



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Πειραματική μελέτη και βελτιστοποίηση
θερμικά υποβοηθούμενης τórνευσης
χάλυβα»**

Συγγραφή:

Γεώργιος Σιδεράς

ΑΜ: 02115626

Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

ΑΘΗΝΑ (Ιούλιος 2021)

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	6
1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Τεχνικές θέρμανσης.....	10
1.3 Επαγωγική θέρμανση	12
1.3.1 Εξοπλισμός για θέρμανση με μέθοδο επαγωγής	13
1.4 Θέρμανση με λέιζερ (LAM - Laser-Assisted Machining).....	14
1.4.1 Αρχή της εφαρμογής LAM σε περιστροφικές καταργασίες.....	14
1.4.2 Αρχή της εφαρμογής LAM στην καταργασία φρεζαρίσματος.....	17
1.4.3 Πλεονεκτήματα της μεθόδου LAM.....	18
1.5 Ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα.....	19
1.6 Σκοπός εργασίας.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	21
2.1 Μελέτη της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα	21
2.2 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	27
3.1 Πειραματική διάταξη.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	31
5.1 Αποτελέσματα πειράματος - Ψυχρή τόνρευση.....	31
5.1.1 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm.....	31
5.1.2 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm.....	32
5.1.3 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm.....	33
5.1.4 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm.....	35
5.1.5 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm.....	36
5.1.6 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm.....	38
5.1.7 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm.....	39
5.1.8 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm.....	40
5.1.9 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm.....	41
5.2 Αποτελέσματα πειράματος – Θέρμη τόνρευση.....	43
5.2.1 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm.....	43
5.2.2 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm.....	44
5.2.3 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm.....	46
5.2.4 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm.....	47

5.2.5 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm.....	48
5.2.6 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm.....	50
5.2.7 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm.....	51
5.2.8 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm.....	52
5.2.9 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°.....	56
5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°.....	62
6.1 Συμπεράσματα.....	62
6.2 Προτάσεις βελτίωσης.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

«Πειραματική μελέτη και βελτιστοποίηση θερμικά υποβοηθούμενης τόννευσης χάλυβα».

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν αρχικά η δημιουργία κατάλληλης πειραματικής διάταξης και η εκτέλεση πειράματος για τον προσδιορισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας στην κατεργασία της τόννευσης. Αρχικά στο πρώτο και δεύτερο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση της ανωτέρω κατεργασίας παρουσιάζοντας αποτελέσματα μελετών από την παγκόσμια βιβλιογραφία. Ακολούθως στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε καθώς επίσης και επεξήγησή των επιμέρους παραμέτρων του πειράματος. Στην συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το σύνολο των επαναλήψεων που εκτελέστηκαν και στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και σύγκριση τους. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της διπλωματικής.

Λέξεις κλειδιά: θερμή τόννευση, θερμή κατεργασία, κυλινδρικό δοκίμιο

ABSTRACT

«Experimental study and optimization of heat assisted turning of steel».

The purpose of this dissertation was to create a suitable experimental set up and to perform an experiment in order to determine the effect of heating up cylindrical test specimens during the process of turning. Initially, in the first and second chapters, a bibliographic review of the hot machining and especially hot turning is presented. In the third chapter the experimental setup is explained as well as the individual parameters of the experiment are presented. Then, in the fourth chapter, the results of all the experiments are presented and in the fifth chapter, analysis and comparison is being made. Finally, the last chapter summarizes the conclusions of the present dissertation.

Keywords: hot turning, hot machining, cylindrical specimen

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Εισαγωγή

Η θερμικά υποβοηθούμενη κατεργασία ή η θερμή κατεργασία, όπως είναι πιο γνωστή, έχει αναδειχθεί ως μια εναλλακτική μέθοδος κατεργασιών με βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά μέταλλα και κράματα τα οποία είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατεργαστούν. Αυτή η τεχνική εξετάζεται από τα τέλη του 19ου αιώνα. Παρατηρήθηκε ότι τα μέταλλα τείνουν να παραμορφώνονται πιο εύκολα όταν θερμαίνονται, κάτι το οποίο ενισχύει την κατεργασιμότητα τους. Η θερμή κατεργασία βρήκε ευρεία εφαρμογή στην κατασκευή εξαρτημάτων μηχανικής στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, έναν αιώνα μετά την πρώτη της εμφάνιση. Η αρχή πίσω από τη θερμή κατεργασία, είναι η αύξηση της διαφοράς στη σκληρότητα του εργαλείου κοπής και του τεμαχίου που κατεργάζεται, με αποτέλεσμα την μείωση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα επιμέρους εξαρτήματα, στη βελτίωση του επιφανειακού φινιρίσματος και στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Η κατασκευαστική βιομηχανία έχει διερευνήσει διάφορες τεχνικές θέρμανσης όπως ηλεκτρικό ρεύμα, τόξο, επαγωγή υψηλής συχνότητας, δέσμη λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων και θέρμανση με πίδακα πλάσματος. Ωστόσο, όλες αυτές οι τεχνικές είναι κατάλληλες για ορισμένες αλλά ακατάλληλες για άλλες συγκεκριμένες λειτουργίες. Για παράδειγμα, η θέρμανση δέσμης ηλεκτρονίων, που απαιτεί κενό για λειτουργία, βρέθηκε ότι είναι κοστοβόρα για εφαρμογές κατεργασίας, αν και η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς για την κοπή στρώσης μετάλλου με ελάχιστες απώλειες και υψηλή ποιότητα των παραγόμενων επιφανειών. Η θέρμανση με λέιζερ, από την άλλη πλευρά, βρέθηκε κατάλληλη τόσο για εφαρμογές κοπής όσο και για μηχανική κατεργασία. Το λέιζερ είναι κατάλληλο για μέταλλα και μη μέταλλα, όπως κεραμικά. Μπορεί να προσαρμοστεί και για περιστροφική κατεργασία άλλα και για φρεζάρισμα, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών μικρο-φρεζαρίσματος λόγω της υψηλής ευελιξίας της εστιασμένης δέσμης. Αλλά όταν προορίζεται να εφαρμοστεί για μεγάλες εφαρμογές, όπως τελικό φρεζάρισμα με εργαλείο μεγάλης διαμέτρου που προορίζεται για σκληρή κατεργασία, η ακτίνα λέιζερ πρέπει να εφαρμοστεί σε μια ευρύτερη περιοχή που απαιτεί λέιζερ υψηλής ισχύος. Επιπλέον, η απόδοση θέρμανσης του λέιζερ και η ανακλαστικότητα της δέσμης λέιζερ είναι μερικά από τα επιπρόσθετα

