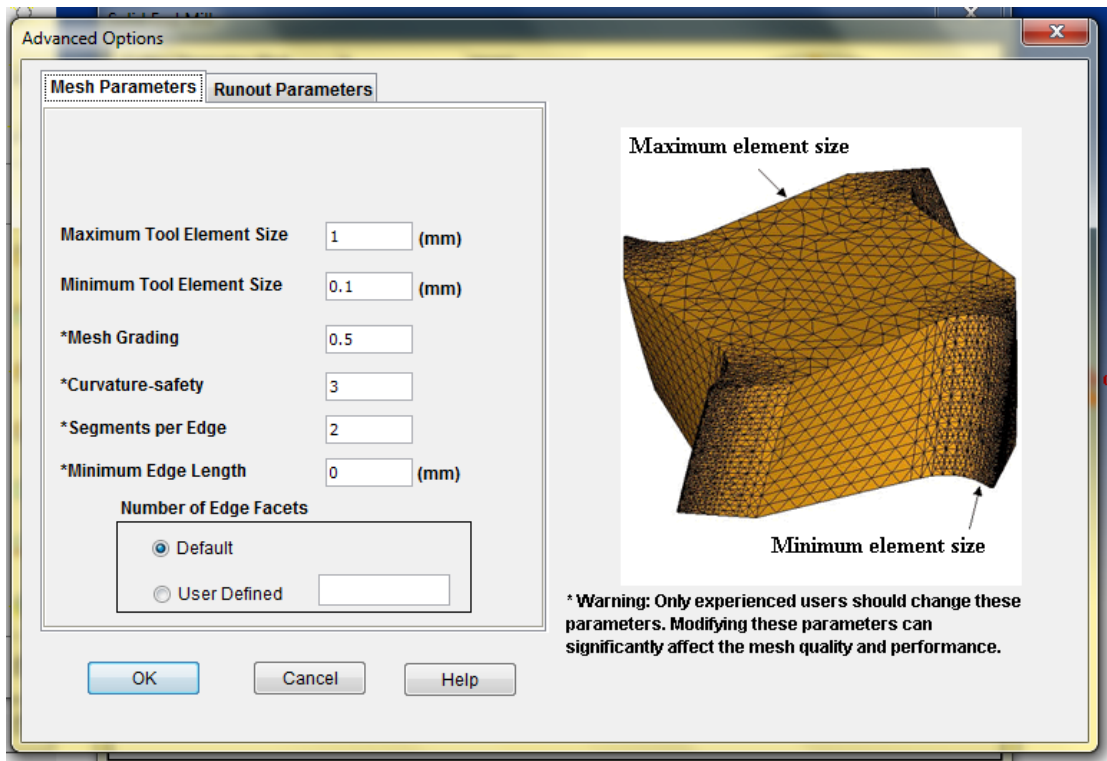
ΣΧΗΜΑ 3.8 Επιλογή υλικού κοπτικού εργαλείου

Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε στην εισαγωγή των διαστάσεων του εργαλείου. Όταν πατήσουμε την επιλογή Create/ Edit Standard Tool (δηλαδή να διαμορφώσουμε το εργαλείο, που μας δίνει το πρόγραμμα, ανάλογα με τις απαιτήσεις μας) εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο (Σχήμα 3.9):



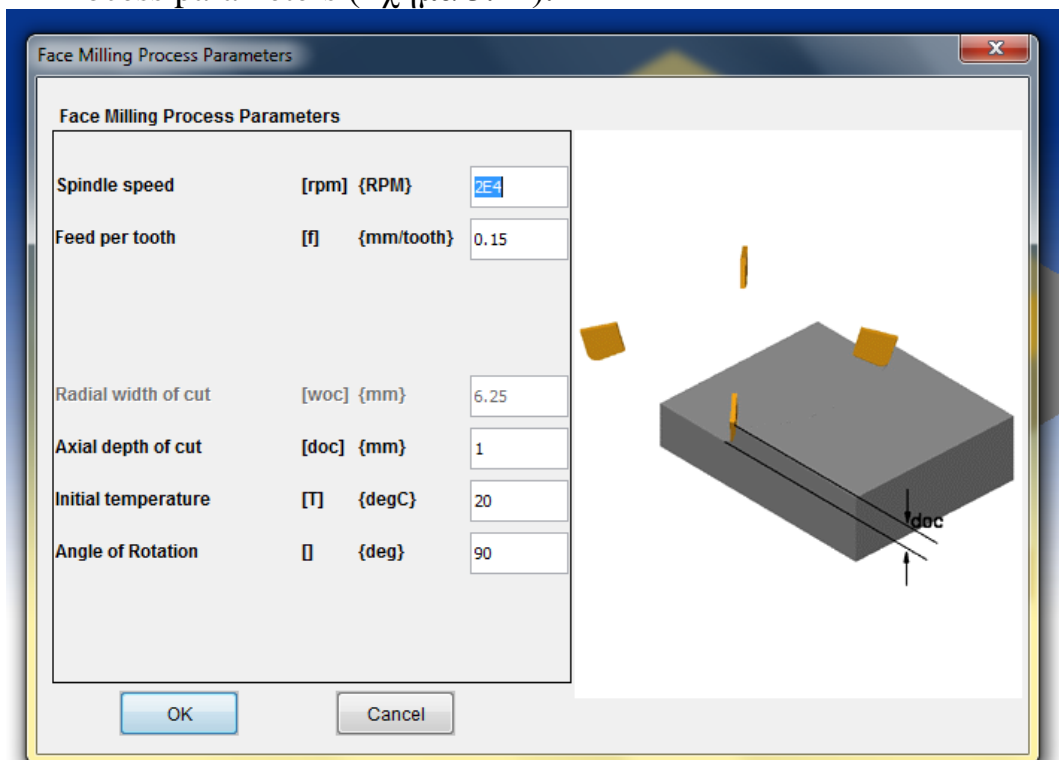
ΣΧΗΜΑ 3.9 Παράθυρο εισαγωγής χαρακτηριστικών κοπτικού εργαλείου

Ο χρήστης καλείται σε αυτό το παράθυρο να εισάγει τα χαρακτηριστικά του εργαλείου που θα χρησιμοποιήσει για τις κοπές του. Σε αυτό το παράθυρο ο χρήστης έχει την δυνατότητα επιλέγοντας τις προηγμένες επιλογές (Advanced Options) να ρυθμίσει το μέγιστο και το ελάχιστο μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων και άλλες παραμέτρους της μοντελοποίησης όπως η εξομάλυνση του πλέγματος (mesh grading), η ασφάλεια καμπυλότητας (curvature-safety) άλλα και τον αριθμό των στοιχείων που καλύπτουν την κοπτική ακμή (number of edge facets). Η τελευταία επιλογή είναι προτιμότερο να μένει στην προεπιλεγμένη θέση (Σχήμα 3.10).



ΣΧΗΜΑ 3.10 Προηγμένες επιλογές κοπτικού εργαλείου

— Τέλος, ορίζουμε τις παραμέτρους της κατεργασίας με την επιλογή Process parameters (Σχήμα 3.11).



ΣΧΗΜΑ 3.11 Ορισμός παραμέτρων της κατεργασίας

Σε αυτό το παράθυρο ορίζουμε τη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου σε rpm, την πρόωση ανά περιστροφή ανά δόντι (mm/tooth), το βάθος κοπής, τη θερμοκρασία αναφοράς καθώς και πόσες μοίρες θα στραφεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο τεμάχιο. Επίσης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την χρήση ψυκτικού υγρού κοπής κατά την προσομοίωση, με την προϋπόθεση ότι γνωρίζει όλες τις χημικές ιδιότητες του υγρού που θα χρησιμοποιήσει.

Αφού εισάγουμε τα δεδομένα για το τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τις συνθήκες της κατεργασίας (όπως είδαμε αναλυτικά παραπάνω), τότε επιλέγουμε τον κατάλογο προσομοίωσης (Simulation), και στη συνέχεια υποβάλλουμε την εφαρμογή στον solver του προγράμματος (Submit Job). Αφού κάνουμε αυτή την επιλογή, εμφανίζεται το παράθυρο που μας δείχνει την πρόοδο της εφαρμογής που «τρέχει», αλλά και τις εφαρμογές που έχουν ολοκληρωθεί ή περιμένουν να «τρέξουν». Στο κατάλογο προσομοίωσης (Simulation), έχουμε και κάποιες επιπλέον επιλογές που μπορούμε να ρυθμίσουμε και αφορούν την προσομοίωση (Simulation Options):

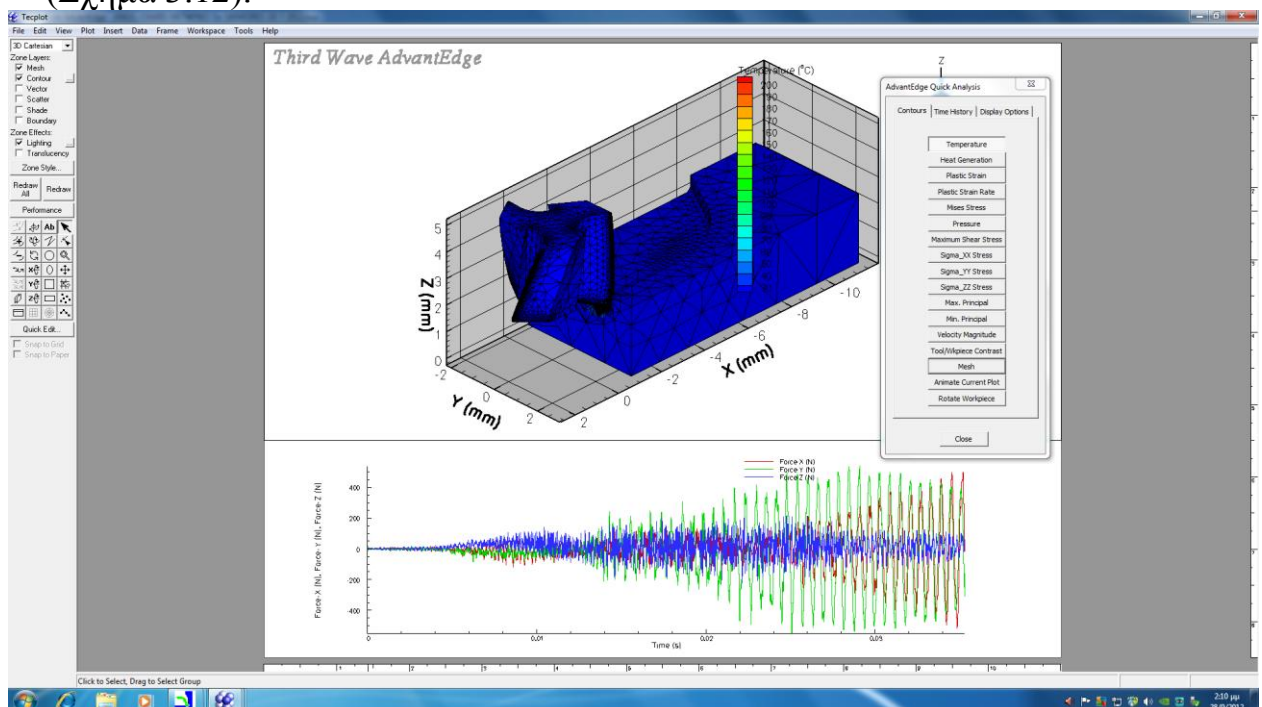
- ❖ Μπορούμε να καθορίσουμε την ακρίβεια των υπολογισμών (Simulation mode) με την επιλογή ανάμεσα σε Standard ή Demonstration mode. Στις οδηγίες χρήσης αναφέρεται ότι η χρήση του Demonstration mode βοηθάει στην εξαγωγή αποτελεσμάτων σε συντομότερο χρονικό διάστημα, αλλά πιθανόν να οδηγήσει σε απόκλιση έως και 20% από τις τιμές που έχουν υπολογιστεί. Γι' αυτό είναι προτιμότερη η χρήση του Standard mode. Επίσης, σύμφωνα και πάλι με τις οδηγίες χρήσης, το Demonstration mode έχει μικρότερο ρυθμό υπολογισμού 3 έως 5 φορές σε σχέση με το Standard mode.
- ❖ Μπορούμε, επίσης, να ρυθμίσουμε το πρόγραμμα να υπολογίσει τις παραμένουσες τάσεις, να αναλύσει τις τάσεις και τις θερμοκρασίες στο τελευταίο στάδιο της κατεργασίας (steady state), να ρυθμίσουμε τον αριθμό των εικόνων ανά δευτερόλεπτο στην γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων (number of output frames), καθώς και να επιλέξουμε την παράλληλη επεξεργασία των εφαρμογών (με την προϋπόθεση ότι έχουμε πολυπύρρηνο επεξεργαστή στον H/Y, έτσι ώστε η παράλληλη επεξεργασία στους πυρήνες του H/Y να μειώνει το χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων).
- ❖ Τέλος, μπορούμε να αλλάξουμε τις ρυθμίσεις που αφορούν την πλεγματοποίηση του τεμαχίου (Workpiece meshing) δηλαδή να ρυθμίσουμε την γεωμετρία και την ομαλοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικά σε αυτή την ρύθμιση καλό είναι να μην αλλάζουμε τις προεπιλεγμένες τιμές του συστήματος, καθώς

το πρόγραμμα έχει υπολογίσει τα πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με την τιμή της πρόωσης.

Σε αυτό το σημείο τελειώνει η εισαγωγή των δεδομένων της κατεργασίας και ακολουθεί η εμφάνιση των αποτελεσμάτων.

### 3.3.3 Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε, γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος Tecplot, το οποίο συνοδεύει το πακέτο AdvantEdge. Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο Tecplot φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία (Σχήμα 3.12).

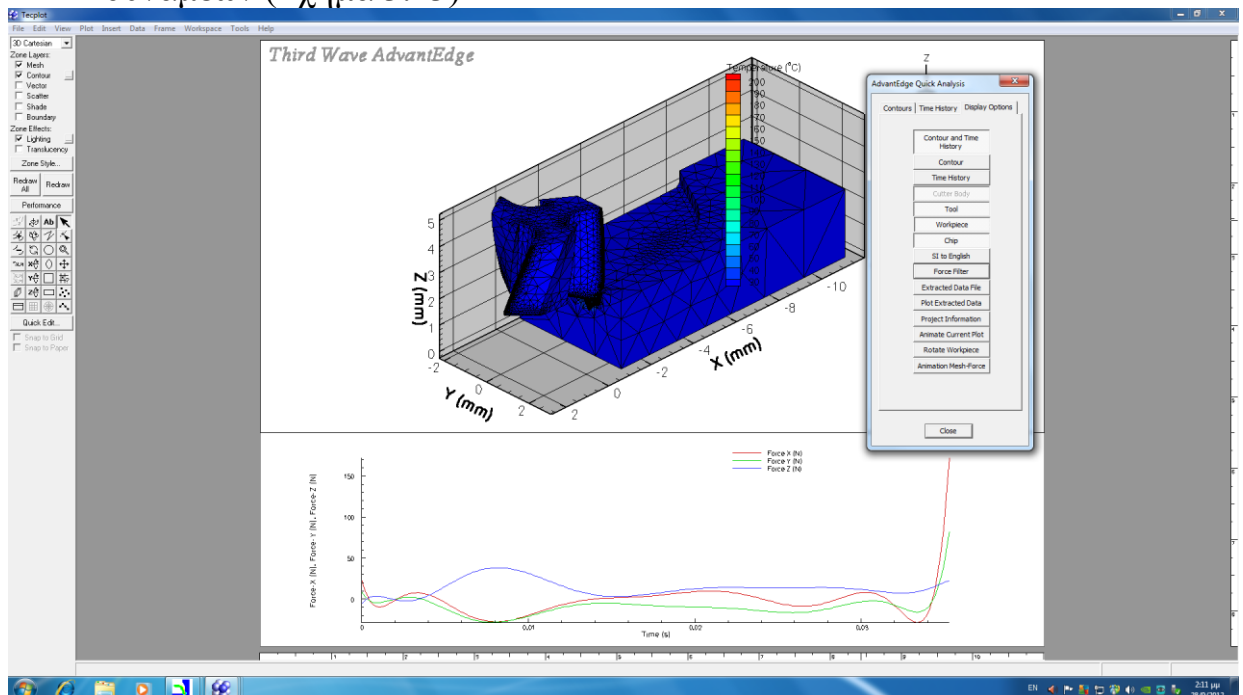


ΣΧΗΜΑ 3.12 Το πρόγραμμα Tecplot που εμφανίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Στο κέντρο του παραθύρου φαίνεται σε τρισδιάστατη ανάλυση η κατεργασία που προσομοιώθηκε. Μάλιστα, όταν ανοίγει το παράθυρο το τρισδιάστατο γράφημα είναι κινούμενο και δείχνει την ακριβή κατεργασία που πραγματοποίησε το πρόγραμμα- πόσο στράφηκε το εργαλείο μέσα στο τεμάχιο, τι απόβλητο δημιούργησε, τι μορφή είχε αυτό το απόβλητο- . Στο παράθυρο του Tecplot μπορούμε να διακρίνουμε τρεις ζώνες.

- Αριστερά βρίσκεται το μενού, στο οποίο επιλέγουμε τα δεδομένα που θέλουν να προβληθούν, αλλά και τον τρόπο με το οποίο αυτά θα προβληθούν.

- Στο κέντρο της οθόνης ανοίγει το μενού επιλογών AdvantEdge Quick Analysis. Σε αυτό το μενού επιλέγουμε τις παραμέτρους που θέλουμε να εμφανιστούν στο κεντρικό γράφημα του Tecplot. Οι παράμετροι είναι οι εξής (με την σειρά που είναι τοποθετημένοι στο μενού):
  - 1) Θερμοκρασία (σε C° ή F°). Η θερμοκρασία είναι πάντα η προεπιλεγμένη παράμετρος που εμφανίζεται στο κεντρικό γράφημα
  - 2) Ρυθμός έκκλισης θερμότητας (σε W/mm<sup>3</sup>).
  - 3) Πλαστική παραμόρφωση (σε s<sup>-1</sup>)
  - 4) Ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης (σε s<sup>-1</sup>)
  - 5) Τάσεις Von Mises (σε MPA ή Psi)
  - 6) Τάσεις φορτίσεων (σε MPA ή Psi)
  - 7) Μέγιστη διατμητική τάση (σε MPA ή Psi)
  - 8) Κύριες και διατμητικές τάσεις XX,YY,ZZ, XY,XZ,YZ (σε MPA ή Psi)
  - 9) Ταχύτητα ανά διεύθυνση (σε m/min ή ft/min)
- Στο κάτω μέρος της οθόνης, εμφανίζεται το διάγραμμα μεταβολής των δυνάμεων κατά τις τρεις διευθύνσεις X,Y και Z (κάθετος άξονας) σε συνάρτηση με τον χρόνο (οριζόντιος άξονας). Έχουμε επίσης τη δυνατότητα να φιλτράρουμε αυτό το διάγραμμα (AdvantEdge Quick Analysis- Display Options- Force Filter) και να εμφανιστεί το διάγραμμα με τις καμπύλες διακύμανσης των τριών δυνάμεων (Σχήμα 3.13)



ΣΧΗΜΑ 3.13 Το πρόγραμμα Tecplot με την καμπύλη διακύμανσης των δυνάμεων (φιλτραρισμένο διάγραμμα)



### **3.3.4 Μειονεκτήματα του Πακέτου AdvantEdge**

Όπως έχουμε αναφέρει σε αυτό το κεφάλαιο, το εμπορικό πακέτο AdvantEdge είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια κάθε μηχανικού αφού με τις προσομοιώσεις κατεργασίας που πολλές αγγίζουν την πραγματικότητα, μπορούν να ερευνηθούν πολλές πτυχές των κατεργασιών που δεν ήταν δυνατόν να γίνει κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Όμως, όπως κάθε υπολογιστικό πρόγραμμα, έχει και προβλήματα, τα οποία εντοπίστηκαν κατά τη χρήση του προγράμματος για την παρούσα διπλωματική, και θα αναφερθούν παρακάτω:

- Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζει το πρόγραμμα είναι το μοντέλο τριβής και ολίσθησης που χρησιμοποιεί. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ιδιαίτερα απλοποιημένο με σκοπό οι εφαρμογές να εκτελούνται σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Αυτό όμως έχει συνέπειες στη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, όπως θα δούμε και στο κεφάλαιο 7 που γίνεται σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών τιμών.
- Ένα άλλο πρόβλημα εντοπίζεται στις οριακές και συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιεί, οι οποίες φαίνεται πως δεν είναι επαρκείς για όλες τις κατεργασίες που προσομοιώνονται. Έτσι, παρατηρήθηκαν εφαρμογές που το απόβλητο περνούσε μέσα από το κοπτικό εργαλείο ή το τεμάχιο, και αυτό είχε ως αποτέλεσμα η εφαρμογή να διακόπτεται και να μην παίρνουμε τα αποτελέσματα που επιθυμούσαμε.
- Παρατηρήθηκε, επίσης, πολλές φορές σε πολύ μικρό αριθμό σημείων στην κοπτική ακμή του εργαλείου εμφάνιση μεγάλων θερμοκρασιών. Ένας πιθανός λόγος για αυτό το πρόβλημα είναι το ελλιπές μοντέλο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.
- Το πρόγραμμα, επιπλέον, δεν έχει τη δυνατότητα να εκτελεί παράλληλα εφαρμογές ίδιων διαστάσεων. Δηλαδή, το πρόγραμμα μπορεί να επεξεργαστεί παράλληλα μια τρισδιάστατη και μια δισδιάστατη εφαρμογή, αλλά δεν μπορεί να επεξεργαστεί ταυτόχρονα δύο τρισδιάστατες ή δυο δισδιάστατες εφαρμογές.
- Παρατηρήσαμε, επίσης, ότι ορισμένες τρισδιάστατες εφαρμογές (ανάλογα και με τις συνθήκες κοπής και πόσες μοίρες να στρέψει το εργαλείο) καθυστερούσαν να ολοκληρωθούν. Έτσι υπήρχαν εφαρμογές τρισδιάστατου φρεζαρίσματος, που ρυθμίζαμε το εργαλείο να στρέψει  $180^\circ$ , και η προσομοίωση χρειαζόταν 2-3 μέρες να ολοκληρωθεί.

- Τέλος, εντοπίσαμε ότι το πρόγραμμα περιέχει μόνο τέσσερα είδη επικαλύψεων για το κοπτικό εργαλείο. Στην πράξη όμως, υπάρχουν περισσότερα είδη και συνδυασμοί επικαλύψεων στα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη βιομηχανία.



## 4. Πειραματική Διαδικασία

### 4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης εργαστηρίου

Σκοπός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν να υπολογιστούν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται στο εργαλείο κατά τα μετωπικό φρεζάρισμα κραμάτων τιτανίου για τις διάφορες συνθήκες κοπής, με χρήση ψυκτικού υγρού. Για το λόγο αυτό είχαμε συνδέσει, κατά την διάρκεια των πειραμάτων, στις κατάλληλες υποδοχές της εργαλειομηχανής τη διάταξη δυναμόμετρου που βλέπουμε στην παρακάτω φωτογραφία (Σχήμα 4.1).

