



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ
Ti-6Al-4V ELI:
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ LS-DYNA

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΚΑΣΤΡΙΤΣΗΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

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 περιφερειακού 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 Η/Υ,
- δ) την ανάλυση των αποτελεσμάτων, που πήραμε κατά την διάρκεια των πειραμάτων και των προσομοιώσεων.

Αφού λοιπόν αναλύονται τα βασικά στοιχεία των κατεργασιών κοπής, γίνεται η παρουσίαση και μοντελοποίηση των κατεργασιών στο εμπορικό πακέτο LS-DYNA. 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. 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 των 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 Πρωτεσίλαο Κωστάζο, 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 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.

Καστρίτης Χαράλαμπος

Αθήνα, Νοέμβριος 2017

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
2.5 Απόβλητα/ Γρέζια.....	28
2.5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά και Είδη Αποβλήτου.....	28
2.5.2 Χαρακτηριστικά του Αποβλήτου.....	33
2.6 Τα Υγρά Κοπής στις Κατεργασίες Κοπής.....	34
2.7 Συνθήκες Κοπής.....	34
2.7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις Συνθήκες Κοπής.....	34
2.7.2 Φρεζάρισμα.....	36
2.7.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη του Φρεζαρίσματος.....	37
3. Το Λογισμικό LS-DYNA.....	38
3.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	38
3.2 Αναλυτικά για το Λογισμικό LS-DYNA.....	39
4. Η Μέθοδος Taguchi.....	40
5. Πειραματική και Υπολογιστική Διαδικασία.....	43
5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης εργαστηρίου.....	43
5.2 Χαρακτηριστικά του Τιτανίου.....	49
5.3 Η Πειραματική διαδικασία Περιφερειακού Φρεζαρίσματος.....	51
5.4 Η Προσομοίωση στο LS-DYNA.....	55
6. Αποτελέσματα.....	61
6.1 Πειραματικά Αποτελέσματα.....	61
6.2 Υπολογιστικά Αποτελέσματα.....	75

7. Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	81
7.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Πειραμάτων – Προσομοίωσεων	81
8. Συμπεράσματα σχετικά με τα Πειράματα και τα Υπολογιστικά Αποτελέσματα.....	86
8.1 Πιθανές Αιτίες Απόκλισης Πειραμάτων – Υπολογιστικών Τιμών.....	86
8.2 Γενικά Συμπεράσματα.....	87
9. Βιβλιογραφία.....	89

1.Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει σκοπό την 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, 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^ο κεφάλαιο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μοντελοποίησης των κατεργασιών, κάνοντας εκτενή αναφορά στο εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA το οποίο χρησιμοποιήσαμε για να μοντελοποιήσουμε τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο. Στο 4^ο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη αναφορά στην μέθοδο Taguchi βάσει της οποίας έγινε η επιλογή των παραμέτρων των πειραμάτων. Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία περιφερειακού φρεζαρίσματος που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κατεργασιών, και στην συνέχεια αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήσαμε για να πετύχουμε την ακριβή μοντελοποίηση των πειραμάτων στο LS-DYNA. Στα τελευταία κεφάλαια γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και των προσομοιώσεων στο LS-DYNA, η σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και τα συμπεράσματα που μπορέσαμε να εξάγουμε μετά την ολοκλήρωση όλων των διαδικασιών που απαιτούνταν.

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 κατεργασίες αφαίρεσης υλικού
- Τις κατεργασίες διαμόρφωσης

Οι κατεργασίες κοπής ή αφαίρεσης υλικού, όπως αλλιώς ονομάζονται, 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 όπως: Τόρνος, Φρέζα, Πλάνη, Τρύπανο, Λειαντικός τροχός, Γραναζοκόπτης, Μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης κ.α.
- Εργαλειομηχανές διαμόρφωσης όπως: Μηχανικό ψαλίδι κοπής χαλυβδόφυλλων, Πρέσα, Μηχανές κάμψεως λαμαρινών, 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.

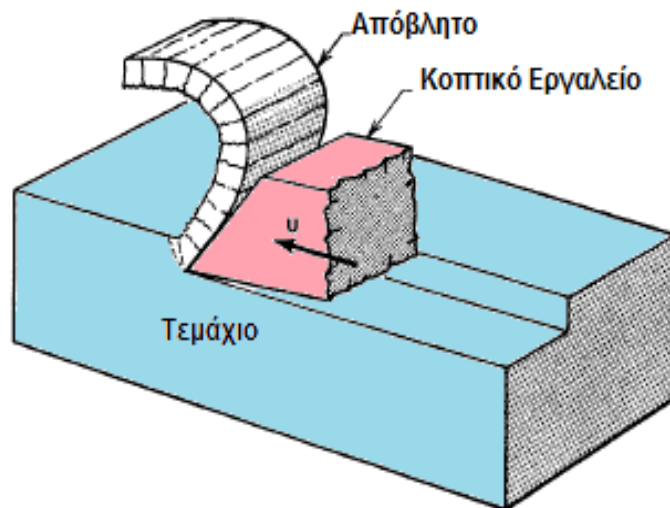
2.2 Κοπή

2.2.1 Περιγραφή βασικών χαρακτηριστικών κοπής

Οι βασικοί συντελεστές, που παίζουν σημαντικό ρόλο κατά την διάρκεια της κοπής, είναι οι εξής:

- 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

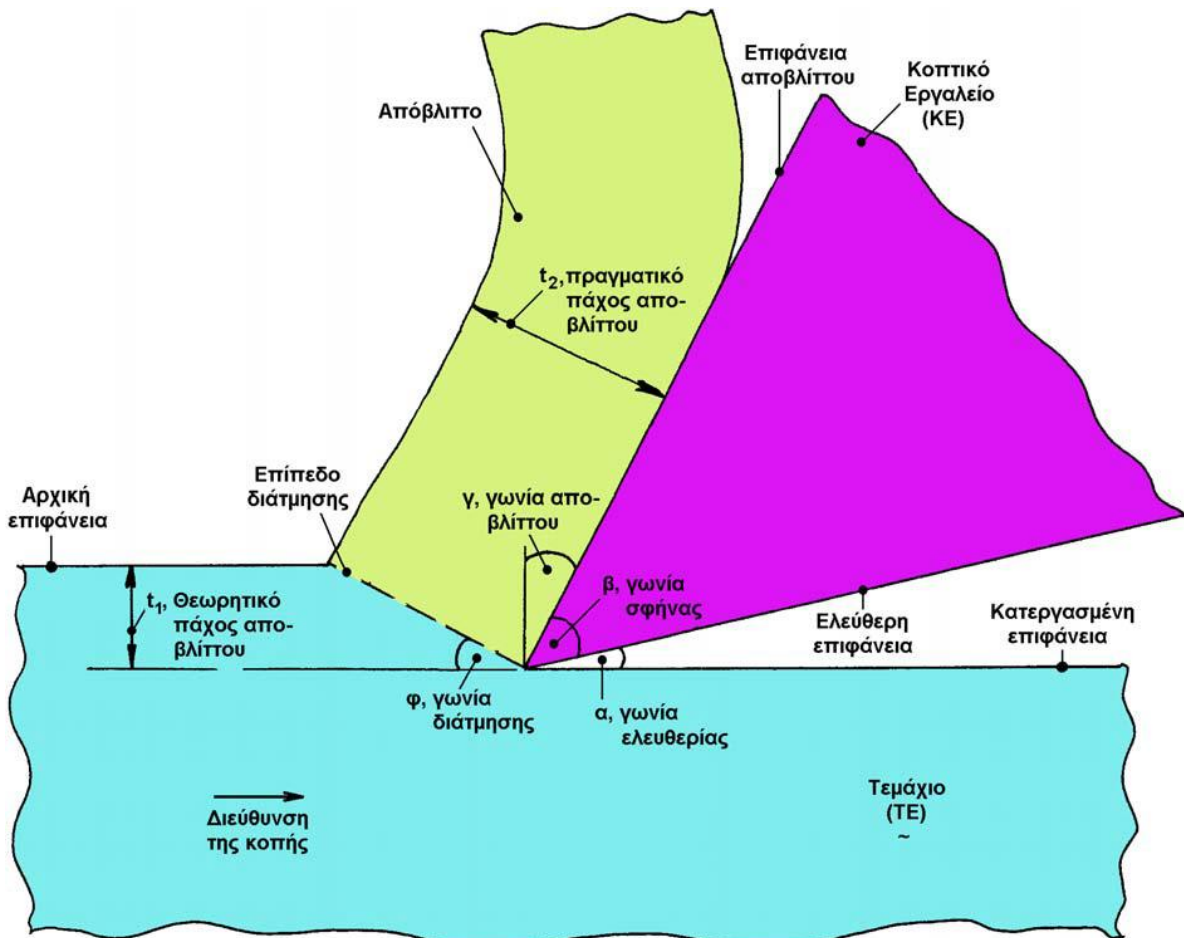
- Το **ΚΕ** κινείται σε σχέση προς το **ΤΕ** σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με **ταχύτητα v** , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το **απόβλητο** που κινείται επί του **ΚΕ** μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του.
- Το **ΚΕ** προσομοιάζεται με σφήνα ευθύγραμμης ακμής που κινείται ως προς το κατεργαζόμενο **ΤΕ** έτσι ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους και με την αντίστοιχη κάθε φορά μορφή αποβλήτου.

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά **ΚΕ** (Σχήμα 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 γ** : 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 α** : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του ΚΕ και την κατεργασμένη επιφάνεια.
- **Γωνία σφήνας β** : 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 είναι οι παρακάτω:

- 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_v : 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_v ισχύει η σχέση:

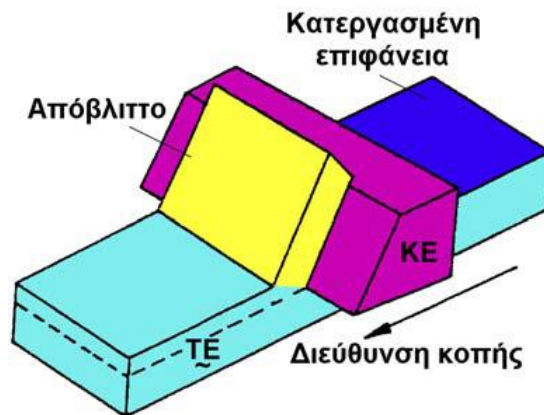
$$v_v = s \cdot n$$

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

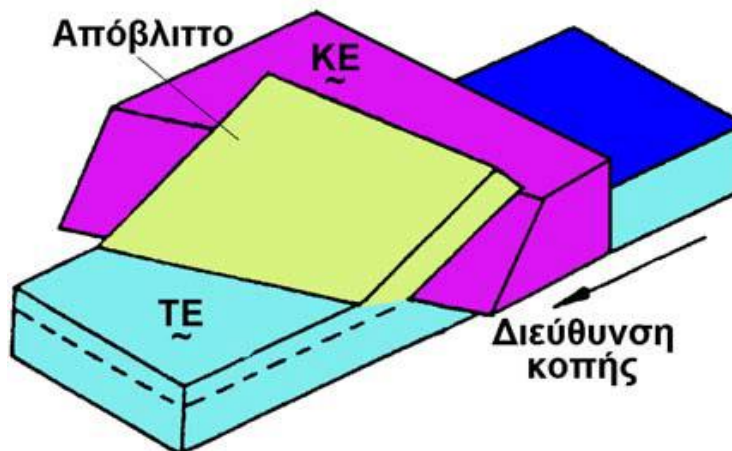
Ανάλογα με την θέση της κόψης του ΚΕ ως προς την διεύθυνση κοπής, διακρίνουμε δύο είδη κοπής (αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 2.4):

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

B) **Λοξή κοπή**: Η κόψη του ΚΕ είναι κεκλιμένη ως προς την διεύθυνση κοπής (Σχήμα 2.4). Η λοξή κοπή θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενη παράγραφο.



ΣΧΗΜΑ 2.3 Ορθογωνική Κοπή

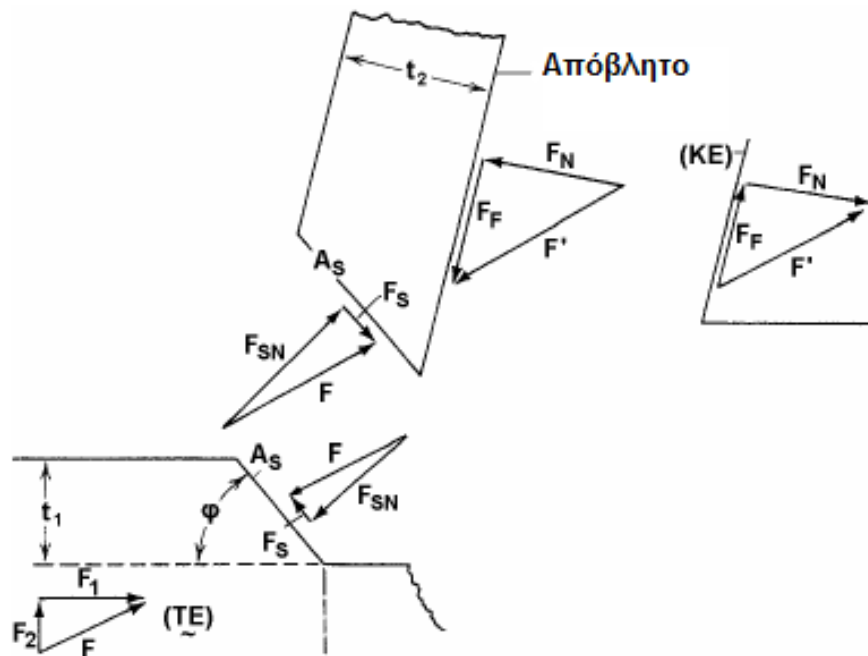


ΣΧΗΜΑ 2.4 Λοξή κοπή

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

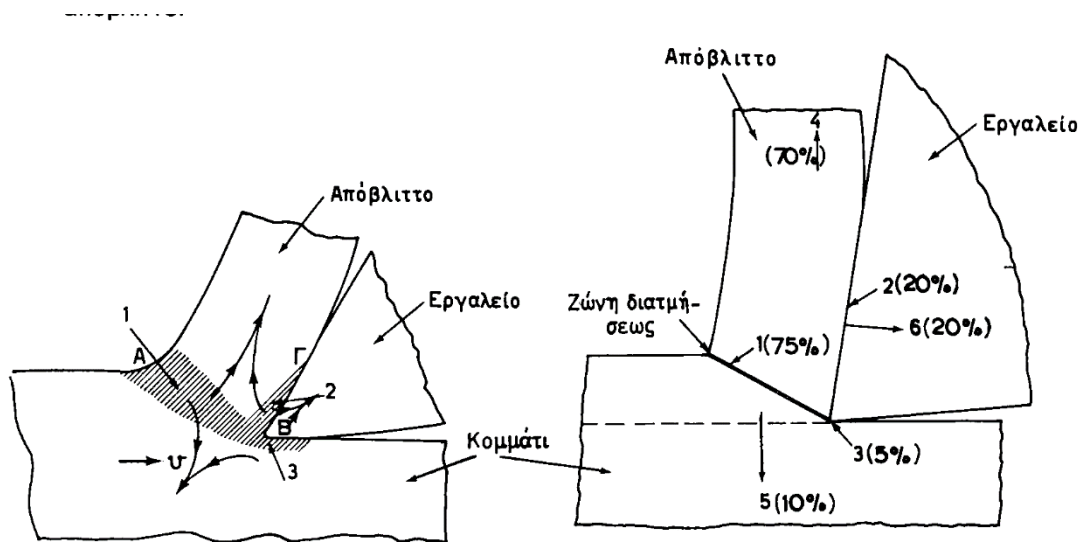
- Στη ζώνη διατμήσεως (1)
- Στη ζώνη τριβής (2)

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.

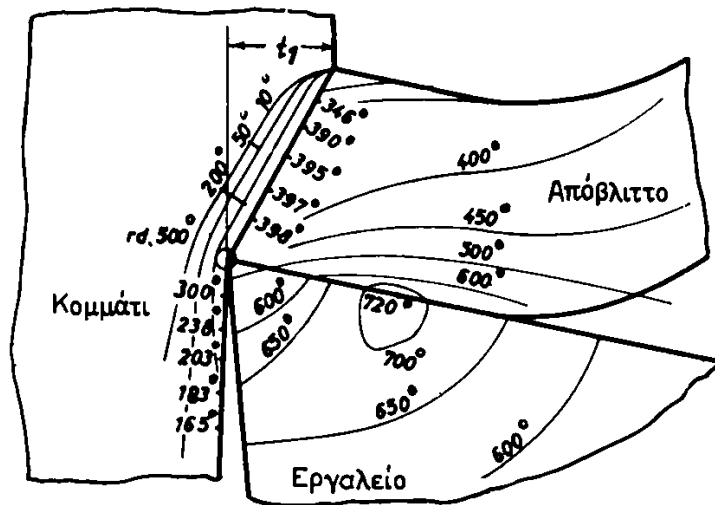


Λόγω της σημαντικής ποσότητας θερμότητας που εκλύεται κατά την κοπή των μετάλλων, αναπτύσσονται στις ζώνες 1,2 και 3, που αναφέραμε, αρκετά υψηλές θερμοκρασίες ανάλογα με την κάθε περίπτωση κοπής. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες έχουν κατά κύριο λόγο δυο επιπτώσεις: α) μια ευνοϊκή που είναι η μείωση του 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, γραναζοκόπτες
- 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:

- Συνήθεις (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 :

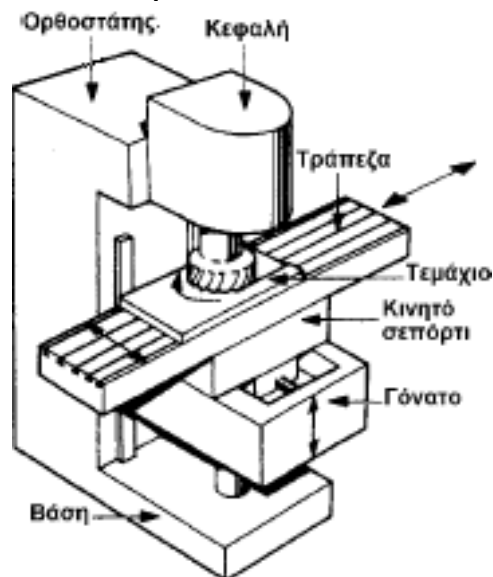
- οριζόντιες και
- κατακόρυφες.

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.

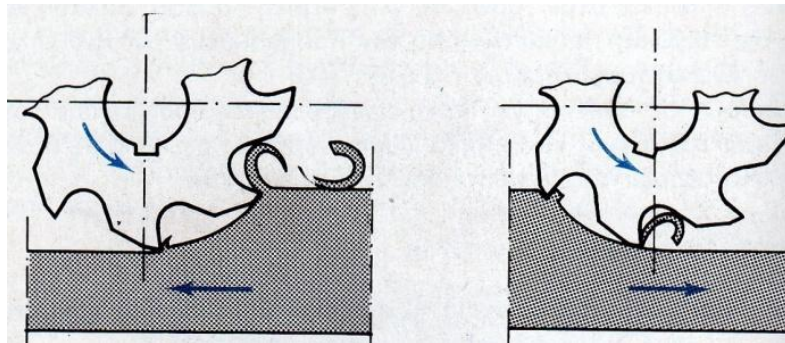


ΣΧΗΜΑ 2.9 Τα κύρια μέρη κατακόρυφης φρεζομηχανής

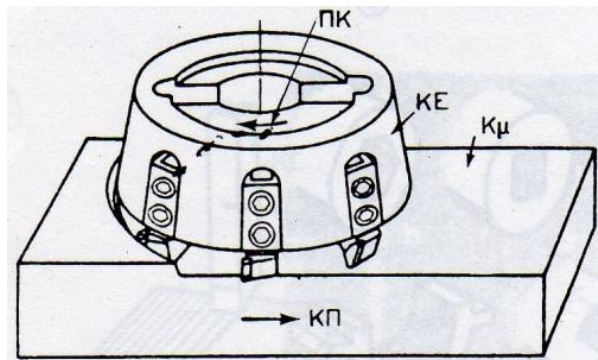
Η φρέζα, ανάλογα με την διάταξη του εργαλειοφόρου άξονα, μπορεί να εκτελέσει τα παρακάτω είδη φρεζαρίσματος:

- **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

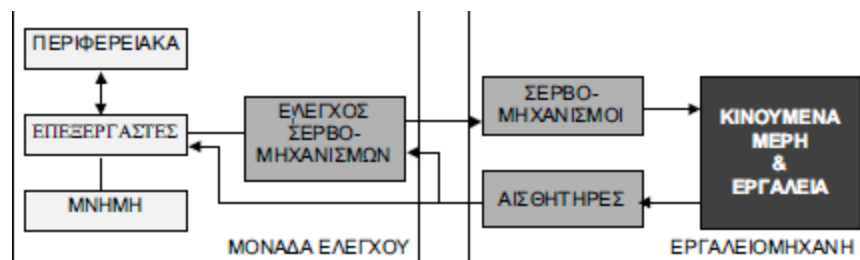
Αριθμητικός έλεγχος εργαλειομηχανών είναι ο τύπος ελέγχου που χρησιμοποιεί αριθμητικές τιμές για την αναφορά στη θέση και την κίνηση των αξόνων της μηχανής, για τον ορισμό εργαλείων, στροφών ατράκτου κ.α. Η έννοια 'άξονας μηχανής' αναφέρεται σε ένα κινηματικό άξονα που αντιστοιχεί συνήθως σε γραμμική κίνηση, όπως η πρόωση του τραπέζιου 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 H/Y (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 λειτουργικότητα 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.