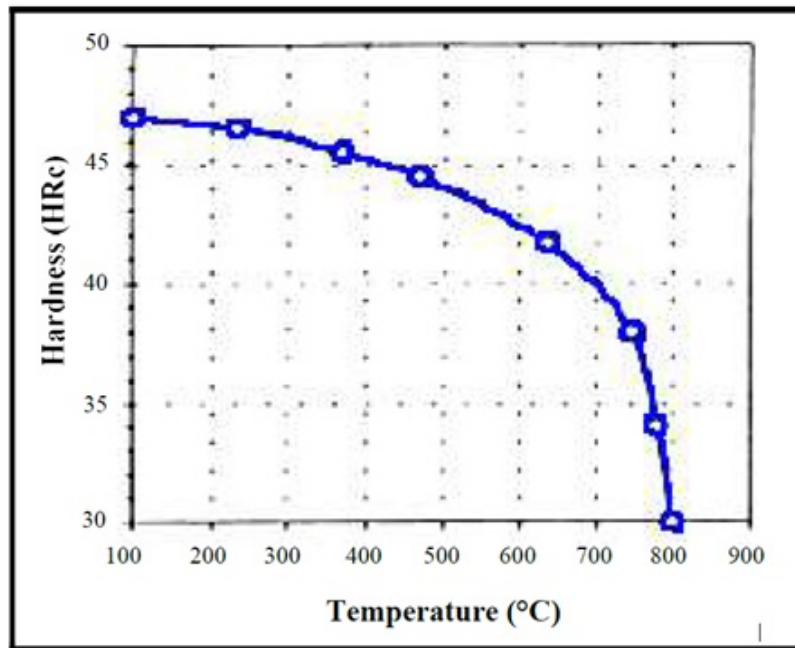
προβλήματα στη μηχανική κατεργασία με λέιζερ (LAM - laser-assisted machining). Εκτός από αυτό, το υψηλό κόστος των λέιζερ υψηλής ισχύος (για παράδειγμα, ένα λέιζερ 1,5 kW CO₂ κοστίζει πάνω από 150.000 \$) και η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας επιβράδυνε την εφαρμογή της μεθόδου LAM [1].

Η θερμή κατεργασία με πλάσμα (PEM Plasma-enhanced machining) έχει αναδειχθεί ως οικονομική εναλλακτική λύση έναντι της LAM και έχει λάβει σημαντική προσοχή στη Γερμανία. Τα πειράματα μηχανικής επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας εργαλεία PCBN σε κεραμικά υλικά (σε περιστροφική κατεργασία) έδειξαν ότι η φθορά του εργαλείου κοπής μειώθηκε κατά περίπου 40%. Η μέθοδος PEM χρησιμοποιήθηκε επίσης για την περιστροφική κατεργασία εξαιρετικά σκληρών μετάλλων με εργαλεία κοπής καρβιδίου βολφραμίου. Παρόλο που η PEM βελτιώνει τις επιδόσεις της μηχανικής κατεργασίας, δεν υπάρχει κατάλληλη προστασία για την αποφυγή της θερμικής επίδρασης στην αιχμή κοπής. Επιπλέον, η φθορά της αιχμής του εργαλείου είναι ένα άλλο πρόβλημα που σχετίζεται με την μέθοδο PEM [2]. Τέλος η PEM έχει έναν ακόμη περιορισμό: Δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές φρεζαρίσματος όπου ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι χαμηλός και η έντονη θερμότητα θα οδηγούσε σε τήξη του υλικού εργασίας.

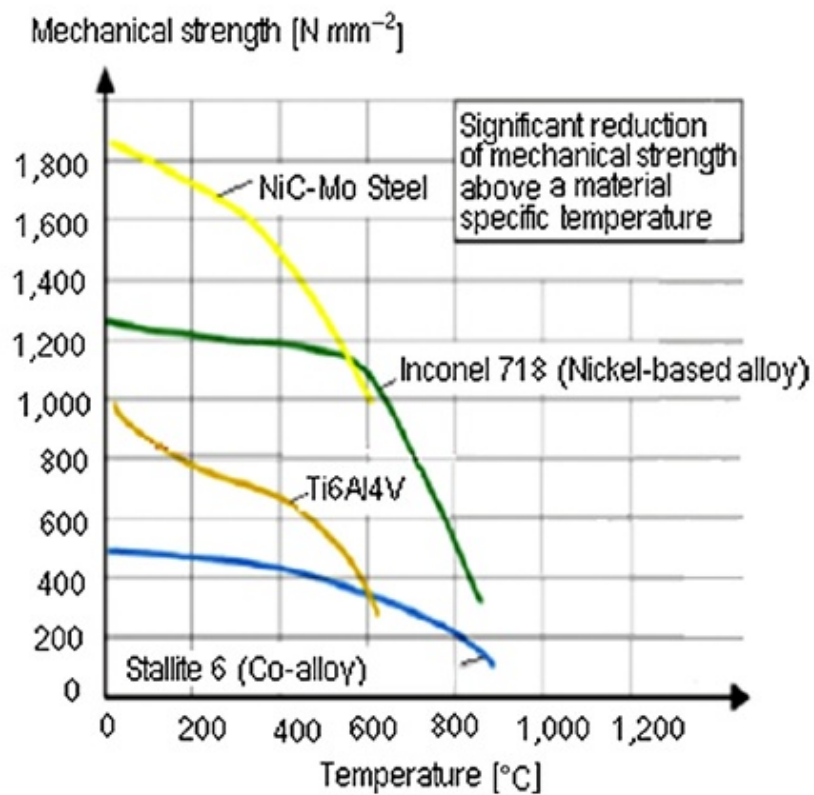
Η θερμότητα που διατηρείται στους χαλύβδινους κυλίνδρους μετά τη χρήση της θερμής έλασης χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη χαμηλών δυνάμεων κοπής και υψηλής διάρκειας ζωής του εργαλείου. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τη μέθοδο θέρμανσης ομοιόμορφου φούρνου για να μελετήσουν την επίδραση της θερμοκρασίας θέρμανσης σε διάφορα κριτήρια κατεργασιμότητας υλικών εργασίας. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι Talantov et al. [3] και οι Amin και Talantov [4] μελέτησαν την επίδραση της μεθόδου θέρμανσης του κλιβάνου ενός τεμαχίου στην κατεργασιμότητα του χάλυβα, του ανοξείδωτου χάλυβα και του κράματος τιτανίου. Βρήκαν σημαντική μείωση του ρυθμού φθοράς του εργαλείου όταν χρησιμοποιήθηκε θέρμανση. Ωστόσο, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τη μέθοδο κλιβάνου μόνο για να δείξουν την επίδραση της θέρμανσης του υλικού εργασίας στην κατεργασιμότητα των υλικών, καθώς η μέθοδος θέρμανσης του κλιβάνου σίγουρα δεν συνιστάται για εφαρμογή στην παραγωγή.