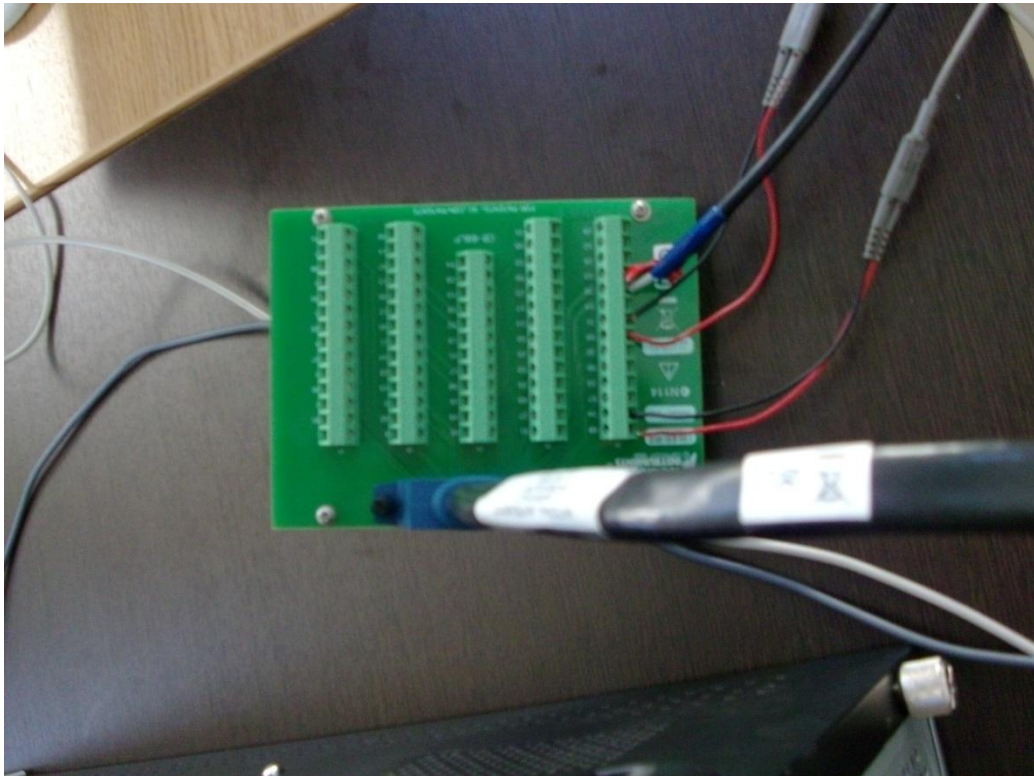


ΣΧΗΜΑ 4.1 Η διάταξη δυναμόμετρου που χρησιμοποιήθηκε

Το δυναμόμετρο είχε συνδεθεί με το τεμάχιο στην ειδική βάση, όπως φαίνεται στην αριστερή φωτογραφία του σχήματος 4.1. Στη συνέχεια το δυναμόμετρο συνδέθηκε με τους δύο ενισχυτές (δεξιά φωτογραφία του σχήματος 4.1). Η διάταξη αυτή (το δυναμόμετρο και οι δύο ενισχυτές) συνδέθηκαν κατάλληλα πάνω σε μία ειδική μετρητική κάρτα (βλέπε Σχήμα 4.2). Η μετρητική κάρτα με την σειρά της συνδέθηκε σε θύρα του Η/Υ του εργαστηρίου (βλέπε Σχήμα 4.3 και 4.4). Στον Η/Υ είναι εγκατεστημένο το εξειδικευμένο πρόγραμμα Labview, το οποίο έχει την δυνατότητα να παίρνει τις μετρήσεις που στέλνει το δυναμόμετρο στον Η/Υ και να εκτελεί τις εξής ενέργειες:

- Να παρουσιάζει τα γραφήματα των δυνάμεων σε κατάλληλους άξονες που εμείς έχουμε επιλέξει (βλέπε Σχήμα 4.5)

- Να αποθηκεύει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνει το δυναμόμετρο σε αρχείο .txt, σε όποιο φάκελο εμείς επιλέξουμε. Έτσι η ανάγνωση των αποτελεσμάτων γίνεται απλούστερη αφού όλες οι τιμές είναι αποθηκευμένες σε αρχεία στον Η/Υ, σε αντίθεση με παλαιότερα, όπου τα αποτελέσματα που έδινε το δυναμόμετρο εκτυπώνονταν σε ειδικό χαρτί, κάνοντας την ανάγνωση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία.



ΣΧΗΜΑ 4.2 Η μετρητική κάρτα στην οποία συνδέθηκε η διάταξη δυναμόμετρου (δυναμόμετρο και ενισχυτές)

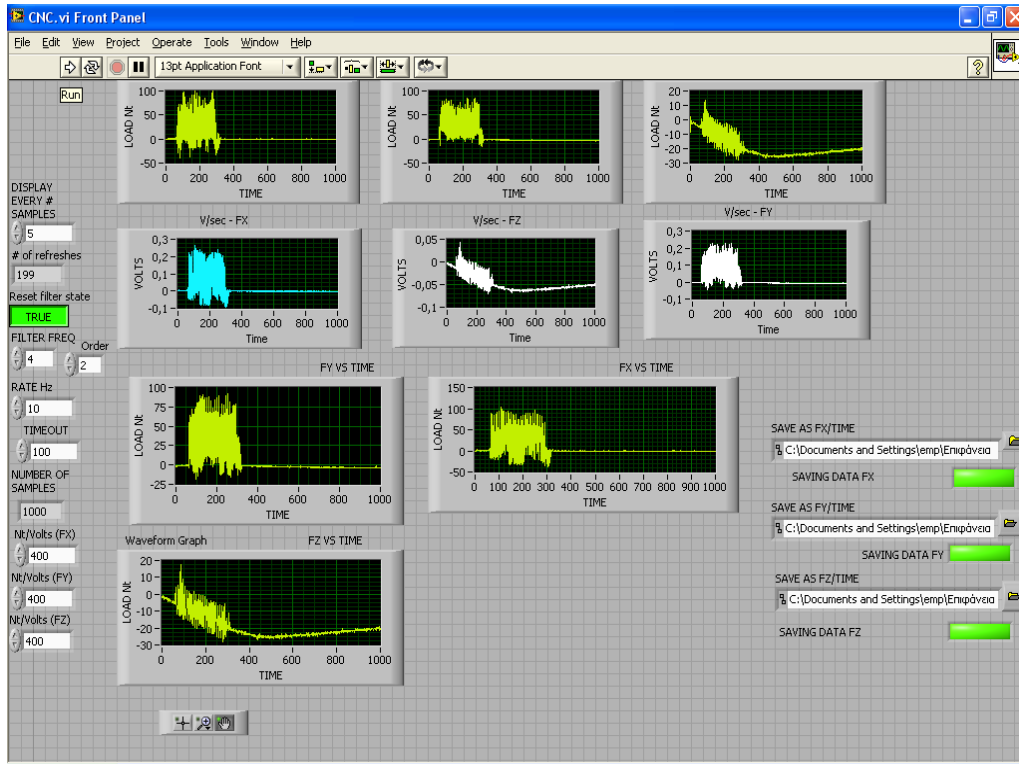


ΣΧΗΜΑ 4.3 Σύνδεση των δύο ενισχυτών με την μετρητική κάρτα και με τον Η/Υ



ΣΧΗΜΑ 4.4 Ο Η/Υ που είχε συνδεθεί με τη διάταξη δυναμόμετρου





ΣΧΗΜΑ 4.5 Τα γραφήματα όπως φαίνονται στην οθόνη του Η/Υ κατά την διάρκεια των πειραμάτων (πρόγραμμα Labview)

Μετά την ολοκλήρωση κάθε πειράματος, με την βοήθεια ενός ηλεκτρονικού τραχύμετρου (βλέπε Σχήμα 4.6 ) μετρούσαμε όλες τις τιμές της τραχύτητας πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



ΣΧΗΜΑ 4.6 Το τραχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Υλικών και πραγματοποιήθηκαν κοπές μετωπικού φρεζαρίσματος. Οι συνθήκες κοπής εισήχθησαν με ακρίβεια στην εργαλειομηχανή CNC με κατάλληλη πληκτρολόγηση τους στον πίνακα ελέγχου (Σχήμα 4.7). Ο G-Code, δηλαδή ο κώδικας, που γράψαμε και χρησιμοποιήσαμε στην φρέζα CNC έτσι ώστε να εκτελέσουμε την πρώτη κοπή είναι ο εξής:

- > **N10 G92 G21** (ορισμός μετρητικών συντεταγμένων)
- > **N20 M03 S140** (εκκίνηση ατράκτου ωρολογιακά, ορισμός ταχύτητας περιστροφής ατράκτου)
- > **N30 G00 X0 Y30 Z200** (ταχεία εκκίνηση στα σημεία X=0, Y=30, Z=200)
- > **N40 G01 Z-0.3 F75** (γραμμική κίνηση στο σημείο Z= -0,3, ορισμός ταχύτητας πρόωσης)
- > **N50 G01 Y-30** (γραμμική κίνηση στο σημείο Y= -30)
- > **N60 G01 Z200** (γραμμική κίνηση στο σημείο Z= -200)
- > **N70 G00 X-6** (ταχεία εκκίνηση στο σημείο X= -6)
- > **N80 Y30** (τοποθέτηση ατράκτου στο σημείο Y=30)
- > **N90 M30** (τέλος προγράμματος και προετοιμασία επανεκτέλεσης)

Για τις υπόλοιπες κοπές, διαμορφώναμε τον κώδικα κατάλληλα ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων του κάθε πειράματος.



ΣΧΗΜΑ 4.7 Ο πίνακας ελέγχου της φρέζας CNC στον οποίο έγινε η εισαγωγή των συνθηκών κοπής

Η εργαλειομηχανή CNC που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

**Φρέζα CNC:** Είναι το μοντέλο **MX-45VAE** (βλέπε Σχήμα 4.8) με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής 7000 rpm. Η μέγιστη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα που είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του εργαλείου είναι 15 ίπποι (11 KW), ενώ η πρόωση δίνεται από κινητήρα μέγιστης ισχύος 4 έως 5.3 hp (3 έως 4 KW) για τις διευθύνσεις X,Y,Z αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 4.8 Η φρέζα CNC που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματα

Για να μελετήσουμε τις κοπές μετωπικού φρεζαρίσματος, που απαιτούνταν για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήσαμε δύο κυλινδρικά τεμάχια Τιτανίου Ti-6Al-4V αρχικής διαμέτρου 50mm και μήκους 30mm το καθένα. Τα τεμάχια αυτά αποκόπηκαν με τη βοήθεια μηχανικού τόρνου (που υπάρχει στο Εργαστήριο του Τομέα) από μία ράβδο τιτανίου Ti-6Al-4V διαμέτρου 50mm και συνολικού μήκους 1m. Μετά την αποκοπή τους από την αρχική ράβδο μέσω της κατεργασίας τόννευσης που αναφέραμε παραπάνω, τα τεμάχια λειάνθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε οι επιφάνειές τους να μην εμπεριέχουν διάφορα απόβλητα (γρέζια), τα οποία είχαν προσκολληθεί πάνω στη επιφάνεια των τεμαχίων λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας που είχε αναπτυχθεί.

## **4.2 Χαρακτηριστικά του Τιτανίου**

Το τιτάνιο είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών. Έχει πολύ καλή αναλογία αντοχής και βάρους και παρουσιάζει πολύ καλή αντίσταση στην διάβρωση. Κατέχει σημαντική θέση στην αεροδιαστημική, στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στη βιομηχανία πετρελαιοειδών, στη βιομηχανία οπλικών συστημάτων, στην αυτοκινητοβιομηχανία καθώς και στην ιατρική. Το τιτάνιο και τα κράματά του επιδέχονται επεξεργασία με

τις συνήθεις μεθόδους όπως χύτευση, σφυρηλάτηση, συγκόλληση καθώς και κατεργασίες κοπής όπως διάτρηση, φρεζάρισμα και τόννευση. Στον περιοδικό πίνακα συμβολίζεται με Ti και έχει ατομικό αριθμό 22. Είναι ελαφρύ και ταυτοχρόνως ισχυρό μέταλλο με χαμηλή πυκνότητα, διαθέτοντας εξαιρετική σχέση δύναμης έναντι του βάρους του. Το τιτάνιο σε καθαρή μορφή παρουσιάζει πολύ καλή ολκιμότητα. Οι εμπορικές κατηγορίες του τιτανίου, οι οποίες έχουν καθαρότητα σε ποσοστό 99,2 %, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή (για Grade 1-4) από 345 έως 540 MPa σε σύγκριση με την αντοχή ενός κοινού χάλυβα, η αντοχή του οποίου κυμαίνεται στα 210 MPa. Ορισμένα κράματα τιτανίου παρουσιάζουν αντοχή που ξεπερνά 1000 MPa. Επίσης, το τιτάνιο είναι 60% βαρύτερο από το αλουμίνιο, αλλά δύο φορές πιο ισχυρό απ' το σύνηθες χρησιμοποιούμενο κράμα αλουμινίου 6061-T6. Παρόλα αυτά, το τιτάνιο χάνει την αντοχή του όταν θερμανθεί πάνω από τους 430 °C. Τέλος, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του τιτανίου είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του  $21.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  σε σύγκριση με την θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα που είναι περίπου  $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Η ιδιότητα αυτή αποτελεί βασική αιτία για τη δυσκολία μηχανουργικής κατεργασίας του τιτανίου καθιστώντας το τιτάνιο ως ένα εξαιρετικά δυσκολοκατέργαστο υλικό.

Οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες του τιτανίου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 1:



ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Οι φυσικές ιδιότητες του τιτανίου

Φάση	Στερεό
Πυκνότητα.	4.506 g*cm <sup>-3</sup>
Πίεση υγρού σε m.p.	4.11 g*cm <sup>-3</sup>
Σημείο τήξης	1941K (1668° C, 3034° F)
Σημείο βρασμού	3560 K (3287° C, 5949° F)
Θερμότητα τήξης	14.15 kJ*mol <sup>-1</sup>
Θερμότητα εξάτμισης	425 kJ*mol <sup>-1</sup>
Θερμοχωρητικότητα	(25° C)25.060 J*mol <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>
Μαγνητική ικανότητα	Παραμαγνητικό
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	(20° C) 0.420 μΩ*m
Θερμική αγωγιμότητα	(300K) 21.9W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>
Θερμική διαστολή	(25° C) 8.6μm*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>
Ταχύτητα ήχου	(r.t.) 5090m*s <sup>-1</sup>
Μέτρο ελαστικότητας	116 GPa
Μέτρο διάτμησης	44 GPa
Λόγος Poisson	0.32
Σκληρότητα κατά Mohs	6.0
Σκληρότητα κατά Vickers	970 MPa
Σκληρότητα κατά Brinelli	716 MPa

Η σχεδίαση των πειραμάτων έγινε με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να απαιτείται ο ελάχιστος αριθμός εφαρμογών για την εξαγωγή σωστών και ασφαλών συμπερασμάτων. Οι τιμές των συνθηκών κοπής έχουν επιλεγεί ύστερα από προσεκτική μελέτη άλλων εργασιών και πειραμάτων, διάφορων μελετητών, πάνω στις κατεργασίες κοπής και πιο συγκεκριμένα του μετωπικού φρεζαρίσματος. Ο ελάχιστος αριθμός πειραμάτων που ήταν αναγκαίος να διεξαχθεί για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων, προήλθε με τη βοήθεια της **μεθόδου Taguchi**. Η μέθοδος, όπως θα δούμε και στην επόμενη παράγραφο, μας δίνει την δυνατότητα να ελαχιστοποιήσουμε τα πειράματά μας, με την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κοπής σε κάθε πείραμα που πραγματοποιείται. Η ανάγκη για την ελαχιστοποίηση των πειραμάτων προήλθε από την ανάγκη να μειώσουμε τις χρονοβόρες διαδικασίες, τόσο των πειραμάτων που πραγματοποιήσαμε στην φρέζα, όσο και των υπολογιστικών προσομοιώσεων στον H/Y του εργαστηρίου.

### 4.3 Η Μέθοδος Taguchi

Όπως έχουμε προαναφέρει, κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας στο εργαστήριο, η επιλογή των πειραμάτων που θα γίνουν αλλά και η επιλογή των παραμέτρων αυτών, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο τόσο από άποψη χρόνου όσο και από άποψη κόστους. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο σωστός σχεδιασμός ενός πειράματος είναι η βασική προϋπόθεση για την επιτυχία του πειράματος. Με την πάροδο των χρόνων πολλές μέθοδοι σχεδιασμού πειραμάτων έκαναν την εμφάνιση τους. Μία από τις πρώτες μεθόδους και ίσως η πιο παραδοσιακή που χρησιμοποιούνταν για χρόνια, είναι η μέθοδος που στηριζόταν στην μελέτη μιας παραμέτρου την φορά (ή αλλιώς One Variable At a Time - OVAT). Η μέθοδος αυτή μπορεί να ήταν ευρέως διαδεδομένη αλλά δεν ήταν καθόλου αποτελεσματική αφού απαιτούσε πολύ χρόνο, πράγμα που σήμαινε και αύξηση του κόστους, αλλά το πιο σημαντικό ήταν ότι δεν μελετούσε την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων του πειράματος. Έτσι οι μελετητές προσπαθούσαν να αναπτύξουν άλλες πιο σημαντικές μεθόδους σχεδιασμού.

Η πιο σημαντική ίσως μέθοδος αλλά και πιο επιτυχημένη εμφανίστηκε γύρω στα μέσα της δεκαετίας του '50 από τον Genichi Taguchi. Η μέθοδος που ανέπτυξε, άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία από την δεκαετία του '80, και μετά από παραλλαγές και βελτιώσεις που έχει υποστεί από σύγχρονους επιστήμονες, είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη ακόμα και σήμερα. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της **μεθόδου Taguchi** -όπως έχει μείνει γνωστή- είναι ο μικρός αριθμός πειραμάτων που απαιτούνται για την ασφαλή εξαγωγή αποτελεσμάτων από πολλές παραμέτρους ταυτόχρονα. Η μέθοδος Taguchi κατάφερε όμως να μειώσει δραστικά και την επίδραση των παραγόντων θορύβου κατά την πειραματική διαδικασία.

Σύμφωνα με την μέθοδο Taguchi, οι παράμετροι των πειραμάτων τοποθετούνται σε ορθογωνικό πίνακα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελέγχονται ζευγάρια συνδυασμών παραμέτρων, και όχι κάθε παράμετρος ξεχωριστά που έκαναν οι παλαιότερες μέθοδοι. Η μέθοδος Taguchi εφαρμόζεται επιτυχημένα όταν εξετάζουμε μέτριο αριθμό παραγόντων (3 έως 50). Οι πίνακες με λίγες παραμέτρους καταστρώνονται πολύ εύκολα, ενώ για τους πίνακες με πολλές παραμέτρους υπάρχουν έτοιμοι αλγόριθμοι που βοηθούν στην οργάνωση και κατάστρωσή τους.

Η διαδικασία που ακολουθούμε για να εφαρμόσουμε την μέθοδο αυτή είναι η εξής:

A) Θα πρέπει να ορίσουμε τον σκοπό της μελέτης που θα κάνουμε. Δηλαδή να ορίσουμε ποιο αποτέλεσμα μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε περισσότερο μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας. Στη συγκεκριμένη διπλωματική, εμείς θα μελετήσουμε τις 3 δυνάμεις κοπής κατά τους άξονες x, y και z.

B) Θα πρέπει να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους που θα μελετήσουμε κατά την πειραματική διαδικασία και που την επηρεάζουν. Όσο περισσότερο μια παράμετρος επηρεάζει την πειραματική διαδικασία, τόσες περισσότερες τιμές αυτής της παραμέτρου πρέπει να πάρουμε. Στη συγκεκριμένη διπλωματική οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν: **το βάθος κοπής, οι στροφές και η πρόωση**. Η επίδραση της κάθε παραμέτρου ήταν εξίσου σημαντική γι' αυτό μελετήσαμε 3 τιμές σε κάθε παράμετρο.

Γ) Θα πρέπει να κατασκευάσουμε τον ορθογωνικό πίνακα με βάση τον αριθμό των παραμέτρων που μελετάμε αλλά και το αριθμό των τιμών της κάθε παραμέτρου που εξετάζουμε. Η κατασκευή του πίνακα των πειραμάτων μας προκύπτει μελετώντας τον παρακάτω γενικό Πίνακα :

		ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ																	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36
	4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32									
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50							

Γενικός Πίνακας TAGUCHI για την Επιλογή του αριθμού Πειραμάτων

Στην πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήσαμε, είχαμε 3 παραμέτρους – βάθος κοπής, στροφές, πρόωση- και 3 τιμές σε κάθε παράμετρο. Άρα χρειάστηκε να κάνουμε βάση του Γενικού Πίνακα 9 πειράματα. Αν δεν ακολουθούσαμε την μέθοδο Taguchi θα έπρεπε να εκτελέσουμε  $3^3 = 27$  πειράματα και όχι 9. Άρα διαπιστώνουμε πόσο

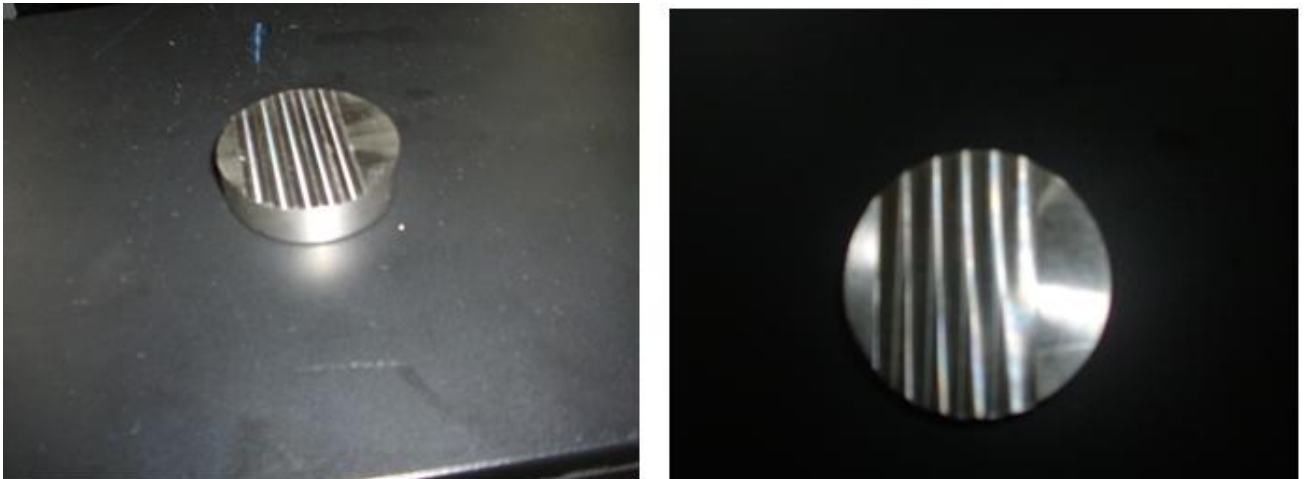
**χρήσιμη μέθοδος είναι η συγκεκριμένη και πόσο εξοικονόμηση χρόνου και κόστους πετύχαμε.**

Δ) Αφού καθορίσαμε τον αριθμό των πειραμάτων και τις τιμές των μεταβλητών σε κάθε πείραμα, προχωράμε στην εκτέλεση των πειραμάτων.

Ε) Θα πρέπει να αναλύουμε τα δεδομένα που έχουμε έτσι ώστε να καθορίσουμε την επίδραση της κάθε μεταβλητής στα τελικά αποτελέσματα.

#### 4.4 Η Πειραματική Διαδικασία Μετωπικού Φρεζαρίσματος

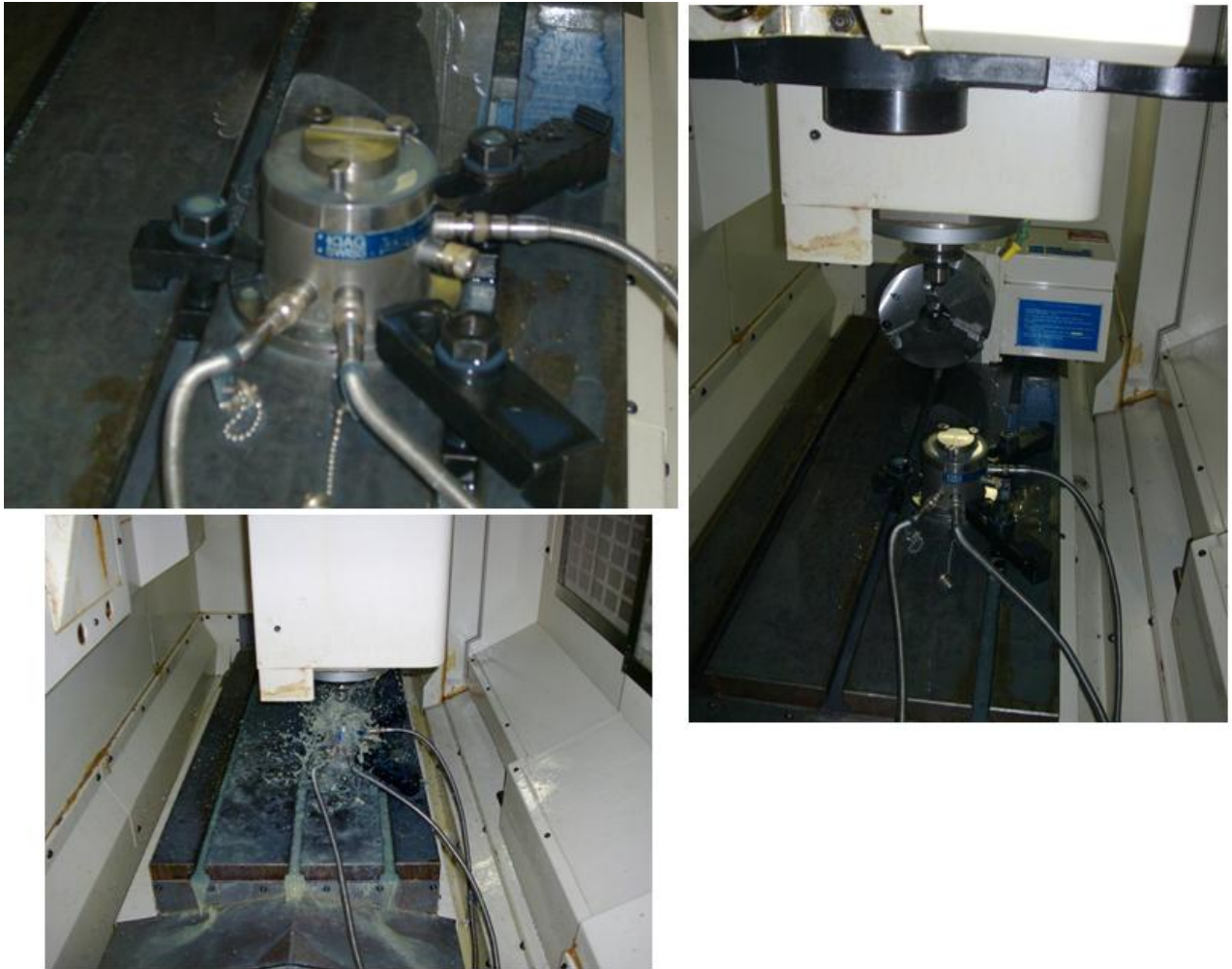
Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Κατεργασιών εννέα πειράματα μετωπικού φρεζαρίσματος. Κατά την πειραματική διαδικασία εκτελέσαμε πέντε κοπές στο τεμάχιο 1 και άλλες τέσσερις κοπές στο τεμάχιο 2. Κατά την διάρκεια κάθε κοπής, δημιουργούσαμε ένα αυλάκι κατά μήκος της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου όπως φαίνεται στα σχήματα 4.9 και 4.10.