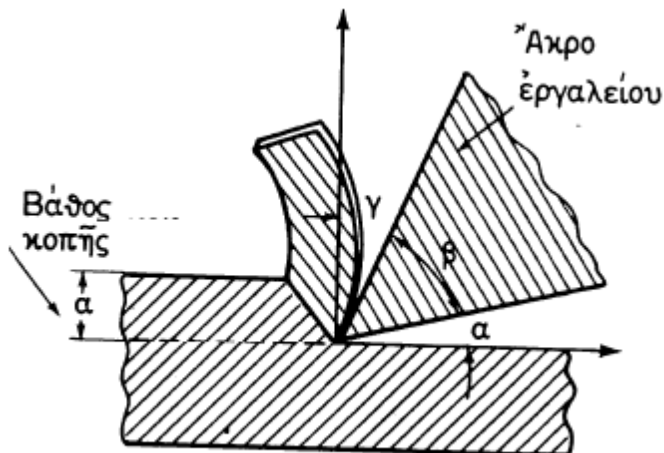
Η ορθογωνική κοπή υλοποιείται στην πράξη σε ειδικές περιπτώσεις, όπως στο πλάνισμα, στην τόννευση με εργαλείο «σχισίματος» κλπ. Η γενική περίπτωση είναι η λοξή κοπή.

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:

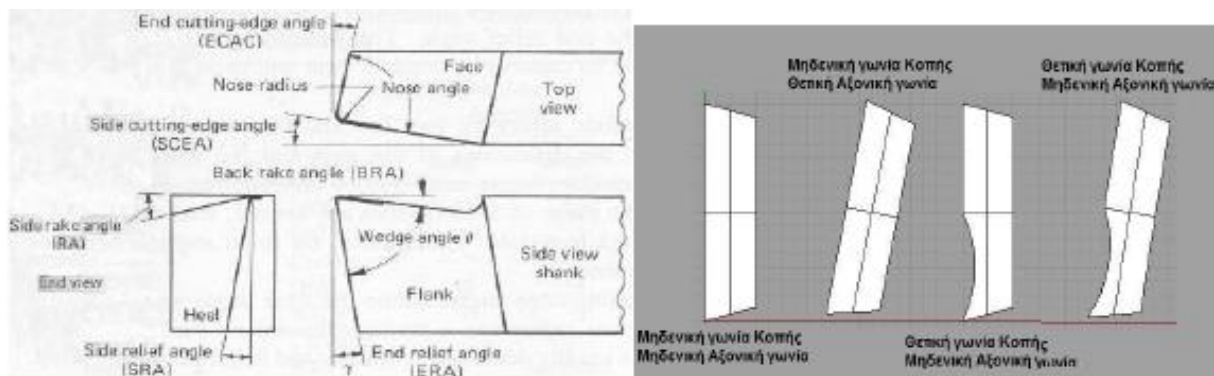
$$\alpha + \beta + \gamma = \pi/2$$



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 ρολό 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 βάφονται 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 ταχυχαλύβων :

- 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 ταχυχαλύβων.

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»

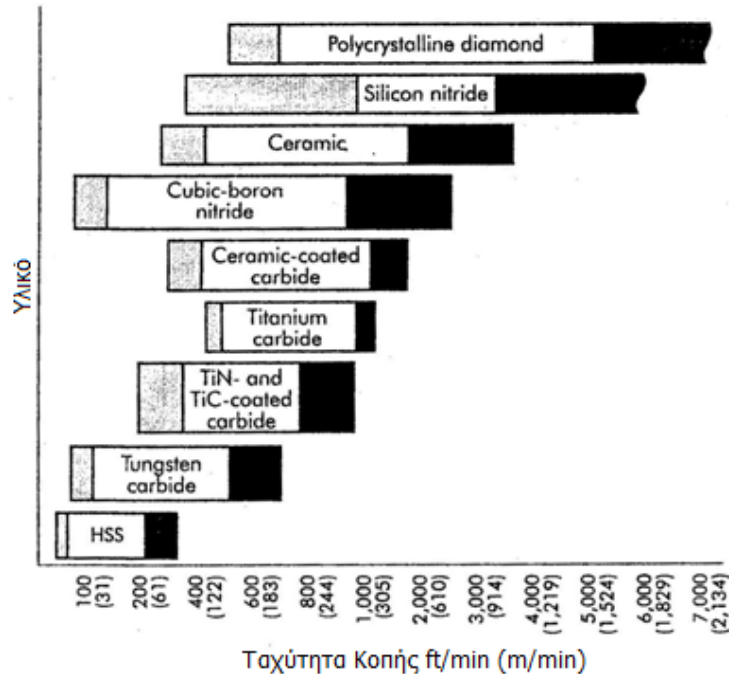
φορτίσεις και επίστρωμα πολυκρυσταλλικού CBN, που δίνει αντοχή στη φθορά και σκληρότητα. Είναι χημικά αδρανές υλικό ως προς τον σίδηρο και το νικέλιο σε υψηλές θερμοκρασίες, αντίθετα με το διαμάντι. Έχει επίσης αντοχή στην οξείδωση. Είναι, λοιπόν, κατάλληλο για κοπή σκληρομένων σιδηρούχων και υψηλής 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:



- Περιστασιακή Χρήση
 - Τυπική Χρήση
 - Μέγιστη ταχύτητα συνήθως για μη μεταλλικά υλικά
- HSS: Ταχυχάλυβες
TiC: Καρβύδιο Τιτανίου
TiN: Νιτρίδιο Τιτανίου

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.

2.5 Απόβλητα/Γρέζια

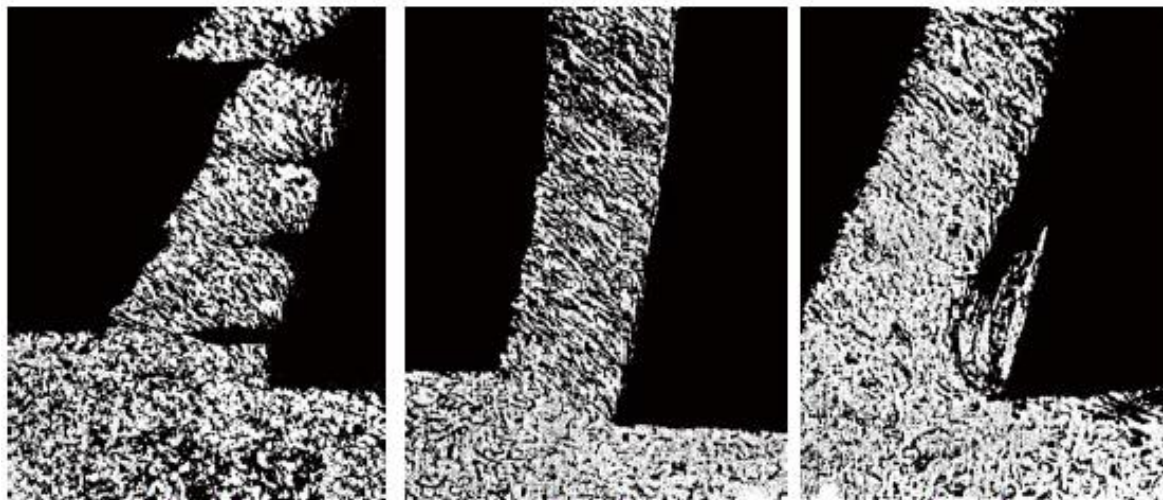
2.5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά και Είδη Αποβλήτου

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 βγάλουμε 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

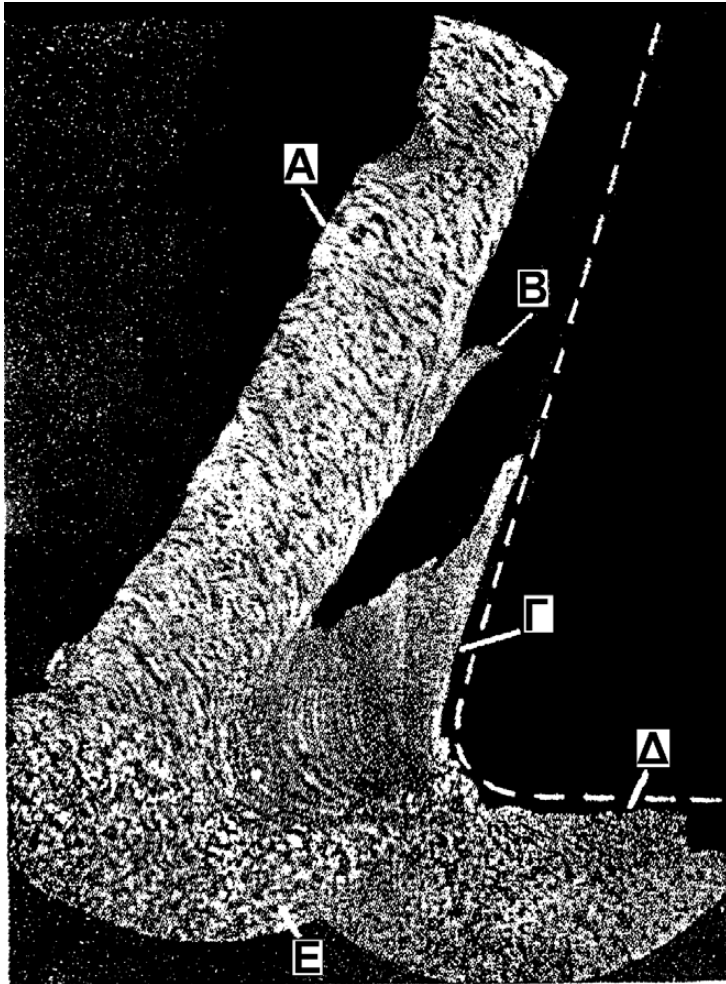


Ασυνεχές απόβλητο

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 EM-KE-TE, 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.

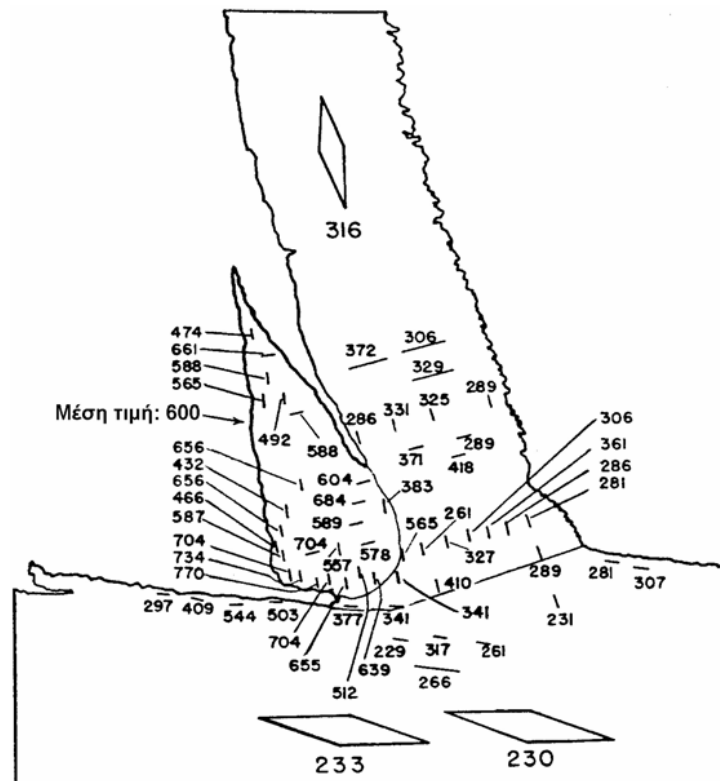
Χαρακτηριστικά του συνεχούς αποβλήτου

- 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, προσφύομενα 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 κρισίμου 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.

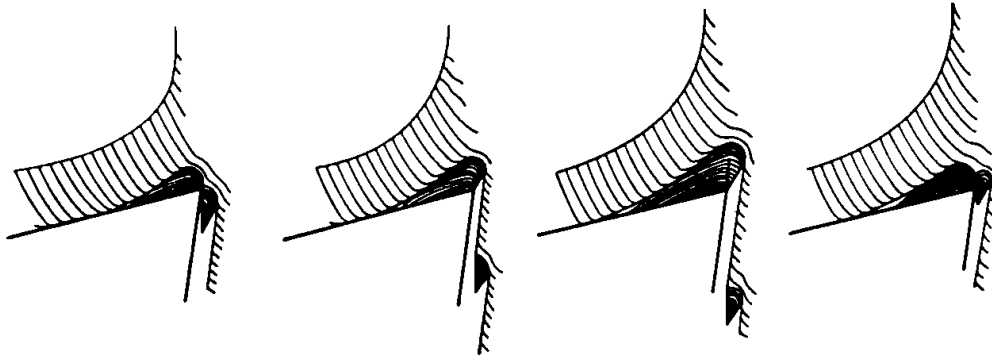


ΣΧΗΜΑ 2.18 Κατανομή της σκληρότητας στα διάφορα τμήματα του ΤΕ και αποβλήτου κατά τον σχηματισμό συνεχούς αποβλήτου με ψευδοακμή

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.



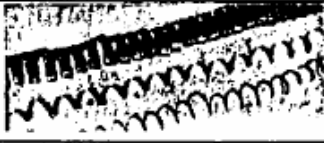


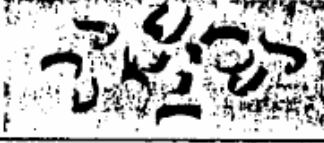
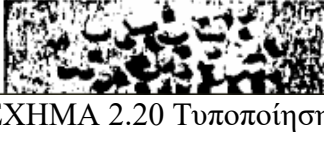
Σχετικά με τον σχηματισμό της ψευδοακμής μπορούμε να διατυπώσουμε τον γενικό κανόνα ότι το μέγεθός της μειώνεται:

- 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 2.19 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. 2.20). 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	Ονομασία
1		Ταινιοειδές ευθύ
2		Ταινιοειδές άτακτο
3		Ελικοειδές
4		Ελικοειδές τεμαχισμένο
5		Σπειροειδές τεμαχισμένο
6		Τεμάχια σπειροειδούς
7		Τεμαχίδια αποβλήτου

ΣΧΗΜΑ 2.20 Τυποποίηση αποβλήτου

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

2.5.2 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, $A_2 = b \cdot t_2$

2.6 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.

2.7 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. Σε αυτήν την παράγραφο είναι σημαντικό να αναφέρουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των παραπάνω συνθηκών στην κάθε κατεργασία.

2.7.1 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.

2.7.2 Φρεζάρισμα

Το φρεζάρισμα είναι κατεργασία κοπής, κατά την οποία αφαιρείται υλικό από το κομμάτι υπό μορφή μεμονωμένων αποβλήτων. Το κοπτικό εργαλείο, που ονομάζεται κοπήρας ή φρέζα, έχει πολλές κύριες κόψεις οι οποίες διαμορφώνονται στα δόντια που φέρει περιφερειακά ή περιφερειακά και μετωπικά ο κοπήρας. 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, αλλά μόνο επί ορισμένο μέρος της περιόδου κίνησης της φρέζας, που αντιστοιχεί σε ορισμένη γωνία περιστροφής.

Το φρεζάρισμα διακρίνεται σε:

- **Περιφερειακό** και
- **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 (up milling) και
- Το ομόρροπο φρεζάρισμα (down milling)



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.

2.7.3 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 συγκεκριμένους 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.

3. Το λογισμικό LS-DYNA

3.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλαδή μέθοδος υπολογισμού με χρήση H/Y) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Ρέι Κλαφ, ο Βάλτερ Ριτζ, ο Μπόρις Γκαλέρκιν και άλλοι.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα **πρόγραμμα CAD** και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται **pre processor**.
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται **solver** και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται **post processor**, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

3.2 Αναλυτικά για το Λογισμικό LS-DYNA

Το LS-DYNA είναι ένα προηγμένο πακέτο λογισμικού προσομοίωσης πολλαπλών χρήσεων που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Ενώ το πακέτο εξακολουθεί να περιέχει όλο και περισσότερες δυνατότητες για τον υπολογισμό πολλών σύνθετων προβλημάτων του πραγματικού κόσμου, η προέλευσή του και η βασική του ικανότητα έγκεινται στην εξαιρετικά μη γραμμική μεταβατική δυναμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) χρησιμοποιώντας ρητή ενσωμάτωση χρόνου. Το LS-DYNA χρησιμοποιείται από τους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, των κατασκευών, της στρατιωτικής βιομηχανίας και της βιοτεχνολογίας κ.α.

Το LS-DYNA προέρχεται από το πρόγραμμα 3D FEA DYNA3D, που αναπτύχθηκε από τον Dr. John O. Hallquist στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore (LLNL) το 1976. Το DYNA3D δημιουργήθηκε για να προσομοιώνει την επίδραση της πλήρους πυρηνικής βόμβας (FUFO) ή της πυρηνικής βόμβας "Dial-a-yield" για απελευθέρωση χαμηλού υψομέτρου (ταχύτητα πρόσκρουσης ~ 40 m/s). Τότε, δεν ήταν διαθέσιμο λογισμικό 3D για προσομοίωση κρούσης και το λογισμικό 2D ήταν ανεπαρκές. Αν και η βόμβα FUFO τελικά ακυρώθηκε, η ανάπτυξη του DYNA3D συνεχίστηκε. Το DYNA3D χρησιμοποίησε ρητή ενσωμάτωση χρόνου για να μελετήσει μη γραμμικά δυναμικά προβλήματα, με τις πρωτότυπες εφαρμογές να είναι κατά κύριο λόγο η ανάλυση της πίεσης των δομών που υφίστανται διάφορους τύπους επιπτώσεων. Το πρόγραμμα ήταν αρχικά πολύ απλό, κυρίως λόγω της έλλειψης επαρκών υπολογιστικών πόρων την εποχή εκείνη. Μια διδιάστατη έκδοση του ίδιου λογισμικού αναπτύχθηκε ταυτόχρονα. Το 1978 ο πηγαίος κώδικας DYNA3D κυκλοφόρησε χωρίς περιορισμούς μετά από αίτημα της Γαλλίας.

4. 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 - OVAP). Η μέθοδος αυτή μπορεί να ήταν ευρέως διαδεδομένη αλλά δεν ήταν καθόλου αποτελεσματική αφού απαιτούσε πολύ χρόνο, πράγμα που σήμαινε και την 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 στους επιστημονικούς κύκλους - 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) Στη συνέχεια 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.

5. Πειραματική και Υπολογιστική Διαδικασία

5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης εργαστηρίου

Σκοπός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν να υπολογιστούν οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται στο μεταξύ εργαλείου και κατεργαζόμενο τεμαχίου κατά το περιφερειακό φρεζάρισμα κραμάτων τιτανίου για τις διάφορες συνθήκες κοπής. 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 5.1).