Κάτωθι παρουσιάζονται δύο εικόνες για την παρουσίαση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη σκληρότητα και την αντοχή σε εφελκυσμό (Εικ. 1.1 και 1.2) [5,6]. Αυτά τα σχήματα εξηγούν ότι η υψηλή θερμοκρασία μειώνει τη σκληρότητα και την

αντοχή εφελκυσμού του υλικού ενός τεμαχίου. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή εξωτερικής θερμότητας θα προωθούσε τη δυνατότητα επεξεργασίας του υλικού.



Εικ. 1.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη σκληρότητα [5]



Εικ. 1.2 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη μηχανική αντοχή [5]

Η εφαρμογή θερμότητας στη μηχανική κατεργασία έχει ιστορικό ξεκινώντας από το 1880, το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τότε κατοχυρώθηκε για να εξηγήσει την πιθανή εφαρμογή θερμότητας στη μηχανική κατεργασία [7]. Έχουν πραγματοποιηθεί μεταγενέστερες μελέτες για τη διερεύνηση των πλεονεκτημάτων της θερμής κατεργασίας [8]. Οι πρόσφατες μελέτες έχουν ολοκληρωθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές θέρμανσης. Τα πλεονεκτήματα της θερμής κατεργασίας όπως προκύπτουν από τις μελέτες είναι τα εξής:

- Μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών για εύκολη λειτουργία κατεργασίας.
- Αύξηση της δυνατότητας κατεργασίας του υλικού
- Επιλογή υψηλότερων παραμέτρων κατεργασίας (υψηλότερη ταχύτητα κοπής, τροφοδοσία και βάθος κοπής)
- Μείωση της φθοράς του εργαλείου
- Αύξηση της παραγωγικότητας
- Εξάλειψη της εφαρμογής υγρού κοπής
- Μείωση συνολικού κόστους παραγωγής

Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι σημαντικά όταν ακριβά υλικά επεξεργάζονται και το κόστος παραγωγής είναι υψηλό.

Τα μειονεκτήματα με τη σειρά τους, φαίνονται παρακάτω:

- Αύξηση κόστους εργαλειομηχανών λόγω του κόστους λόγω εξωτερικού συστήματος θέρμανσης
- Δύσκολο να ελεγχθεί η ακρίβεια των διαστάσεων λόγω της θερμότητας στο υλικό που κατεργάζεται
- Δύσκολο να προσδιοριστεί το φινίρισμα
- Απαιτούνται περισσότερες προφυλάξεις ασφαλείας λόγω του εξοπλισμού θέρμανσης

1.2 Τεχνικές θέρμανσης

Η επιτυχημένη εφαρμογή της θερμής κατεργασίας σχετίζεται με την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου θέρμανσης. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές θέρμανσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτήν τη μέθοδο κατεργασίας. Η επιλογή της μεθόδου θέρμανσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με βασικούς παράγοντες που αναφέρονται παρακάτω [9,10]:

- Εστίαση στη ζώνη διάτμησης όπου θα πραγματοποιηθεί η πλαστική παραμόρφωση
- Παροχή της απαιτούμενης θερμοκρασίας
- Υψηλή ικανότητα θέρμανσης
- Εύκολη προσαρμογή σε εργαλειομηχανές
- Εύκολη ρύθμιση και έλεγχος θερμοκρασίας
- Χαμηλό κόστος
- Ασφαλής λειτουργία
- Υψηλό ποσοστό αφαίρεσης υλικού
- Χαμηλόσυνολικόκόστος παραγωγής

Η τεχνική θέρμανσης θα κάνει τη μέθοδο θερμής κατεργασίας πιο επωφελή σε σύγκριση με τη συμβατική, εάν η επιλεγμένη τεχνική καλύπτει όλους τους πιθανούς παράγοντες.

Οι τεχνικές θέρμανσης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής [9,10,11]:

1. Ολική θέρμανση του τεμαχίου

- Θέρμανση με αντίσταση
- Φούρνος
- Θέρμανση δοκιμίου από προηγούμενη κατεργασία

2. Τοπική θέρμανση του τεμαχίου

- Καυστήρας αερίου (φλόγα) (Gas Burner (flame))
- Επαγωγή (Induction)
- Ηλεκτρικό τόξο (Electric arc)

- Ηλεκτρική επαφή (Electric contact)
- Ακτινοβολία (Radiation)
- Τριβή (Friction)
- Δέσμη ηλεκτρονίων (Electron-beam)
- Τόξο πλάσματος (Plasma arc)
- Λείζερ(Laser-assisted)

Κάθε γενικός τύπος τεχνικών θέρμανσης έχει κάποια πλεονεκτήματα, αλλά φαίνεται ότι η τεχνική τοπικής θέρμανσης είναι πιο αποδεκτή και χρήσιμη.