ΣΧΗΜΑ 4.9 και 4.10 Το κατεργαζόμενο τεμάχιο μετά την ολοκλήρωση των κοπών μετωπικού φρεζαρίσματος

Οι κοπές πραγματοποιήθηκαν έτσι ώστε το εργαλείο να κόβει κατά  $180^\circ$  στο μετωπικό φρεζάρισμα. Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι τρεις παράμετροι που εξετάσαμε κατά την πειραματική διαδικασία ήταν το βάθος κοπής, οι στροφές του εργαλείου και η πρόωσή του. **Το βάθος κοπής μελετήθηκε για τις τιμές 0,3mm – 0,6mm – 0,9mm, οι στροφές που ορίσαμε στο εργαλείο ήταν 700rpm – 850rpm – 1000rpm, ενώ η πρόωση του ορίστηκε στα 75mm/min – 100mm/min – 125mm/min.** Όλες οι παραπάνω τιμές των τριών παραμέτρων επιλέχθηκαν ύστερα από προσεκτική μελέτη δημοσιεύσεων πάνω στο μετωπικό φρεζάρισμα τιτανίου υψηλής ταχύτητας. Επίσης μελετήσαμε τις ιδιότητες του τιτανίου, αλλά κάναμε και εκτενή έρευνα στην ιστοσελίδα του

κατασκευαστή του εργαλείου (Clarkson-Osborn) έτσι ώστε να επιλέξουμε το κατάλληλο εργαλείο από τα ήδη υπάρχοντα του εργαστηρίου, που είναι κατάλληλο για τα πειράματα και τις τιμές των παραμέτρων που θέλουμε να εκτελέσουμε. Στις επόμενες φωτογραφίες (Σχήμα 4.11), απεικονίζονται διάφορα στιγμιότυπα των πειραμάτων μετωπικού φρεζαρίσματος που πραγματοποιήθηκαν στην φρέζα CNC.



ΣΧΗΜΑ 4.11 Στιγμιότυπα από την πειραματική διαδικασία

Ο Πίνακας Taguchi, σύμφωνα με τις παραμέτρους και τις τιμές αυτών που ορίσαμε και σύμφωνα με την επίδραση που έχει κάθε παράμετρος στα τελικά αποτελέσματα, διαμορφώνεται ως εξής:

α/α πειράματος	Βάθος Κοπής (mm)	Στροφές (rpm)	Πρόωση (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

Τελικός Πίνακας TAGUCHI για τις Κοπές Μετωπικού Φρεζαρίσματος

Ύστερα από προσεκτική μελέτη άλλων εργασιών πάνω στο μετωπικό φρεζάρισμα τιτανίου αλλά και αναφορές που υπήρχαν στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήσαμε, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι **το βάθος κοπής είναι η παράμετρος που επηρεάζει σε σημαντικότερο βαθμό την κατεργασία μετωπικού φρεζαρίσματος τιτανίου**. Γι' αυτό το λόγο, στον παραπάνω Τελικό Πίνακα Taguchi το βάθος κοπής τοποθετήθηκε στην πρώτη στήλη. Δεύτερη παράμετρος σε βαθμό σημαντικότητας είναι η ταχύτητα περιστροφής και τρίτη η ταχύτητα πρόωσης. Έτσι στην δεύτερη στήλη τοποθετήθηκαν οι τιμές της ταχύτητας περιστροφής και στην τρίτη στήλη οι τιμές της ταχύτητας πρόωσης.

Το εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση των κοπών μετωπικού φρεζαρίσματος είναι της εταιρείας Clarkson-Osborn (Σχήμα 4.12).





ΣΧΗΜΑ 4.12 Το εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για τις κοπές

Τα χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου είναι τα εξής:

- Είναι το μοντέλο SVG 0598 της εταιρείας Clarkson- Osborn
- Έχει ακτίνα κοπής 6mm
- Έχει 3 ελικοειδή δόντια
- Είναι κατασκευασμένο από 95% χάλυβα και 5% κοβάλτιο
- Δεν έχει επένδυση/ επικάλυψη
- Έχει ακτίνα καμπυλότητας ακμής 0,04mm
- Έχει ακτίνα καμπυλότητας πλευράς 0,8mm

Τέλος, όπως αναφέραμε και παραπάνω, μετά το τέλος κάθε κοπής με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού τραχύμετρου μετρούσαμε την τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται, για κάθε πείραμα ξεχωριστά, οι τιμές  $R_a$ , που είναι η μέση τιμή της τραχύτητας,  $R_t$  που είναι η μέγιστη τιμή της τραχύτητας και  $R_z$  που είναι η μέση τιμή των 10 κατ' απόλυτη τιμή μέγιστων αποκλίσεων.



α/α πειράματος	$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_z(\mu\text{m})$
1	0,58	3,5	3,2
2	0,68	3,9	3,6
3	0,8	4,2	3,9
4	1	5,7	5
5	1,18	5,4	5
6	0,4	2,8	2,3
7	1,32	5,5	5,1
8	0,48	2,9	2,6
9	0,6	3,7	3,2

Πίνακας με τις τιμές της τραχύτητας μετά από κάθε κοπή

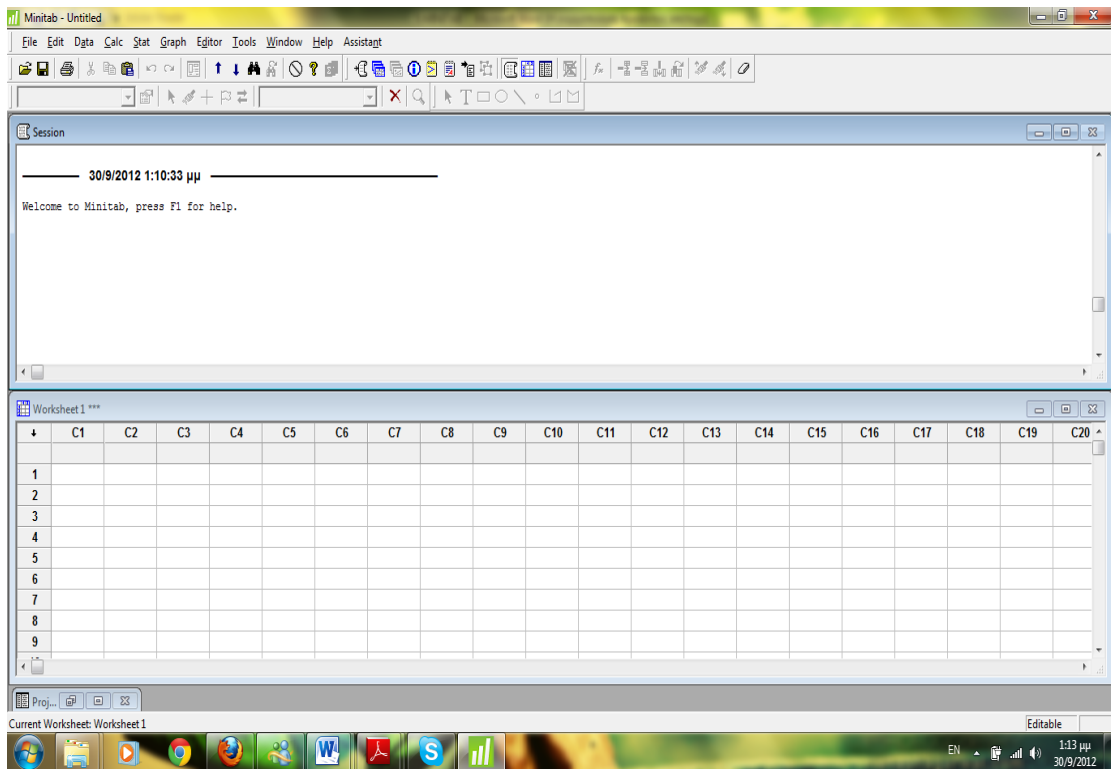
Παρατηρώντας προσεκτικά τον παραπάνω Πίνακα και έχοντας υπόψη και τον Τελικό Πίνακα Taguchi (όπου φαίνονται οι συνθήκες κοπής που επικρατούν σε κάθε πείραμα), μπορούμε να σημειώσουμε την εξής παρατήρηση:

- **Όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης, τόσο αυξάνεται και η τιμή της μέσης τραχύτητας  $R_a$ .** Για κάθε τιμή του βάθους κοπής, όταν η ταχύτητα πρόωσης έχει την μεγαλύτερη τιμή (125 mm/min), τότε η τιμή της  $R_a$  που εμφανίζεται είναι η μεγαλύτερη (σε σχέση με τις υπόλοιπες εφαρμογές που έχουν ίδιο βάθος κοπής αλλά διαφορετική ταχύτητα πρόωσης). Αναλυτικότερα, όταν το βάθος κοπής έχει την τιμή 0,3mm, η μέση τραχύτητα έχει την μεγαλύτερη τιμή όταν η πρόωση είναι 125mm/min, ενώ την μικρότερη όταν η πρόωση είναι 75mm/min. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρούμε και για τις υπόλοιπες τιμές του βάθους κοπής.

## 5. Στατιστική Ανάλυση Πειραματικών Αποτελεσμάτων με τη χρήση του προγράμματος Minitab

### 5.1. Γενικά για το πρόγραμμα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε, βάση των πειραματικών τιμών των δυνάμεων στους τρεις άξονες να βρούμε την εξάρτηση που έχουν αυτές οι μεταβλητές με τις παραμέτρους του προβλήματος (βάθος κοπής, ταχύτητα περιστροφής και ταχύτητα πρόωσης). Για να βρούμε την εξάρτηση των μεταβλητών μεταξύ τους, θα χρησιμοποιήσουμε το στατιστικό πρόγραμμα Minitab. Το Minitab έχει την δυνατότητα να αναλύει τη διακύμανση των τιμών των παραμέτρων σε κάθε πείραμα ξεχωριστά, και να βρίσκει την αλληλεξάρτηση τους με στατιστικά αποτελέσματα. Όταν ανοίγουμε το Minitab, εμφανίζεται το γραφικό περιβάλλον που φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία (Σχήμα 5.1)



ΣΧΗΜΑ 5.1 Το γραφικό περιβάλλον του Minitab

Στο κάτω μέρος της οθόνης (στο worksheet του Minitab), τοποθετούμε τις τιμές των παραμέτρων ανά πείραμα που θέλουμε να αναλύσουμε την εξάρτηση που έχουν μεταξύ τους. Έτσι για την ανάλυση που κάναμε για την παρούσα διπλωματική εργασία τοποθετήσαμε όπου:

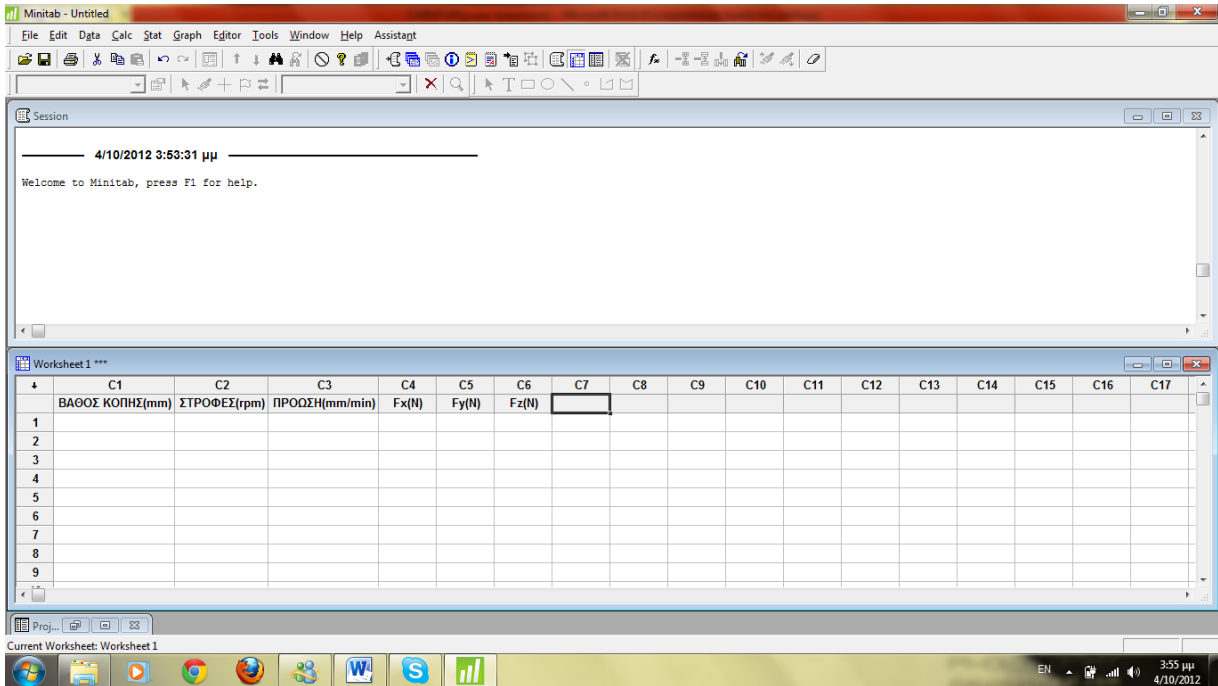
- C1 > βάθος κοπής**
- C2 > ταχύτητα περιστροφής**
- C3 > ταχύτητα πρόωσης**

**C4 > μέγιστη τιμή της δύναμης Fx**

**C5 > μέγιστη τιμή της δύναμης Fy**

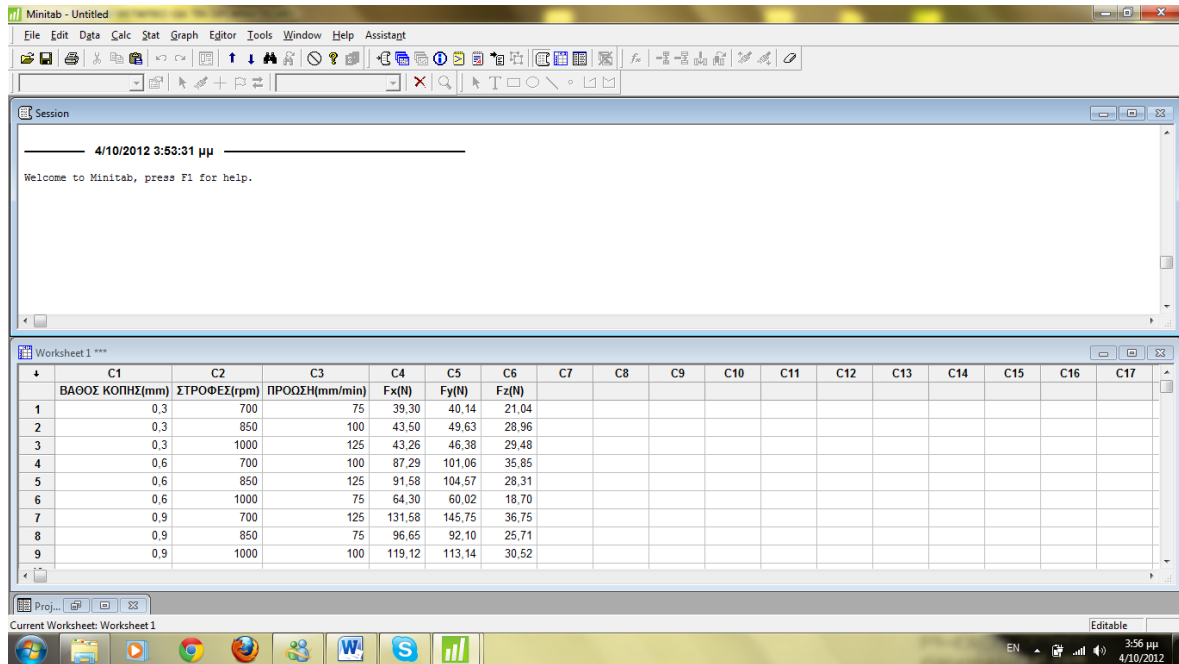
**C6 > μέγιστη τιμή της δύναμης Fz**

Έτσι το γραφικό περιβάλλον του Minitab διαμορφώνεται ως εξής (Σχήμα 5.2):



ΣΧΗΜΑ 5.2 Το γραφικό περιβάλλον του Minitab όπως διαμορφώθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία

Στη συνέχεια, κάτω από κάθε παράμετρο και για κάθε ένα από τα εννιά πειράματα που εκτελέσαμε, τοποθετήσαμε τις τιμές. Για το βάθος κοπής, την ταχύτητα περιστροφής και την ταχύτητα πρόωσης βάλαμε τις τιμές που είχαμε επιλέξει κατά την προεργασία του πειράματος. Για τις παραμέτρους Fx, Fy και Fz βάλαμε τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων βάση των μετρήσεων που μας έδωσε το δυναμόμετρο κατά την πειραματική διαδικασία. Μετά τη τοποθέτηση των τιμών στα κατάλληλα κελιά του προγράμματος, το γραφικό περιβάλλον έχει την εξής μορφή (Σχήμα 5.3):



ΣΧΗΜΑ 5.3 Το γραφικό περιβάλλον μετά την τοποθέτηση των τιμών στα αντίστοιχα κελιά

Στο πάνω μέρος του παραθύρου του Minitab (στο Session του Minitab), το πρόγραμμα εμφανίζει τα αποτελέσματα των στατιστικών αναλύσεων που επιλέγουμε να κάνει. Για τη παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέξαμε να εκτελέσουμε την ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Στην επόμενη παράγραφο αναλύεται η στατιστική ανάλυση ANOVA και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις τιμές του πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος που εκτελέσαμε.

## **5.2 Ανάλυση της Διακύμανσης (ANOVA)**

### **5.2.1 Χαρακτηριστικά της Ανάλυσης της Διακύμανσης**

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANalysis Of VAriance – ANOVA) είναι μία στατιστική μέθοδος με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ’ ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, Άγγλο στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962). Στην πραγματικότητα η ANOVA περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων κατάλληλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς.

Τα δεδομένα ενός δείγματος ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε **παρατηρήσεις** (observational sampling) ή σε **πειραματικά** (designed sampling). Στην πρώτη κατηγορία ο στατιστικός

ερευνητής απλά παρατηρεί τις τιμές που εμφανίζονται χωρίς να έχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μιας ή περισσότερων **ανεξάρτητων** (independent) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται **εξαρτημένη** (dependent) ή **απόκριση** (response).

Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην απόκριση. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν **παράγοντες** (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις ενδεχομένως να ενδιαφερόμαστε για την επίδραση που έχουν πάνω στην απόκριση περισσότερες της μιας ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται **επίπεδα** (levels). Σε ένα πείραμα με ένα παράγοντα οι **μεταχειρίσεις** (treatments) του πειράματος είναι τα επίπεδα του παράγοντα.

### **5.2.2 Αποτελέσματα της Ανάλυσης της Διακύμανσης**

Με βάση τις τιμές που επιλέξαμε για το βάθος κοπής, την ταχύτητα περιστροφής και την ταχύτητα πρόωσης αλλά και τις πειραματικές τιμές που προέκυψαν για τις δυνάμεις στους τρεις άξονες, λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα για την ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Σε κάθε εφαρμογή ορίζουμε ως **εξαρτημένη μεταβλητή τις Fx, Fy και Fz** με τη σειρά, ενώ **ως ανεξάρτητες μεταβλητές σε κάθε εφαρμογή ορίζουμε το βάθος κοπής, την ταχύτητα περιστροφής και την ταχύτητα πρόωσης.**

#### **ΔΥΝΑΜΗ Fx**

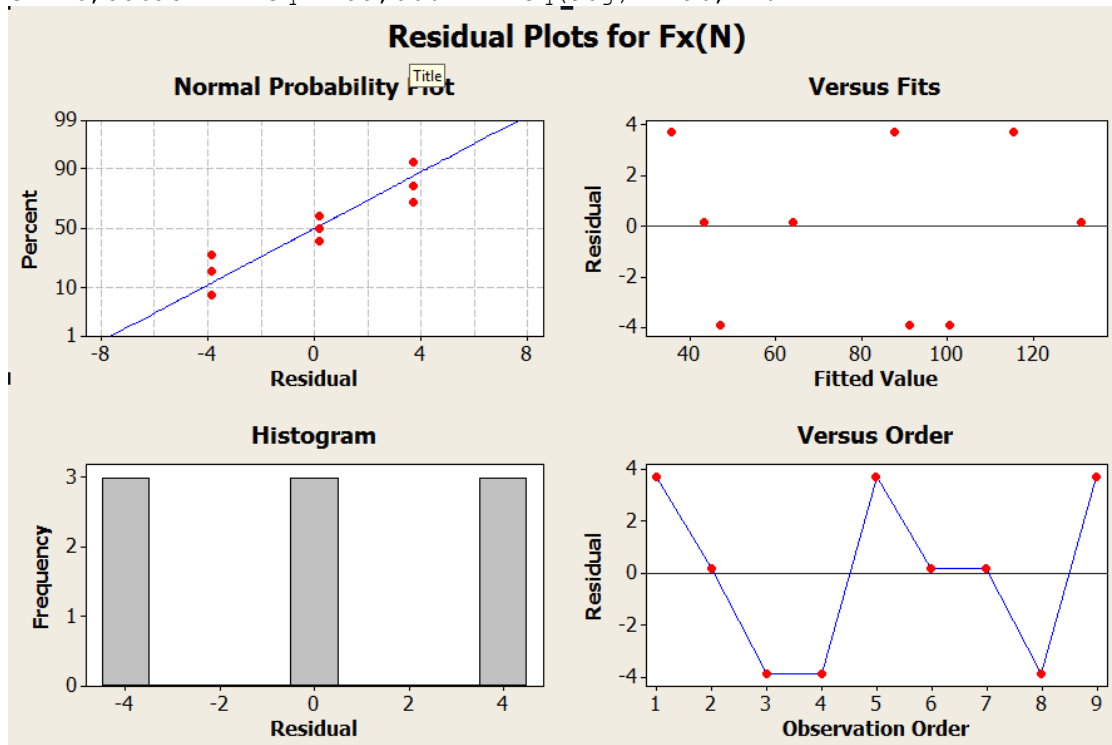
##### **Fx(N) versus ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ(mm); ΣΤΡΟΦΕΣ(rpm); ΠΡΟΩΣΗ(mm/min)**

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(N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	2	190,7	190,7	95,3	2,20	0,041
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	2	790,8	790,8	395,4	9,11	0,029
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	2	8170,8	8170,8	4085,4	94,16	0,011
Error	2	86,8	86,8	43,4		
Total	8	9239,1				

S = 6,58693 R-Sq = 99,06% R-Sq(adj) = 96,24%



Παρατηρούμε ότι η εξαρτημένη μεταβλητή Fx επηρεάζεται κατά 99,06% από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Άρα η διακύμανση των τιμών του βάθους κοπής, της ταχύτητας περιστροφής και της ταχύτητας πρόωσης επιδρούν σημαντικά στις τιμές της δύναμης Fx. Αναλυτικότερα, το σφάλμα της 1<sup>ης</sup> ανεξάρτητης μεταβλητής, που είναι το βάθος κοπής είναι της τάξης του 4,1%. Το σφάλμα της μεταβλητής της ταχύτητας περιστροφής είναι 2,9%, ενώ της μεταβλητής της ταχύτητας πρόωσης είναι της τάξης του 1,1%.