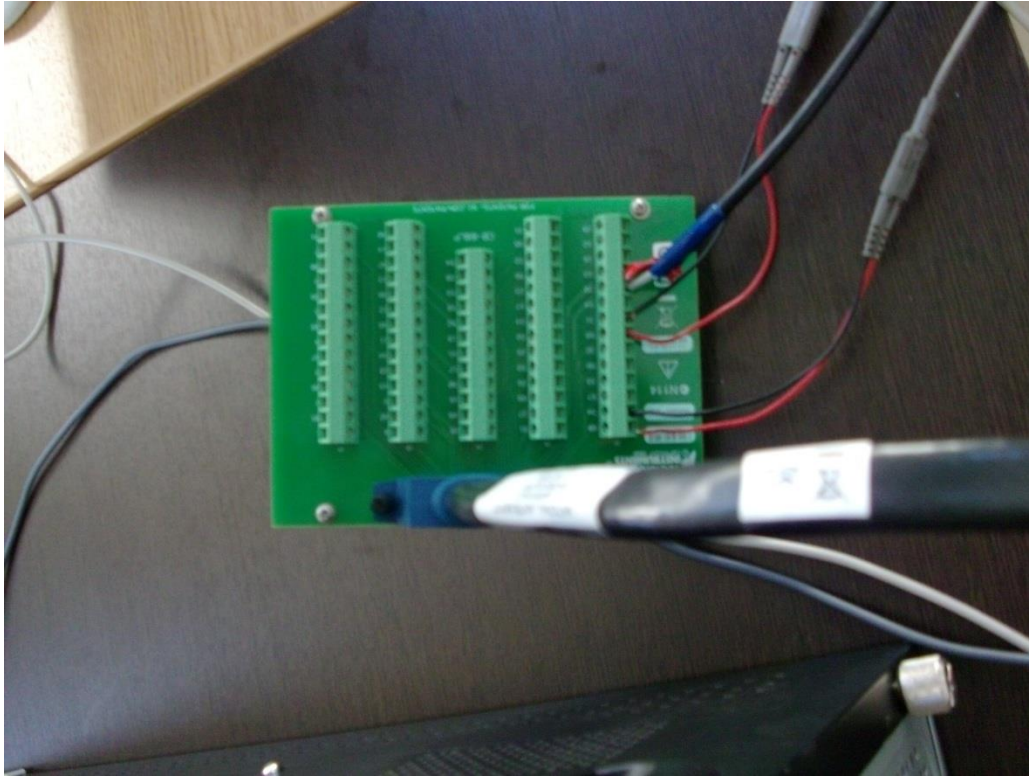


ΣΧΗΜΑ 5.1 Η διάταξη δυναμόμετρου που χρησιμοποιήθηκε

Το δυναμόμετρο είχε συνδεθεί με το κατεργαζόμενο τεμάχιο στην ειδική βάση, όπως φαίνεται στην αριστερή φωτογραφία του σχήματος 5.1. Στη συνέχεια το δυναμόμετρο συνδέθηκε με τους δύο ενισχυτές (δεξιά φωτογραφία του σχήματος 5.1). Η διάταξη αυτή (το δυναμόμετρο και οι δύο ενισχυτές) συνδέθηκαν κατάλληλα πάνω σε μία ειδική μετρητική κάρτα (βλέπε Σχήμα 5.2). Η μετρητική κάρτα με την σειρά της συνδέθηκε σε θύρα του Η/Υ του εργαστηρίου (βλέπε Σχήματα 5.3 και 5.4). Στον Η/Υ είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Labview, το οποίο έχει την δυνατότητα να παίρνει τις μετρήσεις που στέλνει το δυναμόμετρο στον Η/Υ και στην συνέχεια να εκτελεί τις εξής ενέργειες:

- Να παρουσιάζει τα γραφήματα των δυνάμεων σε κατάλληλους άξονες που εμείς έχουμε επιλέξει (βλέπε Σχήμα 5.5)
- Να αποθηκεύει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνει το δυναμόμετρο σε αρχείο .txt, σε φάκελο της επιλογής μας. 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 χαρτί, κάνοντας την ανάγνωση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία.



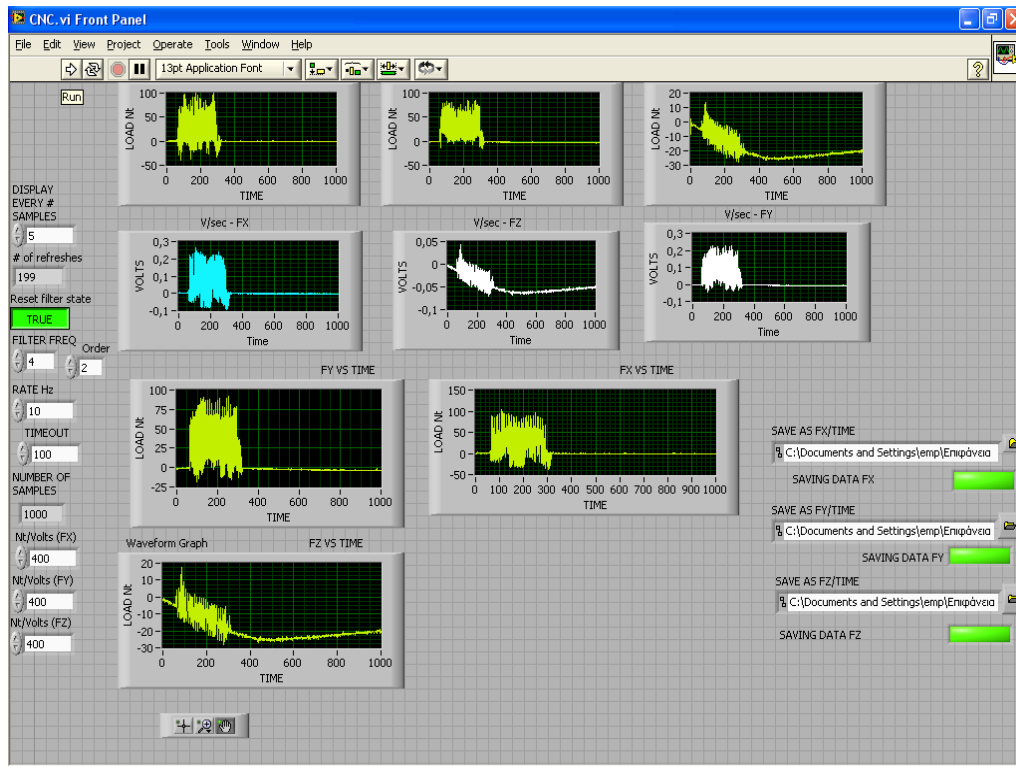
ΣΧΗΜΑ 5.2 Η μετρητική κάρτα στην οποία συνδέθηκε η διάταξη δυναμόμετρου (δυναμόμετρο και ενισχυτές)



ΣΧΗΜΑ 5.3 Σύνδεση των δύο ενισχυτών με την μετρητική κάρτα και με τον Η/Υ



ΣΧΗΜΑ 5.4 Ο Η/Υ που είχε συνδεθεί με τη διάταξη δυναμόμετρου



ΣΧΗΜΑ 5.5 Τα γραφήματα όπως φαίνονται στην οθόνη του Η/Υ κατά την διάρκεια των πειραμάτων (πρόγραμμα Labview)

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Υλικών και πραγματοποιήθηκαν κοπές περιφερειακού φρεζαρίσματος. Οι συνθήκες κοπής εισήχθησαν με ακρίβεια στην εργαλειομηχανή CNC με κατάλληλη πληκτρολόγηση τους στον πίνακα ελέγχου (Σχήμα 5.6). Ο G-Code, δηλαδή ο κώδικας, που εισάγαμε και χρησιμοποιήσαμε στην φρέζα CNC, έτσι ώστε να εκτελέσουμε την πρώτη κοπή φρεζαρίσματος, είναι ο ακόλουθος:

- > **N10 G92 G21** (ορισμός μετρητικών συντεταγμένων)
- > **N20 M03 S1000** (εκκίνηση ατράκτου ωρολογιακά, ορισμός ταχύτητας περιστροφής ατράκτου)
- > **N30 G00 X-50 Y30 Z0** (ταχεία εκκίνηση στα σημεία X=-5, Y=30, Z=0)
- > **N40 G01 Z-5.4 F100** (γραμμική κίνηση στο σημείο Z= -5.4, ορισμός ταχύτητας πρόωσης)
- > **N50 G01 Y-30** (γραμμική κίνηση στο σημείο Y= -30)
- > **N60 G01 Z-50** (γραμμική κίνηση στο σημείο Z= -50)
- > **N70 G00 Z200** (ταχεία εκκίνηση στο σημείο Z=200)
- > **N80 M30** (τέλος προγράμματος και προετοιμασία επανεκτέλεσης)

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



ΣΧΗΜΑ 5.6 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 5.7) με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής 7000 rpm. Η μέγιστη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα που είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του εργαλείου είναι 15 HP (11 KW), ενώ η πρόωση δίνεται από κινητήρα μέγιστης ισχύος 4 έως 5.3 HP (3 έως 4 KW) για τις διευθύνσεις X,Y και Z αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 5.7 Η φρέζα CNC που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματα

Για να μελετήσουμε τις κοπές περιφερειακού φρεζαρίσματος, που απαιτούνταν για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήσαμε δύο κυλινδρικά τεμάχια Τιτανίου Ti-6Al-4V αρχικής διαμέτρου 50mm και μήκους 30mm το καθένα.

5.2 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 τórνευση. 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 ⁻³
Πίεση υγρού σε m.p.	4.11 g*cm ⁻³
Σημείο τήξης	1941K (1668° C, 3034° F)
Σημείο βρασμού	3560 K (3287° C, 5949° F)
Θερμότητα τήξης	14.15 kJ*mol ⁻¹
Θερμότητα εξάτμισης	425 kJ*mol ⁻¹
Θερμοχωρητικότητα	(25° C)25.060 J*mol ⁻¹ *K ⁻¹
Μαγνητική ικανότητα	Παραμαγνητικό
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	(20° C) 0.420 μΩ*m
Θερμική αγωγιμότητα	(300K) 21.9W*m ⁻¹ *K ⁻¹
Θερμική διαστολή	(25° C) 8.6μm*m ⁻¹ *K ⁻¹
Ταχύτητα ήχου	(r.t.) 5090m*s ⁻¹
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 περιφερειακού 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 είδαμε και σε προηγούμενη 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 LS-DYNA.

5.3 Η Πειραματική Διαδικασία Περιφερειακού Φρεζαρίσματος

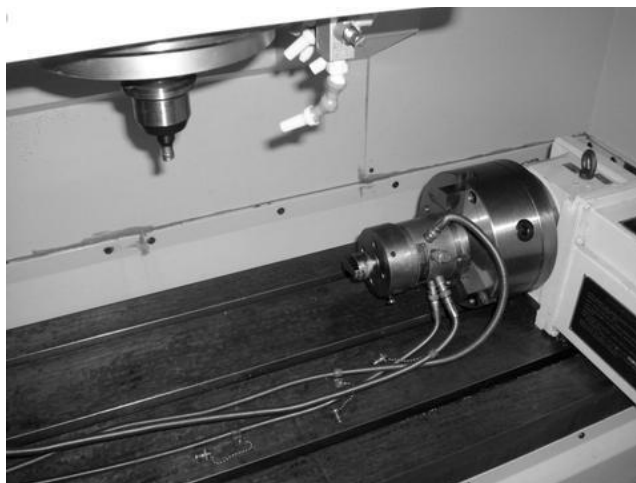
Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Κατεργασιών εννέα πειράματα περιφερειακού φρεζαρίσματος. Το τεμάχιο μας αποκόπηκε από τη συνολική ράβδο και στο χειροκίνητο τόρνο πραγματοποιήθηκε το φινίρισμά του. Λόγω της ανάγκης για συγκράτηση πάνω στη κυλινδρική εσοχή του δυναμόμετρου χρειάστηκε εισαγωγή στο τεμάχιο μέσω σφήνας ενός κυλινδρικού υποδοχέα με διαστάσεις ίδιες με αυτές της υποδοχής του δυναμόμετρου. Αυτό το γεγονός μείωσε την ακτίνα του υλικού μας από το τεμάχιο και σε συνδυασμό με κάποιες δοκιμαστικές κοπές που πραγματοποιήθηκαν μας ανάγκασε να αλλάξουμε τον αρχικό σχεδιασμό για την κατεργασία υπό το φόβο ότι πιθανόν να μην πραγματοποιηθούν όλα τα πειράματα. Συγκεκριμένα κατεργαστήκαμε στη φρέζα το τεμάχιο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αφαιρεθούν δυο ημικύκλια δεξιά και αριστερά από την κεντρική επιφάνεια και στη συνέχεια, μετά την τοποθέτηση του δυναμόμετρου κάθετα στην τράπεζα της εργαλειομηχανής, να κατεργαστεί αυτή η εσωτερική επιφάνεια περιφερειακά εξασφαλίζοντας ότι θα πραγματοποιηθούν όλα τα πειράματα (Σχήματα 5.8 και 5.9).



ΣΧΗΜΑ 5.8 και 5.9 Το κατεργαζόμενο τεμάχιο τιτανίου

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 περιφερειακό φρεζάρισμα τιτανίου. 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 5.10), απεικονίζονται διάφορα στιγμιότυπα των πειραμάτων μετωπικού φρεζαρίσματος που πραγματοποιήθηκαν στην CNC φρεζομηχανή.



ΣΧΗΜΑ 5.10 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 Περιφερειακού Φρεζαρίσματος

Ύστερα από προσεκτική μελέτη άλλων εργασιών πάνω στο περιφερειακό 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**

περιφερειακού φρεζαρίσματος τιτανίου. Γι' αυτό το λόγο, στον παραπάνω 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 5.11).



ΣΧΗΜΑ 5.11 Το εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για τις κοπές

Τα χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου είναι τα εξής:

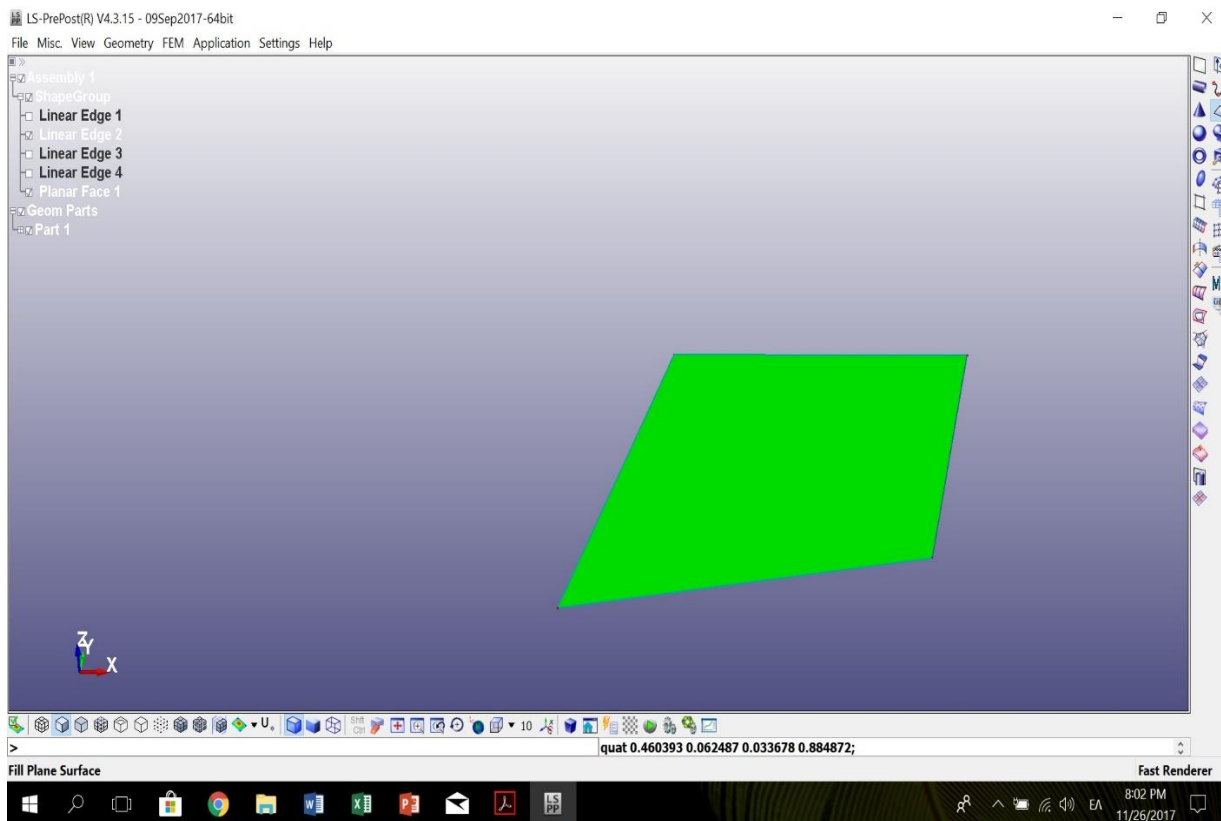
- Είναι το μοντέλο SVG 0598 της εταιρείας Clarkson- Osborn
- Έχει ακτίνα κοπής 6mm
- Έχει 3 ελικοειδή δόντια
- Είναι κατασκευασμένο από 95% χάλυβα και 5% κοβάλτιο
- Δεν έχει επένδυση/ επικάλυψη
- Έχει ακτίνα καμπυλότητας ακμής 0,04mm
- Έχει ακτίνα καμπυλότητας πλευράς 0,8mm

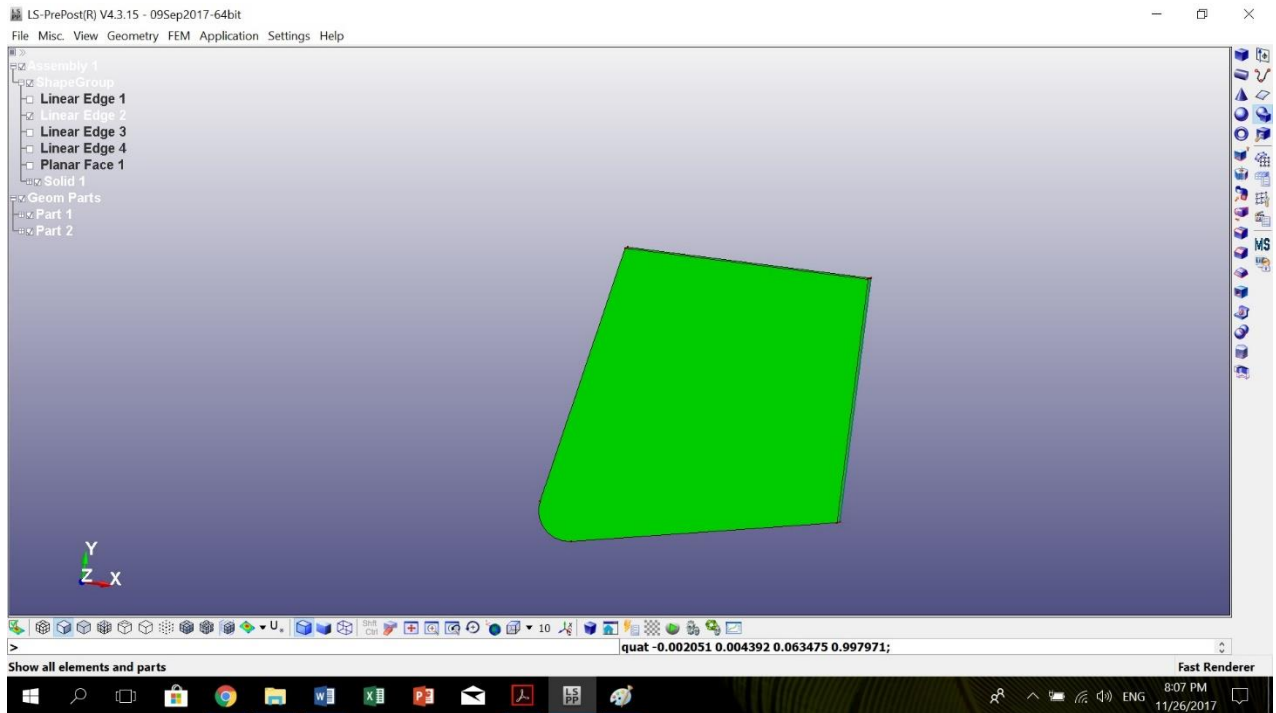
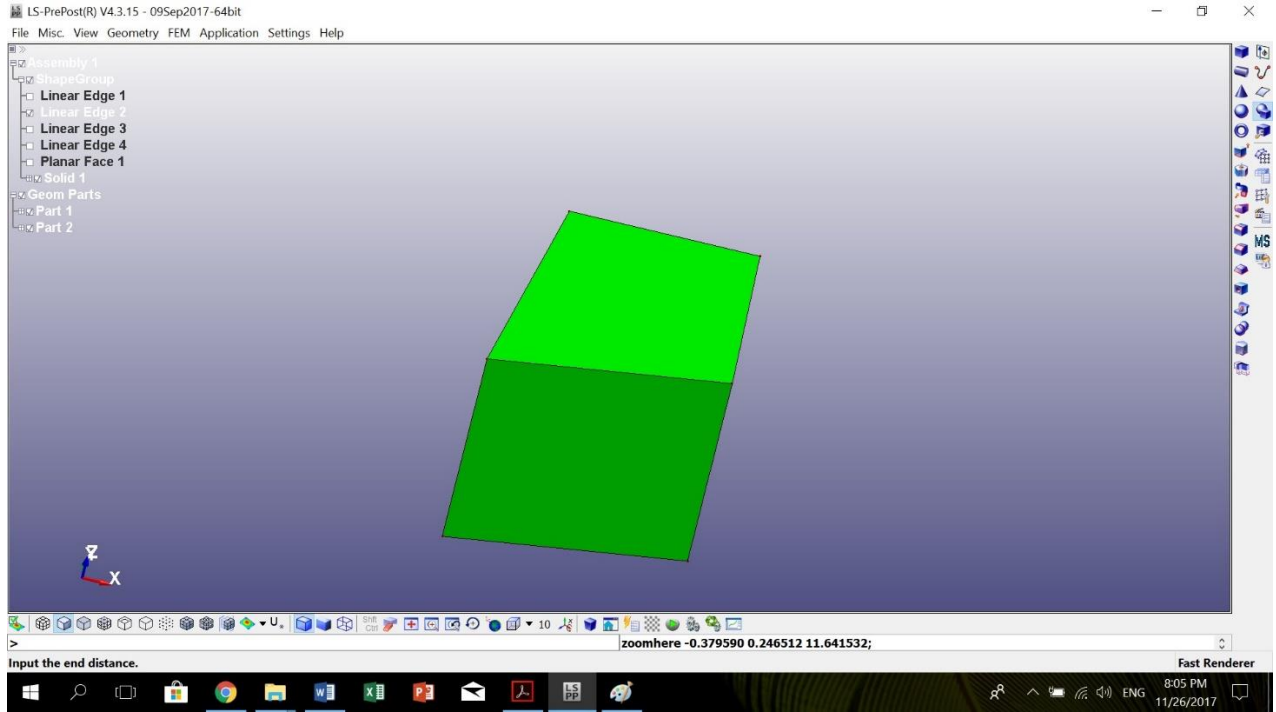
5.4 Η Προσομοίωση στο LS-DYNA