Για παράδειγμα η ολική θέρμανση:

- είναι χρονοβόρα λειτουργία
- η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη
- ο απαιτούμενος έλεγχος θερμοκρασίας είναι δύσκολος
- επηρεάζεται η δομή της εργαλειομηχανής
- η τοποθέτηση του τεμαχίου στο μηχάνημα γίνεται δύσκολη
- η ακρίβεια των διαστάσεων είναι αναξιόπιστη και ορισμένα προβλήματα ασφάλειας μπορεί να προκύψουν λόγω της θερμοκρασίας του αντικειμένου.

Ωστόσο, αυτή η τεχνική θέρμανσης θα μπορούσε να είναι επωφελής εάν το εξάρτημα είχε ήδη προέλθει από την πρώιμη διαδικασία κατασκευής, όπως χύτευση και διαμόρφωση [9,10,11].

Η ολική θέρμανση του τεμαχίου περιλαμβάνει τρεις τύπους όπως αναφέρθηκε ανωτέρω: θέρμανση αντίστασης, φούρνος και θέρμανση τεμαχίου από προηγούμενη διαδικασία κατασκευής. Η μέθοδος θέρμανσης με αντίστασης πραγματοποιείται με ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται από το υλικό του τεμαχίου που τοποθετείται στον εξοπλισμό ή στο εξάρτημα συγκράτησης του τεμαχίου. Το εξάρτημα είναι ειδικά σχεδιασμένο για να κάνει δυνατή την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος. Ολόκληρο το υλικό του τεμαχίου θερμαίνεται και έτσι μόνωση θα πρέπει να εφαρμοστεί για την ασφαλή εφαρμογή μηχανικής επεξεργασίας [10,11].

Η εφαρμογή του φούρνου είναι μια άλλη πιθανή μέθοδος για ολική θέρμανση. Ειδικός ηλεκτρικός φούρνος είναι εγκατεστημένος στο μηχάνημα για να παρέχει την

απαιτούμενη θερμοκρασία για τη διαδικασία κατεργασίας. Αυτή η μέθοδος έχει επίσης μερικά μειονεκτήματα όπως την προσαρμογή του φούρνου στη δομή των εργαλειομηχανών, τον έλεγχο της θερμοκρασίας και των τάσεων στο υλικό του τεμαχίου μετά τη λειτουργία της μηχανικής κατεργασίας. Έτσι, η ανωτέρω μέθοδος δεν είναι αξιόπιστη για μαζική παραγωγή [9,10,11,12].

Το θερμαινόμενο τεμάχιο μπορεί εκτός από τις ανωτέρω μεθόδους να θερμαίνεται και από την προηγούμενη κατεργασία την οποία υπέστη. Αυτή η περίπτωση μπορεί να είναι δυνατή μετά τη διαδικασία χύτευσης εξαρτημάτων ή θερμού σχηματισμού (θα μπορούσε να είναι θερμή σφυρηλάτηση ή θερμή έλαση). Αυτό είναι πιο οικονομικό από άλλες τεχνικές ολικής θέρμανσης, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα προβλήματα όπως η μεταφορά του θερμασμένου τεμαχίου από την μια κατεργασία στην επόμενη [10,11].

Η θέρμανση ολόκληρου του τεμαχίου δεν είναι κατάλληλη για βιομηχανική εφαρμογή λόγω διαφόρων προβλημάτων. Η πιο κατάλληλη μέθοδος θέρμανσης είναι η τοπική θέρμανση. Ένα περιορισμένο τμήμα του τεμαχίου μπορεί να θερμανθεί μπροστά από το εργαλείο κοπής. Αυτός ο τύπος τεχνικής θέρμανσης παρέχει περισσότερα πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, ευκολότερο έλεγχο θερμοκρασίας και ασφαλέστερη λειτουργία για τον χειριστή. Παρατηρείται επίσης ότι οι περισσότερες ερευνητικές μελέτες βασίζονται σε αυτόν τον τύπο θέρμανσης.

1.3 Επαγωγική θέρμανση

Η επαγωγική θέρμανση είναι μια μέθοδος που είναι πολύ αποτελεσματική από άποψη απόδοσης. Στην βιομηχανία πολλές φορές χρησιμοποιούνται διαφοροποιημένες εφαρμογές της που περιλαμβάνονται στις γραμμές μεταφοράς κατασκευής ή ως η τελική διεργασία σε εξαρτήματα μετά τις εργασίες κατεργασίας. Ο μικρός χρόνος θέρμανσης δεν οδηγεί ουσιαστικά σε σκουριά του εξαρτήματος και έτσι δεν απαιτεί ανάγκες λείανσης. Οι Amin και Abdelgadir έδειξαν τη δημιουργικότητα της χρήσης επαγωγικής θέρμανσης για θέρμανση ενός λεπτού στρώματος του τεμαχίου αμέσως πριν από την τελική διαδικασία φρεζαρίσματος για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του υλικού [13]. Ο Amin και η ομάδα του πραγματοποίησαν πολλές ερευνητικές μελέτες σχετικά με τη θερμική υποβοήθηση της κατεργασίας χρησιμοποιώντας τη νέα