## ΔΥΝΑΜΗ Fy

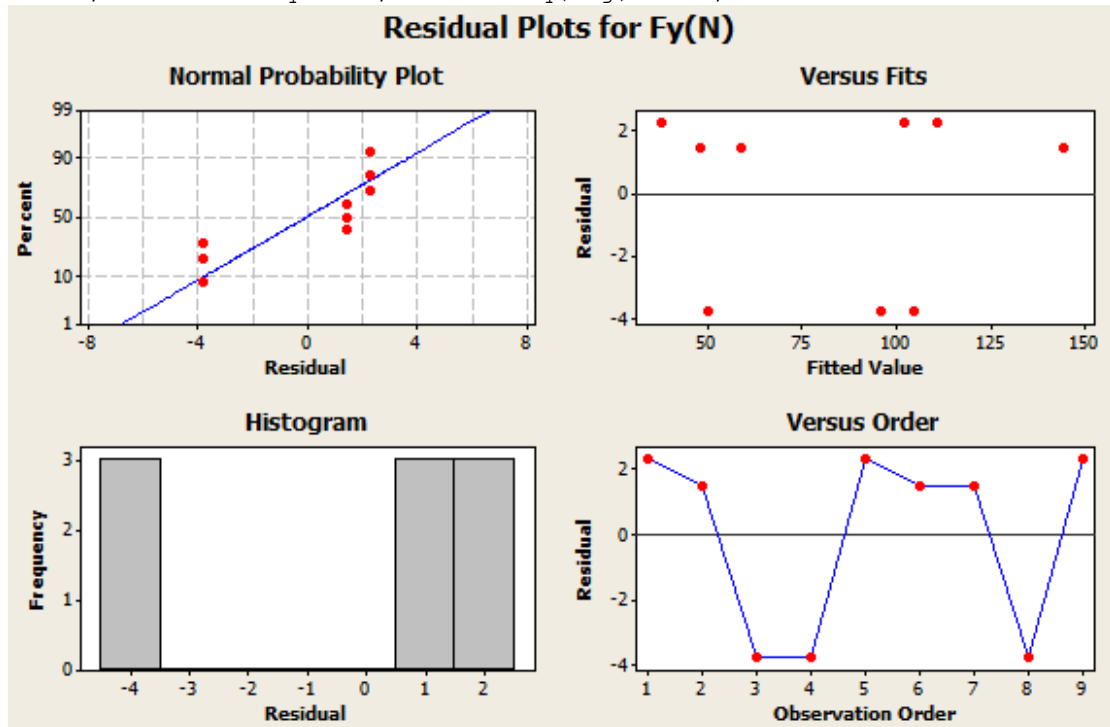
### Fy(N) versus ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ(mm); ΣΤΡΟΦΕΣ(rpm); ΠΡΟΩΣΗ(mm/min)

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(N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	2	768,1	768,1	384,0	11,66	0,039
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	2	1901,2	1901,2	950,6	28,86	0,029
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	2	7801,2	7801,2	3900,5	118,44	0,008
Error	2	65,9	65,9	32,9		
Total	8	10536,1				

S = 5,73875    R-Sq = 99,37%    R-Sq(adj) = 97,50%



Η εξαρτημένη μεταβλητή Fy εξαρτάται κατά 99,37% από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Πιο αναλυτικά, το σφάλμα του βάθους κοπής είναι κοντά στο 4%, της ταχύτητας περιστροφής είναι περίπου 3% ενώ της ταχύτητας πρόωσης είναι 0,8%.

## ΔΥΝΑΜΗ Fz

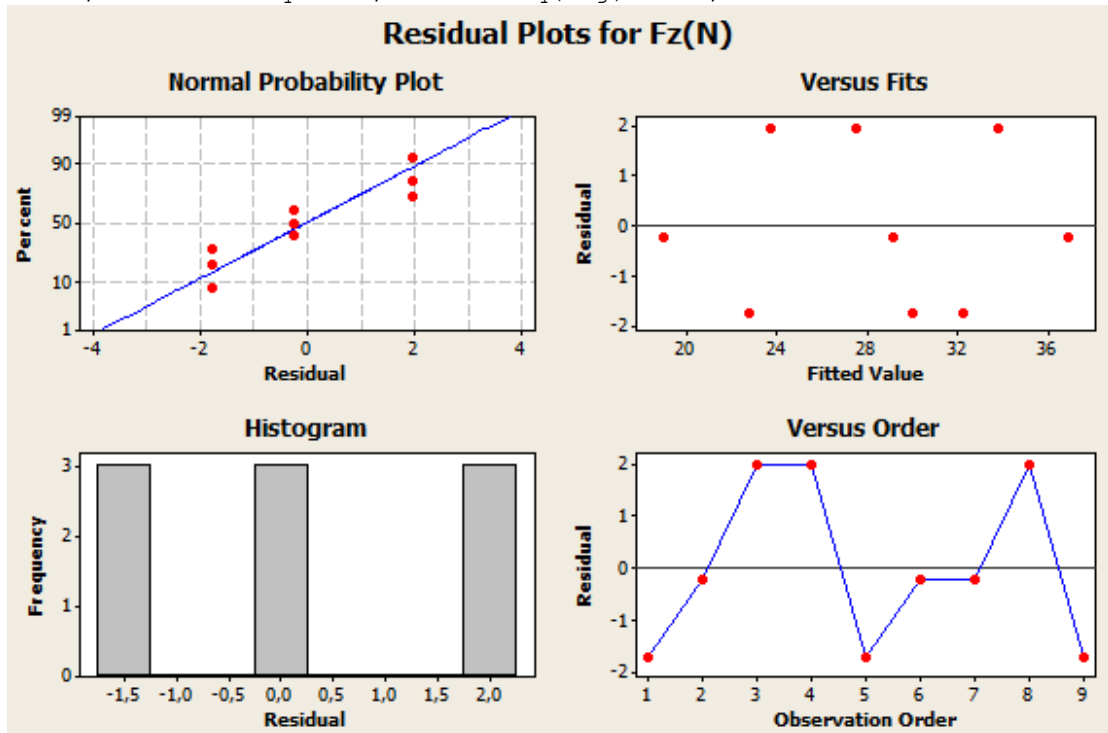
### Fz(N) versus ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ(mm); ΣΤΡΟΦΕΣ(rpm); ΠΡΟΩΣΗ(mm/min)

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(N), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	2	32,90	32,90	16,45	1,56	0,039
ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	2	39,46	39,46	19,73	1,88	0,035
ΠΡΟΩΣΗ (mm/min)	2	193,30	193,30	96,65	9,19	0,028
Error	2	21,04	21,04	10,52		
Total	8	286,69				

S = 3,24326    R-Sq = 92,66%    R-Sq(adj) = 90,65%



Η εξαρτημένη μεταβλητή Fz επηρεάζεται κατά ποσοστό 92,66% από τις εξαρτημένες μεταβλητές. Το σφάλμα του βάθους κοπής είναι 3,9%, της ταχύτητας περιστροφής 3,5% και της ταχύτητας πρόωσης είναι 2,8%.



## **6. Αποτελέσματα**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν να μελετηθούν οι δυνάμεις κοπής κατά την κατεργασία του μετωπικού φρεζαρίσματος.

### **6.1 Πειραματικά Αποτελέσματα**

Τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 4 για την πειραματική διαδικασία, λαμβάνονταν σε ψηφιακή μορφή με τη βοήθεια της διάταξης δυναμόμετρου και του H/Y που ήταν συνδεδεμένος μέσω ειδικής μετρητικής κάρτας με το δυναμόμετρο. Έτσι οι τιμές των δυνάμεων  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  επεξεργάστηκαν ηλεκτρονικά μέσω του προγράμματος Microsoft Excel. Μέσω του προγράμματος αυτού, πήραμε και τα διαγράμματα των δυνάμεων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

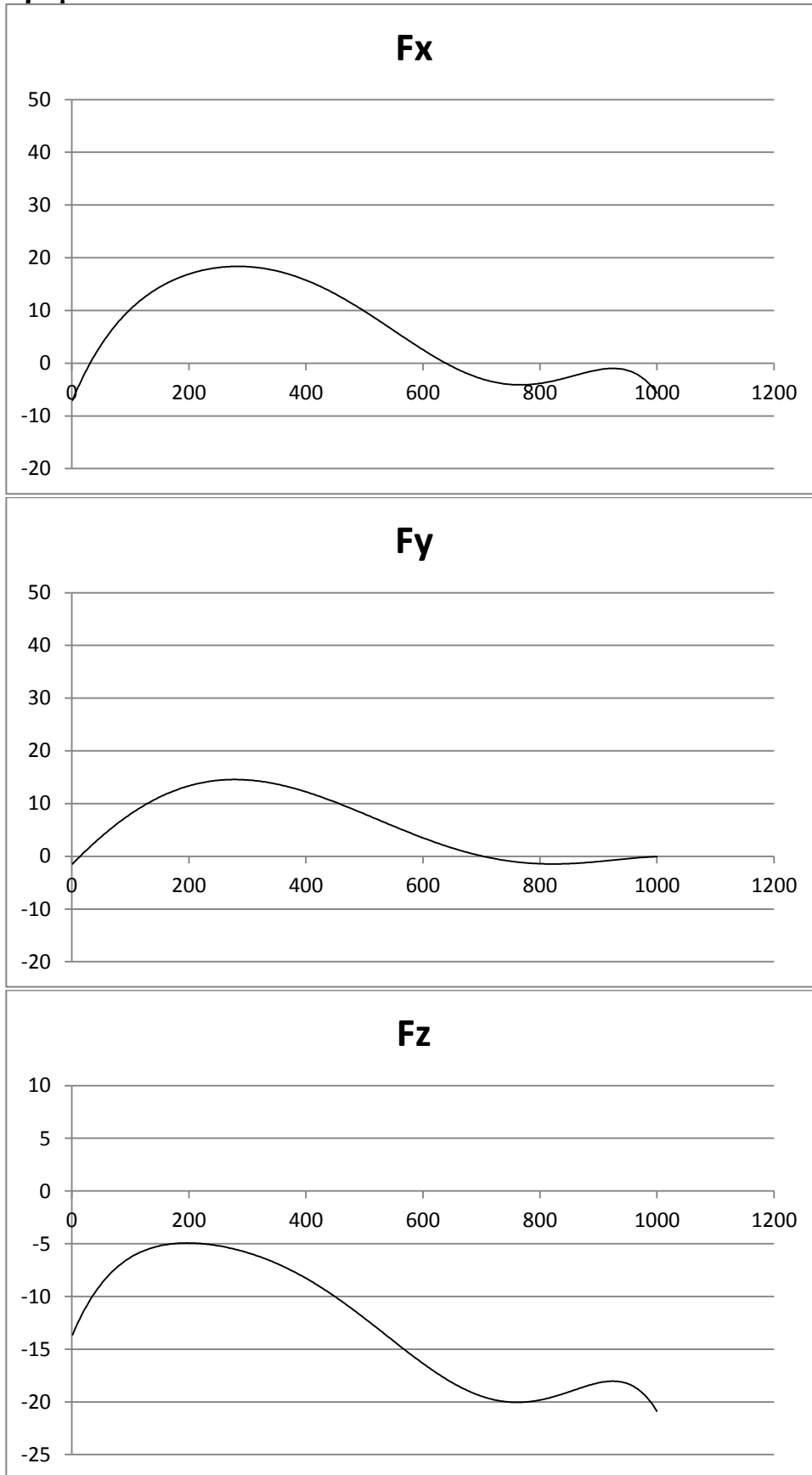
Για να συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα υπολογιστικά, κρίναμε σκόπιμο να παρουσιάσουμε το διάγραμμα της γραμμής τάσης της δύναμης, δηλαδή την γραμμή που μας δείχνει τη διακύμανση της μέσης τιμής της δύναμης κατά την διάρκεια της κοπής. Επίσης θα παρουσιαστούν σε έναν πίνακα, οι μέγιστες τιμές των γραμμών τάσεων για κάθε δύναμη σε κάθε κοπή, με σκοπό να συγκριθούν στο επόμενο κεφάλαιο με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Ο πίνακας Taguchi, όπως διαμορφώθηκε με τις συνθήκες κοπής που επιλέξαμε, έχει την ακόλουθη μορφή:

<b>α/α πειράματος</b>	<b>Βάθος Κοπής (mm)</b>	<b>Στροφές (rpm)</b>	<b>Πρώση (mm/min)</b>
<b>1</b>	0,3	700	75
<b>2</b>	0,3	850	100
<b>3</b>	0,3	1000	125
<b>4</b>	0,6	700	100
<b>5</b>	0,6	850	125
<b>6</b>	0,6	1000	75
<b>7</b>	0,9	700	125
<b>8</b>	0,9	850	75
<b>9</b>	0,9	1000	100

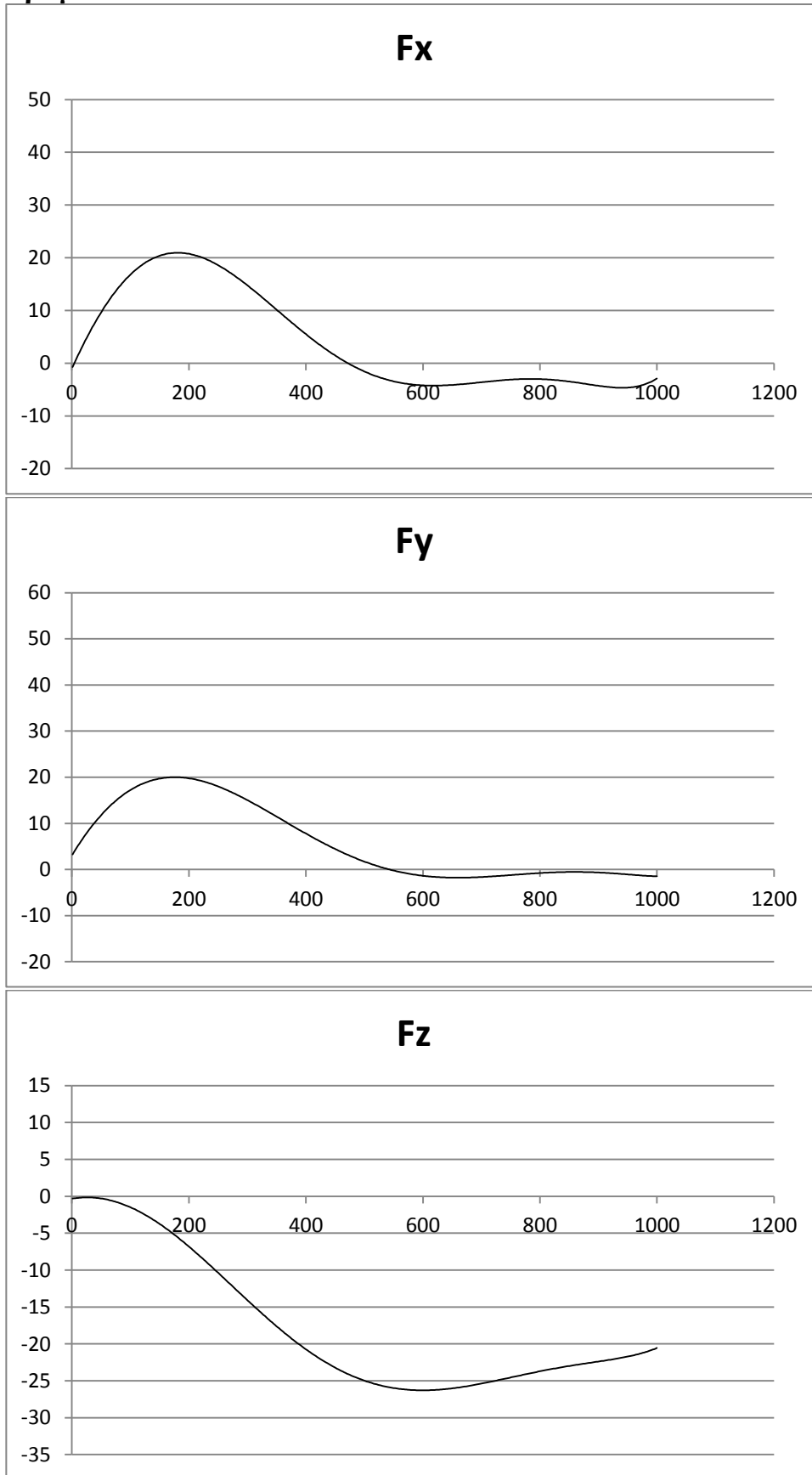
Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε κοπή ξεχωριστά. Όλες οι κοπές ήταν κοπές μετωπικού φρεζαρίσματος και έγιναν με το ίδιο εργαλείο (παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4). Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται οι γραμμές τάσης των δυνάμεων για κάθε πείραμα ξεχωριστά. Στον κάθετο άξονα (άξονας y) παρουσιάζονται οι τιμές των δυνάμεων (σε N) που μας ενδιαφέρουν:

### 1<sup>ο</sup> Πείραμα



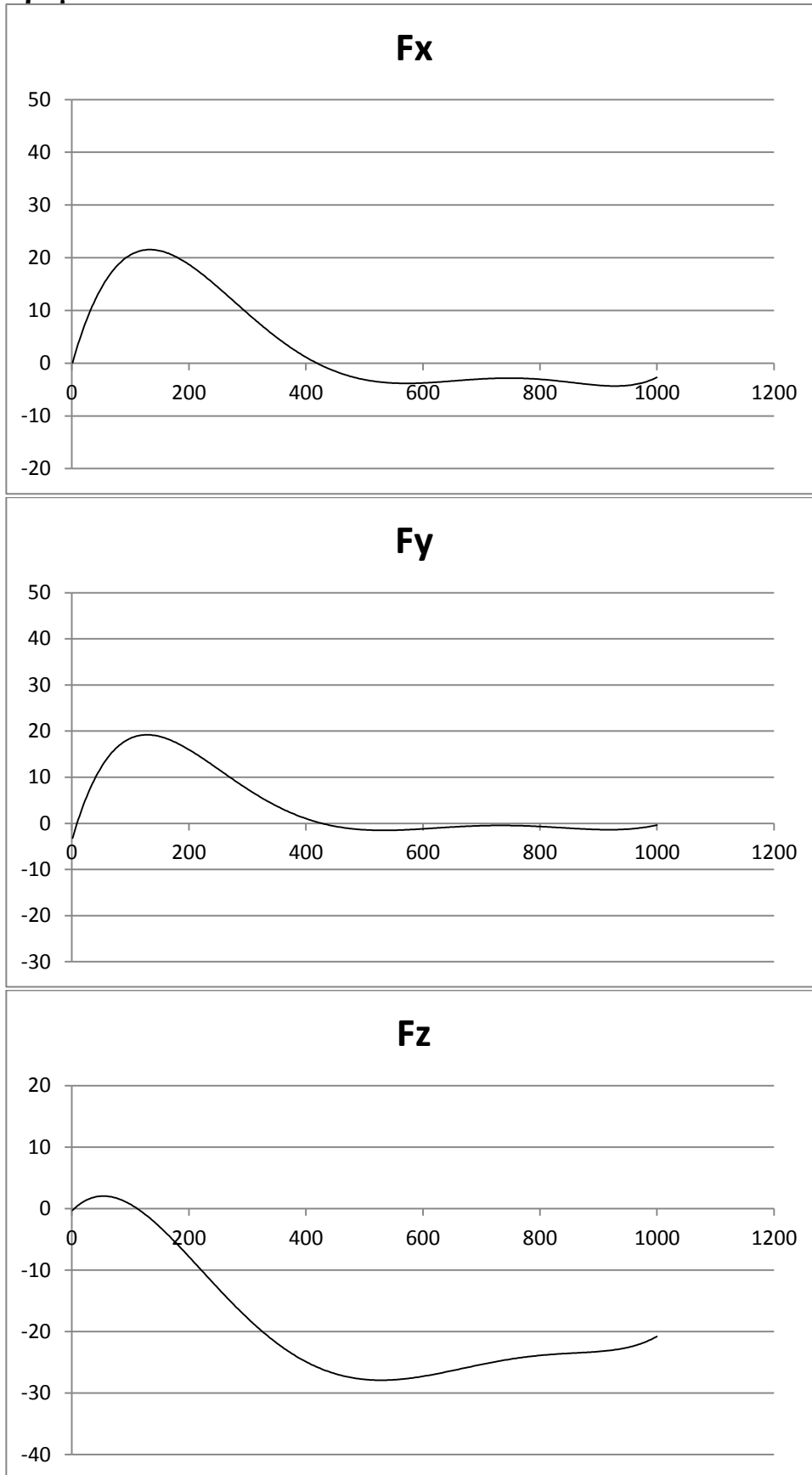
ΣΧΗΜΑ 6.1 Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=75mm/min

## 2<sup>ο</sup> Πείραμα



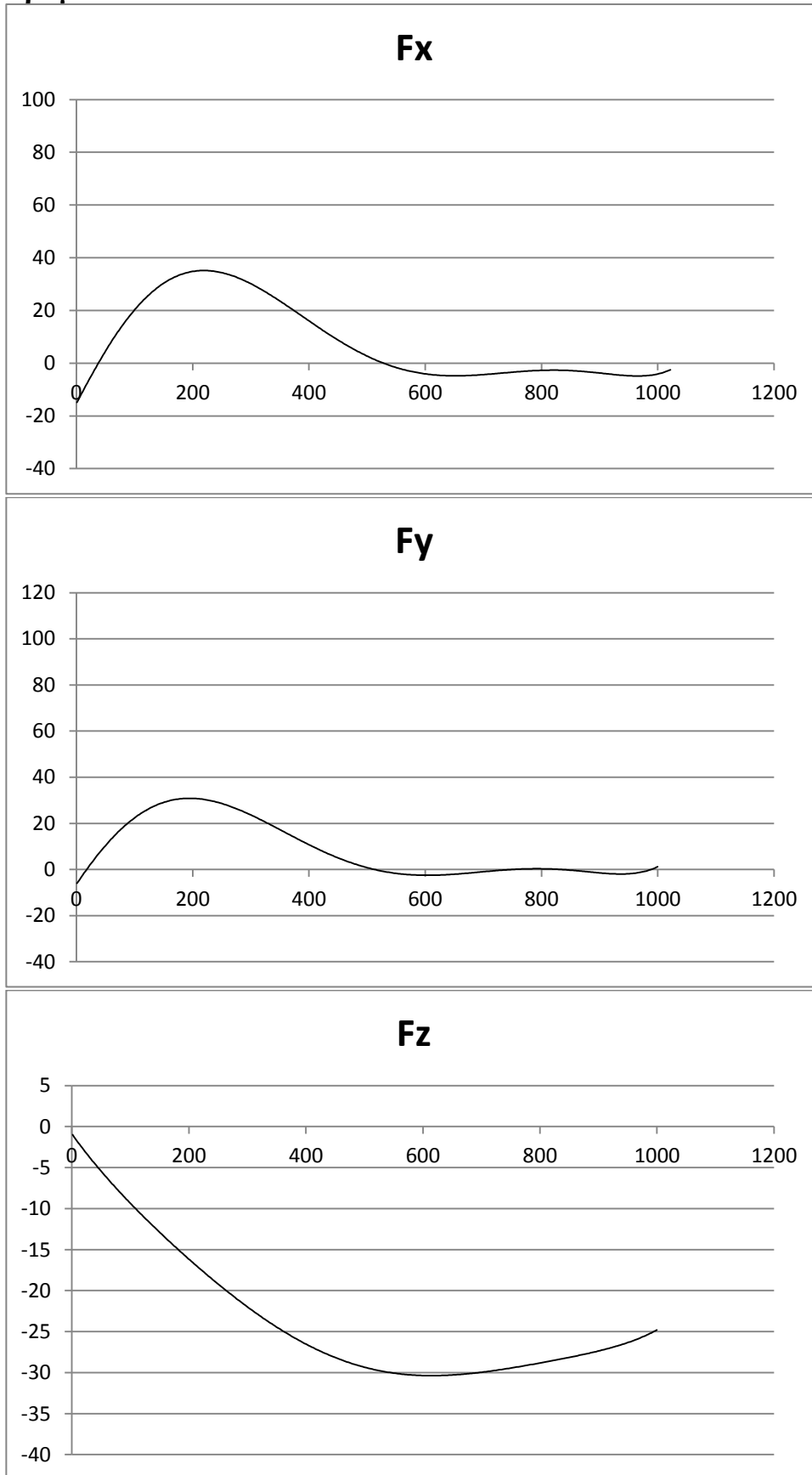
ΣΧΗΜΑ 6.2 Αποτελέσματα 2<sup>ο</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=100mm/min