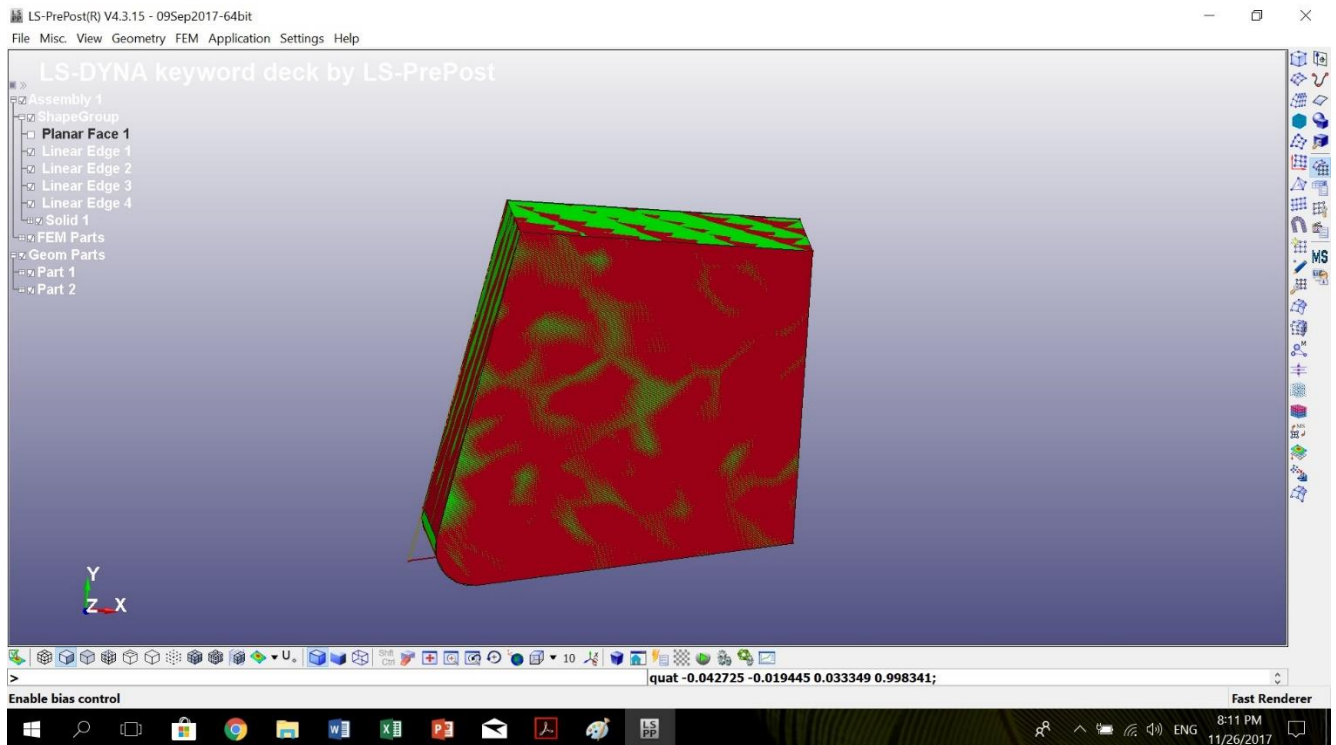
Ο σχεδιασμός των υπολογιστικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία έγινε με την βοήθεια του προ-επεξεργαστή LS-PrePost. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 4.3, η οποία και διατίθεται δωρεάν στην επίσημη ιστοσελίδα της εταιρίας LSTC.

Καθορισμός γεωμετρίας κοπτικού εργαλείου

Αρχικά σχεδιάσαμε το κοπτικό εργαλείο της κατεργασίας. Έτσι στην συντεταγμένη $z=0$ σχεδιάσαμε ένα συμπαγές εξάπλευρο. Το κοπτικό εργαλείο είναι απαραμόρφωτο και απλής γεωμετρίας και έτσι χρησιμοποιήθηκε διακριτοποίηση 10 πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της πλάκας 10 πεπερασμένα στοιχεία κατά πλάτος και 10 πεπερασμένα στοιχεία κατά ύψος, η οποία δεν θεωρείται πολύ πυκνή.

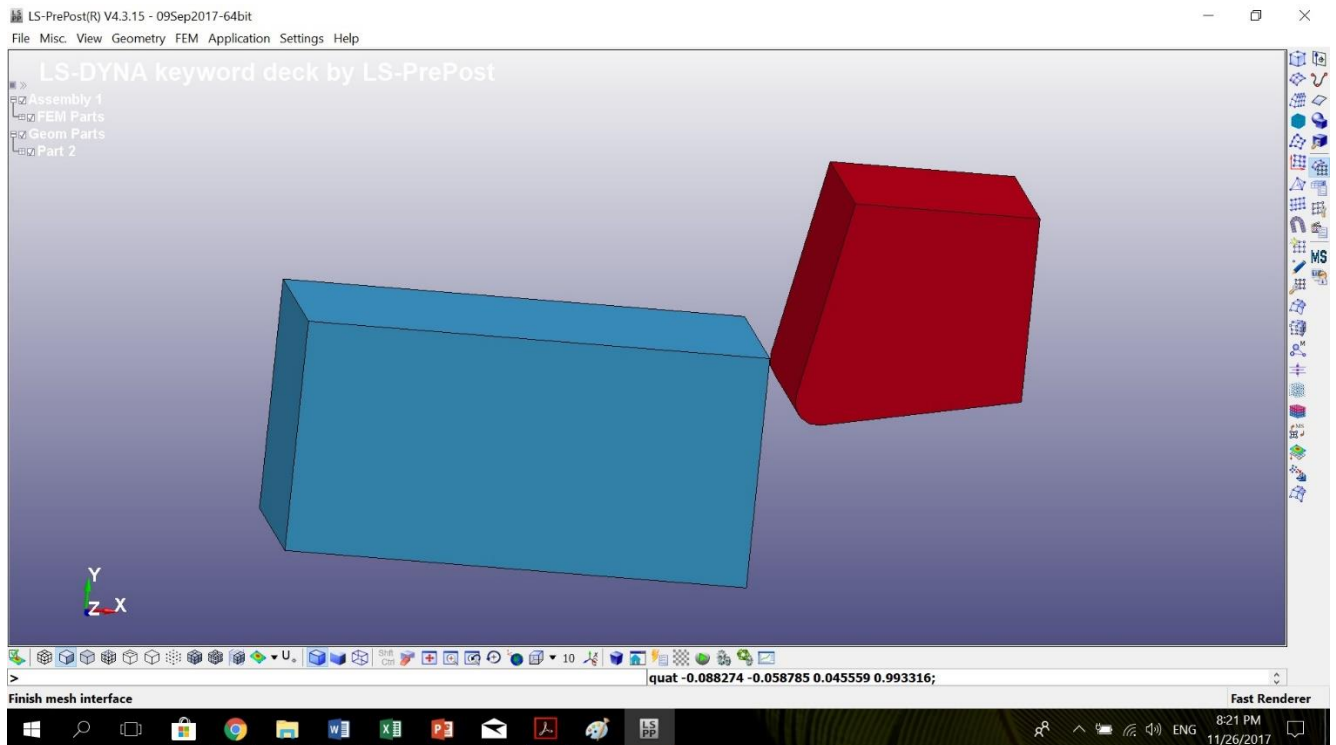






Καθορισμός γεωμετρίας τεμαχίου

Για την σχεδίαση των δοκιμών ως **Box_solid** επιλέχθηκε από το **SHAPE MESHER** η αντίστοιχη επιλογή. Στην συνέχεια δόθηκαν οι διαστάσεις του τεμαχίου. Έπειτα στις επιλογές **FEM, N-LINE MESHER, N-SIDE SURF** δηλώνονταν τα πεπερασμένα στοιχεία του τεμαχίου. Η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε εδώ αποφασίστηκε να είναι 2x2, δηλαδή οι διαστάσεις του κάθε πεπερασμένου στοιχείου να είναι 2mm x 2mm. Αυτή η διακριτοποίηση εξυπηρετούσε καλύτερα τις ανάγκες της εργασίας από την 1x1 που δοκιμάστηκε αρχικά, επειδή μείωσε κατά πολύ τους χρόνους προσομοίωσης και δεν επηρέασε την ακρίβεια της προσομοίωσης.



Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για καθένα από τα 9 πειράματα ξεχωριστά, ανάλογα με το βάθος κοπής που είχαμε σε κάθε εφαρμογή.

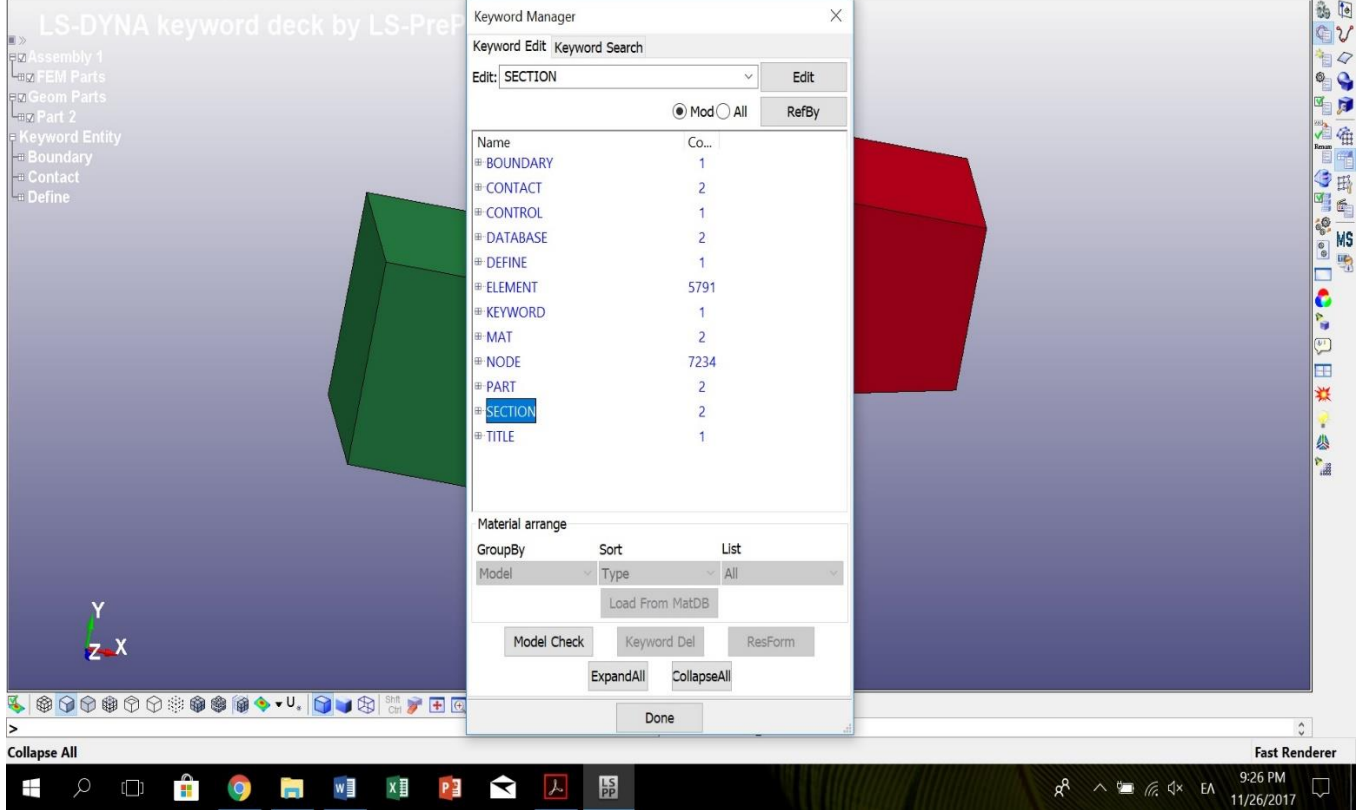
Keyword Manager

Μετά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας και της διακριτοποίησης των μοντέλων ο σχεδιασμός συνεχίζεται μέσω του **KEYWORD MANAGER**. Εκεί θα δηλώσουμε συνοριακές συνθήκες, τα υλικά, τα χαρακτηριστικά των υλικών, τις κινήσεις που γίνονται, τις ταχύτητες, τον χρόνο τερματισμού κλπ.

Ξεκινώντας από την επιλογή **SECTION**, δημιουργούμε δύο solid sections, ένα solid για το κοπτικό εργαλείο με **ELFORM=1**, και άλλο solid για το τεμάχιο με **ELFORM=2**. Έπειτα στην επιλογή **MAT** επιλέγουμε για το κοπτικό εργαλείο την καρτέλα **RIGID_no.20** και το αφήνουμε ελεύθερο να κινηθεί στον άξονα z. Για το παραμορφώσιμο υλικό επιλέγουμε την καρτέλα **PIECIEWISE_LINEAR_PLASTICITY_no.24** και συμπληρώνουμε τις τιμές του υλικού μας για πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, λόγο Poisson και όριο διαρροής στα αντίστοιχα πεδία. Συνεχίζοντας στην επιλογή **PART**, αντιστοιχούμε το κάθε γεωμετρικό σχήμα με το υλικό και το section του.

Τώρα, θα πρέπει να ορίσουμε τις επαφές που δημιουργούνται μεταξύ των σωμάτων. Αυτές είναι δύο ειδών, αρχικά πρέπει να οριστεί η επαφή του τεμαχίου με τον εαυτό του, έτσι ώστε κατά την κοπή το πρόγραμμα να πετυχαίνει καλύτερη προσομοίωση, και έπειτα η επαφή του τεμαχίου με το κοπτικό εργαλείο. Για την επαφή του τεμαχίου με τον εαυτό του επιλέγουμε την καρτέλα **AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE** στην οποία ορίζουμε το τεμάχιο ως slave part και συμπληρώνουμε τους συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής. Για τις επαφές του τεμαχίου με το κοπτικό εργαλείο επιλέγουμε την καρτέλα **NODES_TO_SURFACE** όπου ουσιαστικά δηλώνουμε πως η επιφάνεια του εργαλείου αλληλεπιδρά με τους κόμβους της αντίστοιχης πλευράς του τεμαχίου. Μέσα στην καρτέλα επιλέγουμε το τεμάχιο ως slave part και το εργαλείο ως master part και συμπληρώνουμε τους συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής.

Τέλος, μας μένει να ορίσουμε την ταχύτητα κίνησης του εργαλείου και να ορίσουμε τον χρόνο τερματισμού. Μέσω της καρτέλας **CONTROL, TERMINATION** ορίζουμε τον χρόνο τερματισμού. Από την καρτέλα **DEFINE_CURVE** ορίζουμε την ταχύτητα σταθερή και ίση ανάλογα με τα δεδομένα κάθε πειράματος. Από την καρτέλα **BOUNDARY_PRESRIBED_MOTION_RIGID** αναθέτουμε στο κοπτικό εργαλείο την αντίστοιχη ταχύτητα και ορίζουμε ως άξονα κίνησης τον z. Τελειώνοντας, από την καρτέλα **DATABASE** ορίζουμε το **BINARY_D3PLOT** ίσο με 1 ώστε η προσομοίωση να μας δίνει τιμές για κάθε 1 msec και το **RCFORC** ίσο με 0.1 ώστε η γραφική παράσταση φορτίου-χρόνου να έχει τις αντίστοιχες τιμές.



6. Αποτελέσματα

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

6.1 Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, λαμβάνονταν σε ψηφιακή μορφή με τη βοήθεια της διάταξης δυναμόμετρου και του Η/Υ 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.

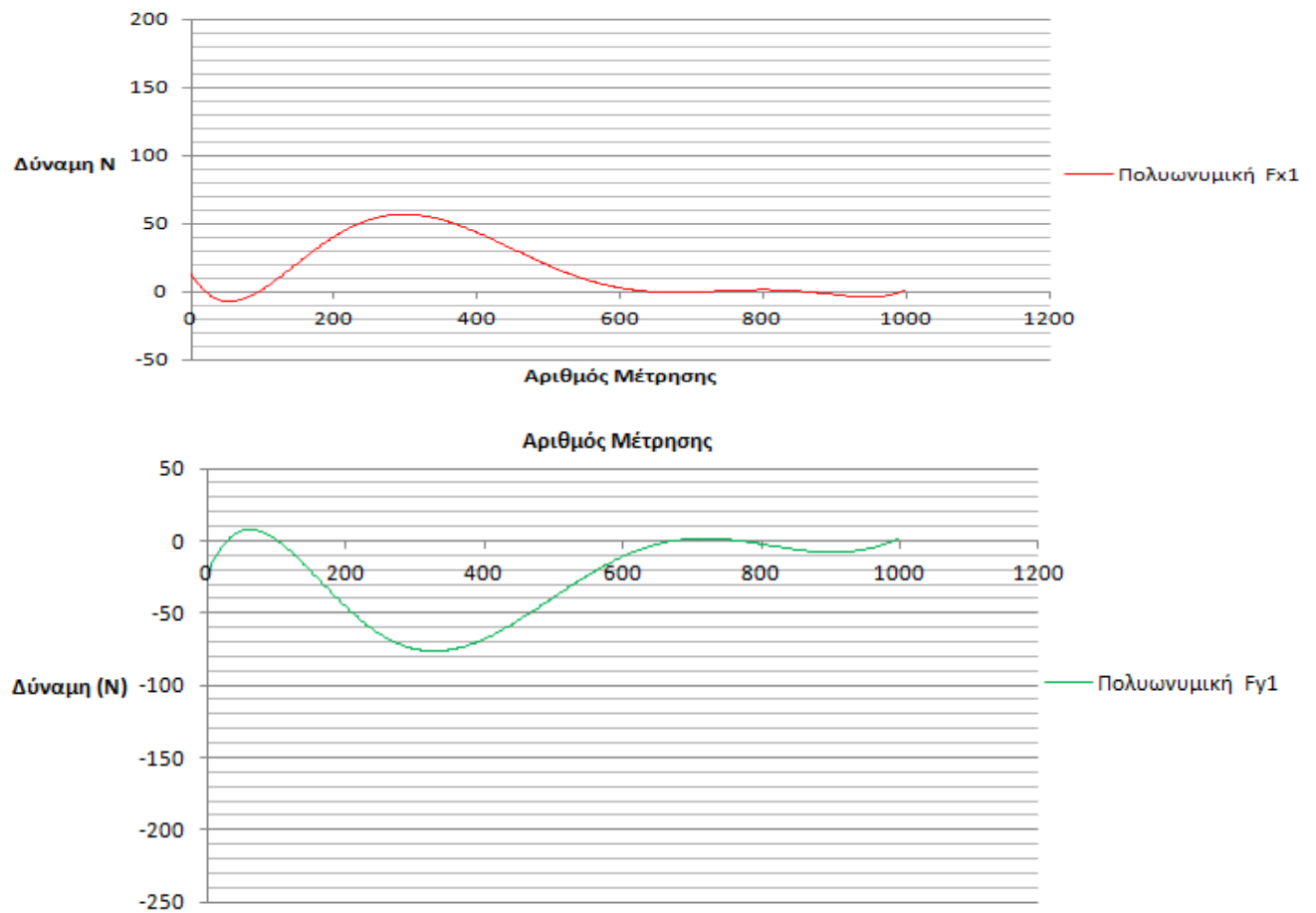
Ο πίνακας Taguchi, όπως διαμορφώθηκε με τις συνθήκες κοπής που επιλέξαμε, έχει την ακόλουθη μορφή:

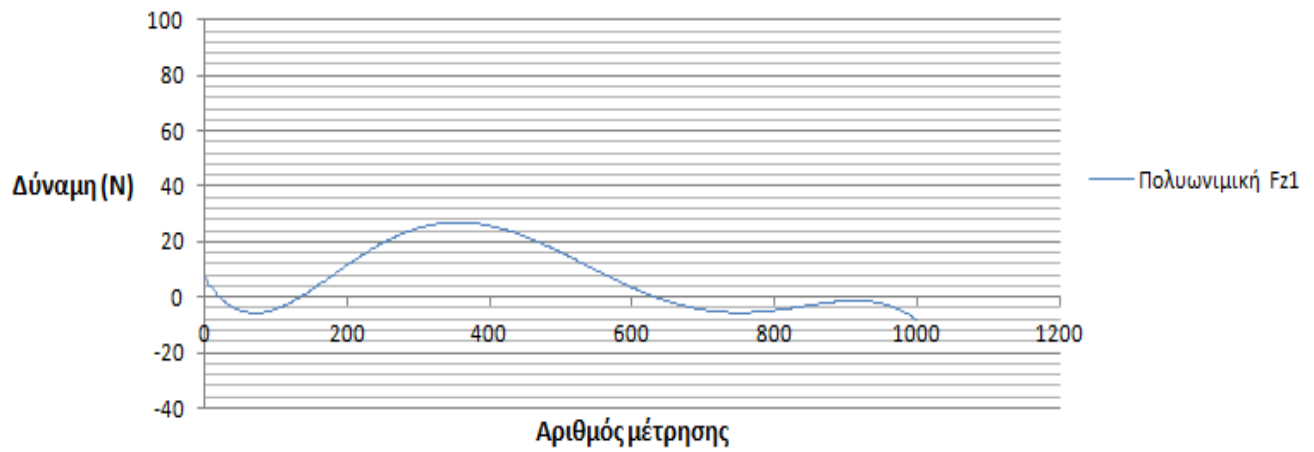
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΠΡΩΩΣΗ (mm/min)
1	0.3	700	75
2	0.3	850	100
3	0.3	1000	125
4	0.6	700	75
5	0.6	850	100
6	0.6	1000	125
7	0.9	700	75
8	0.9	850	100
9	0.9	1000	125

Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε κοπή ξεχωριστά. Όλες οι κοπές ήταν κοπές περιφερειακού φρεζαρίσματος και έγιναν με το ίδιο εργαλείο (παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο). 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:

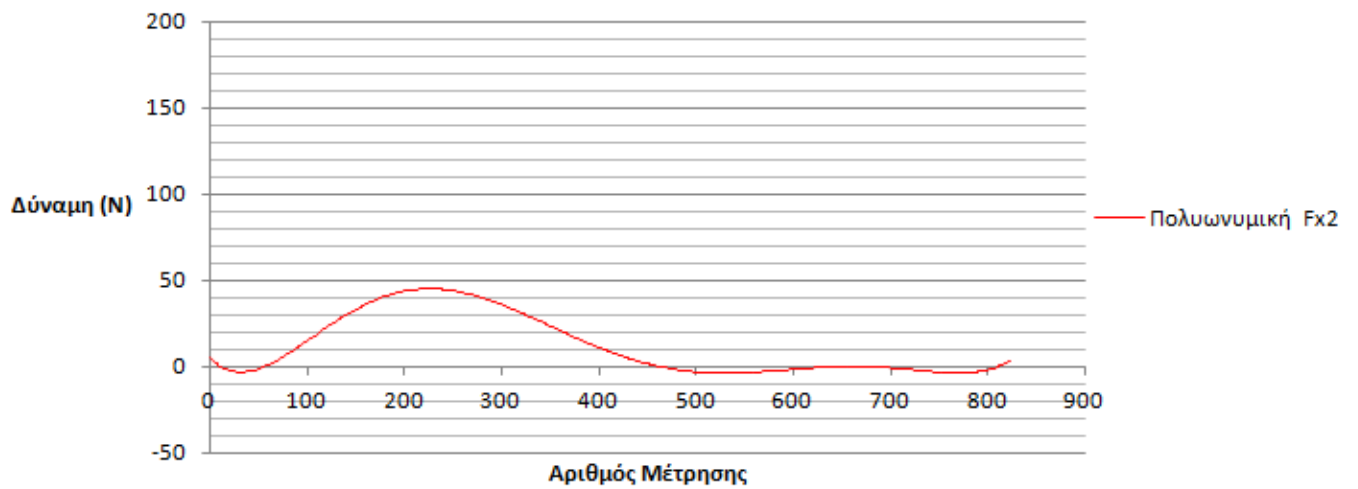
1^ο Πείραμα

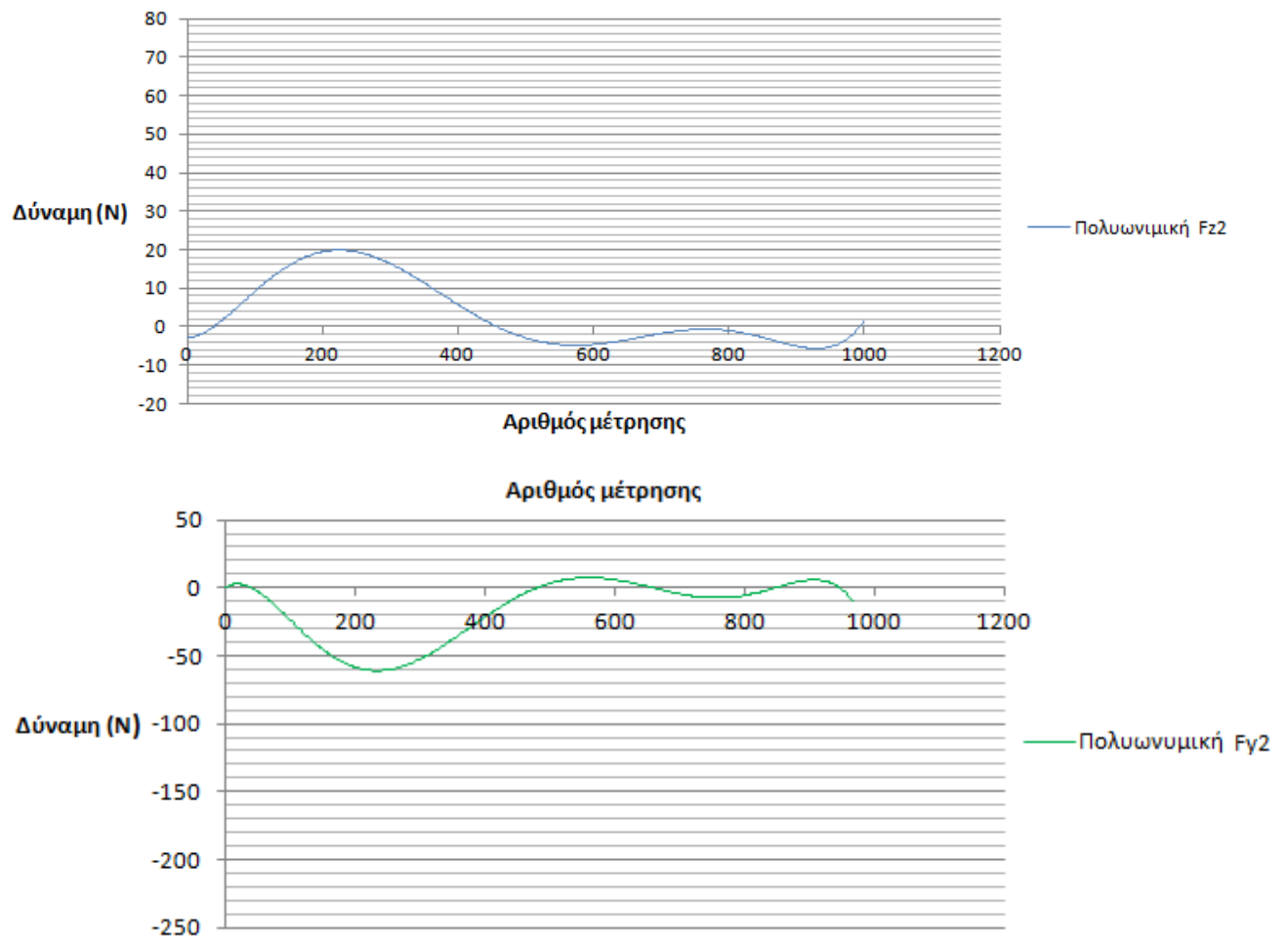




ΣΧΗΜΑ 6.1 Αποτελέσματα 1^ο πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
 Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=75mm/min

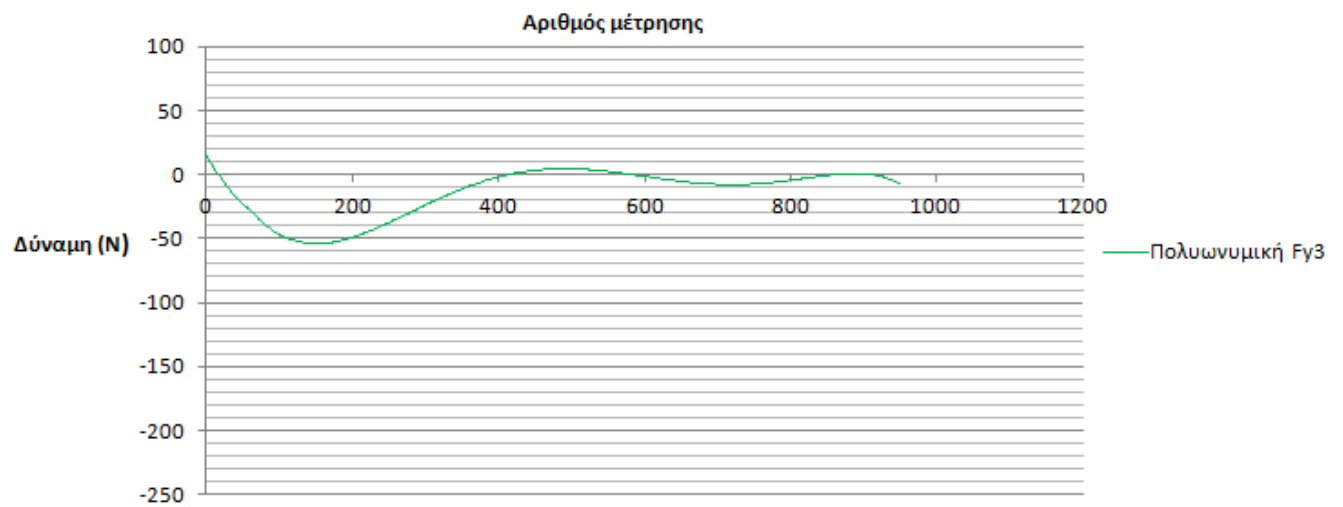
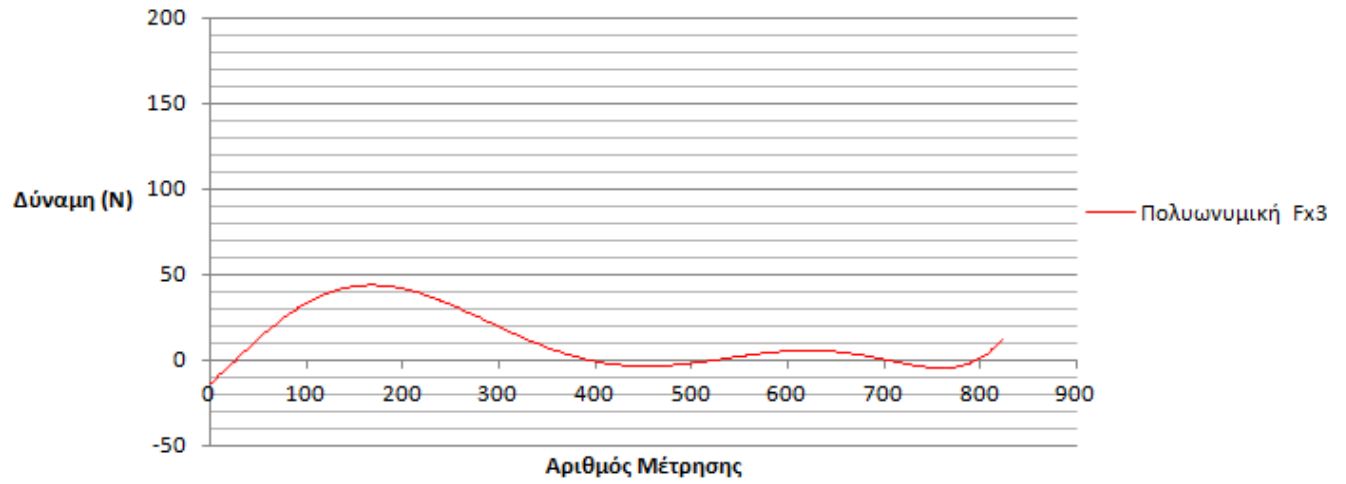
2^ο Πείραμα

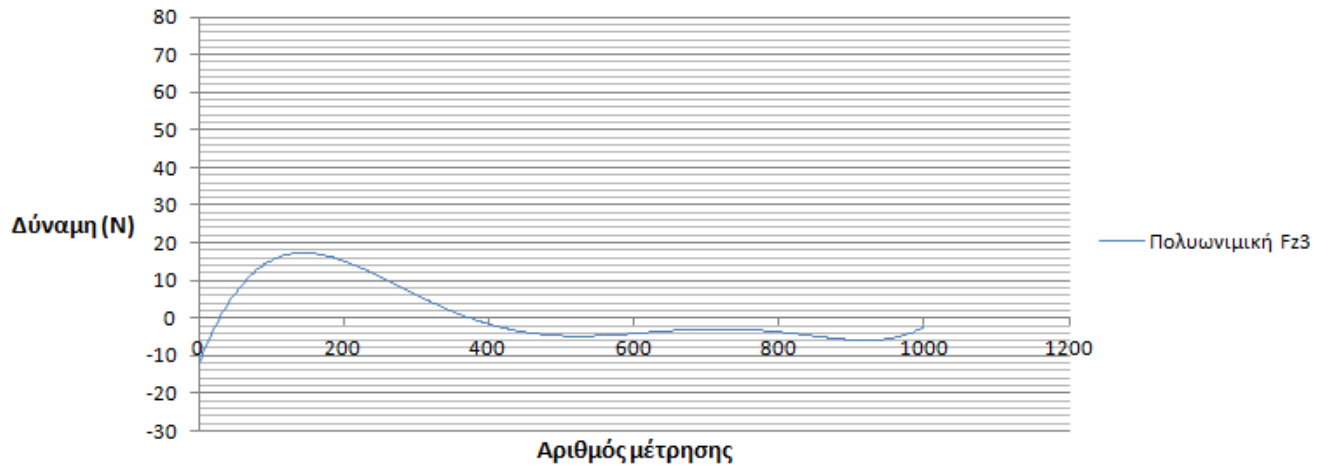




ΣΧΗΜΑ 6.2 Αποτελέσματα 2^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
 Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=100mm/min

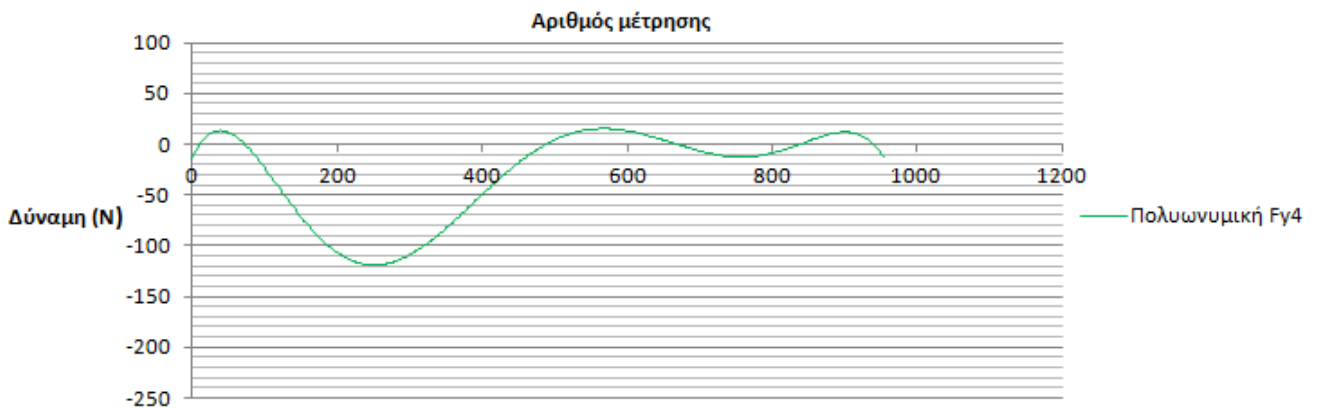
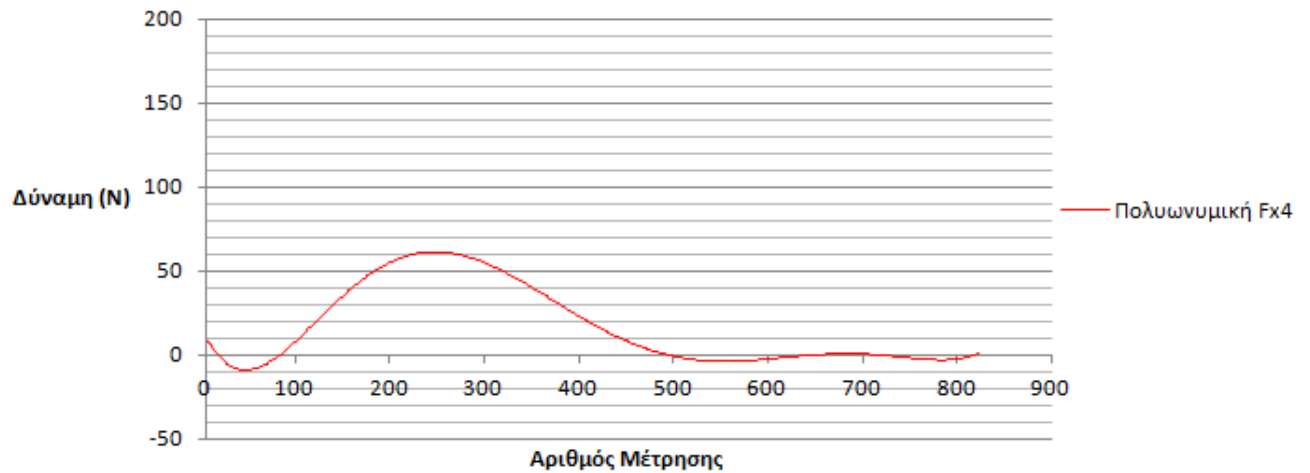
3^ο Πείραμα

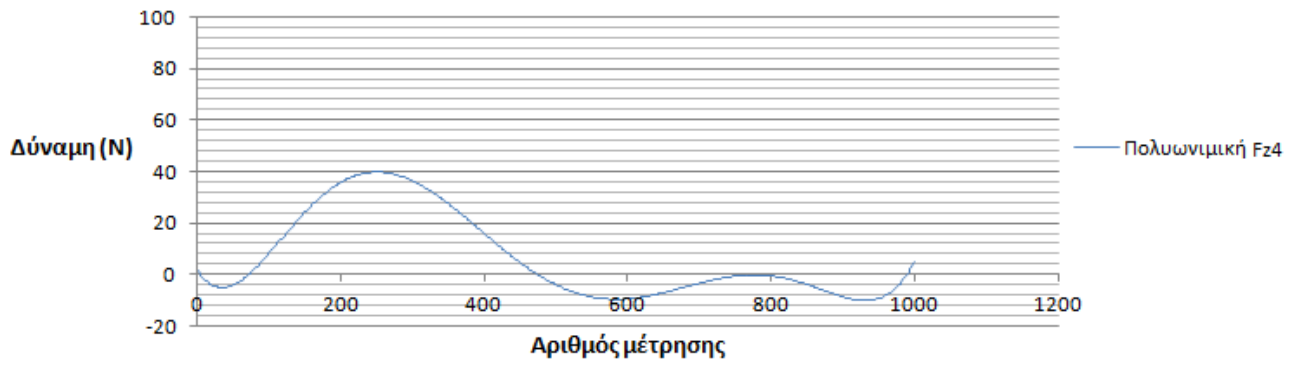




ΣΧΗΜΑ 6.3 Αποτελέσματα 3^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
 Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=125mm/min