μέθοδο θέρμανσης. Επίσης [14] έδειξαν ότι η επαγωγική θερμική υποβοήθηση κατάφερε να περιορίσει κατά 98% τους κραδασμούς και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου πολλές φορές στην περίπτωση του χάλυβα. Οι Aminetal. [15] διεξήγαγαν έρευνα σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας θέρμανσης (χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο θέρμανσης) στην απόδοση κοπτικών εργαλείων καρβιδίου στο τελικό φρεζάρισμα του χάλυβα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι θέρμανση των τεμαχίων θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του πλάτους επιτάχυνσης των κραδασμών, καθώς και στη σημαντική μείωση της μέσης τραχύτητας επιφάνειας και των τιμών φθοράς του εργαλείου. Σε μια άλλη έρευνα, οι Aminetal. [16] χρησιμοποίησαν επαγωγική θερμική υποβοηθούμενη μέθοδο κατεργασίας για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του κράματος Ti-6Al-4V. Ως αποτέλεσμα, επιτεύχθηκε ομοιόμορφη φθορά εργαλείου με σχεδόν 2,5 φορές τη μείωση των μέσων τιμών φθοράς των πλευρών. Ενώ η επιφανειακή τραχύτητα βρέθηκε να κυμαίνεται από 0,5 έως 1,3 mm, με αύξηση στο εύρος ταχύτητας κοπής από 40 έως 160 mm^{min}-1 κατά τη διάρκεια της κανονικής κατεργασίας σε θερμοκρασία δωματίου, το ίδιο για τη θερμικά υποβοηθούμενη κατεργασία βρέθηκε να είναι περίπου 0,2 mm στην ίδια κοπή εύρος ταχύτητας. Η επιφανειακή τραχύτητα που επιτεύχθηκε έτσι μετά τη θερμική υποβοήθηση της κατεργασίας ήταν αρκετά χαμηλή ώστε να υποδηλώνει την εξάλειψη της λεπτής λείανσης και των τραχιών στίλβωσης.

1.3.1 Εξοπλισμός για θέρμανση με μέθοδο επαγωγής

Οι επαγωγικοί θερμαντήρες παρέχουν εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα ηλεκτρικό πηνίο (το επαγωγικό πηνίο), με αποτέλεσμα το επαγωγικό πηνίο να γίνεται η ηλεκτρική πηγή (θερμότητα) που προκαλεί ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής συχνότητας στο προς κατεργασία τεμάχιο. Δεν απαιτείται επαφή μεταξύ του τεμαχίου και του επαγωγικού πηνίου που λειτουργεί ως πηγή θερμότητας και η θερμότητα περιορίζεται σε εντοπισμένες περιοχές ή επιφανειακές ζώνες που γειτνιάζουν αμέσως με το πηνίο. Αυτό συμβαίνει επειδή το εναλλασσόμενο ρεύμα (ac) σε ένα πηνίο επαγωγής έχει ένα αόρατο δυναμικό πεδίο (ή μαγνητική ροή) γύρω από αυτό. Όταν το πηνίο τοποθετείται δίπλα στο εργαλείο περίπου 5 mm πάνω από την επιφάνεια του τεμαχίου, οι δυναμικές γραμμές συγκεντρώνονται στο διάκενο του αέρα μεταξύ του πηνίου και του τεμαχίου. Το επαγωγικό πηνίο λειτουργεί στην

πραγματικότητα ως πρωτεύων μετασχηματιστής, με το προς κατεργασία κομμάτι να γίνεται ο δευτερεύων μετασχηματιστής. Το δυναμικό πεδίο που περιβάλλει το επαγωγικό πηνίο προκαλεί ένα ίσο και αντίθετο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο τεμάχιο, με το τεμάχιο στη συνέχεια να θερμαίνεται λόγω της αντίστασης στη ροή αυτού του επαγόμενου εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής συχνότητας. Ο ρυθμός θέρμανσης του τεμαχίου εξαρτάται από τη συχνότητα και την ένταση του επαγόμενου ρεύματος, τη συγκεκριμένη θερμοκρασία του υλικού, τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και την αντίσταση του υλικού στη ροή του ρεύματος. Τα επαγόμενα ρεύματα αναφέρονται μερικές φορές ως ρεύματα στροβιλισμού, με το υψηλότερο ρεύμα έντασης να παράγεται εντός της περιοχής των έντονων μαγνητικών πεδίων.

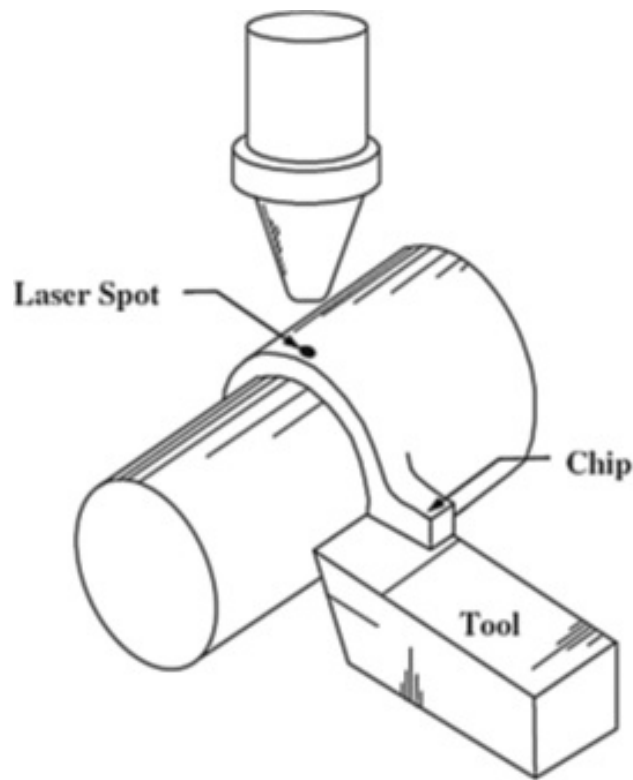
1.4 Θέρμανση με λέιζερ (LAM - Laser-Assisted Machining)

Η επεξεργασία και θέρμανση υλικών με τη βοήθεια των λέιζερ είναι ένας από τους αναδυόμενους τομείς των προηγμένων μηχανικών κατεργασιών. Τα πλεονεκτήματα που καθιστούν τα λέιζερ όλο και πιο ελκυστικά στη βιομηχανική παραγωγή περιλαμβάνουν συνοχή, ικανότητα εστίασης, ένταση πολύ υψηλής ισχύος, ικανότητα διαμόρφωσης ισχύος και ευκολία αυτοματισμού με ανίχνευση κατά τη διαδικασία [17]. Προσφέρει επίσης τη δυνατότητα υλοποίησης καινοτόμου σχεδιασμού με υψηλή ευελιξία, υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας και καλή ποιότητα σε πολλές διαδικασίες κατασκευής. Η επένδυση κεφαλαίου μπορεί να είναι υψηλότερη, αλλά αυτό αντισταθμίζεται από τα οφέλη που αποκτήθηκαν σε πολλές εφαρμογές.