### 3<sup>ο</sup> Πείραμα



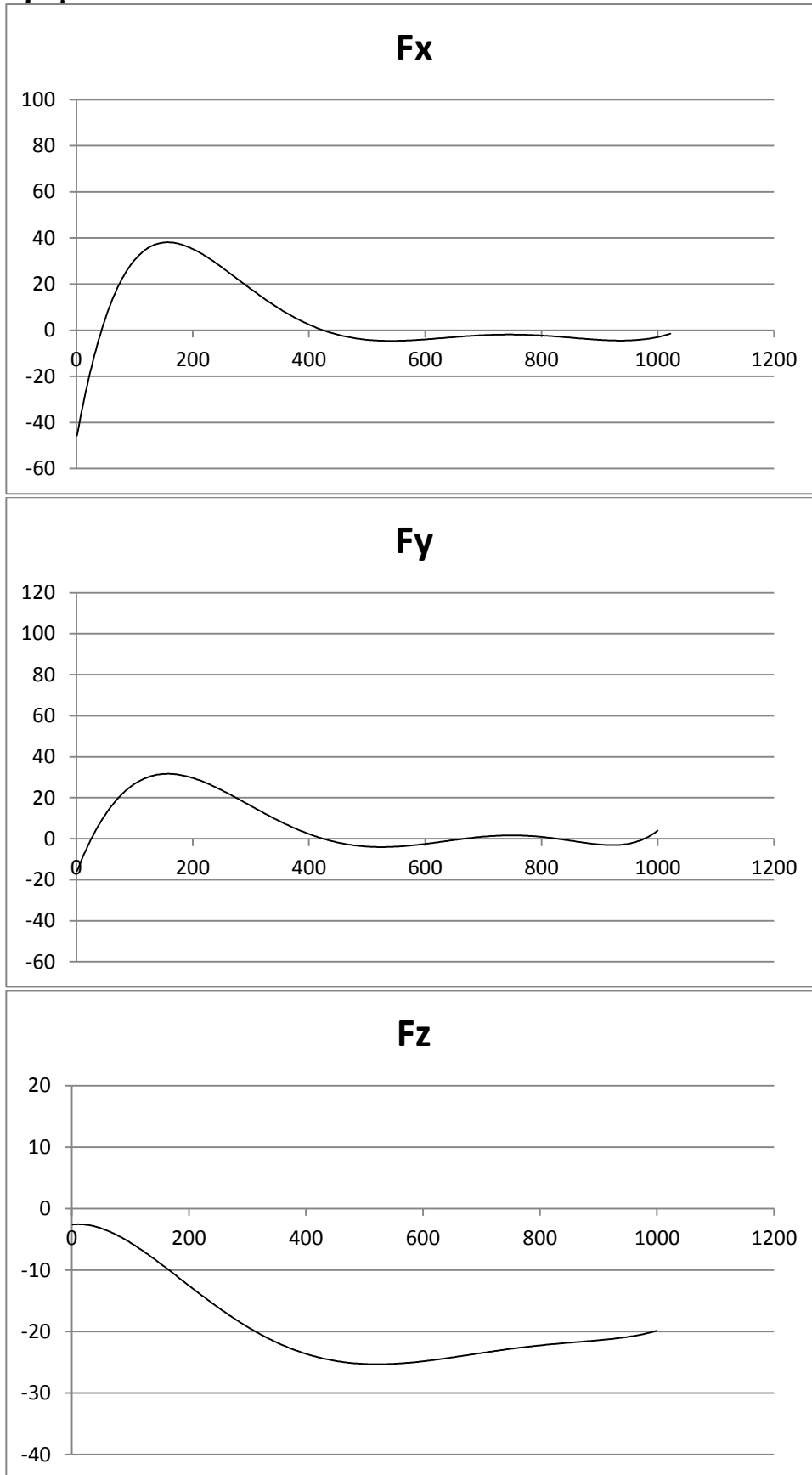
ΣΧΗΜΑ 6.3 Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=125mm/min

#### 4<sup>ο</sup> Πείραμα



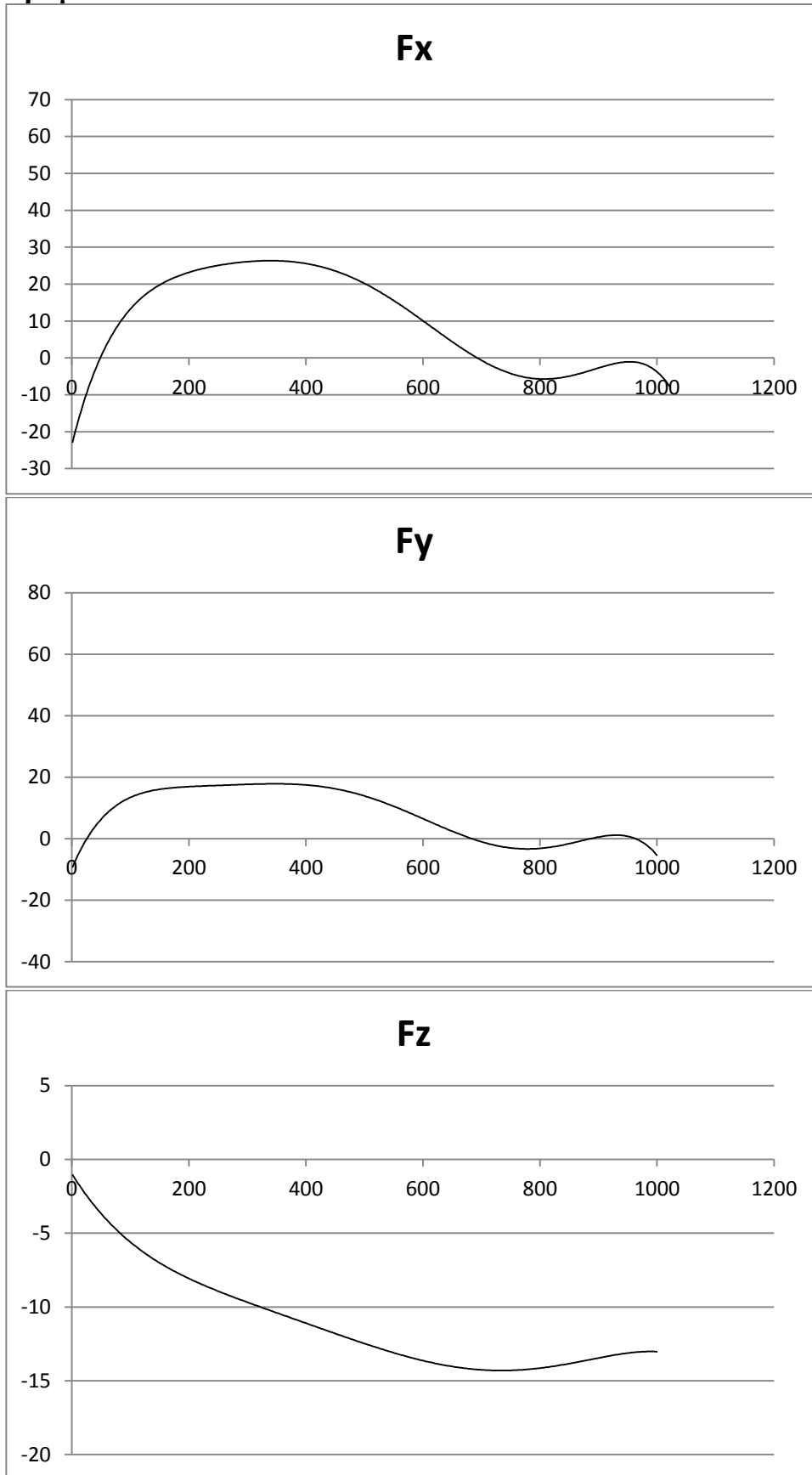
ΣΧΗΜΑ 6.4 Αποτελέσματα 4<sup>ο</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=100mm/min

### 5<sup>ο</sup> Πείραμα



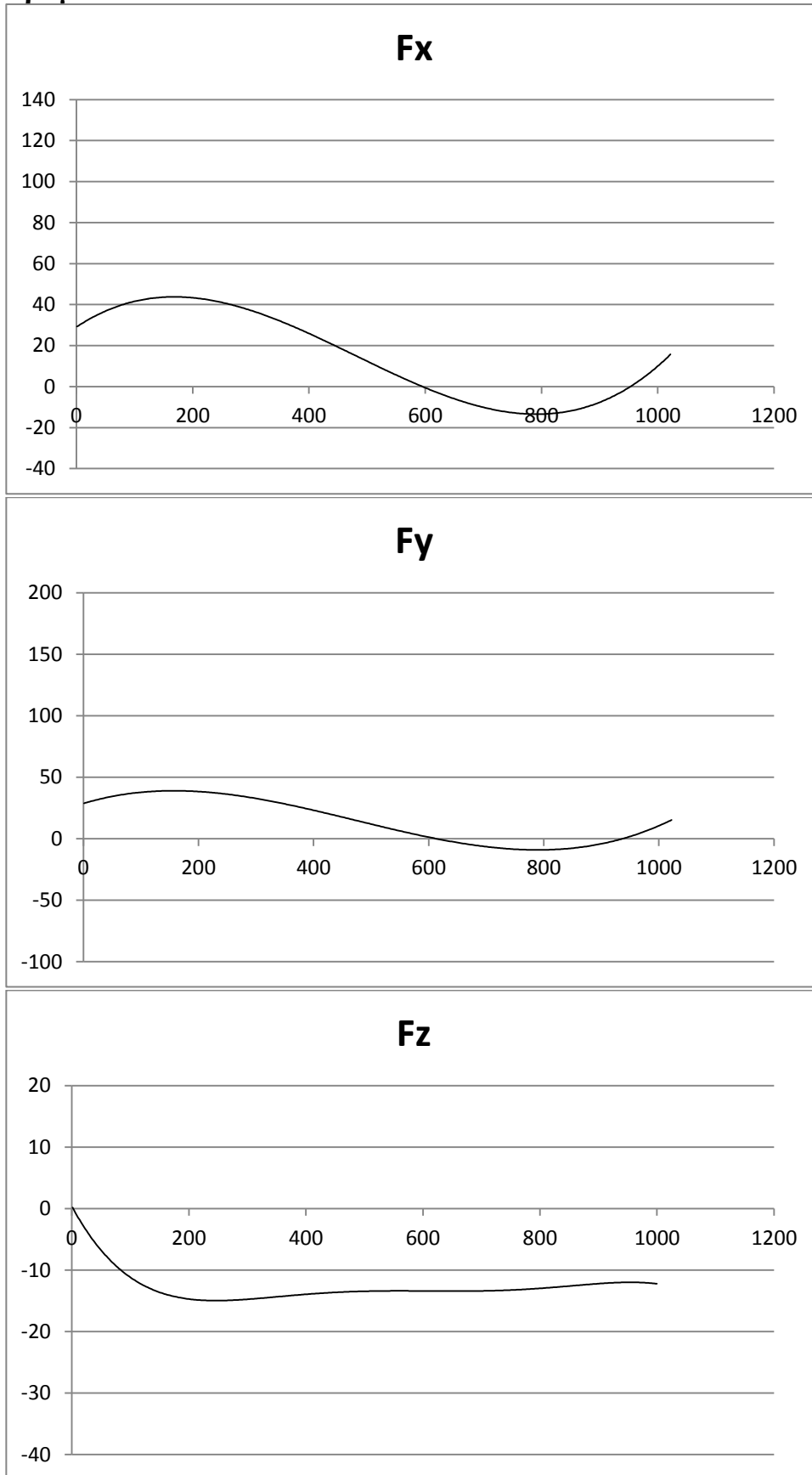
ΣΧΗΜΑ 6.5 Αποτελέσματα 5<sup>ου</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=125mm/min

### 6<sup>ο</sup> Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.6 Αποτελέσματα 6<sup>ου</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=75mm/min

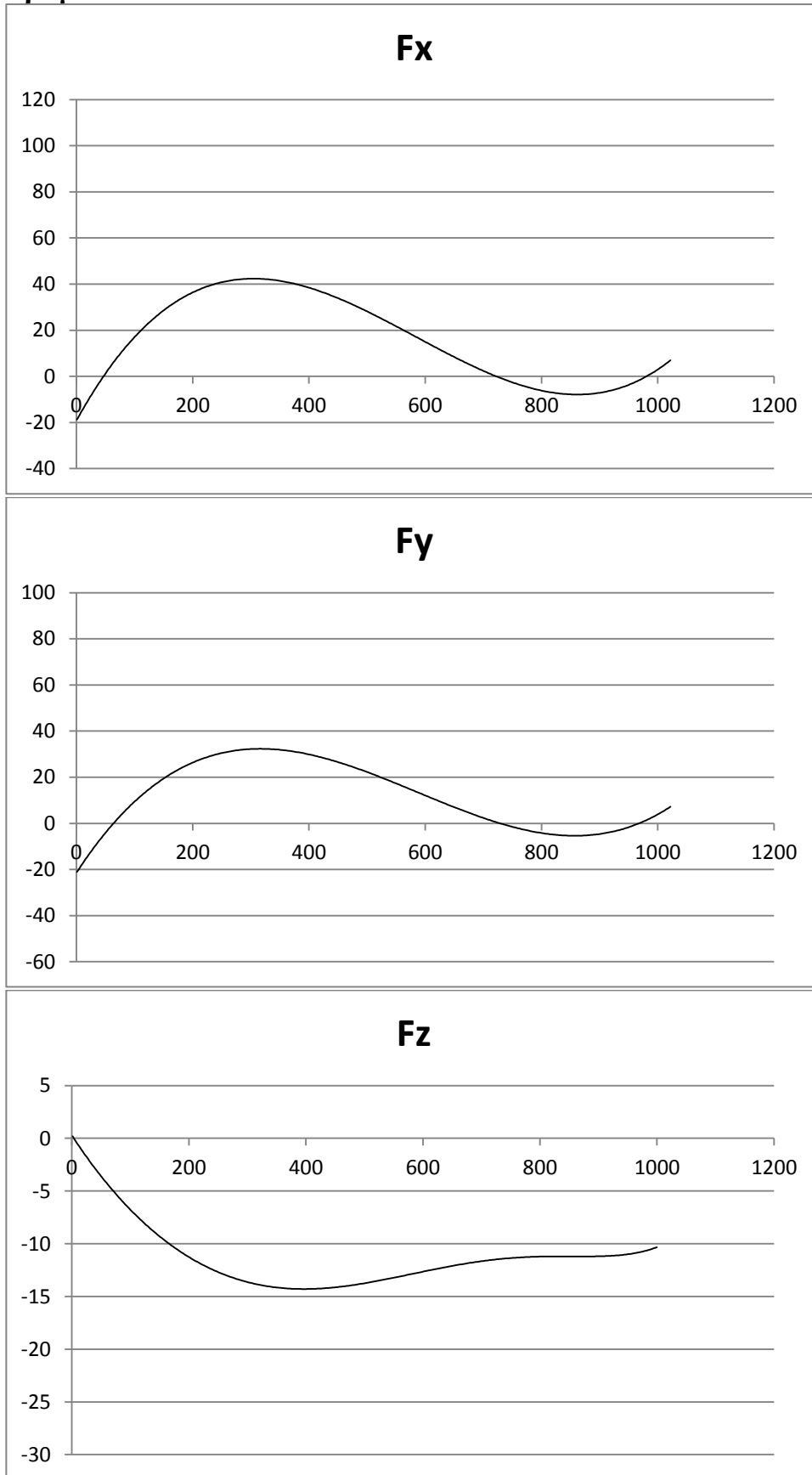
### 7<sup>ο</sup> Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.7 Αποτελέσματα 7<sup>ου</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=125mm/min

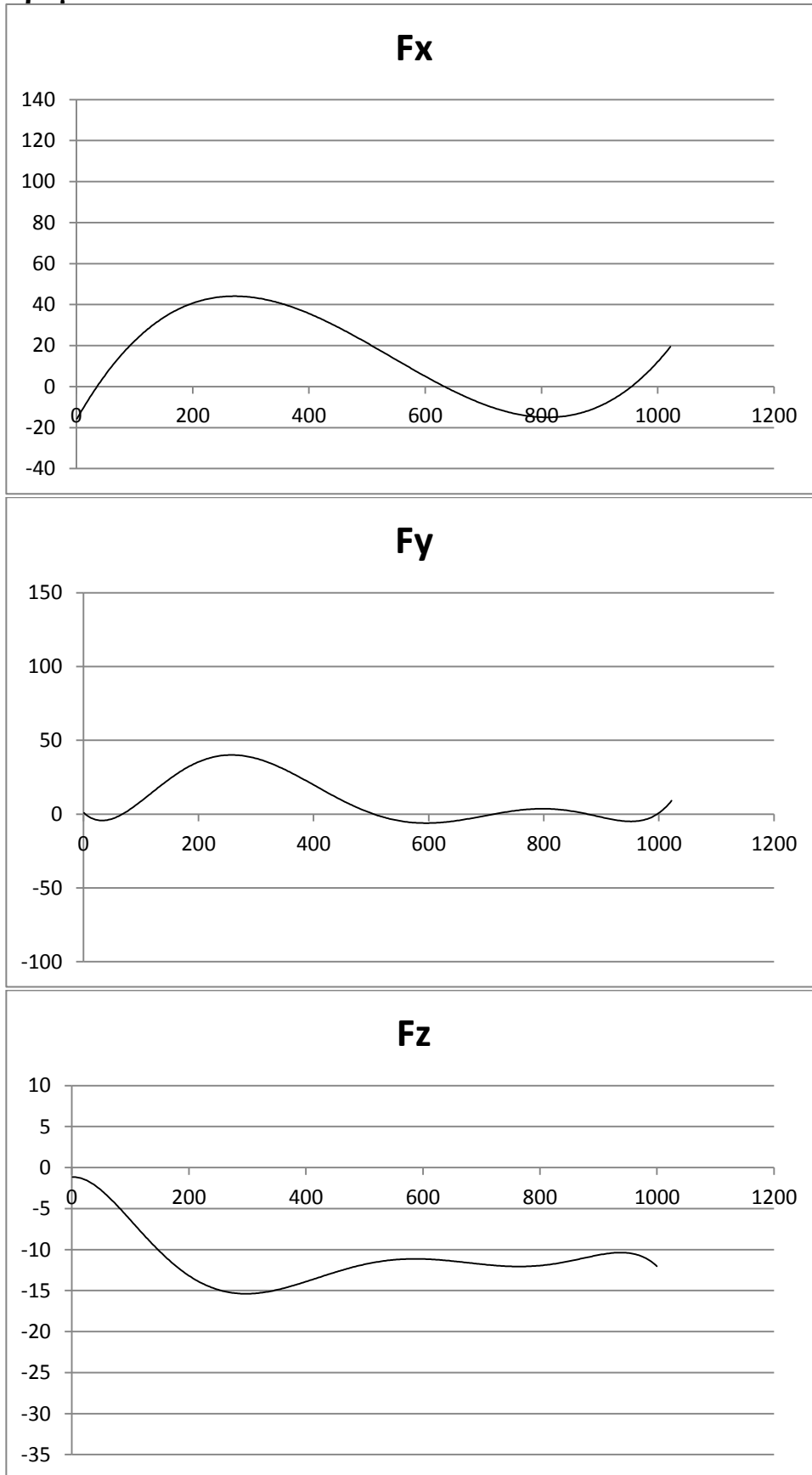


### 8<sup>ο</sup> Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.8 Αποτελέσματα 8<sup>ου</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=75mm/min

### 9<sup>ο</sup> Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.9 Αποτελέσματα 9<sup>ο</sup> πειράματος μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=100mm/min

Οι μέγιστες τιμές (κατά απόλυτη τιμή) των γραμμών τάσεων (που παρουσιάστηκαν παραπάνω) ανά πείραμα, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός Πειράματος	Μέγιστη Δύναμη Κοπής $F_x$ (N)	Μέγιστη Δύναμη Κοπής $F_y$ (N)	Μέγιστη Δύναμη Κοπής $F_z$ (N)
1	17	15	20
2	21	20	26
3	21	19	29
4	35	30	32
5	38	30	26
6	25	18	14
7	44	35	15
8	42	30	14
9	42	40	15

## 6.2 Υπολογιστικά Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσα από το πρόγραμμα AdvantEdge (που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3). Από τις πολλές παραμέτρους της κοπής που έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει το πρόγραμμα, εμάς σε αυτή την εργασία μας ενδιαφέρουν οι κύριες δυνάμεις κοπής  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ . Οι δυνάμεις παρουσιάζονται μέσα από διαγράμματα δύο ειδών:

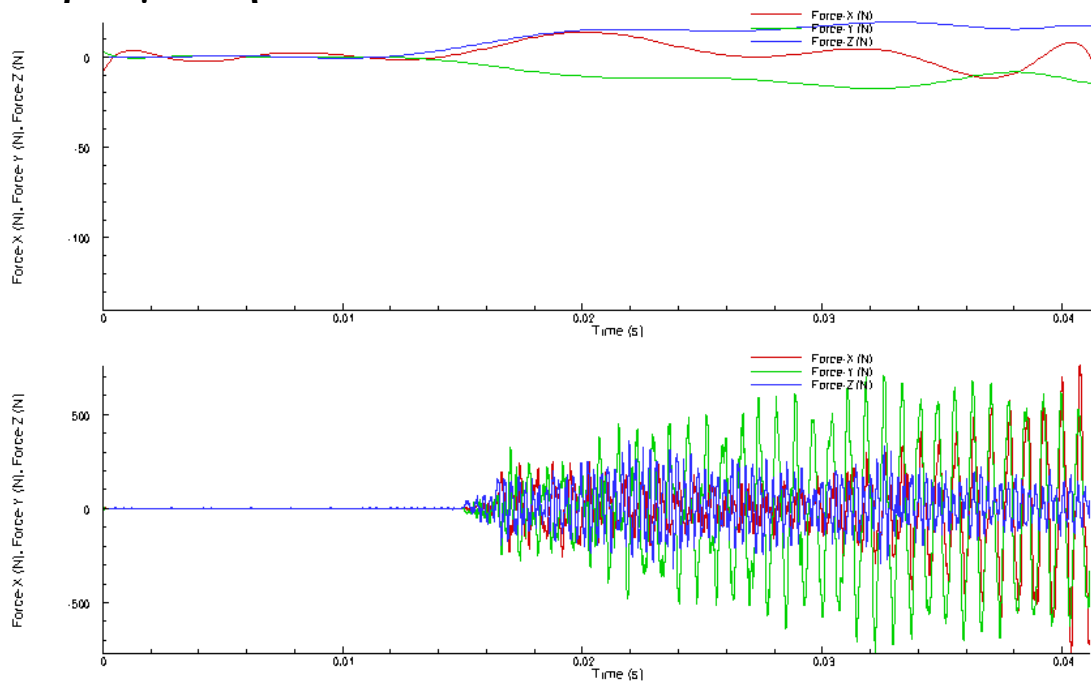
- Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση των δυνάμεων
- Στο δεύτερο, οι καμπύλες των δυνάμεων αφού έχουν φιλτραριστεί.

Ουσιαστικά το δεύτερο διάγραμμα (με την προσθήκη φίλτρου) είναι το διάγραμμα των μέσων τιμών των δυνάμεων κατά την διάρκεια της κοπής. Είναι παρόμοιο με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Άρα θα είναι και αυτά που θα μας βοηθήσουν ώστε να κάνουμε την σύγκριση των δυνάμεων ανάμεσα στα πειραματικά και στα υπολογιστικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν για κάθε κοπή που προσομοιώθηκε ξεχωριστά, το διάγραμμα της διακύμανσης των δυνάμεων και το διάγραμμα με τις ομαλοποιημένες (φιλτραρισμένες) καμπύλες των δυνάμεων. Η κάθε προσομοίωση έγινε με περιστροφή του εργαλείου κατά 180 μοίρες. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται:

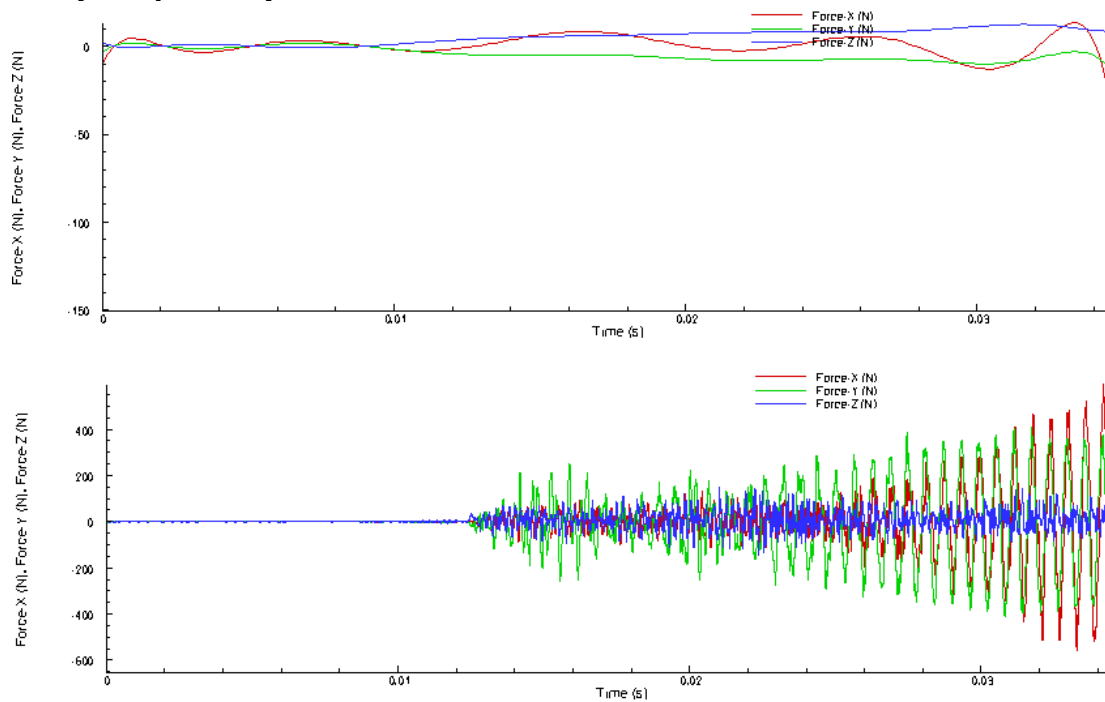
- Με κόκκινη γραμμή η δύναμη  $F_x$
- Με πράσινη γραμμή η δύναμη  $F_y$
- Με μπλε γραμμή η δύναμη  $F_z$