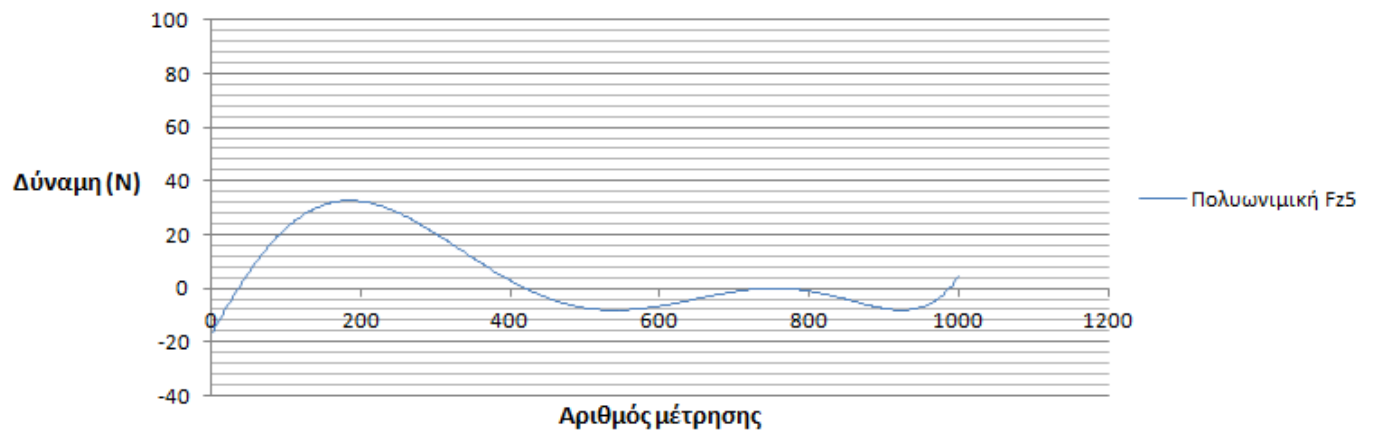
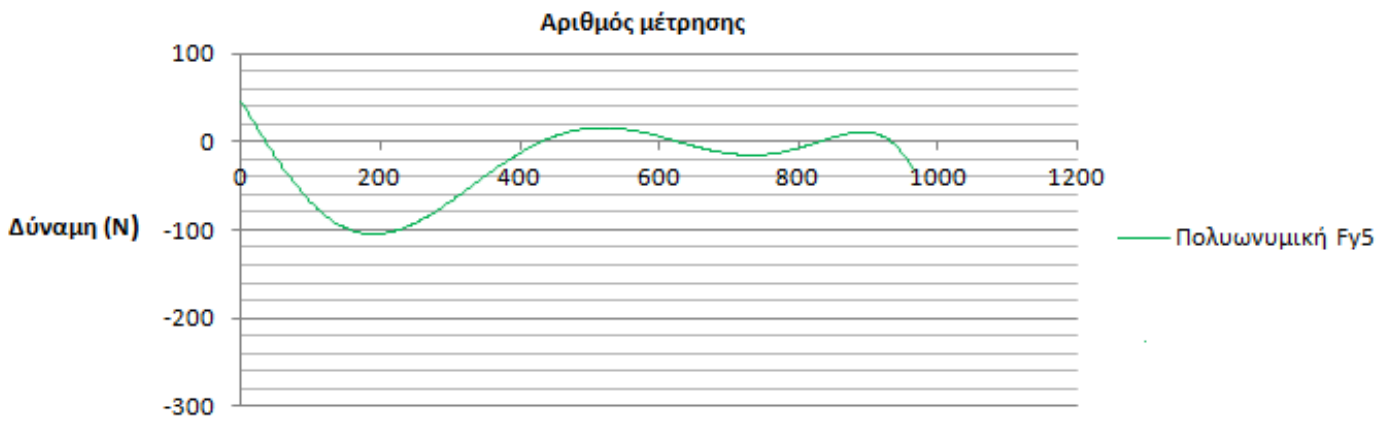
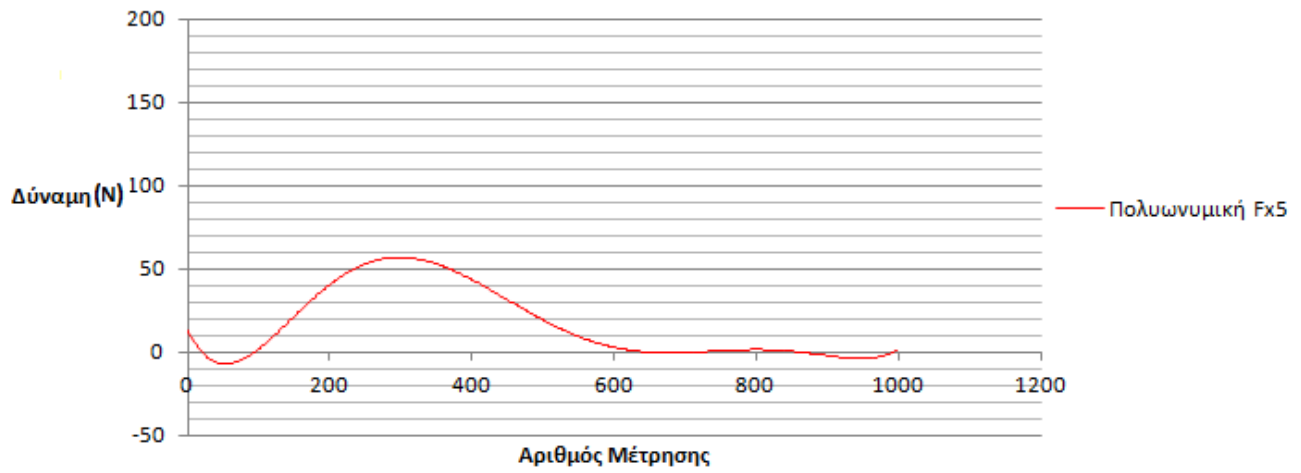
4^ο Πείραμα





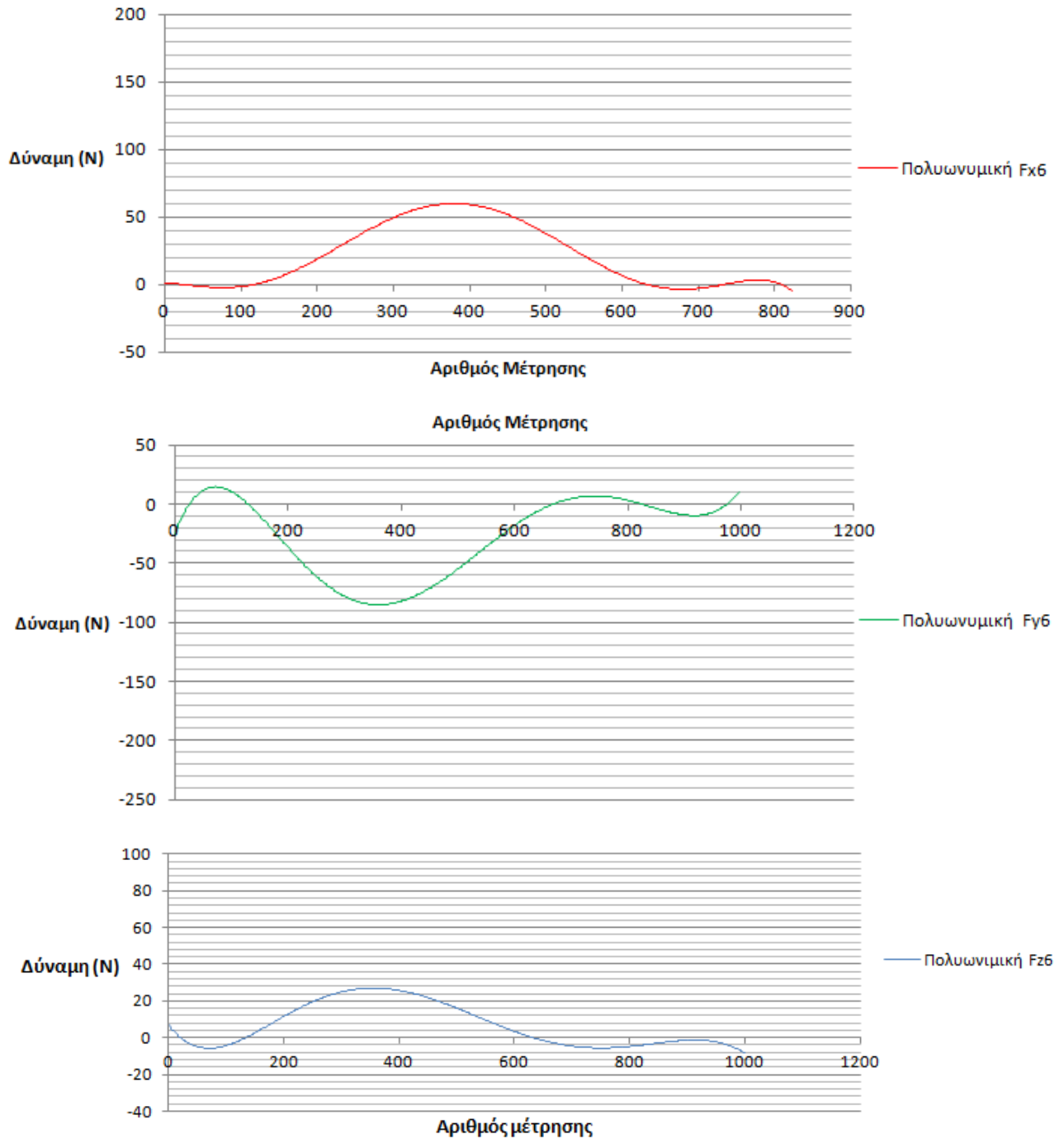
ΣΧΗΜΑ 6.4 Αποτελέσματα 4^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=100mm/min

5^ο Πείραμα



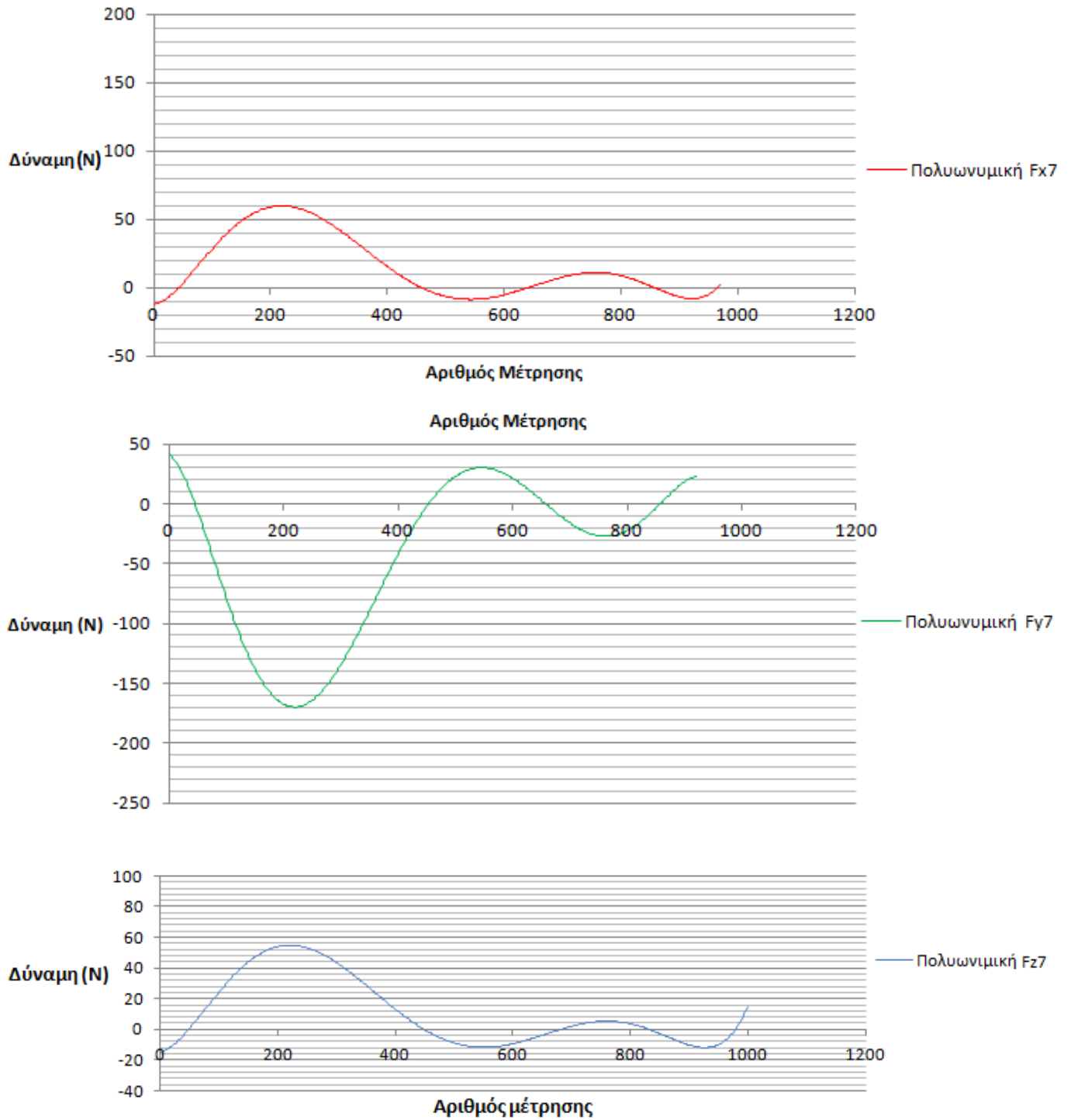
ΣΧΗΜΑ 6.5 Αποτελέσματα 5^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=125mm/min

6^ο Πείραμα



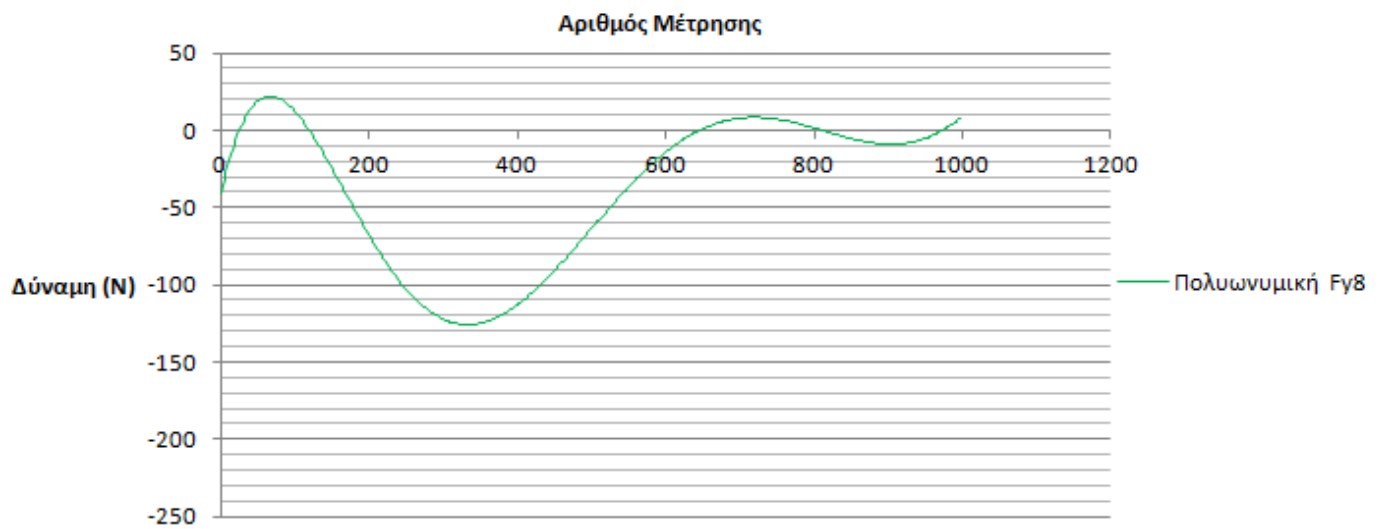
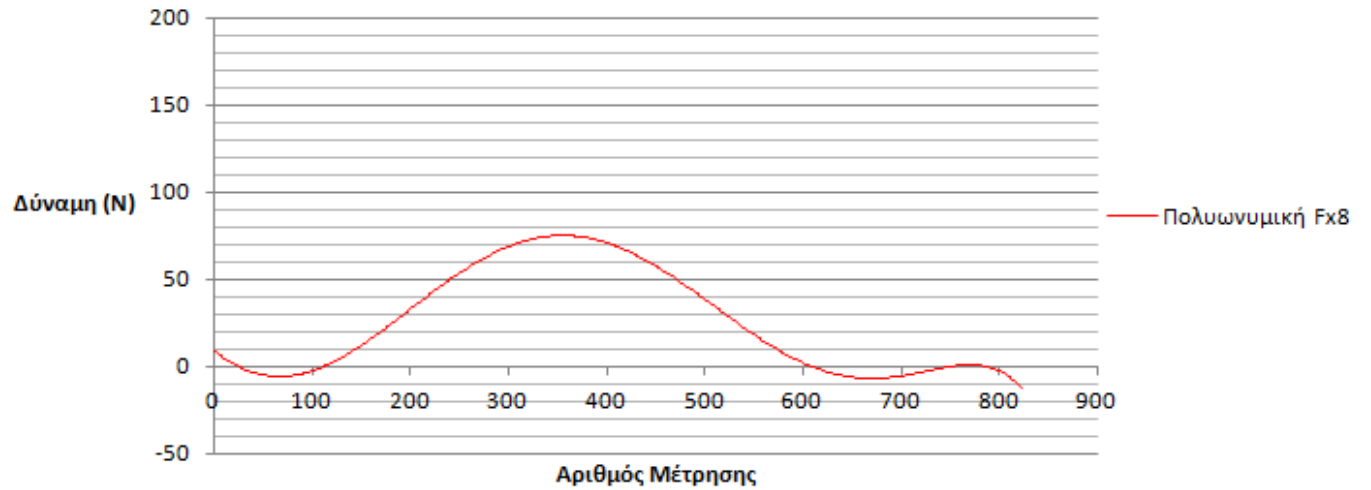
ΣΧΗΜΑ 6.6 Αποτελέσματα 6^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=75mm/min

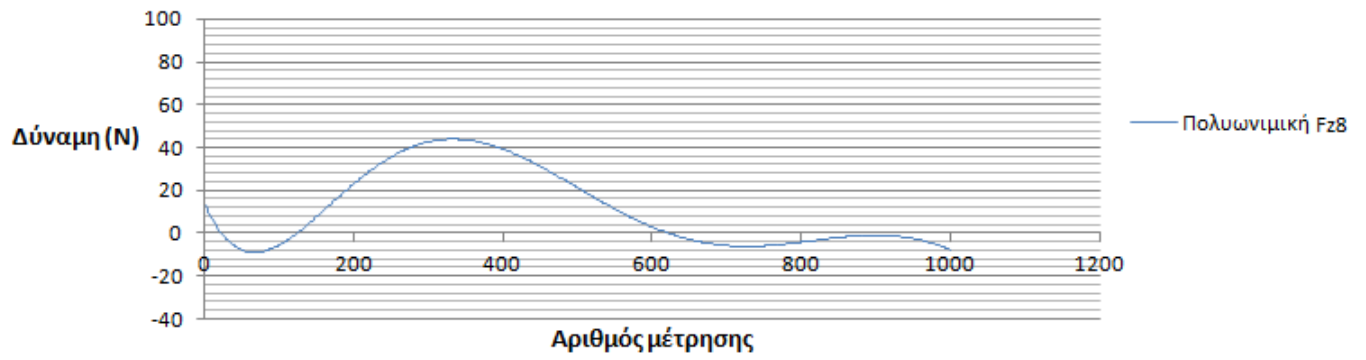
7^ο Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.7 Αποτελέσματα 7^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=125mm/min