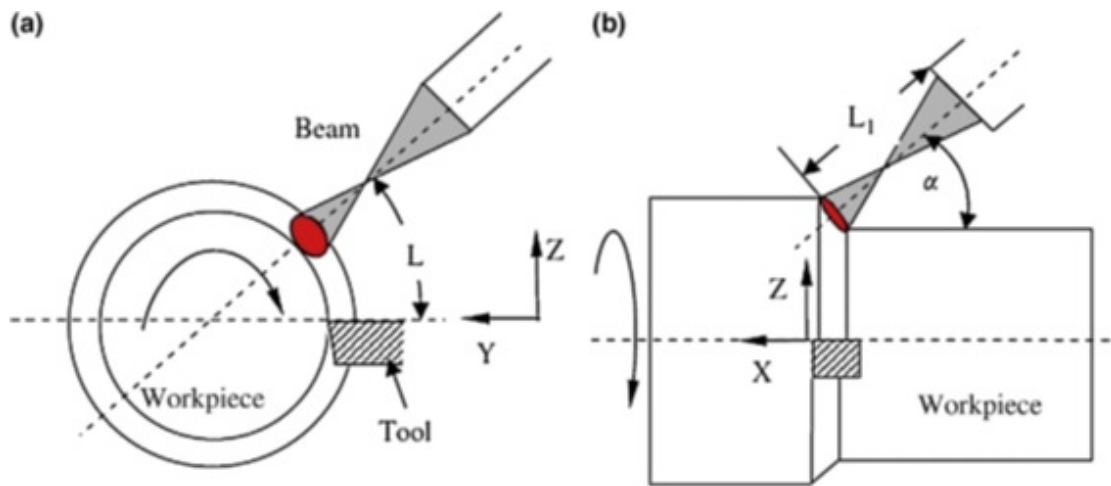
1.4.1 Αρχή της εφαρμογής LAM σε περιστροφικές κατεργασίες

Η εφαρμογή της θέρμανσης με δέσμη λέιζερ στις κατεργασίες με περιστροφή είναι σχετικά απλή λόγω της στάσιμης φύσης του εργαλείου κοπής [18]. Οι μεταβλητές στη δέσμη λέιζερ είναι η θέση, το μέγεθος σημείου, η προσπίπτουσα γωνία και η απόσταση του εργαλείου από την δέσμη. Η δέσμη λέιζερ τοποθετείται κανονικά στην επιφάνεια του τεμαχίου όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 1.3. Αυτή η διάταξη προτιμάται μερικές φορές επειδή η κατεργασία είναι εύκολη και ο εξοπλισμός λέιζερ δεν έρχεται κοντά

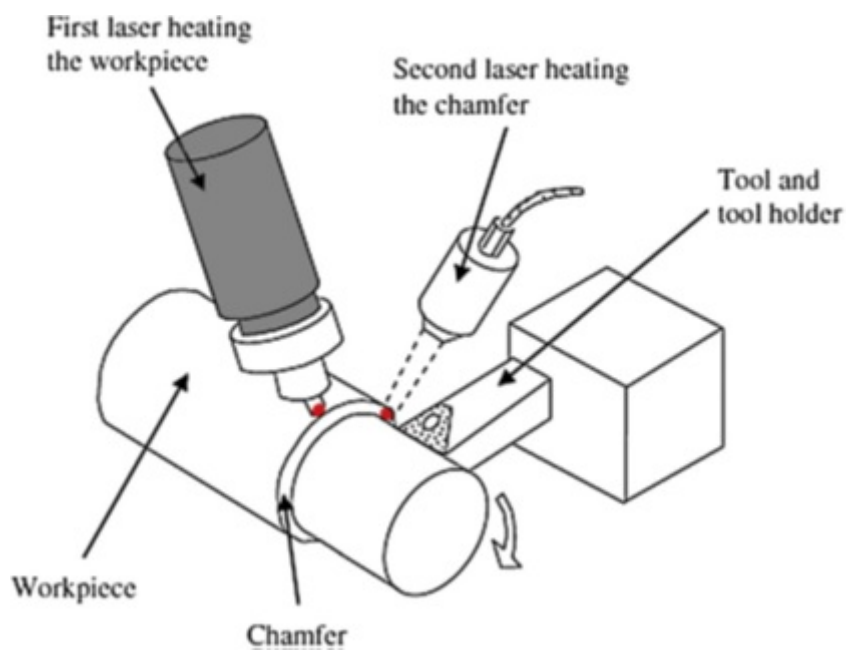
στην περιοχή κατεργασίας, αλλά η απόδοση θέρμανσης της επιφάνειας προς κατεργασία είναι χαμηλή σε αυτήν την περίπτωση και δεν είναι αρκετή για βαθιά κοπή. Η άλλη εναλλακτική λύση που χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές [19-21] είναι να τοποθετηθεί το περιστατικό λέιζερ κάθετα στην επιφάνεια κοπής (όπως το σχήμα 1.4). Το μέγεθος της δέσμης λέιζερ απαιτείται για να καλύψει πλήρως την επιφάνεια της λοξοτομής προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη μείωση των δυνάμεων κοπής στις κατευθύνσεις x-, y- και z[21]. Ωστόσο, ακόμη και η μερική κάλυψη της επιφάνειας της λοξοτομής από τη δέσμη λέιζερ κοντά στην κατεργασμένη επιφάνεια μπορεί να μειώσει δραματικά τη φθορά του εργαλείου [22].