### 1<sup>η</sup> Προσομοίωση



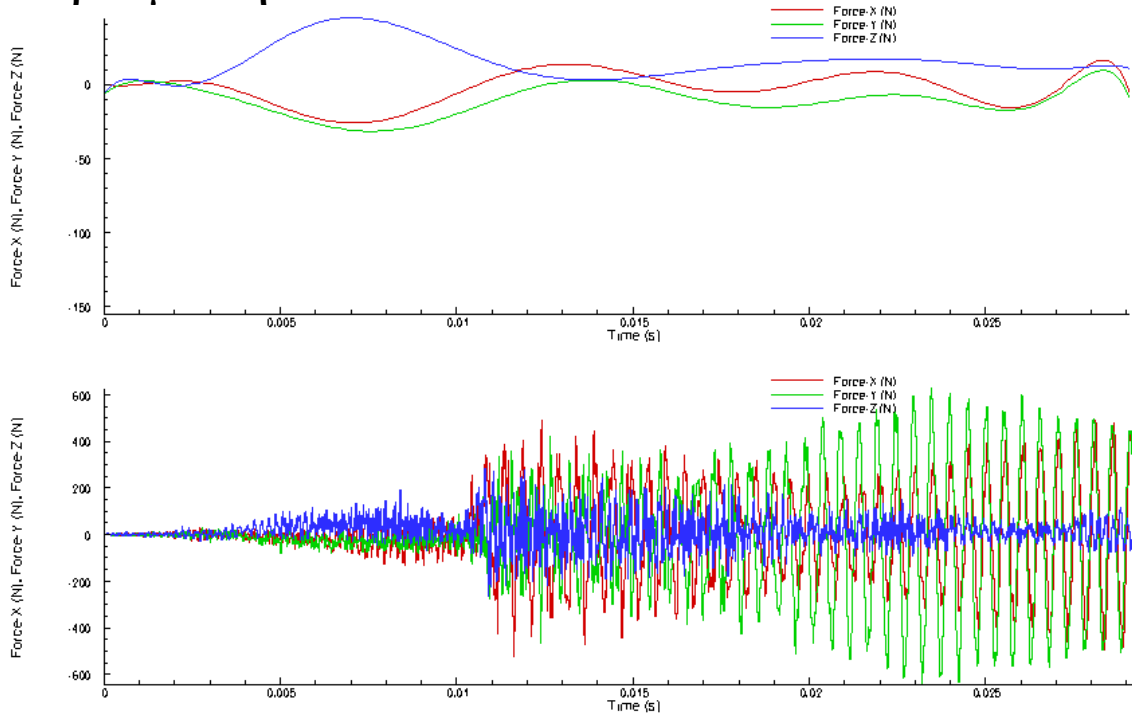
ΣΧΗΜΑ 6.10 Αποτελέσματα 1<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=75mm/min

### 2<sup>η</sup> Προσομοίωση



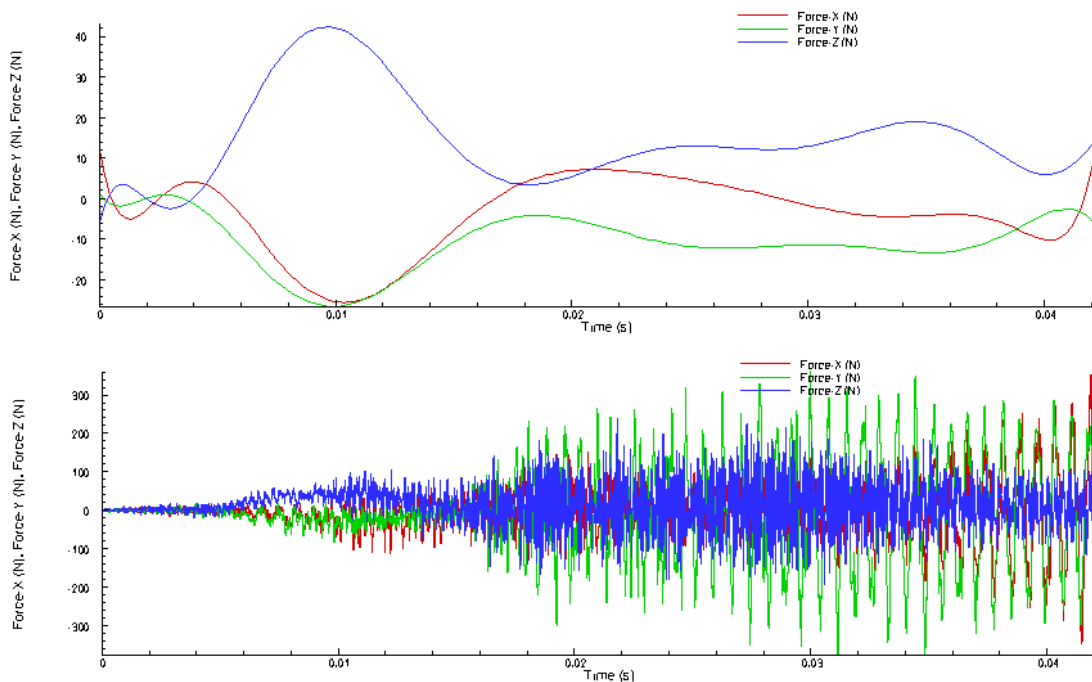
ΣΧΗΜΑ 6.11 Αποτελέσματα 2<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=100mm/min

### 3<sup>η</sup> Προσομοίωση



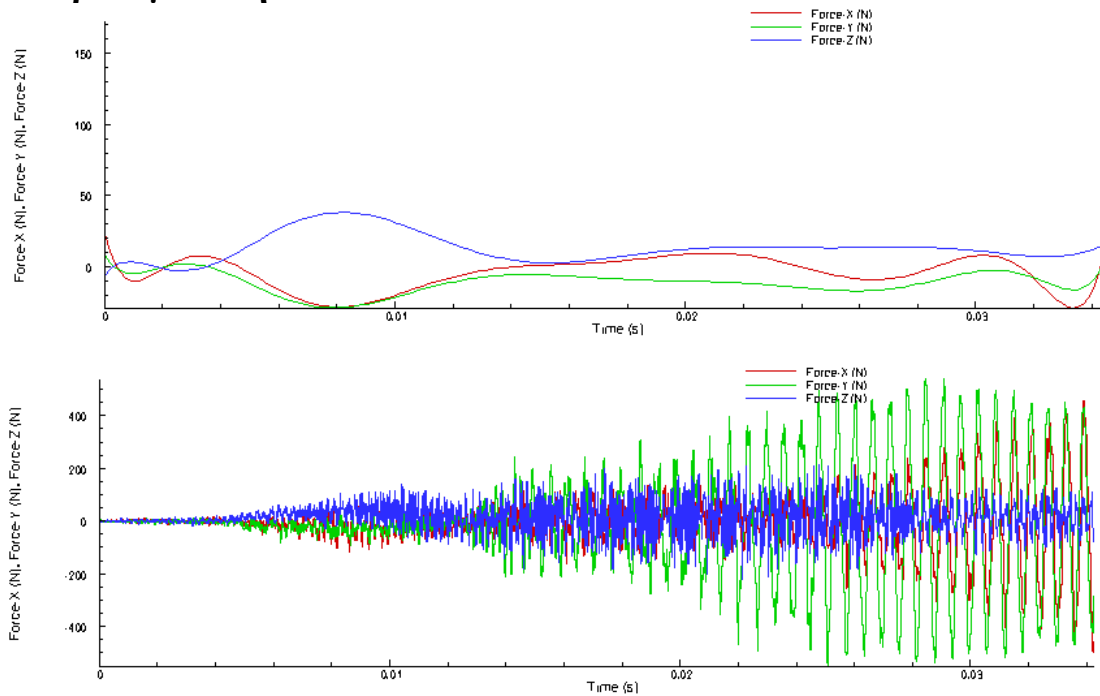
ΣΧΗΜΑ 6.12 Αποτελέσματα 3<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος  
Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=125mm/min

### 4<sup>η</sup> Προσομοίωση



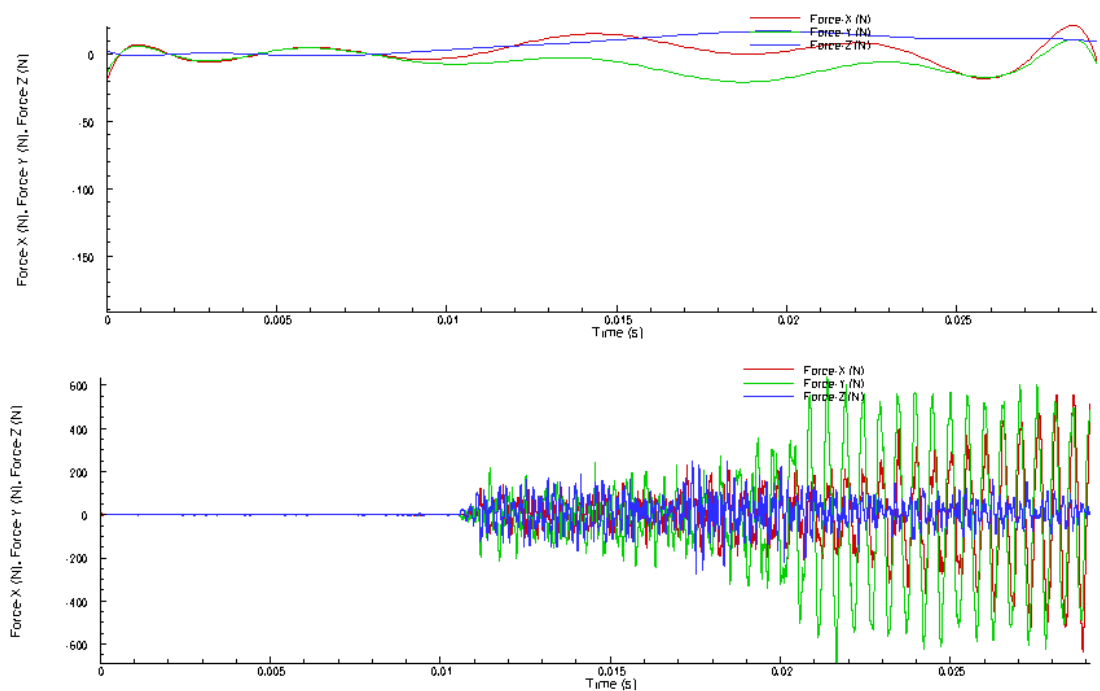
ΣΧΗΜΑ 6.13 Αποτελέσματα 4<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος  
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=100mm/min

### 5<sup>η</sup> Προσομοίωση



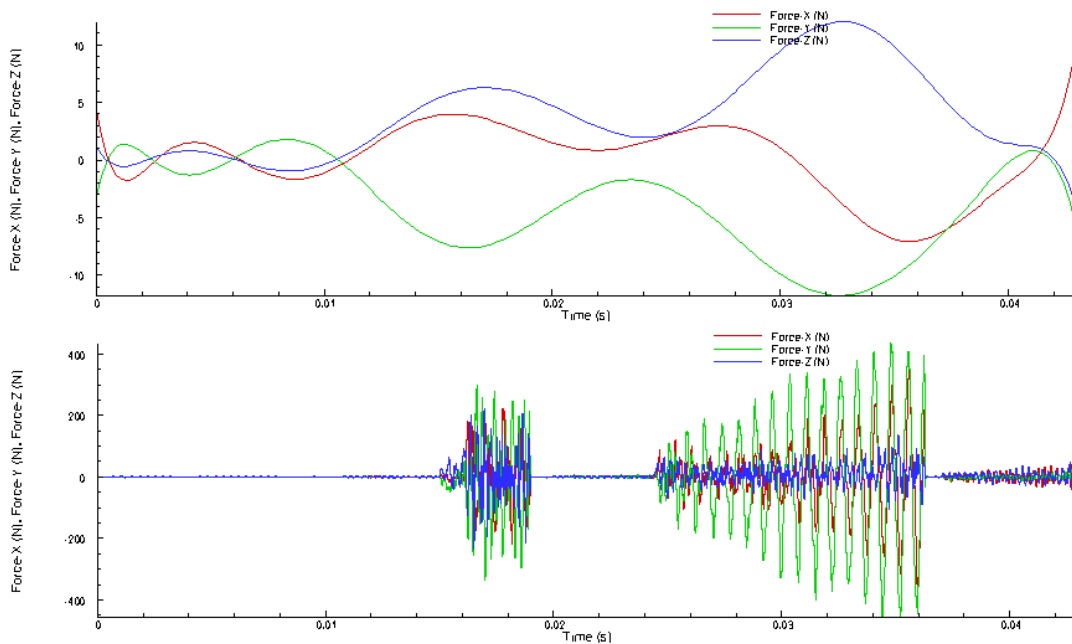
ΣΧΗΜΑ 6.14 Αποτελέσματα 5<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος  
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=125mm/min

### 6<sup>η</sup> Προσομοίωση



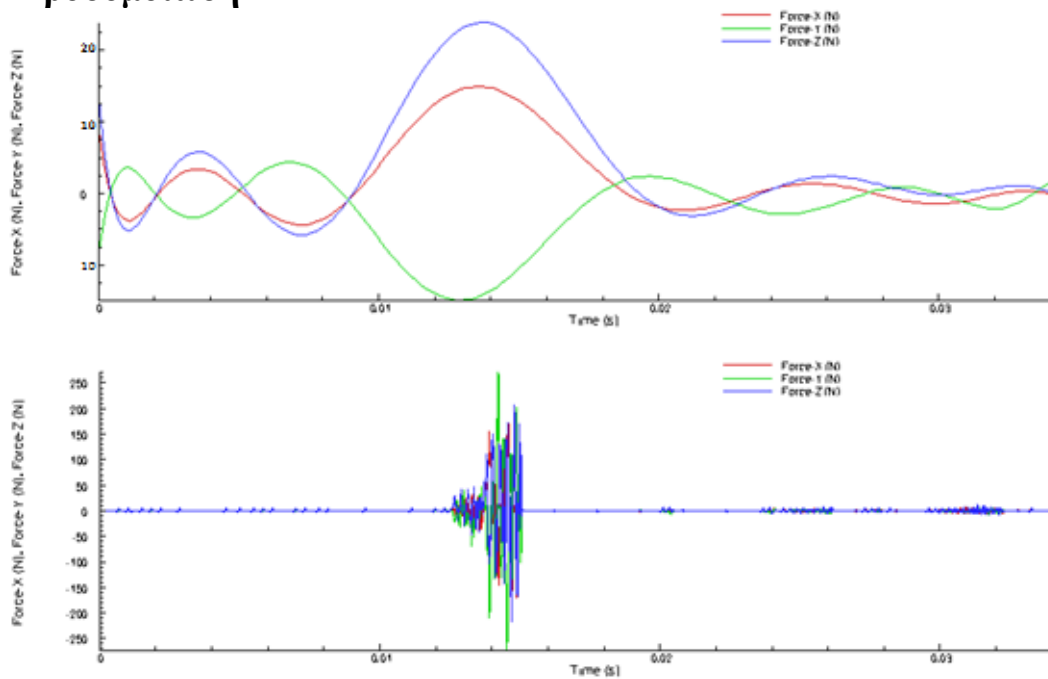
ΣΧΗΜΑ 6.15 Αποτελέσματα 6<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος  
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=75mm/min

### 7<sup>η</sup> Προσομοίωση



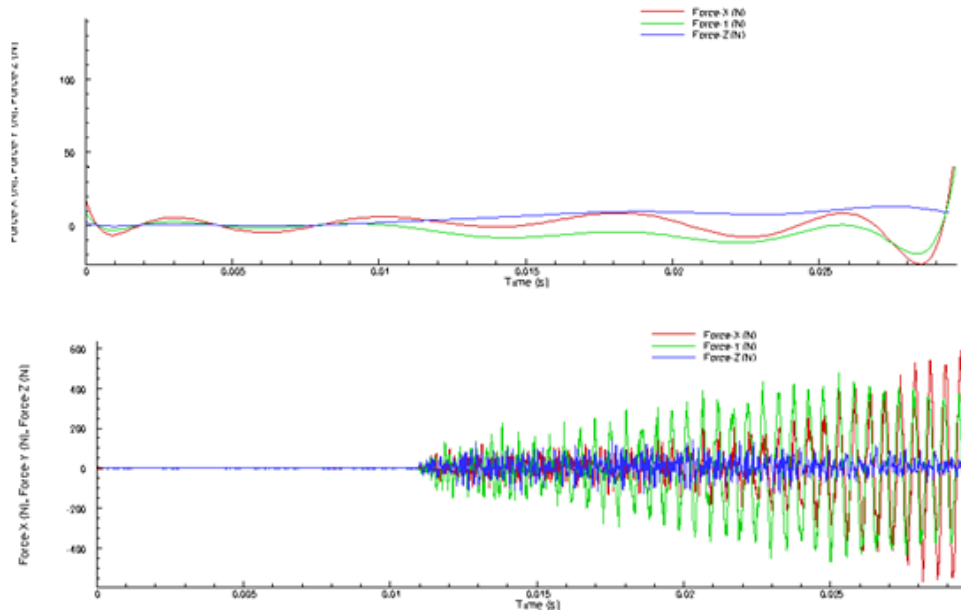
ΣΧΗΜΑ 6.16 Αποτελέσματα 7<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=125mm/min

### 8<sup>η</sup> Προσομοίωση



ΣΧΗΜΑ 6.17 Αποτελέσματα 8<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος  
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=75mm/min

## 9<sup>η</sup> Προσομοίωση



ΣΧΗΜΑ 6.18 Αποτελέσματα 9<sup>ης</sup> προσομοίωσης μετωπικού φρεζαρίσματος Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=100mm/min

Από τα παραπάνω διαγράμματα, αυτό που θα μας απασχολήσει είναι το πρώτο που παρουσιάζεται σε κάθε πείραμα, και είναι το διάγραμμα της ομαλοποιημένης καμπύλης. Αυτό το διάγραμμα, όπως προαναφέραμε, είναι το αντίστοιχο με αυτά που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη παράγραφο και αφορούσε τα πειραματικά αποτελέσματα. Από το διάγραμμα της ομαλοποιημένης καμπύλης θα πάρουμε τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων, για να τις συγκρίνουμε με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές των πειραματικών δυνάμεων.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται οι μέγιστες τιμές (κατ' απόλυτη τιμή) ανά προσομοίωση των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω:

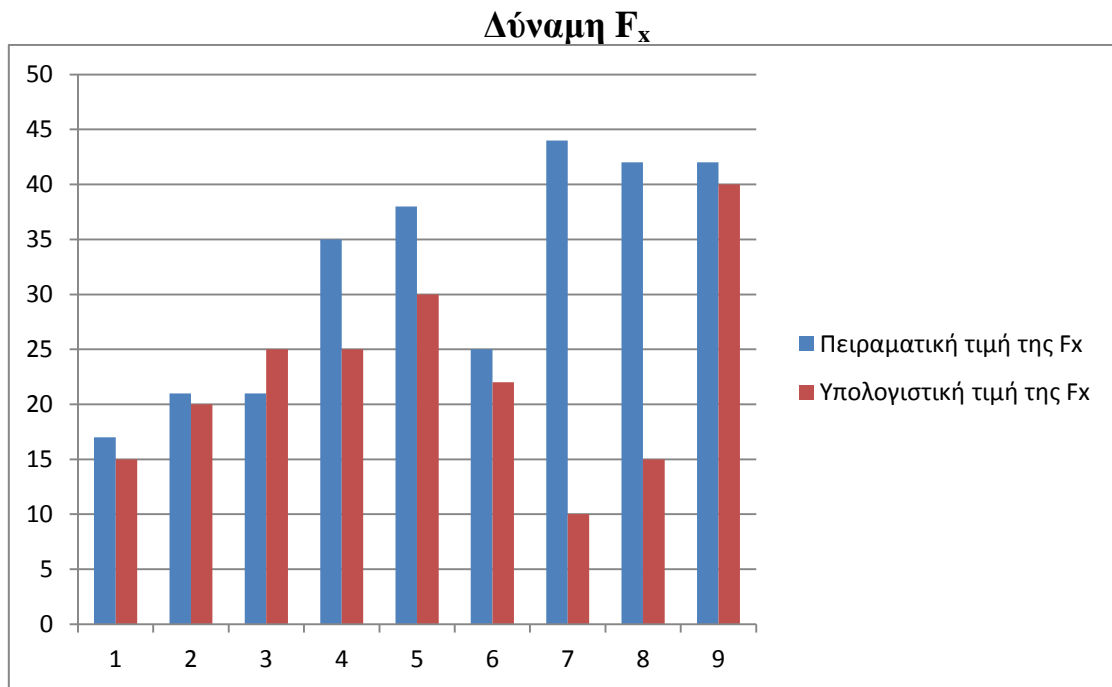


<b>Αριθμός Πειράματος</b>	<b>Μέγιστη Δύναμη Κοπής F<sub>x</sub> (N)</b>	<b>Μέγιστη Δύναμη Κοπής F<sub>y</sub> (N)</b>	<b>Μέγιστη Δύναμη Κοπής F<sub>z</sub> (N)</b>
<b>1</b>	15	18	20
<b>2</b>	20	20	13
<b>3</b>	25	32	43
<b>4</b>	25	26	42
<b>5</b>	30	30	36
<b>6</b>	22	22	18
<b>7</b>	10	12	15
<b>8</b>	15	15	22
<b>9</b>	40	40	12

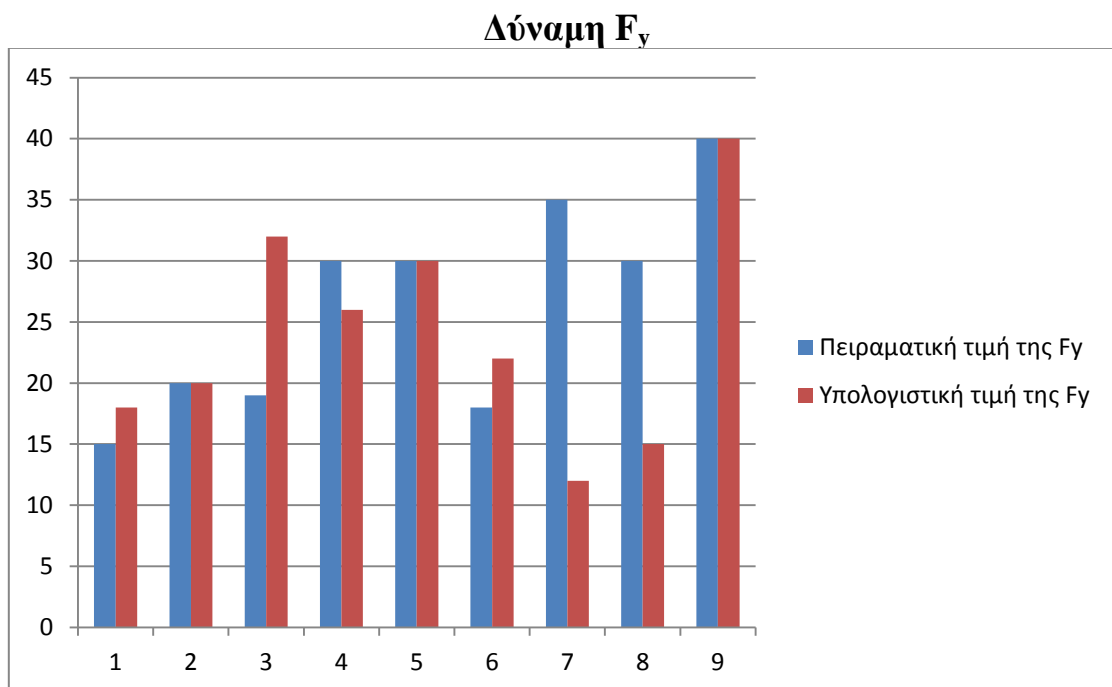
## 7. Συμπεράσματα

### 7.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Πειραμάτων-Προσομοιώσεων

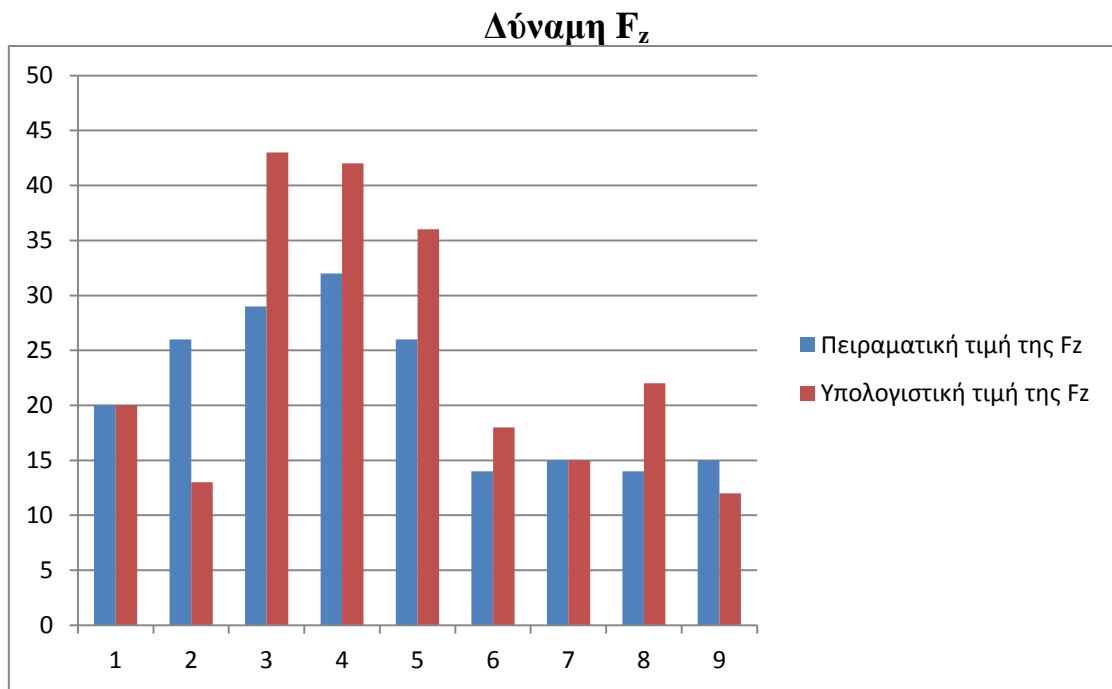
Σ' αυτήν την παράγραφο θα συγκρίνουμε τις τιμές των δυνάμεων που προέκυψαν από τα πειράματα και τις προσομοιώσεις, που διεξήχθησαν στο πρόγραμμα AdvantEdge. Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνονται οι δυνάμεις αυτές:



ΣΧΗΜΑ 7.1 Σύγκριση πειραματικής και υπολογιστικής δύναμης  $F_x$



ΣΧΗΜΑ 7.2 Σύγκριση πειραματικής και υπολογιστικής δύναμης  $F_y$



ΣΧΗΜΑ 7.3 Σύγκριση πειραματικής και υπολογιστικής δύναμης  $F_z$

Η απόκλιση των πειραματικών- υπολογιστικών τιμών προκύπτει με τη χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$\frac{|F_{\text{πειραματική}} - F_{\text{υπολογιστική}}|}{F_{\text{max}}}$$

Στον παραπάνω τύπο όπου  $F_{\text{max}}$  είναι η μέγιστη τιμή ανάμεσα στην πειραματική και την υπολογιστική, ενώ η διαφορά στον αριθμητή της εξίσωσης είναι πάντα σε απόλυτη τιμή.

Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι αποκλίσεις ανάμεσα στις τιμές των τριών δυνάμεων για κάθε πείραμα ξεχωριστά, με χρήση του παραπάνω τύπου:

α/α πειράματος	Απόκλιση Fx	Απόκλιση Fy	Απόκλιση Fz
1	12%	17%	0%
2	5%	0%	50%
3	16%	41%	33%
4	29%	13%	24%
5	21%	0%	28%
6	12%	18%	22%
7	77%	66%	0%
8	64%	50%	36%
9	5%	0%	20%

ΣΧΗΜΑ 7.4 Πίνακας με τις αποκλίσεις των πειραματικών τιμών σε σχέση με τις αντίστοιχες υπολογιστικές κατά το μετωπικό φρεζάρισμα

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι το σύνολο των αποκλίσεων βρίσκεται στην τάξη των 5% - 30% , που είναι μέσα στα όρια του στατιστικού λάθους. Πιο αναλυτικά:

- Στο άξονα X, η απόκλιση είναι της τάξης 5 -29%. Εξαίρεση αποτελούν οι εφαρμογές 7 και 8 (απόκλιση 77% και 64% αντίστοιχα) στις οποίες έχουμε μεγάλο βάθος κοπής (0,9 mm).
- Στον άξονα Y, η απόκλιση είναι της τάξης 0 – 18%. Στην 4<sup>η</sup> εφαρμογή παρατηρούμε πιο υψηλή απόκλιση της τάξης του 41%, ενώ όπως και στον άξονα X οι αποκλίσεις στις εφαρμογές 7 και 8 είναι πολύ μεγάλες (66% και 50% αντίστοιχα).
- Τέλος, στον άξονα Z η κατάσταση είναι πιο ομαλοποιημένη. Όλες οι αποκλίσεις είναι σε φυσιολογικά επίπεδα, με εξαίρεση την εφαρμογή 2 όπου η απόκλιση αγγίζει το 50% ( στην 2<sup>η</sup> εφαρμογή έχουμε το μικρότερο βάθος κοπής).

Κάποια σημαντικά συμπεράσματα προκύπτουν μελετώντας την συνισταμένη των δυνάμεων κατά τους άξονες X και Y. Στον παρακάτω πίνακα, υπολογίζονται οι τιμές των συνισταμένων δυνάμεων (πειραματικές και υπολογιστικές) σε κάθε εφαρμογή καθώς και η μεταξύ τους απόκλιση:

α/α Πειράματος	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ (N) Πειραματική	$\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ (N) Υπολογιστική	Απόκλιση
1	22,7	23,4	3%
2	29	28,3	2,4%
3	28,3	40,6	30,3%
4	46,1	36,1	21,7%
5	48,4	42,4	12,4%
6	30,8	31,1	1%
7	56,2	15,6	72,2%
8	51,6	21,2	58,9%
9	58	56,6	2,4%

ΣΧΗΜΑ 7.5 Πίνακας υπολογισμού της πειραματικής και υπολογιστικής συνισταμένης δύναμης των  $F_x$  και  $F_y$  και η μεταξύ τους απόκλιση κατά το μετωπικό φρεζάρισμα

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, βλέπουμε ότι οι αποκλίσεις των εφαρμογών 1,2,3,4,5,6 και 9 κινούνται στα φυσιολογικά πλαίσια του 0 – 30%. Όπως και στις αποκλίσεις της κάθε δύναμης ξεχωριστά, έτσι και εδώ παρατηρείται πολύ μεγάλη απόκλιση στις εφαρμογές 7 και 8 (72,2% και 58,9% αντίστοιχα).

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις (τόσο στις δυνάμεις κατά τους άξονες X και Y ξεχωριστά, όσο και στη συνισταμένη των δυνάμεων κατά τους άξονες X και Y) παρατηρήθηκαν στις εφαρμογές 7 και 8. Σ' αυτές τις εφαρμογές έχουμε το μεγαλύτερο βάθος κοπής (0,9mm). Η απόκλιση αυτή ίσως οφείλεται στο μοντέλο τριβής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και πιθανόν να μην είναι κατάλληλο για πιο μεγάλα βάθη κοπής. Τη θέση αυτή θα μπορούσαμε να τη ισχυροποιήσουμε αν και στην εφαρμογή 9 είχαμε αντίστοιχα μεγάλη απόκλιση, αφού και σ' αυτήν την εφαρμογή το βάθος κοπής είναι το μέγιστο (0,9mm). Πιθανότατα όμως, κάποιο γρέζι να υπήρχε στην επιφάνεια επαφής κοπτικού εργαλείου- τεμαχίου και το οποίο να επηρέασε τις τιμές των δυνάμεων.

**Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η απόκλιση των πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες υπολογιστικές, κυμαίνεται κατά μέσο όρο στην τάξη του 15-20%, που είναι μέσα στα πλαίσια του στατιστικού λάθους.**

## **7.2 Πιθανές αιτίες απόκλισης Πειραματικών-Υπολογιστικών τιμών**

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και από την αριθμητική προσομοίωση αυτών των πειραμάτων. Επίσης συγκρίναμε τις τιμές των δυνάμεων και υπολογίσαμε τις αποκλίσεις ανάμεσα στις πειραματικές και υπολογιστικές τιμές. Στις περισσότερες εφαρμογές οι αποκλίσεις ήταν μικρές και μέσα στα πλαίσια του στατιστικού λάθους (περίπου έως 30% απόκλιση). Υπήρχαν όμως και εφαρμογές, στις οποίες η απόκλιση ξέφευγε από αυτά τα όρια και ήταν σημαντικά υψηλή. Σε αυτήν την παράγραφο θα αναφέρουμε κάποιες πιθανές αιτίες που οδηγούν στην μη σύγκλιση των πειραματικών με τις υπολογιστικές τιμές:

- Μια από τις πιο σημαντικές αιτίες είναι οι συνθήκες που επικρατούν στην κάθε εφαρμογή. Κατά την πειραματική διαδικασία υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες (που δεν μπορούμε να υπολογίσουμε και να λάβουμε υπόψη στην προεργασία του πειράματος) που επηρεάζουν τις κοπές και άρα τις τιμές των δυνάμεων. Αντίθετα στην προσομοίωση επικρατούν ιδανικές συνθήκες και η κοπή δεν επηρεάζεται από τίποτα, παρά μόνο από τις τιμές των συνθηκών κοπής του κάθε πειράματος που εμείς ρυθμίζουμε. **Άρα θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι τιμές των δυνάμεων που προκύπτουν από την προσομοίωση στο AdvantEdge είναι οι ιδανικές και αυτές που θα είχαν προκύψει και στα πειράματα αν τα πειράματα εκτελούταν υπό ιδανικές συνθήκες.**
- Μια άλλη πιθανή αιτία μη σύγκλισης εντοπίζεται στο κοπτικό εργαλείο της κατεργασίας. Κατ' αρχήν, το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματα, είχε ήδη χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες κατεργασίες στο εργαστήριο, και άρα δεν μπορούμε να λάβουμε υπόψη την φθορά που ήδη είχε υποστεί. Αλλά και στα πειράματα που κάναμε για την συγκεκριμένη διπλωματική, χρησιμοποιούσαμε το ίδιο κοπτικό εργαλείο για κάθε πείραμα. Άρα η φθορά του εργαλείου άλλαζε από πείραμα σε πείραμα, και οπότε αυτό πιθανόν να επηρέαζε και τις τιμές των αποτελεσμάτων. Αντίθετα στην αριθμητική προσομοίωση, το εργαλείο σε κάθε κατεργασία ήταν το ιδανικό, δηλαδή χωρίς καμία φθορά. Άρα οι τιμές των δυνάμεων δεν επηρεάζονταν από τη φθορά του εργαλείου.
- Επίσης, οι ιδιότητες των διάφορων επικαλύψεων του κοπτικού εργαλείου δεν ήταν γνωστές- όπως το πάχος του κάθε στρώματος και η ακριβής του θέση. Άρα ήταν αδύνατον να προσομοιωθεί

επακριβώς το κοπτικό εργαλείο στο πρόγραμμα. Παράλληλα, στους καταλόγους του AdvantEdge περιέχονται πολύ λίγα είδη επικαλύψεων, ενώ στην πραγματικότητα στα σύγχρονα εργαλεία υπάρχουν πολλά περισσότερα είδη αλλά και συνδυασμός αυτών. Αυτό το πρόβλημα βέβαια μπορεί να αντιμετωπιστεί από τον χρήστη, αφού με προσεκτική μελέτη των επικαλύψεων του προγράμματος, είναι εύκολο να παρατηρήσει ότι οι ιδιότητες των επικαλύψεων που περιέχει το πρόγραμμα είναι παρόμοιες με αυτές διάφορων επικαλύψεων που συναντώνται στα σύγχρονα εργαλεία (αλλά δεν υπάρχουν στο πρόγραμμα).

- Σημαντικό ρόλο στην απόκλιση που παρουσιάζουν οι πειραματικές με τις υπολογιστικές τιμές παίζει το ίδιο το πρόγραμμα AdvantEdge, και κάποια μειονεκτήματα που αυτό παρουσιάζει. **Το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα του προγράμματος είναι το μοντέλο τριβής και ολίσθησης που χρησιμοποιεί, το οποίο είναι ιδιαίτερα απλοποιημένο για να εξάγει αποτελέσματα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.** Τα μοντέλα αυτά διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στις κοπές στη φρέζα, οπότε και τα αποτελέσματα δεν είναι απόλυτα ακριβή. Επιπρόσθετα, η πλεγματοποίηση που έκανε το πρόγραμμα σε διάφορες εφαρμογές και η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων ίσως δεν ήταν η σωστή, οπότε και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν να μην ήταν απόλυτα ακριβή.
- Τέλος, ένας ακόμη πιθανός λόγος απόκλισης των πειραματικών-υπολογιστικών τιμών να είναι η μη ακριβής προσομοίωση του υλικού του τεμαχίου. Το υλικό του τεμαχίου ήταν το Ti, αλλά το πρόγραμμα δεν μπορεί να προσομοιώσει ακριβώς τις ιδιότητες του υλικού, και άρα να προβλέψει επακριβώς την συμπεριφορά του κατά την διάρκεια των κοπών. Οπότε είναι λογική και η εμφάνιση αποκλίσεων στις τιμές.

### **7.3 Τελικά Συμπεράσματα για τα Πειράματα και τις Προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν**

Κατά την προετοιμασία και την μελέτη που κάναμε για την πειραματική διαδικασία, επιλέξαμε να αναλύσουμε και να ερευνήσουμε τις δυνάμεις κοπής που εμφανίζονται κατά τους τρεις άξονες αλλά και την μέση τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου, και πως οι μεταβλητές αυτές επηρεάζονται από τις προκαθορισμένες συνθήκες κοπής. Ως συνθήκες κοπής, διαλέξαμε τιμές για: το βάθος κοπής, την ταχύτητα περιστροφής και την ταχύτητα πρόωσης. Έτσι, ορίσαμε τρεις τιμές για το βάθος κοπής (0,3mm – 0,6mm – 0,9mm), τρεις τιμές για την ταχύτητα

περιστροφής (700rpm – 850rpm – 1000rpm), και τρεις τιμές για την ταχύτητα πρόωσης (75mm/min – 100mm/min – 125mm/min). Στις εφαρμογές που εκτελέσαμε (τόσο στα πειράματα όσο και στις προσομοιώσεις), δεν είχαμε ποτέ έναν μόνο μεταβαλλόμενο παράγοντα. Δηλαδή, δεν κρατούσαμε μία σταθερή τιμή από τις συνθήκες κοπής και αλλάζαμε τις υπόλοιπες. Αντίθετα, εκτελέσαμε εννέα κοπές και σε κάθε κοπή γινόταν ένας συνδυασμός των τιμών των συνθηκών κοπής. Η επιλογή των τιμών των συνθηκών κοπής, έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Taguchi (όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 4). **Άρα τα αποτελέσματα της ανάλυσης που έγινε στις προηγούμενες παραγράφους, μας έδειξαν πως οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν ποιοτικά και όχι ποσοτικά τις δυνάμεις κοπής και την τραχύτητα επιφάνειας.**

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε συμφωνούν με τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2. **Οι δυνάμεις κοπής κατά τους τρεις άξονες ( $F_x$ ,  $F_y$  και  $F_z$ ) αυξάνονταν όσο αυξανόταν το βάθος κοπής και η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου. Αντίθετα, όσο αυξανόταν η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, τόσο μειώνονταν οι δυνάμεις.** Όσον αφορά την μέση τραχύτητα  $R_a$  της επιφάνειας του τεμαχίου, οι παρατηρήσεις που κάναμε ταιριάζουν με αυτές των δυνάμεων κοπής. Δηλαδή, **όσο αυξάνονταν το βάθος κοπής και η ταχύτητα πρόωσης, τόσο αυξανόταν η μέση τραχύτητα, ενώ όσο αυξανόταν η ταχύτητα περιστροφής τόσο μειωνόταν η μέση τραχύτητα.** Τέλος, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο με την μελέτη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου, **η φθορά του εργαλείου αυξανόταν όσο μεγάλωναν οι τιμές των συνθηκών κοπής της κατεργασίας, και σε πιο έντονο ρυθμό όσο αυξανόταν το βάθος κοπής της κατεργασίας.**

Η μοντελοποίηση των κοπών μετωπικού φρεζαρίσματος χωρίς τη χρήση ψυκτικού υγρού κοπής έγινε στο εμπορικό πρόγραμμα AdvantEdge. Το πρόγραμμα αυτό θεωρείται το πιο εμπορικό και ταυτόχρονα το φιλικότερο προς το χρήστη, όσον αφορά την μοντελοποίηση κατεργασιών κοπής. Χρησιμοποιεί ένα απλοποιημένο μοντέλο τριβής- ολίσθησης αλλά και ένα απλό θερμομηχανικό μοντέλο. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν (υπολογίστηκαν και αναλύθηκαν εκτενώς στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του Κεφαλαίου) κινούνταν κατά μέσο όρο στα φυσιολογικά πλαίσια του στατιστικού σφάλματος που το ίδιο πρόγραμμα θέτει. Δηλαδή, η απόκλιση του 15 με 20% που είχαν οι πειραματικές τιμές με τις υπολογιστικές, θεωρούνται φυσιολογικές σύμφωνα με τις αρχές του προγράμματος. Παρατηρήθηκαν βέβαια και αποκλίσεις σε μεμονωμένες κοπές και για συγκεκριμένους παραμέτρους που ξεπερνούσαν τα φυσιολογικά όρια. Όμως, αναπτύξαμε παραπάνω τους πιθανούς λόγους που πολλές φορές η προσομοίωση αποκλίνει από την πειραματική διαδικασία. Όμως παρά την ύπαρξη



αυτών των αποκλίσεων, το πακέτο AdvantEdge παραμένει ένα ισχυρό «όπλο» για κάθε βιομηχανία, αφού μπορεί να προσομοιώσει μεγάλο αριθμό κατεργασιών (και άρα να μειώσει τον αριθμό των πειραμάτων που θα εκτελέσει), βγάζοντας πολύ χρήσιμα και ευσταθή συμπεράσματα που θα την βοηθήσουν να βελτιώσει την κατεργασία σε λιγότερο χρόνο και με μικρότερο κόστος.

## **8. Φθορά και Χρόνος Ζωής κοπτικού εργαλείου**

### **8.1 Γενικά Χαρακτηριστικά**

Κατά την κοπή των μετάλλων, το κοπτικό εργαλείο υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες των οποίων η διανομή μάλιστα παρουσιάζει απότομες μεταβολές, όπως και σε υψηλές τάσεις. Ακόμα η νεοσχηματιζόμενη επιφάνεια του αποβλήτου και του κομματιού επάνω στις οποίες τρίβεται το εργαλείο δεν προλαβαίνουν να οξειδωθούν ή να σκεπαστούν από άλλα στρώματα και κατά συνέπεια μπορούμε να δεχτούμε ότι υφίσταται καθαρή μεταλλική επαφή ανάμεσα στο εργαλείο και στο απόβλητο και ανάμεσα στο εργαλείο και στο κομμάτι. Περιορίζεται βέβαια σημαντικά η μεταλλική αυτή επαφή με χρήσης τέτοιου υγρού κοπής, που να μπορεί να δράσει ως λιπαντικό. Κάτω από αυτές τις πολύ δυσμενείς συνθήκες εργασίας του, φθείρεται ή και αστοχεί γενικότερα. Όταν λέμε ότι το κοπτικό εργαλείο αστοχεί, αυτό σημαίνει ότι το εργαλείο παύει πλέον να εκτελεί ικανοποιητικά την αποστολή του, έχει φτάσει δηλαδή στο τέλος της ζωής του και θα πρέπει να αποσυρθεί από την εργαλειομηχανή και είτε να ανατροχισθεί είτε να απορριφθεί ως άχρηστο.

### **8.2 Φθορά και είδη φθοράς κοπτικού εργαλείου**

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι φθοράς κοπτικών εργαλείων : προοδευτική και καταστροφική. **Ο πρώτος τύπος είναι συνδεδεμένος με προοδευτική εξέλιξη φαινομένων που εμφανίζονται ως προοδευτική απώλεια υλικού σε συγκεκριμένα σημεία του εργαλείου (πεδίο φθοράς, κρατήρας και μικρό-αποκολλήσεις), ενώ ο δεύτερος τύπος εμφανίζεται ως θραύση ή πλαστική παραμόρφωση του εργαλείου και συμβαίνει είτε απότομα είτε ως επακόλουθο του πρώτου τύπου. Με τη στενή έννοια του όρου ως φθορά χαρακτηρίζεται μόνο ο πρώτος τύπος.**

Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά κοπτικών εργαλείων είναι πολλοί και διαφέρουν ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες κοπής καθώς και με το ζεύγος υλικών τεμαχίου-εργαλείου. Παρόλα αυτά τρεις είναι οι καθοριστικοί πάντοτε :

- Η σκληρότητα του εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο και μάλιστα σε υψηλή θερμοκρασία (όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μικρότερη είναι η φθορά του εργαλείου)
- Η τάση που δείχνουν τα υλικά τεμαχίου – εργαλείου για «συγκόλληση» με διάφορους φυσικό-χημικούς μηχανισμούς (όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η φθορά του εργαλείου). Με αυτή την τάση συνδέεται και η δημιουργία

ψευδοακμής (built-up edge) που αρχίζει με την προσκόλληση στρώματος υλικού του τεμαχίου στην ακμή κοπής, συνεχίζεται με την απόθεση νέων στρωμάτων (αυξημένης σκληρότητας σε σχέση με το τεμάχιο), τα οποία κάποια στιγμή θραύονται σε κομμάτια, ένα ποσοστό από τα οποία προσκολλώνται στην κατεργασμένη επιφάνεια και την καταστρέφουν. Η ψευδοακμή αλλάζει τη γεωμετρία του εργαλείου. Μειώνεται με την αύξηση της  $V$  (όπου  $V$  η ταχύτητα κοπής), αύξηση της  $\gamma$ , χρήση υγρού κοπής και αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας της κορυφής του εργαλείου.

- Η θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου, έτσι ώστε στην ιδανική περίπτωση να απάγεται εύκολα η θερμότητα.

### Το πεδίο φθοράς

Εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία ελευθερίας. Οφείλεται στην ολίσθηση / τριβή του εργαλείου επάνω στο τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης (adhesion) και διάβρωσης/τριβής (abrasion) που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής. Το πεδίο φθοράς προκαλεί σταδιακή μείωση του βάθους κοπής. Συνήθως η διάρκεια ζωής του εργαλείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο όριο μέσου πεδίου φθοράς  $VB$ . Για παράδειγμα, για ταχυχάλυβα για εργαλεία τόννευσης  $VB=1.5$  mm, για κονδύλια  $VB=0.5$  mm, για τρυπάνια  $VB=0.4$  mm και για γλύφανα  $VB=0.15$  mm. Αντίστοιχα, για σκληρομέταλλο  $VB=0.8$  mm για εκχόνδριση και 0.4 έως 0.15 mm για αποπεράτωση. Η διάρκεια ζωής προσδιορίζεται από εξισώσεις Taylor πχ την κλασσική  $V \cdot T^n = c$ , ή σε επεκτεταμένη μορφή που απαιτείται για τα πιο σύγχρονα υλικά εργαλείων και τεμαχίων :

$V \cdot T^n \cdot a^x \cdot s^y = c$ . Για μεν εργαλεία από ταχυχάλυβα η διάρκεια ζωής για την οποία συνιστώνται ταχύτητες κοπής είναι 60 ή 120 min, για δε εργαλεία από σκληρομέταλλο είναι 30 ή 60 min.

### Η φθορά κρατήρα

Εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία αποβλήτου. Εκεί είναι και οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες υψηλότερες, όπως και οι μηχανικές τάσεις κατά την κοπή. Μέγιστη φθορά παρατηρείται μάλιστα στο σημείο όπου η θερμοκρασία κατά την κοπή είναι μέγιστη. Ο μηχανισμός φθοράς είναι διαφορετικός από αυτόν του πεδίου φθοράς σε περιβάλλον υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών (υψηλών  $V$ ) και σχετίζεται με τη διάχυση ατόμων. Ο κρατήρας δεν επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της κοπής όσο την αντοχή της κοπτικής ακμής και ενδεχόμενη μετέπειτα θραύση.

## **Αποκολλήσεις**

Αυτές συμβαίνουν σε μικρο-κλίμακα οπότε εμπίπτουν στη φθορά και σε μακρο-κλίμακα οπότε εμπίπτουν στην καταστροφική θραύση. Οφείλονται σε μηχανικά σοκ που παρατηρούνται τυπικά σε διακοπτόμενη κοπή, αλλά και σε θερμική κόπωση που παρουσιάζεται επίσης τότε. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται ρωγμές κάθετες στην κοπτική ακμή. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα φαινόμενα αποκολλήσεων, πχ η μικρή γωνία σφήνας του εργαλείου αδυνατίζει την περιοχή της κοπτικής ακμής και αυξάνει τις πιθανότητες τέτοιων φαινομένων.

Η μέτρηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου γίνεται άμεσα με χρήση μηχανουργικού μικροσκοπίου, που διακόπτει όμως την κατεργασία. Γίνεται επίσης έμμεσα με συσχέτισμό της φθοράς με άλλα μεγέθη όπως δύναμη κοπής, θερμοκρασία, τραχύτητα επιφάνειας, ταλαντώσεις, τασικά κύματα που μετρώνται μέσω ανάλυσης ακουστικού σήματος κλπ.

## **8.3 Ο χρόνος ζωής του κοπτικού εργαλείου**

### **8.3.1 Κριτήρια Αστοχίας του εργαλείου**

Η φθορά του εργαλείου έχει άμεση σχέση με την ζωή του. Λέγοντας ζωή ενός κοπτικού εργαλείου εννοούμε την ωφέλιμη ή ενεργό ζωή του από την στιγμή, όπου το νεοτροχισμένο εργαλείο θα αρχίσει την κοπή μέχρι κάποια άλλη στιγμή (καθορίζεται από κάποιο κριτήριο αστοχίας που βάζουμε) οπότε το εργαλείο αφαιρείται για ξανατρόχισμα ή για αντικατάσταση. Η ζωή του εργαλείου μπορεί να εκφράζεται, ανάλογα με την κατεργασία, σε μονάδες χρόνου (min) ή και σε μονάδες άλλου μεγέθους (π.χ. σε μονάδες όγκου αφαιρούμενου υλικού, θεωρητικού μήκους αποβλήτου, μήκους κατεργασμένης επιφάνειας, αριθμού κατεργασμένων κομματιών κ.α.).