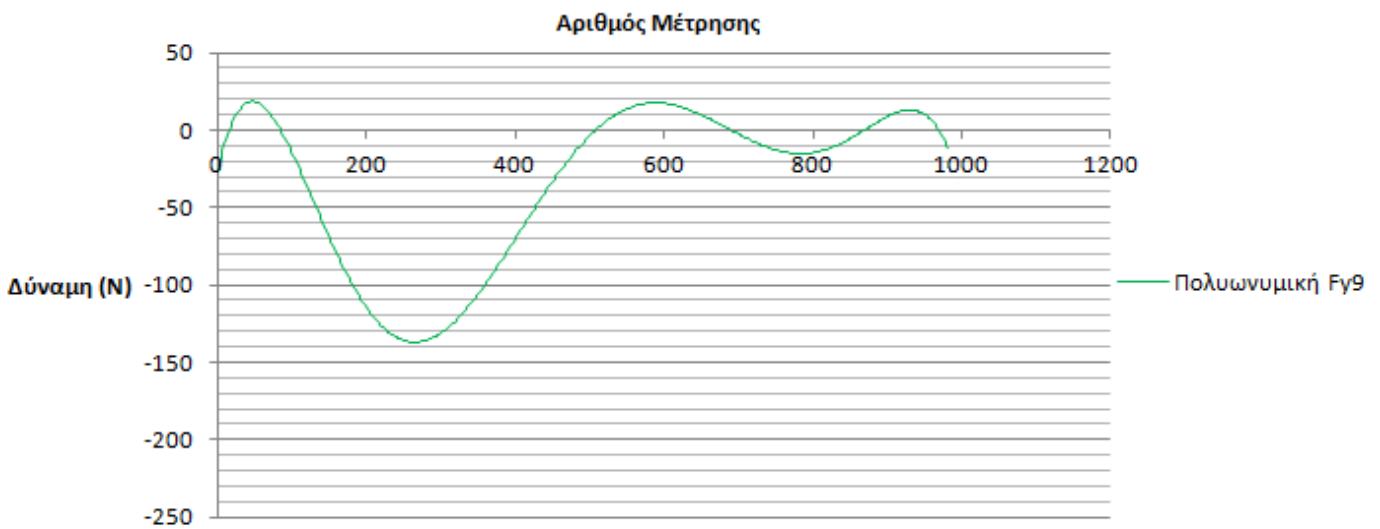
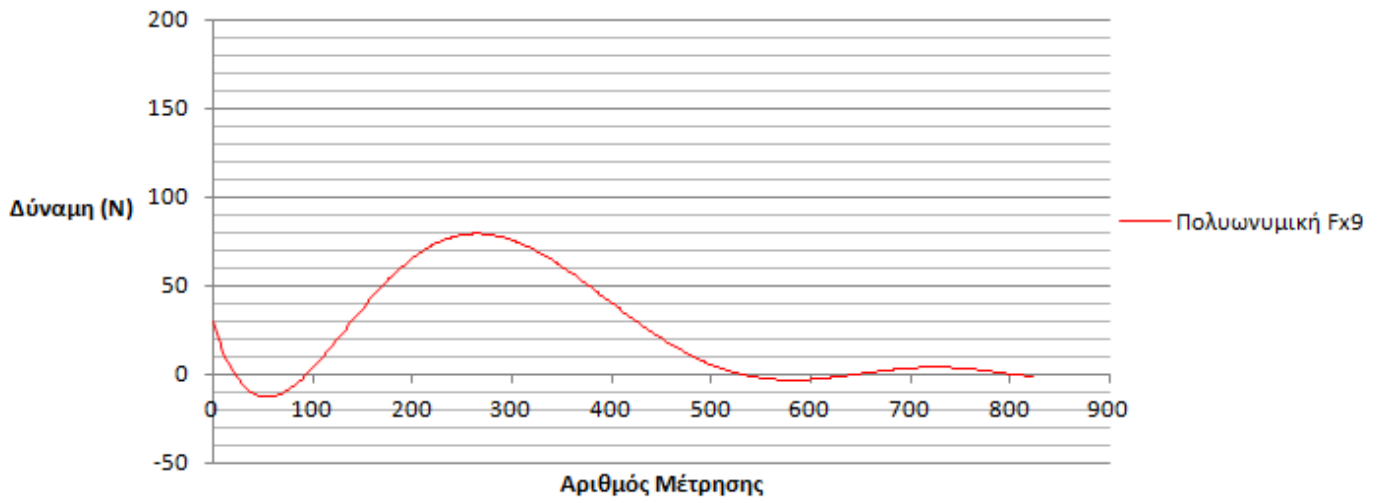
8^ο Πείραμα

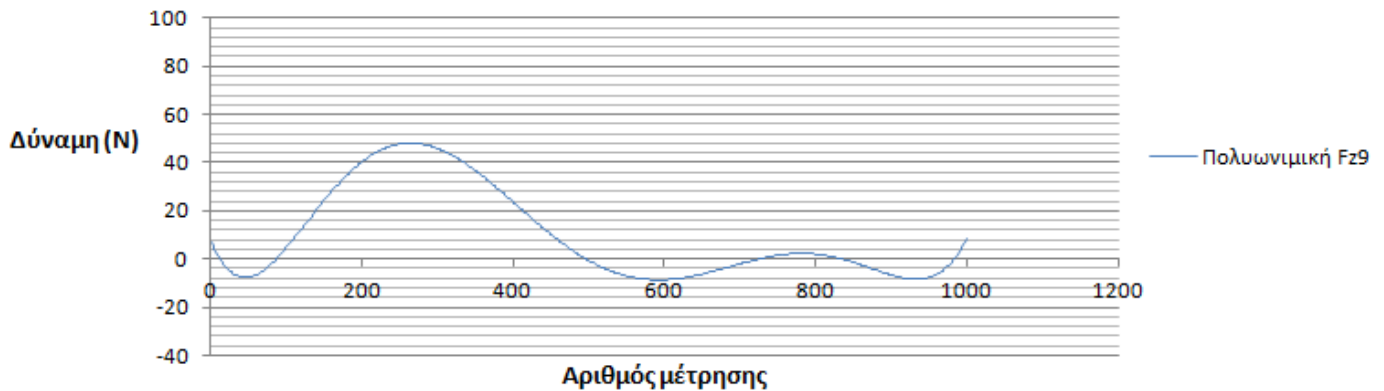




ΣΧΗΜΑ 6.8 Αποτελέσματα 8^ο πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=75mm/min

9^ο Πείραμα





ΣΧΗΜΑ 6.9 Αποτελέσματα 9^{ου} πειράματος περιφερειακού φρεζαρίσματος
 Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=100mm/min

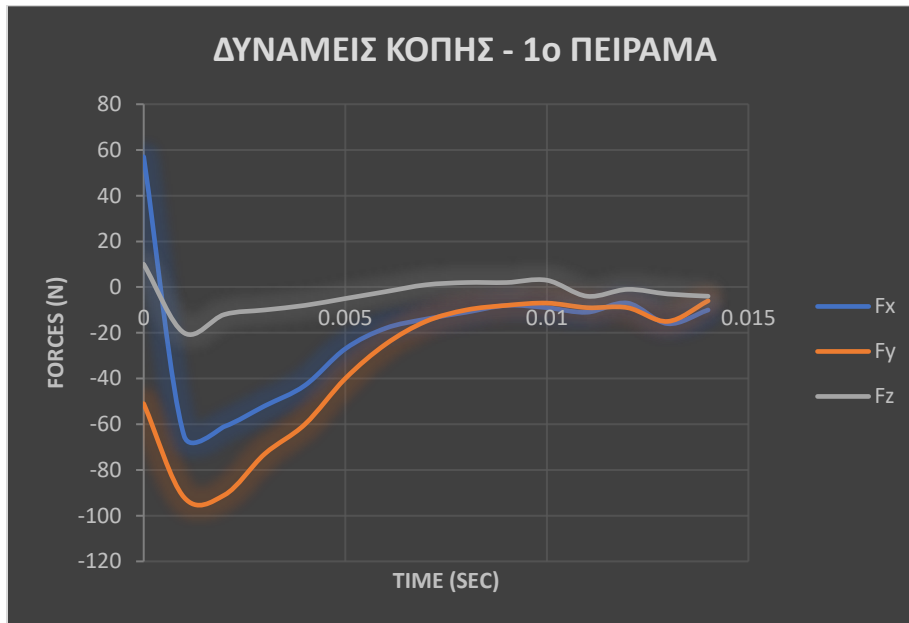
Οι μέγιστες τιμές (κατά απόλυτη τιμή) των γραμμών τάσεων (που παρουσιάστηκαν παραπάνω) ανά πείραμα, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΠΟΛΥΤΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ			
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΟΠΗΣ F _x (N)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΟΠΗΣ F _y (N)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΟΠΗΣ F _z (N)
1	58	78	23
2	45	60	20
3	42	51	18
4	62	118	40
5	57	103	33
6	59	87	28
7	60	170	51
8	75	128	42
9	80	139	48

6.2 Υπολογιστικά Αποτελέσματα

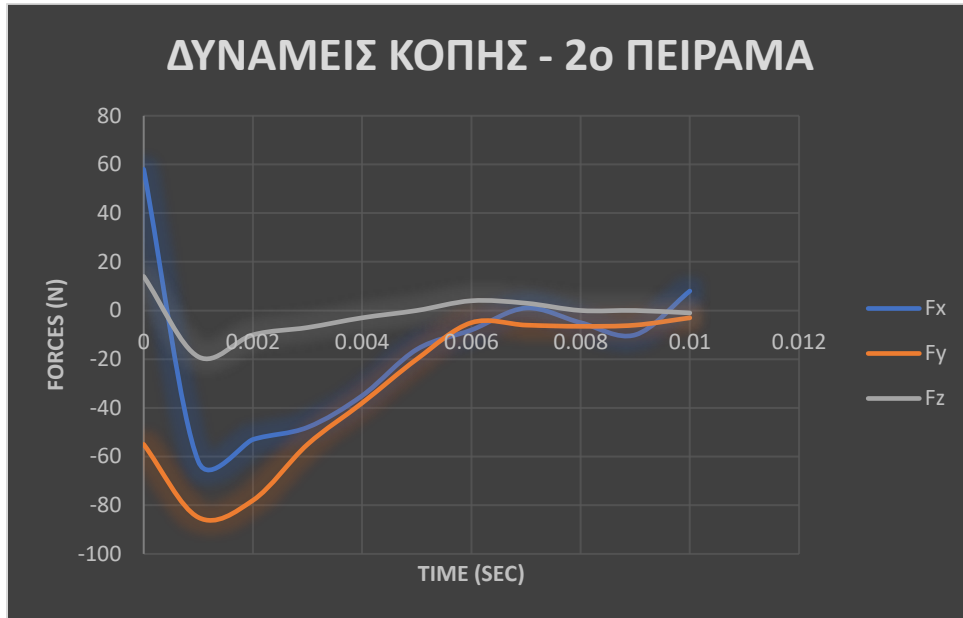
Ακολουθούν τα διαγράμματα των δυνάμεων κοπής που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων των κοπών στο πρόγραμμα LS-DYNA. Όπως και στις πειραματικές τιμές προηγουμένως, θα παρουσιάσουμε τις γραμμές τάσεις των δυνάμεων στους τρεις άξονες:

1^ο Πείραμα



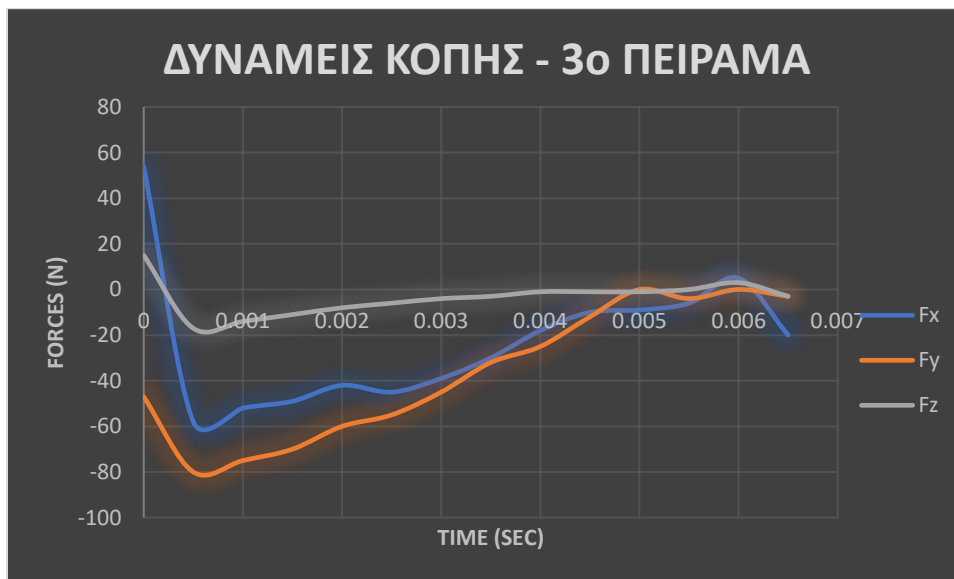
ΣΧΗΜΑ 6.10 Αποτελέσματα 1^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=75mm/min

2^ο Πείραμα



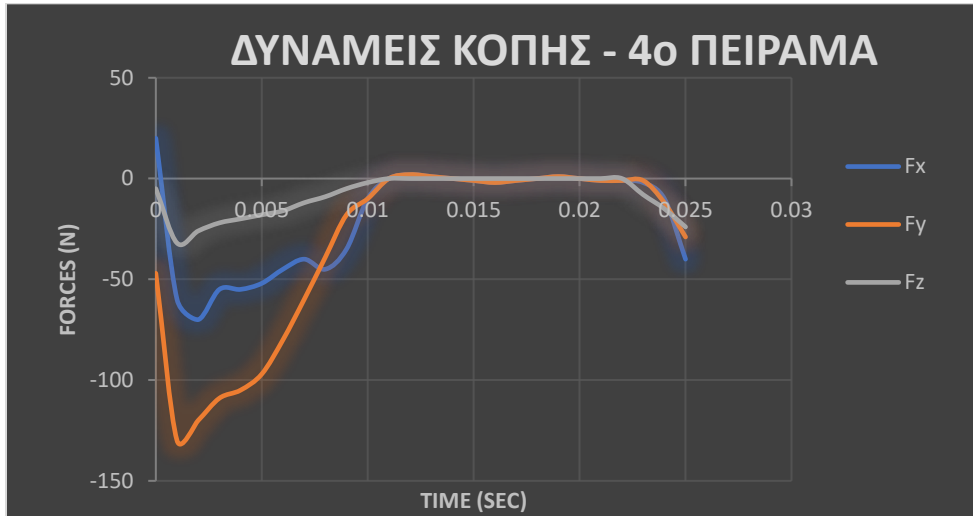
ΣΧΗΜΑ 6.11 Αποτελέσματα 2^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=100mm/min

3^ο Πείραμα



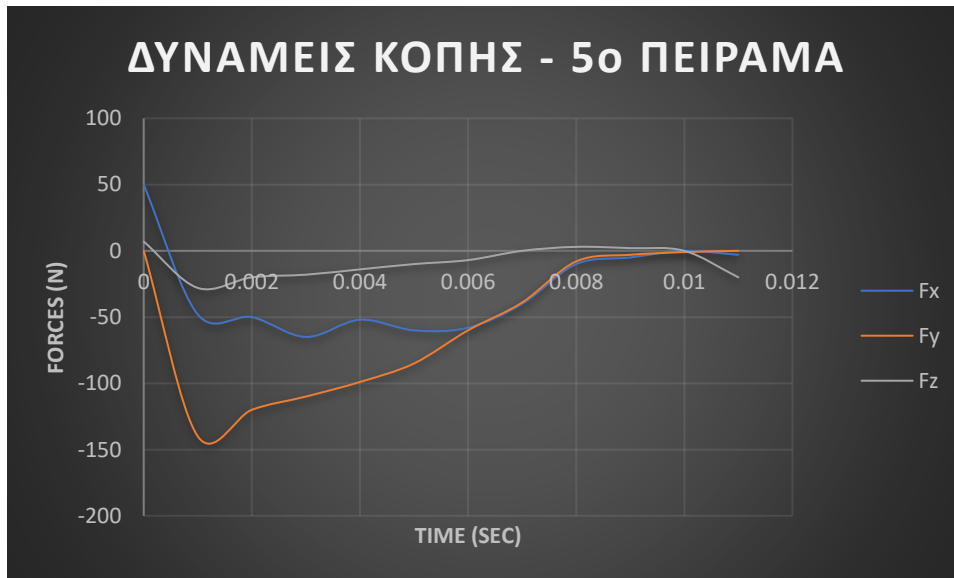
ΣΧΗΜΑ 6.12 Αποτελέσματα 3^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος Βάθος κοπής=0,3mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=125mm/min

4^ο Πείραμα



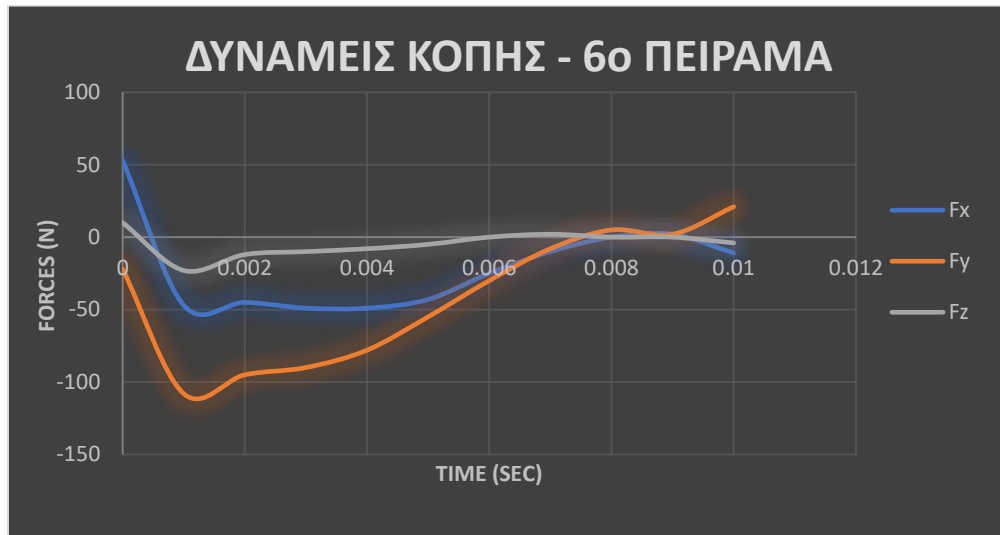
ΣΧΗΜΑ 6.13 Αποτελέσματα 4^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=100mm/min

5^ο Πείραμα



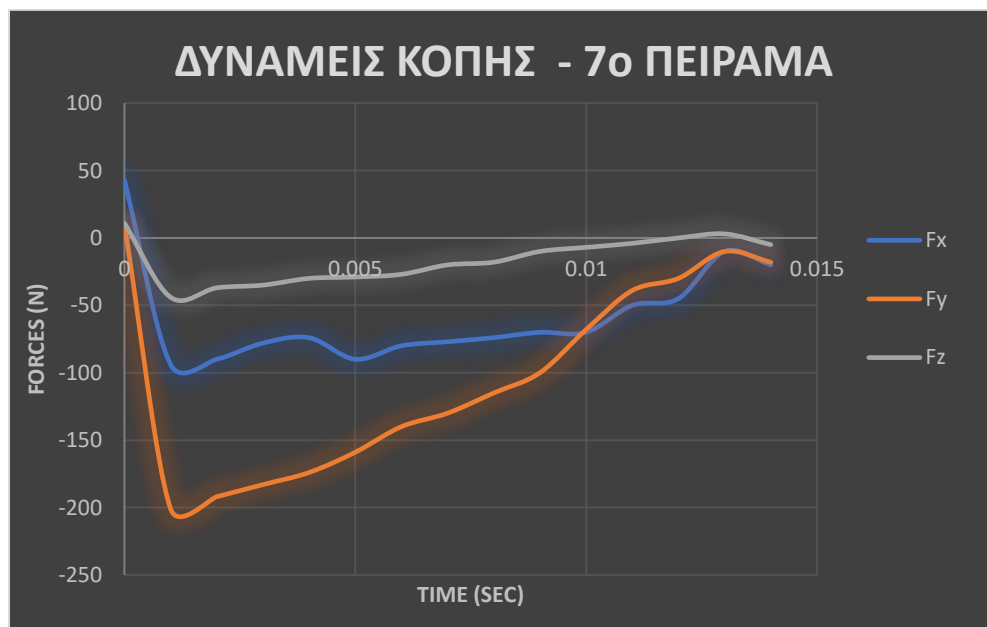
ΣΧΗΜΑ 6.14 Αποτελέσματα 5^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=125mm/min

6^ο Πείραμα



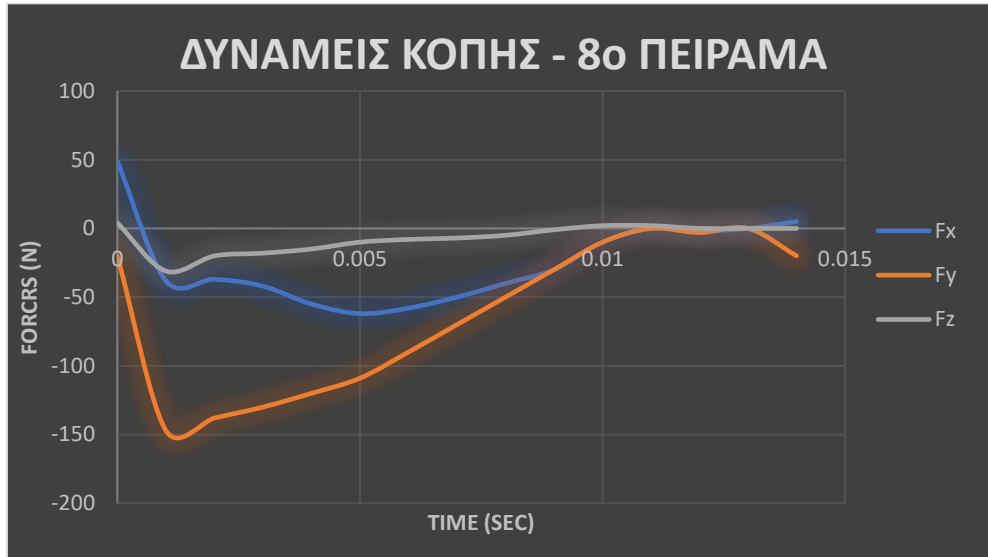
ΣΧΗΜΑ 6.15 Αποτελέσματα 6^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,6mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=75mm/min