Εικ. 1.3 Διάταξη LAM με τη δέσμη λέιζερ κάθετη στην επιφάνεια του τεμαχίου. Wu, J. F.; Guu, Y. B. *Laser Assisted Machining Methods and Device*, US Patent 7,002,100 B2, 2004.



Εικ.1.4 Η σχετική θέση της δέσμης λέιζερ, του τεμαχίου και του εργαλείου κοπής σε λειτουργία περιστροφής με λέιζερ (α) Κάτοψη (β) Πλάγια όψη. Sun, S.; Harris, J.; Brandt, M. *Parametric Investigation of Laser-Assisted Machining of Commercially Pure Titanium*. *Adv. Eng. Mater.* 2008, 10, 565–572.



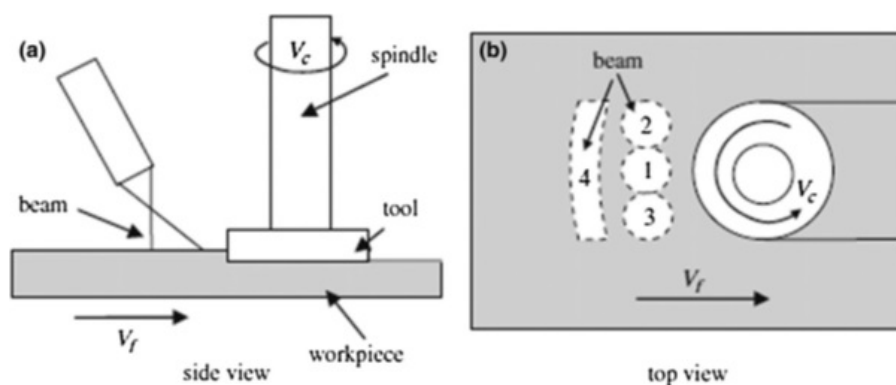
Εικ. 1.5 Περιστροφική κατεργασία με θέρμανση με λέιζερ χρησιμοποιώντας δύο δέσμες λέιζερ. Y.C. *Laser Assisted Machining Process with Distributed Lasers*. *US Patent 0062920A1*, 2007.

Ο Shin[23,24] χρησιμοποίησε πολλαπλές κατανομημένες μονάδες λέιζερ, με σκοπό ταυτόχρονα να θερμαίνει τόσο τη μη κατεργαζόμενη επιφάνεια όσο και την επιφάνεια της λοξοτομής (Εικόνα 1.5) για να δημιουργήσουν την επιθυμητή κατανομή θερμοκρασίας μέσω του βάθους κοπής στο τεμάχιο, το οποίο αναφέρεται ότι έχει ως

αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εργαλείων. Η θέση της δέσμης λέιζερ σε σχέση με το εργαλείο είναι κρίσιμη. Η απόσταση εργαλείου – δέσμης, μαζί με την ταχύτητα κοπής, καθορίζει το χρονικό διάστημα μεταξύ της λειτουργίας θέρμανσης και κατεργασίας με λέιζερ και, συνεπώς, της κατανομής θερμοκρασίας στη ζώνη κοπής. Βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη μείωση των δυνάμεων κοπής επιτυγχάνεται με το σημείο λέιζερ τοποθετημένο πλησιέστερα στο εργαλείο κοπής όταν κόβετε σκληρυμένος χάλυβας [25], καθαρό τιτάνιο [21] και λευκός χυτοσίδηρο υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο [26]. Ωστόσο, εάν η δέσμη είναι πολύ κοντά στο εργαλείο κοπής, ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα μηχανικής επεξεργασίας [27]. Επομένως, το εργαλείο κοπής πρέπει να διατηρείται σε ελάχιστη απόσταση από τη δέσμη λέιζερ.

1.4.2 Αρχή της εφαρμογής LAM στην κατεργασία φρεζαρίσματος

Η κατεργασία φρεζαρίσματος υποβοηθούμενη από την θέρμανση με λέιζερ καθώς περιστρέφεται το εργαλείο κοπής είναι μια περίπλοκη εργασία. Γενικά, η δέσμη μπορεί να τοποθετηθεί ξεχωριστά από το εργαλείο κοπής ή να ενσωματωθεί στον άξονα. Για το φρεζάρισμα της επιφάνειας, ο ευκολότερος τρόπος είναι να τοποθετηθεί η δέσμη του λέιζερ μπροστά από το εργαλείο κοπής προς την κατεύθυνση τροφοδοσίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6. Το περιορισμένο μέγεθος της δέσμης της εξωτερικής πηγής θερμότητας περιορίζει την ικανότητα κάλυψης του πλάτους κοπής στις περισσότερες εφαρμογές. Επομένως, η δέσμη μπορεί να θερμαίνει μόνο μέρος του πλάτους κοπής.



Εικ. 1.6 Απεικόνιση της θέσης της δέσμης σε σχέση με το εργαλείο κοπής για φρεζάρισμα επιφανειών. Sun, S.; Harris, J.; Brandt, M. *Parametric Investigation of Laser-Assisted Machining of Commercially Pure Titanium*. *Adv. Eng. Mater.* 2008, 10, 565–572.

Αυτό θα μπορούσε να είναι το μεσαίο (θέση 1) [28] ή το σημείο εισόδου του εργαλείου (θέση 2) ή και τα δύο σημεία εισόδου και εξόδου (θέση 2 και θέση 3) από δύο δέσμες

[29,30]. Για να καλυφθεί το πλάτος της κοπής (περιοχή 4) απαιτείται λέιζερ υψηλής ισχύος, πολλές ακτίνες ή δέσμη γραμμής [30-33]. Η δυναμική πρόσκρουση στο εργαλείο κοπής, καθώς το περιστρεφόμενο εργαλείο εμπλέκεται κατά διαστήματα και αποσυνδέεται με το τεμάχιο που κατεργάζεται στα σημεία εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα, προκαλεί σημαντική δόνηση και τελικά θραύση του εργαλείου κατά τις εργασίες φρεζαρίσματος.