Ως κριτήρια αστοχίας ενός κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιούνται στην πράξη τα εξής:

A) Καθορισμένη ανώτερη τιμή για το πλάτος φθοράς  $B$  ή για το βάθος κρατήρα  $KT$  ή και για τα δύο μαζί

B) Στόμωση (άμβλυνση) της κόπης του εργαλείου, η οποία εκδηλώνεται με την εμφάνιση μιας στιλπνής ζώνης στο κομμάτι και με το άκουσμα χαρακτηριστικού σφυρίγματος, λόγω της προχωρημένης πλέον φθοράς του εργαλείου στην ελεύθερη του επιφάνεια

Γ) Καθορισμένη ανώτερη τιμή της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας ή της ανοχής των κρίσιμων διαστάσεων του κομματιού ή

καθορισμένο μέγιστο ποσοστό αύξησης των δυνάμεων κοπής ή της ισχύος κοπής.

### 8.3.2 Η σχέση του Taylor

Ο Αμερικάνος μηχανικός Taylor στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, μελέτησε την σχέση ανάμεσα στην ζωή του εργαλείου και στην ταχύτητα κοπής με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες της κοπής. Ύστερα από πολλά πειράματα κατέληξε στην πολύ γνωστή σχέση που χρησιμοποιούμε και σήμερα:

$$V * T^n = C \quad \text{ή}$$

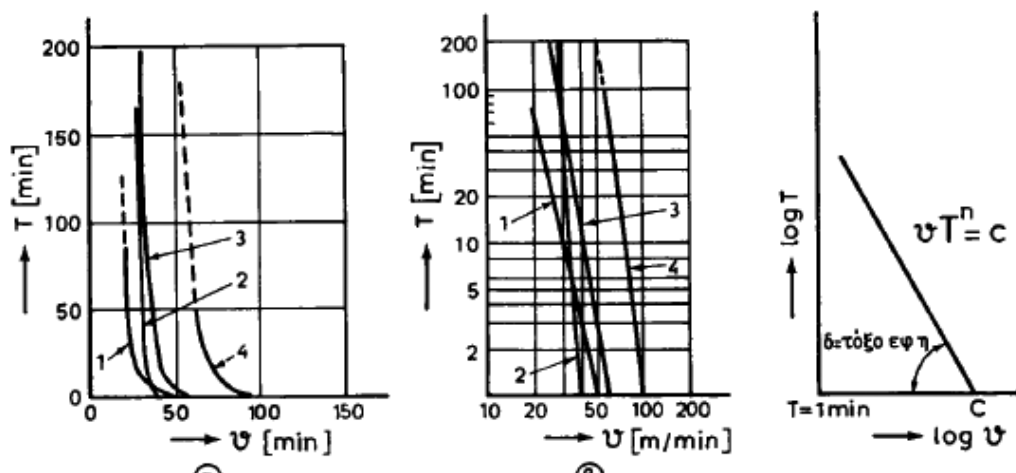
$$T * V^{1/n} = C^{1/n} = C'$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα κοπής σε m/min,  $T$  η ζωή του εργαλείου σε min (με κριτήριο αστοχίας την στόμωση της κόψης) και όπου  $n$  είναι εκθέτης και  $C$  σταθερά, που εξαρτώνται από το υλικό του κομματιού και του εργαλείου, από τις συνθήκες κοπής, από τη γεωμετρική μορφή του εργαλείου και από το υγρό κοπής. Όπως προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις, η σταθερά  $C$  παριστάνει την ταχύτητα κοπής για ζωή του εργαλείου ίση με 1 min ( $T=1\text{min}$ ,  $V=C$ ).

Αν ως κριτήριο αστοχίας του εργαλείου πάρουμε προκαθορισμένη τιμή του πλάτους φθοράς  $B$  (το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιείται συχνά στη πράξη) τότε, όπως έχει αποδειχθεί και πειραματικά, ισχύει πάλι η σχέση του Taylor με την προσθήκη του δείκτη  $B$  στο  $T$ ,  $n$  και  $C$ , για υποδηλωθεί το κριτήριο αστοχίας. Δηλαδή:

$$V * T_B^{nB} = C_B$$

Η σταθερά  $C_B$  ορίζεται όπως η σταθερά  $C$  στην προηγούμενη εξίσωση, δηλαδή για  $T_B=1\text{min}$ .



ΣΧΗΜΑ 8.1 Η σχέση Taylor σε α) γραμμικές και β) λογαριθμικές συντεταγμένες

### **8.3.3 Παράγοντες κοπής που επηρεάζουν την ζωή του εργαλείου**

Οι παράγοντες κοπής, οι οποίοι ασκούν σημαντική επιρροή στη ζωή του εργαλείου είναι:

- Οι συνθήκες κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση και βάθος κοπής)
- Η γεωμετρική μορφή του εργαλείου
- Το υλικό του εργαλείου
- Το υλικό του κομματιού
- Το υγρό κοπής

#### **1.Οι συνθήκες κοπής**

Για δοσμένη ταχύτητα κοπής (και σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες) αύξηση στην πρόωση ή στο βάθος κοπής έχει ως αποτέλεσμα μείωση της ζωής του εργαλείου. Το ίδιο συμβαίνει και για σταθερή πρόωση και βάθος κοπής και αύξηση στη ταχύτητα κοπής.

#### **2.Η γεωμετρία του εργαλείου**

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενη παράγραφο, αύξηση της γωνίας αποβλήτου του εργαλείου έχει ευνοϊκά αποτελέσματα για τη κοπή, και άρα για τη ζωή του εργαλείου. Αυτό όμως ισχύει μέχρι ένα όριο για τη τιμή της γωνίας αποβλήτου. Αυτό γίνεται γιατί αν μεγαλώσει υπέρμετρα η γωνία αυτή, τότε θα ελαττωθούν σε σημαντικό βαθμό οι διατομές, μέσα από τις οποίες απάγεται η παραγόμενη θερμότητα στην περιοχή κοπής στην υπόλοιπη μάζα του εργαλείου, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας και συνεπώς την χειροτέρευση της ζωής του εργαλείου. Οι δύο αυτοί παράγοντες που αναφέραμε, επιβάλλουν μια βέλτιστη τιμή στη γωνία αποβλήτου του εργαλείου.

Επίσης, αύξηση της γωνίας ελευθερίας α συνεπάγεται ελάττωση του πλάτους της ζώνης φθοράς και επομένως αύξηση της ζωής του κοπτικού εργαλείου. Το αντίθετο συμβαίνει με την μείωση της γωνίας ελευθερίας του εργαλείου. Για λόγους μηχανικής αντοχής του εργαλείου υπάρχει περιορισμός στην αύξηση της γωνίας ελευθερίας, με την οποία αύξηση επέρχεται εξασθένιση του εργαλείου.

#### **3.Το υλικό του εργαλείου**

Οι ταχυχάλυβες και τα σκληρομέταλλα βρίσκουν ευρύτατη χρησιμοποίηση στην πράξη ως υλικά για κοπτικά εργαλεία. Από αυτά τα υλικά, τα πιο ευαίσθητα (σε ότι αφορά τη διατήρηση της σκληρότητάς

του) σε μεταβολές θερμοκρασίας (άρα και της ταχύτητας κοπής) είναι οι ταχυχάλυβες και ακολουθούν τα σκληρομέταλλα που παρουσιάζονται πιο ευαίσθητα από τα κεραμεικά πυρίμαχων οξειδίων. Είναι προφανές ότι πτώση της σκληρότητας σε ένα υλικό για εργαλείο κοπής με αύξηση της θερμοκρασίας (ή της ταχύτητας κοπής) έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη φθορά στο εργαλείο και βραχύτερη ζωή του.

#### **4. Το υλικό του κομματιού**

Η χημική σύνθεση του υλικού του κομματιού, η κρυσταλλική του δομή (π.χ. η αναλογία περλίτη στους ανθρακούχους χάλυβες), η σκληρότητα, η ικανότητά του για σκλήρωση και οι διάφορες ακαθαρσίες και εγκλείσματα που περιέχονται σε αυτό, ασκούν σημαντική επιρροή στη ζωή του εργαλείου. Η αύξηση της σκληρότητας του υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ζωής του εργαλείου, με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες της κοπής. Επίσης σκληρά εγκλείσματα και επιφανειακές σκουριές (ιδιαίτερα στα χυτά) επιδρούν δυσμενώς στη ζωή του εργαλείου.

Η σχετική ευκολία μορφοποίησης ενός υλικού με κατεργασίες κοπής, αναφορικά προς κάποιο ή κάποια κριτήρια, ονομάζεται κατεργαστικότητα. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να είναι η ζωή του εργαλείου, η τραχύτητα επιφάνειας, η διαστατική ακρίβεια, η ισχύς κοπής κ.α. Μπορούμε δηλαδή να θεωρήσουμε ότι ένα υλικό έχει καλή κατεργαστικότητα, αν η φθορά του εργαλείου με το οποίο το κατεργαζόμαστε είναι μικρή (και η ζωή του μεγάλη) ή αν η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας είναι καλή ή αν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται είναι χαμηλές και η ισχύς που καταναλίσκεται είναι μικρή, ή αν το κόστος ανά μονάδα όγκου αφαιρούμενου υλικού είναι χαμηλό κλπ. Ακόμα, αν το απόβλητο απομακρύνεται εύκολα από τη θέση κοπής ή αν η ακρίβεια διαστάσεων που επιτυγχάνεται είναι ικανοποιητική. Παρατηρώντας όλα τα παραπάνω, καταλαβαίνουμε ότι είναι πολύ δύσκολο να εκφράσουμε την κατεργαστικότητα ποσοτικά και να μπορέσουμε έτσι να κατατάξουμε τα διάφορα υλικά μετρώντας το καθένα με μονάδες κατεργαστικότητας.

#### **5. Το υγρό κοπής**

Η χρήση υγρού κοπής ασκεί ευνοϊκή επίδραση στη φθορά και στη ζωή του κοπτικού εργαλείου, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο.

#### **8.4 Μελέτη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου κατά τις κοπές μετωπικού φρεζαρίσματος**

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας που εκτελέσαμε, μετά το τέλος κάθε κοπής μελετούσαμε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο το κοπτικό εργαλείο. Σκοπός μας ήταν να εντοπίσουμε τη φθορά που τυχόν έχει υποστεί το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή. Για την καλύτερη μελέτη της φθοράς, παίρναμε φωτογραφίες στις περιοχές που εντοπίζαμε πως υπήρχε φθορά. Έτσι μέσα από αυτές τις φωτογραφίες, που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια, θα μελετήσουμε τη φθορά που υπέστη το κοπτικό εργαλείο με την πάροδο των πειραμάτων.

**Γενικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η φθορά που εντοπίστηκε στο εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε, είναι μόνο στην περιοχή της κοπτικής ακμής του εργαλείου.** Αυτό, βέβαια, δικαιολογείται από τις κοπές μετωπικού φρεζαρίσματος που εκτελέσαμε. Θυμίζουμε ότι κατά τις πειραματικές κοπές, κόβαμε κατά μήκος της επιφάνειας του τεμαχίου (βλέπε Σχήμα 8.2). Άρα, η κοπτική ακμή του εργαλείου ήταν αυτή που φθειρόταν κατά τις κοπές, αφού μόνο αυτή ερχόταν σε επαφή με το τεμάχιο.



ΣΧΗΜΑ 8.2 Το τεμάχιο μετά τις κοπές μετωπικού φρεζαρίσματος

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν θα μελετήσουμε τη φθορά του κοπτικού εργαλείου στην κοπτική του ακμή.



Στην πρώτη φωτογραφία (Σχήμα 8.3) βλέπουμε την κοπτική ακμή του εργαλείου πριν ξεκινήσουν οι κοπές.



ΣΧΗΜΑ 8.3 Η κοπτική ακμή του εργαλείου πριν την έναρξη των πειραμάτων

Όπως προείπαμε, η φθορά εντοπίζεται στην κοπτική ακμή του εργαλείου. Σε εκείνο το σημείο μπορούμε να πούμε ότι έχουμε ένα συνδυασμό ανάπτυξης πεδίου φθοράς και φθοράς κρατήρα. Η φθορά αυτή οφείλεται στη τριβή του εργαλείου με το τεμάχιο. Επίσης η πλευρά του εργαλείου, στην οποία εμφανίζεται η φθορά, ορίζει τη γωνία ελευθερίας αλλά και τη γωνία αποβλήτου. Γι' αυτό το λόγο αναφερθήκαμε σε συνδυασμό των δύο τύπων φθοράς. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν θα δούμε την πρόοδο της φθοράς όσο περνούν τα πειράματα. Θυμίζουμε ότι η φθορά ενός εργαλείου θεωρείται φυσιολογική όταν δεν ξεπερνά τα 0,3mm περίπου.

Ακολουθούν οι φωτογραφίες που πήραμε μετά την εκτέλεση των εννέα κοπών:



ΣΧΗΜΑ 8.4 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 1<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.5 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 2<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.6 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 3<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.7 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 4<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.8 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 5<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.9 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 6<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.10 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 7<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.11 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 8<sup>η</sup> κοπή



ΣΧΗΜΑ 8.12 Η κοπτική ακμή του εργαλείου μετά την 9<sup>η</sup> κοπή

Συνοπτικά, για τη φθορά του κοπτικού εργαλείου διαπιστώνουμε:

- Μετά τις δύο πρώτες κοπές, παρατηρείται ένας μικρός κρατήρας στην άκρη της κοπτικής ακμής της τάξεως των 0,1mm.
- Στις επόμενες τέσσερις κοπές, παρατηρείται και η εμφάνιση ενός δεύτερου μικρού κρατήρα ο οποίος «ακολουθεί» τον πρώτο. Είναι και αυτός της τάξεως των 0,1mm.
- Στις κοπές 7 και 8, βλέπουμε οι δυο κρατήρες να ενώνονται και να δημιουργούν έναν ενιαίο μεγαλύτερο κρατήρα. Αλλά και αυτός ο κρατήρας, αν και μεγαλύτερος από τους προηγούμενους, κινείται στα φυσιολογικά πλαίσια φθοράς.
- Τέλος, βλέπουμε μετά την ένατη κοπή ο κρατήρας να αρχίσει να εκτείνεται κατά μήκος της πλευράς του εργαλείου.

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι με την πάροδο των πειραμάτων το εργαλείο, και ιδιαίτερα η κοπτική του ακμή, φθείρεται. Η φθορά αυτή είναι φυσιολογική αφού κατά την διάρκεια των κοπών εμφανίζονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες στο σημείο επαφής κοπτικού

εργαλείου- τεμαχίου. Η φθορά που παρατηρήθηκε στα πειράματα της συγκεκριμένης διπλωματικής δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλη. Άρα η φθορά αυτή δεν επηρέασε σε σημαντικό βαθμό τις τιμές των αποτελεσμάτων που πήραμε τόσο για τις δυνάμεις κοπής όσο και για την τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου. Επίσης, **είναι εμφανές στις φωτογραφίες πως όσο αυξάναμε το βάθος κοπής στα πειράματα, τόσο αναπτυσσόταν μεγαλύτερη φθορά στην ακμή του εργαλείου.**

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι για την καλύτερη μελέτη της φθοράς του εργαλείου σε κάθε κοπή ξεχωριστά, έτσι ώστε να δούμε πόσο επηρεάζεται η φθορά από τις συνθήκες κοπής κάθε πειράματος (βάθος κοπής, ταχύτητα περιστροφής και ταχύτητα πρόωσης), θα έπρεπε σε κάθε πείραμα να χρησιμοποιούμε ένα νέο εργαλείο. Αυτή η δυνατότητα όμως δεν υπήρχε, λόγω των περιορισμένων κοπτικών εργαλείων που υπάρχουν στο εργαστήριο. Έτσι μελετήσαμε τη φθορά, συγκρίνοντας κάθε φορά την κατάσταση της κοπτικής ακμής σε σχέση με την προηγούμενη κοπή.

## 9. Επίλογος

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν να μελετήσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στους τρεις άξονες κατά την διάρκεια κοπών μετωπικού φρεζαρίσματος κραμάτων τιτανίου. Για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από τις πειραματικές κοπές που εκτελέσαμε, προσομοιώσαμε στον Η/Υ τη συγκεκριμένη κατεργασία με τη βοήθεια ενός δημοφιλούς εμπορικού πακέτου, του AdvantEdge. Η σύγκριση των τιμών των δυνάμεων από τις πειραματικές και αριθμητικές αναλύσεις που κάναμε, έδειξε ότι η σύγκλιση των τιμών ήταν αρκετά ικανοποιητική. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι συγκλίσεις των αντίστοιχων τιμών των δυνάμεων ήταν πολύ μεγάλη. Υπήρχαν και κάποιες λίγες περιπτώσεις που παρατηρήσαμε κάποια απόκλιση στις τιμές αλλά κρίθηκε φυσιολογική και μέσα στα πλαίσια του στατιστικού λάθους. Οι αιτίες των τυχόν αποκλίσεων αναλύθηκαν εκτενώς σε προηγούμενες παραγράφους. Επίσης, αναφερθήκαμε και στη φθορά που υπέστη το κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια των κοπών, μέσω της ανάλυσης που έγινε με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Τέλος, πραγματοποιήσαμε και στατιστική ανάλυση των παραμέτρων των εφαρμογών που εκτελέσαμε. Με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος Minitab είδαμε πως και κατά τι ποσοστό οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν τα αποτελέσματα των δυνάμεων.

Για να είναι όμως μια κατεργασία πετυχημένη, προϋποθέτει την προσεκτική μελέτη όλων των παραγόντων και παραμέτρων που επηρεάζουν την κατεργασία. Όταν λέμε όλες οι παράμετροι της κατεργασίας εννοούμε το κοπτικό εργαλείο, το τεμάχιο, οι συνθήκες κοπής που επικρατούν στο κάθε πείραμα και οτιδήποτε θα μπορούσε να επηρεάσει το αποτέλεσμα της κατεργασίας. Στη σύγχρονη βιομηχανία, ο μηχανικός έχει στα χέρια του «εργαλεία» που τον βοηθούν να τελειοποιήσει τις εφαρμογές που εκτελεί, και που οι μηχανικοί άλλων παλαιότερων εποχών ούτε που είχαν φανταστεί. Τα σύγχρονα κοπτικά εργαλεία (π.χ. CBN), οι ηλεκτρονικές εργαλειομηχανές (CNC), τα υλικά που μπορεί να μεταχειρίζεται, ακόμα και τα προγράμματα προσομοίωσης κατεργασιών (όπως είναι το AdvantEdge) είναι κάποιες από τις σημαντικές αλλαγές που παρατηρούνται στο τομέα των κατεργασιών σε σχέση με παλαιότερες εποχές. Πάντα όμως ο κάθε μηχανικός θα πρέπει να έχει υπόψη του, ανεξάρτητα από τα «όπλα» που διαθέτει, ότι οι επιλογές που θα κάνει τόσο στις συνθήκες κοπής όσο και στα εργαλεία και στα υλικά που θα χρησιμοποιήσει να έχουν ως στόχο την υψηλότερη παραγωγικότητα με την μεγαλύτερη ακρίβεια, και ταυτόχρονα το μικρότερο δυνατό κόστος και το λιγότερο χρόνο κατεργασίας.

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε ότι με το πέρασμα των χρόνων όλο και πιο σύγχρονα μέσα είναι διαθέσιμα στον μηχανικό της σύγχρονης

βιομηχανίας. Μέσα τα οποία τον βοηθούν να τελειοποιήσει τις κατεργασίες που εκτελεί και να προβλέψει επιτυχώς τα αποτελέσματα των ενεργειών του. Πάντα όμως θα είναι απαραίτητη η μελέτη και η αφομοίωση των βασικών αρχών των κατεργασιών, αφού μόνο έτσι θα μπορέσει να εξοικειωθεί και να καταλάβει πραγματικά τον ρόλο των κατεργασιών και τους λόγους που είναι τόσο απαραίτητες και συνεχώς προσπαθούμε να τις εξελίξουμε.

## 10. Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Πέτρος Γ. Πετρόπουλος, «Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο 2», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1994
- [2] Λάζαρος Ε. Λαζαρίδης, «Μηχανουργική Τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1990
- [3] Ελευθέριος Δ. Παπαδανιήλ-Μιχαήλ Μ. Σφαντζικόπουλος, «Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο 2», Ίδρυμα Ευγενίδου, 2006
- [4] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Φοίβος, 1996
- [5] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 1», 1998
- [6] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 2», 1999
- [7] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, «Κατεργασίες των Υλικών 4», 1999
- [8] Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιακός, «Computer Numerical Control-Computer Aided Manufacturing», 2001
- [9] Άγγελος Μαρκόπουλος, «Κατεργασίες Αποβολής Υλικού Λίαν Υψηλής Ακρίβειας», Διδακτορική Διατριβή, 2006
- [10] Νικόλαος Ι. Γαλάνης, «Κατεργασιμότητα Λίαν Υψηλής Ακρίβειας Βιολογικών Εμφυτευμάτων Τεχνητού Ισχίου», Διδακτορική Διατριβή, 2011
- [11] Κωνσταντίνος Καντζάβελος, «Κατεργασίες Κοπής Υψηλής Ταχύτητας: Πειραματική Μελέτη και Αριθμητική Προσομοίωση», Διπλωματική Εργασία, 2009
- [12] Ιωάννης Γιαννακόπουλος, «Κατασκευή Κεφαλών Εμφυτευμάτων Μηριαίου Οστού από Κράμα Τιτανίου Ti-6Al-4V και Αριθμητική Προσομοίωση της Κατεργασίας με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Διπλωματική Εργασία, 2010
- [13] 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



- [14] Σημειώσεις από το μάθημα «Εισαγωγή στη Μηχανουργική Τεχνολογία» του καθηγητή Γ. Βοσνιάκου:
- i. Εργαλειομηχανές- Κοπτικά Εργαλεία- Γεωμετρία
  - ii. Κοπτικά Εργαλεία- Υλικά
  - iii. Μηχανουργικές Επιφάνειες
  - iv. Μη συμβατικές κατεργασίες
- [15] Σημειώσεις από το μάθημα «Εργαλειομηχανές» του καθηγητή Γ. Βοσνιάκου:
- i. Τυπικές Εργαλειομηχανές CNC
  - ii. CNC- DNC
  - iii. Συγκρότηση Εργαλειομηχανών

### **Ξένη Βιβλιογραφία**

- [16] J. Paulo Davim, «Machining- Fundamentals and Recent Advances», Springer, 2008
- [17] Helmi A. Youssef, Hassan El-Hofy, «Machining Technology- Machine Tools and Operations», CRC Press, 2008
- [18] T. H. C. Childs, R. Rahmad, «The effect of a yield drop on chip formation of soft carbon steels», Machining Science and Technology: An International Journal, Taylor and Francis, 2009
- [19] T. H. C Childs, «Numerical experiments on the influence of material and other variables on plane strain continuous chip formation in metal machining», International Journal of Mechanical Science, Elsevier, 2005
- [20] T. H. C. Childs, «Friction modeling in metal cutting», Journal of Wear, Elsevier, 2005
- [21] ASM Handbook, «Machining: Volume 16», ASM International, 1989
- [22] Douglas C. Montgomery, «Design and Analysis of Experiments: 5<sup>th</sup> Edition», John Wiley and Sons, 2001
- [23] P. W. Marksberry, I. S. Jawahir, « A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing», International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, 2007
- [24] P. G. Benardos, G.-C. Vosniakos, « Predicting surface roughness in machining: a review», International Journal of Machine Tools and Manufacture, Pergamon, 2003
- [25] Wen-Hsien Ho, Jinn-Tsong Tsai, Bor-Tsuen Lin, Jyh-Horng Chou, «Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm», Elsevier, 2009

- [26] M. Nouari, A. Ginting, «Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end- milling of titanium alloy», Surface and Coatings Technology, Elsevier, 2004
- [27] M. Nouari, A. Ginting, «Experimental and Numerical studies on the Performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace Material», International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, 2004
- [28] Stephanie Fraley, Mike Oom, Ben Terrien, John Zalewski, « Design Of Experiments via Taguchi methods: Orthogonal arrays», ControlsWiki, 2006
- [29] C. Soutis and P. W. R. Beaumont, « Multi-scale modelling of composite material systems: The art of predictive damage modelling», CRC Press, 2005
- [30] J. Barry, G. Byrne, D. Lennon, « Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy», International Journal of Machine Tools & Manufacture, Pergamon, 2001
- [31] S. Sun , M.Brandt , M.S.Dargusch, « Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys», International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, 2009
- [32] Viktor P. Astakhov, José C. Outeiro, « Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling», General Motors Business Unit of PSMi
- [33] Y. Su, N. He, L. Li, X. L. Li, « An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V», Elsevier, 2006
- [34] [www.thirdwavesys.com](http://www.thirdwavesys.com)
- [35] AdvantEdge User's Manual
- [36] Tecplot User's Manual
- [37] [www.okuma.com](http://www.okuma.com)
- [38] Okuma Manual
- [39] <http://en.wikipedia.org>
- [40] <http://el.wikipedia.org>