7^ο Πείραμα



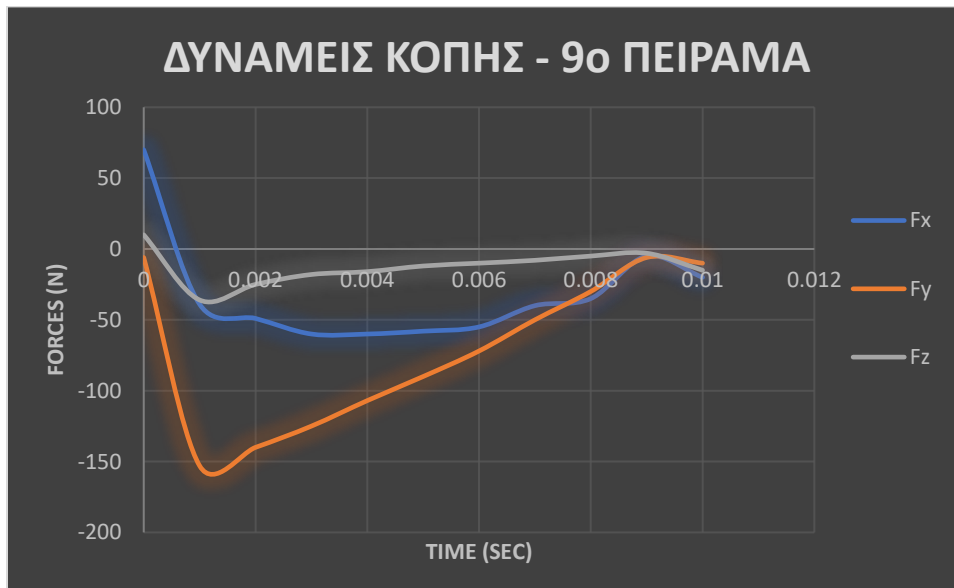
ΣΧΗΜΑ 6.16 Αποτελέσματα 7^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=700rpm, Πρόωση=125mm/min

8^ο Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.17 Αποτελέσματα 8^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=850rpm, Πρόωση=75mm/min

9^ο Πείραμα



ΣΧΗΜΑ 6.18 Αποτελέσματα 9^{ης} προσομοίωσης περιφερειακού φρεζαρίσματος
Βάθος κοπής=0,9mm, Ταχύτητα περιστροφής=1000rpm, Πρόωση=100mm/min

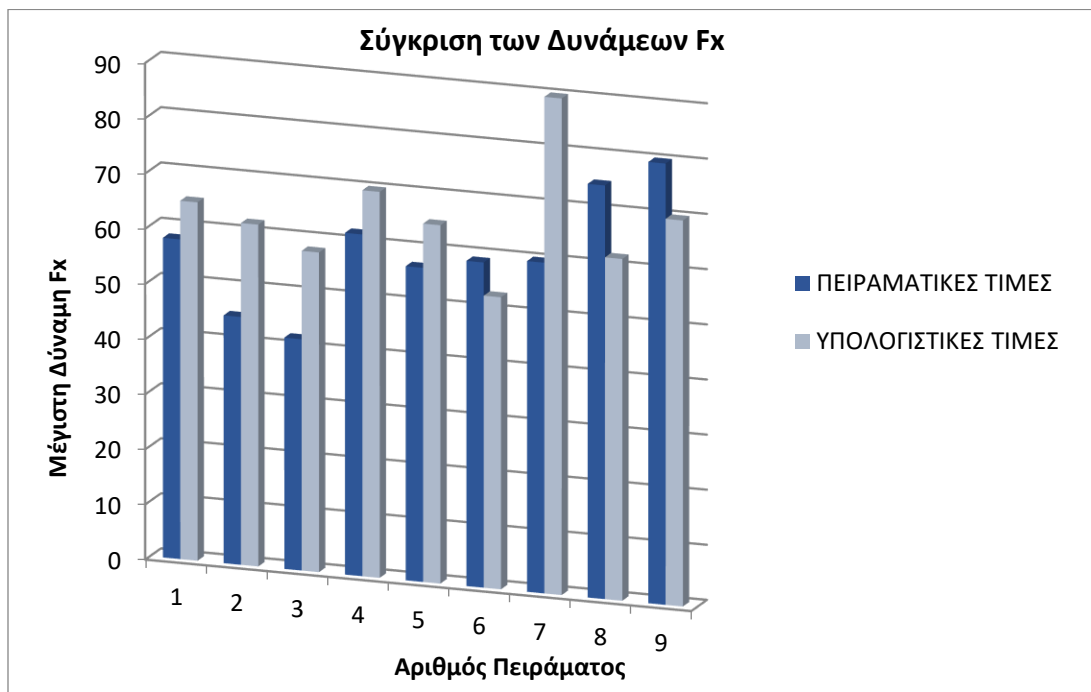
Οι μέγιστες, κατά απόλυτη τιμή, τιμές των γραμμών τάσεων των προσομοιώσεων, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

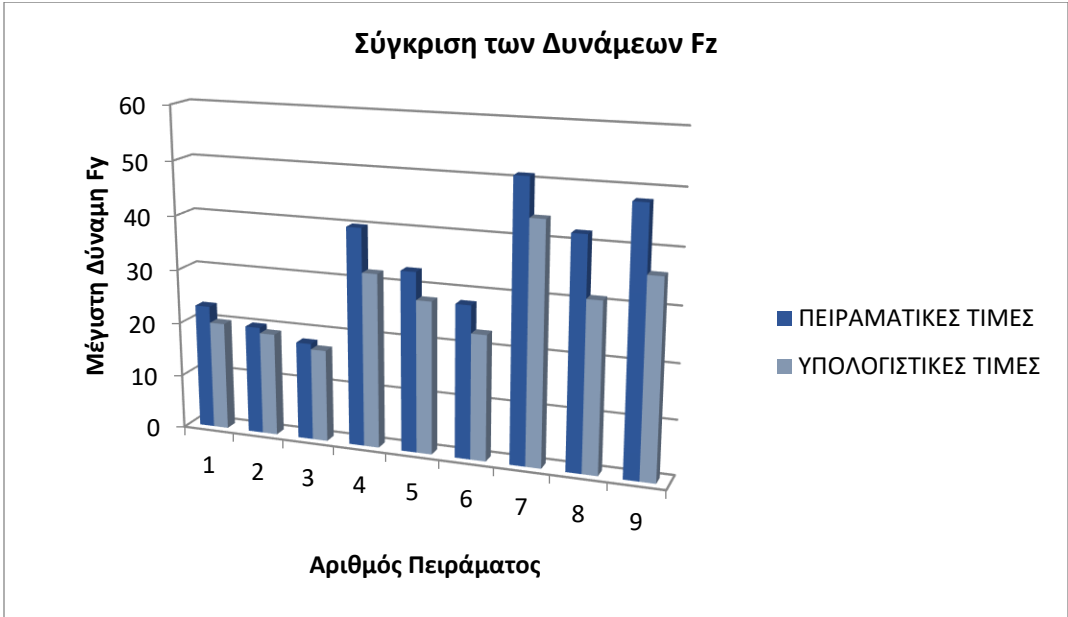
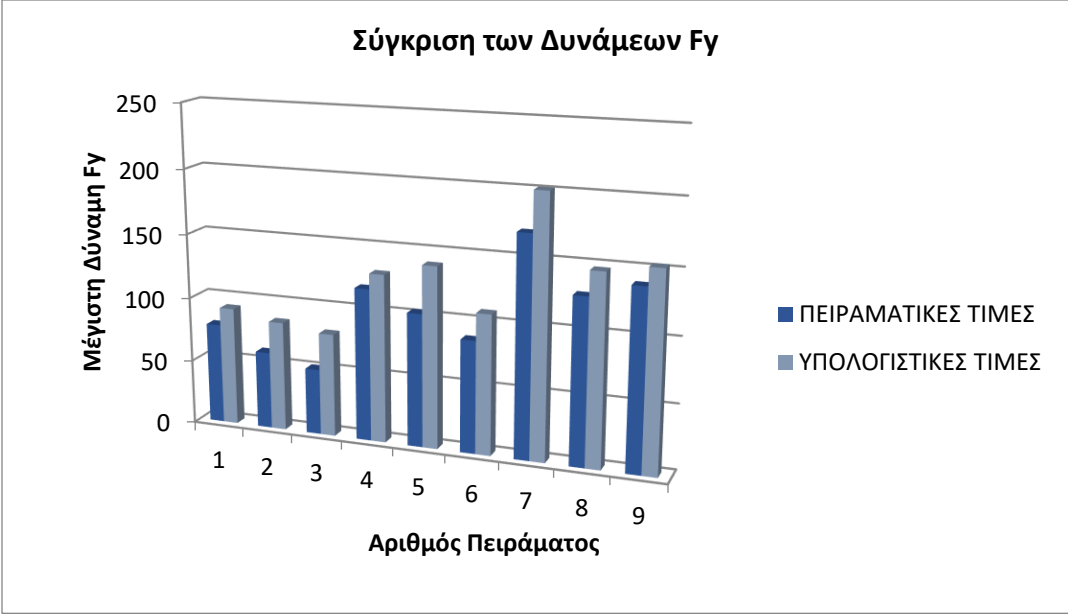
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΠΟΛΥΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ			
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΟΠΗΣ F_x (N)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΟΠΗΣ F_y (N)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΟΠΗΣ F_z (N)
1	65	92	20
2	62	85	19
3	58	80	17
4	70	130	32
5	65	140	28
6	53	108	23
7	90	201	44
8	62	147	31
9	70	153	36

7. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

7.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Πειραμάτων - Προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή, θα αναλύσουμε και θα συγκρίνουμε τις τιμές των δυνάμεων που προέκυψαν από τα πειράματα, στην CNC εργαλειομηχανή, και τις προσομοιώσεις, στο πρόγραμμα LS-DYNA. Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνονται οι δυνάμεις που μετρήσαμε στους τρεις άξονες:





Η απόκλιση των πειραματικών τιμών με αυτών που πήραμε μέσω των προσομοιώσεων, προκύπτει με τη χρήση του ακόλουθου στατιστικού τύπου:

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

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

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι αποκλίσεις ανάμεσα στις τιμές των δυνάμεων στους τρεις άξονες για κάθε πείραμα ξεχωριστά, με τη χρήση του τύπου που παραθέσαμε παραπάνω:

ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ % ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ			
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ F _x (N) %	ΑΠΟΚΛΙΣΗ F _y (N) %	ΑΠΟΚΛΙΣΗ F _z (N) %
1	10.8	15.2	13
2	27.4	29.4	5
3	27.5	36.2	5.5
4	11.4	9.2	20
5	12.3	26.4	15.2
6	10.2	17.6	17.9
7	33.3	15.4	13.7
8	17.3	12.9	26.2
9	12.5	15.7	25

Παρατηρώντας τον πίνακα αποκλίσεων που παρουσιάστηκε παραπάνω, μπορούμε να επισημάνουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος των τιμών βρίσκεται στην περιοχή 5% - 30%. Αυτό το διάστημα των αποκλίσεων μπορεί να θεωρηθεί μέσα στα όρια του στατιστικού λάθους. Για την πιο αποτελεσματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ακολουθεί η ανάλυση δυνάμεων ανά άξονα:

- ❖ **Στον άξονα X:** Η μεγαλύτερη απόκλιση, λίγο παραπάνω από το 30%, παρατηρείται στο πείραμα 7 (για την ακρίβεια 33.3 %), οπότε έχουμε το

μεγαλύτερο βάθος κοπής (0.9 mm) και την μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης (125mm/min).

- ❖ **Στον άξονα Y:** Η μεγαλύτερη απόκλιση (όπως και στον άξονα X είναι λίγο παραπάνω από το 30%) παρατηρείται στο 3^ο πείραμα (για την ακρίβεια 36.2 %), όπου έχουμε την μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής (1000 rpm) και την μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης (125mm/min).
- ❖ **Στον άξονα Z:** Σε αυτόν τον άξονα όλες οι τιμές είναι μέσα στα πλαίσια του στατιστικού λάθους. Παρά ταύτα, η μεγαλύτερη απόκλιση έχει την τιμή 26.2%, και παρατηρείται στο 8^ο πείραμα όπου έχουμε μεγάλο βάθος κοπής (0.9mm).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της συνισταμένης των δυνάμεων κατά τους άξονες X και Y. Στον επόμενο πίνακα, υπολογίζονται οι τιμές των συνισταμένων δυνάμεων (τόσο για τις πειραματικές, όσο και για τις υπολογιστικές τιμές) σε κάθε εφαρμογή, καθώς και η μεταξύ τους απόκλιση που παρουσιάζεται:

ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ			
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	Πειραματική (N) $\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	Υπολογιστική (N) $\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	ΑΠΟΚΛΙΣΗ %
1	97.2	112.6	13.70%
2	75	105.2	28.70%
3	66.1	98.8	33.10%
4	133.3	147.6	9.70%
5	117.7	154.4	23.80%
6	105.1	120.3	12.60%
7	180.3	220.2	18.12%
8	148.4	159.5	7%
9	160.4	168.3	4.70%

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, μπορούμε να σημειώσουμε ότι οι αποκλίσεις όλων των πειραμάτων κινούνται στα φυσιολογικά πλαίσια του 0 – 30%. Στο μόνο πείραμα που παρατηρείται μια μικρή αύξηση της απόκλισης (33.10%) είναι στο 3^ο πείραμα, όπου όπως αναφέραμε και παραπάνω έχουμε τις μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης.

Σαν γενική παρατήρηση, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η απόκλιση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών τιμών (τόσο στους τρεις άξονες, όσο και στην συνισταμένη των αξόνων X και Y) **είναι κατά μέσο όρο 17,6%**. Άρα τα αποτελέσματά μας κυμαίνονται στην τάξη του 15-20%, που ομολογουμένως είναι μέσα στα όρια του στατιστικού λάθους.

8. Συμπεράσματα σχετικά με τα Πειραματικά και τα Υπολογιστικά Αποτελέσματα

8.1 Πιθανές Αιτίες Απόκλισης Πειραματικών – Υπολογιστικών Τιμών

Στο 7^ο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από την πειραματική διαδικασία, όσο και από την αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων στο LS-DYNA. Έγινε επίσης σύγκριση των τιμών των παραγόμενων δυνάμεων, και υπολογισμός των αποκλίσεων ανάμεσα σε πειραματικές και υπολογιστικές τιμές. Στα περισσότερα πειράματα, οι αποκλίσεις ήταν μικρές και μέσα στα πλαίσια του στατιστικού λάθους (έως 30% περίπου). Παρουσιάστηκε βέβαια, και ένας μικρός αριθμός πειραμάτων, που οι τιμές των αποκλίσεων υπερέβησαν, κατά μικρό ποσοστό, τα όρια του στατιστικού λάθους. Σε αυτήν την παράγραφο θα αναπτύξουμε κάποιες πιθανές αιτίες που οδήγησαν στην μη σύγκλιση των πειραματικών τιμών με τις αντίστοιχες υπολογιστικές.

Μια συνηθισμένη και σημαντική αιτία απόκλισης, είναι οι συνθήκες που επικρατούν κατά την διάρκεια κάθε πειράματος. Κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται εξωτερικοί παράγοντες (που δεν μπορούμε να υπολογίσουμε και να λάβουμε υπόψη κατά την προεργασία του πειράματος) που επηρεάζουν τις κοπές και τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε. Αντίθετα στην υπολογιστική προσομοίωση στον H/Y, επικρατούν οι ιδανικές συνθήκες, και η κάθε εφαρμογή επηρεάζεται μόνο από τις τιμές των συνθηκών κοπής που εμείς θέτουμε. **Άρα οι τιμές των δυνάμεων που προκύπτουν από την προσομοίωση στο LS-DYNA είναι οι ιδανικές και αυτές που θα είχαν προκύψει και κατά την πειραματική διαδικασία, αν τα πειράματα είχαν εκτελεσθεί κάτω από ιδανικές συνθήκες.**

Αιτία απόκλισης αποτελεί και το κοπτικό εργαλείο της κατεργασίας. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για την πειραματική διαδικασία, είχε ήδη χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες κοπές του εργαστηρίου, οπότε δεν είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη η φθορά που είχε ήδη υποστεί. Αλλά και στα πειράματα που εκτελέστηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο κοπτικό εργαλείο σε κάθε πείραμα. Οπότε η φθορά του εργαλείου που αναπτυσσόταν από πείραμα σε πείραμα, πιθανόν να ασκούσε επιρροή στις τιμές των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν. Αντίθετα στην αριθμητική προσομοίωση, το εργαλείο σε κάθε κοπή ήταν το ιδανικό, δηλαδή χωρίς καμία φθορά. **Άρα οι τιμές των δυνάμεων που προέκυπταν δεν επηρεάζονταν από τη φθορά του εργαλείου.**

Η χαμηλή ακρίβεια καταγραφής της μετρητικής διάταξης του εργαστηρίου ίσως να ασκεί επιρροή στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Μια πιο ακριβής καταγραφή με περισσότερες μετρήσεις στη μονάδα του χρόνου, ίσως να μείωνε την απόκλιση των δυνάμεων. Πιο ακριβής καταγραφή θα μπορούσε να επιτευχθεί με μια πιο σύγχρονη διάταξη δυναμόμετρου, καλωδίων, ενισχυτών και λογισμικού, έτσι ώστε να περιοριστεί το πρόβλημα.

Η διακριτοποίηση που επιλέχθηκε στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στο LS-DYNA, ήταν 2x2, δηλαδή οι διαστάσεις του κάθε πεπερασμένου στοιχείου ήταν 2mm x 2mm. Ο σημαντικότερος λόγος επιλογής της συγκεκριμένης διακριτοποίησης, ήταν γιατί μείωνε τους χρόνους προσομοίωσης τουλάχιστον στο μισό, σε σχέση με τη διακριτοποίηση 1x1 που είχε επιλεγεί αρχικά.

Ένας επιπλέον λόγος εμφάνισης αποκλίσεων είναι το είδος προσομοίωσης κάμψης που χρησιμοποιήθηκε. Σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήσαμε, από τις παραμέτρους του keyword manager, το ELFORM=2 (element formulation – μηχανική συμπεριφορά/μαθηματική διατύπωση του εν λόγω πεπερασμένου στοιχείου). Έτσι, το δοκίμιο είναι γενικά δύσκαμπτο, αλλά τα αποτελέσματα που δίνει το παρών element formulation είναι πιο ρεαλιστικά.

8.2 Γενικά Συμπεράσματα

Σε αυτή την παράγραφο, θα παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, των πειραμάτων και των προσομοιώσεων περιφερειακού φρεζαρίσματος κραμάτων τιτανίου.

Μέσω της θεωρίας, που αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο εκτενέστερα, είχε γίνει κατανοητή η δυσκολία στη κατεργασία του τιτανίου και η ανάγκη ανάλυσής της. Η πειραματική διαδικασία περιφερειακού φρεζαρίσματος πάνω σε συνήθεις συνθήκες κοπής, που πρόέκυψαν μετά από βιβλιογραφική μελέτη, οδήγησε στα αποτελέσματα των δυνάμεων, τα οποία και αναλύθηκαν τόσο αυτούσια όσο και συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προγράμματος προσομοίωσης LS-DYNA.

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 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 (αναλύθηκε 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.**

Γενικά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε συμφωνούν με τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο. **Οι δυνάμεις κοπής κατά τους τρεις άξονες (Fx, Fy και Fz) 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 τη ποσοτική σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε ότι οι συνολικές αποκλίσεις, της τάξεως του 20% με 25%, που παρουσιάστηκαν για τις δυνάμεις κοπής είναι μέσα στα αποδεκτά στατιστικά όρια και έχουν να κάνουν με λόγους που αφορούν τόσο το ίδιο το LS-DYNA, όσο και γενικότερα την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση κατεργασιών. Λόγοι που αφορούν τη μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών και το απλουστευμένο μοντέλο τριβής ολίσθησης σε συνδυασμό με σφάλματα διακριτοποίησης και επαναπροσδιορισμού του πλέγματος. Προέκυψε επίσης μια πολύ καλή ποιοτική ανάλυση ,από το πρόγραμμα, της αυξητικής τάσης των δυνάμεων με την αύξηση του βάθους κοπής.

Συνοψίζοντας, το LS-DYNA αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για κάθε βιομηχανία, αφού μπορεί να προσομοιώσει μεγάλο αριθμό κατεργασιών (και άρα να μειώσει τον αριθμό των πειραμάτων που θα πρέπει να εκτελεστούν), βγάζοντας πολύ χρήσιμα και ευσταθή συμπεράσματα που θα την βοηθήσουν να βελτιώσει την κατεργασία σε λιγότερο χρόνο και με μικρότερο κόστος.

9. 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] Άγγελος Καγκελάρης, «Πειραματική και Αριθμητική Ανάλυση Περιφερειακού Φρεζαρίσματος κραμάτων τιτανίου», Διπλωματική Εργασία, 2012
- [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: 5th 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
- [37] www.okuma.com
- [39] <http://en.wikipedia.org>
- [40] <http://el.wikipedia.org>