Έτσι η θέρμανση της δέσμης λέιζερ στο σημείο εισόδου είναι πολύ σημαντική για την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου και την μείωση των δονήσεων. Οι Rajagopalaetal., [20] πειραματίστηκαν με ένα λέιζερ CO₂ 14kW σε τιτάνιο και Inconel 718, έδειξαν ότι η θέση της δέσμης είναι σημαντική κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Μελετήθηκαν διάφορες επικαλύψεις, όπως το μελάνι της Ινδίας, το καρβίδιο του πυριτίου και το πυριτικό κάλιο, για την βελτίωση της απορροφητικότητας της επιφάνειας.

1.4.3 Πλεονεκτήματα της μεθόδου LAM

Οι Komendurietal. [34] διεξήγαγαν μια έρευνα για θερμική κατεργασία Ti-6Al – 4V και Inconel 718 χρησιμοποιώντας ένα παλμικό λέιζερ Nd-YAG, το οποίο έχει το πλεονέκτημα της παροχής υψηλότερης απορροφητικότητας για μέταλλα λόγω του μικρότερου μήκους κύματος. Για να ξεπεραστεί το διαλείπον πρόβλημα ενέργειας, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές. Αρχικά, ο Komenduri χρησιμοποίησε το λέιζερ ως κύρια πηγή θερμότητας με υψηλό ρυθμό παλμού και παρατήρησε μείωση κατά 49% στις δυνάμεις κοπής και τον κατακερματισμό των τσιπ για την κατεργασία του Inconel 718. Για το Ti-6Al – 4V οι δυνάμεις μειώθηκαν κατά 30% στον αέρα και 60% με βοήθεια οξυγόνου. Στην συνέχεια, χρησιμοποίησε το λέιζερ για να προετοιμάσει το τεμάχιο πριν από την κατεργασία και κατάφερε μείωση κατά 28% των δυνάμεων για το Ti-6Al-4V. Ωστόσο η έρευνα δεν διέθετε κάποια λεπτομερή ανάλυση των αποτελεσμάτων, δεν αναφέρθηκαν βελτιώσεις στη φθορά των εργαλείων και επίσης παρατηρήθηκε τραχύτητα στην επιφάνεια.

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει προηγμένα κεραμικά υλικά σε περιστροφικές κατεργασίες με θέρμανση Για παράδειγμα, ο Corpley [1], ο οποίος επεσήμανε τη σχέση μεταξύ του σχήματος και της πόλωσης λέιζερ. Τα αποτελέσματά του δείχνουν ότι η

αντοχή του Si₃N₄ μετά τη μηχανική κατεργασία είναι περίπου 30% μεγαλύτερη από αυτήν που παράγεται από συμβατική μέθοδο. Ο Corpley πρότεινε επίσης την εφαρμογή ενός κεκλιμένου λέιζερ για τη θέρμανση των υλικών την ίδια στιγμή όπου ένα εργαλείο κοπής μονού σημείου αφαιρεί το υλικό με την χρήση τόννου. Αυτή η μέθοδος αύξησε το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, αλλά θεωρήθηκε ότι ταιριάζει μόνο με μεταλλικά υλικά. Στην αναζήτησή τους για μια νέα τεχνική κοπής κεραμικών, οι Uehara και Takeshita [35] χρησιμοποίησαν θερμή κατεργασία για να κόψουν κεραμικά πορσελαινίτη και Si₃N₄, μετρώντας τα αποτελέσματα από άποψη δύναμης κοπής, σχήματος τσιπ, τραχύτητας επιφάνειας και φθοράς εργαλείων. Η πρώτη επιτυχημένη χρήση του LAM σε κεραμικό υλικό ήταν αυτή των König και Zaboklicki [36], οι οποίοι απέκτησαν συνεχή απόβλητα για νιτρίδιο πυριτίου όταν η θερμοκρασία του ξεπέρασε τους 1200 οC. Εφαρμόζοντας LAM σε κεραμικά και σύνθετα υλικά ανέφεραν χαμηλή δύναμη κοπής, μικρή φθορά εργαλείων και υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού ως κύρια χαρακτηριστικά. Ακολουθώς ο Chryssolouris[37] δοκίμασε την εφαρμογή LAM σε γενικά μέταλλα, θερμαίνοντας την επιφάνεια του τεμαχίου με συνεχή δέσμη λέιζερ πριν αφαιρέσει το υλικό με ένα εργαλείο κοπής. Αυτό το πείραμα διαπίστωσε μείωση της φθοράς των εργαλείων, με μείωση κόστους 60-80% σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο λείανσης.

1.5 Ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα

Η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (HAZheataffectedzone) είναι η βασική περιοχή ενός υλικού η οποία δεν τήκεται, αλλά οι ιδιότητες του υλικού και η μικροδομή σε εκείνη την περιοχή ενδέχεται να αλλάξουν λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Είναι κρίσιμη περιοχή καθώς εκεί μπορεί να συμβεί αστοχία του υλικού ή μετασχηματισμός της φάσης κατά την θέρμανση με δέσμη laser με επαγωγή (IAM) Η ανάλυση της HAZ έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας πηγές θερμότητας λέιζερ, για εφαρμογές όπως συγκόλληση με λέιζερ και μηχανική κατεργασία με λέιζερ [38-41]. Οι Joshi και ο Sharma [42] μελέτησαν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της κωνικής και θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στο Al6061-T6.

1.6 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν αρχικά η δημιουργία κατάλληλης πειραματικής διάταξης και έπειτα η εκτέλεση πειράματος για τον προσδιορισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε κυλινδρικό δοκίμιο κατά την κατεργασία της τórνευσης.

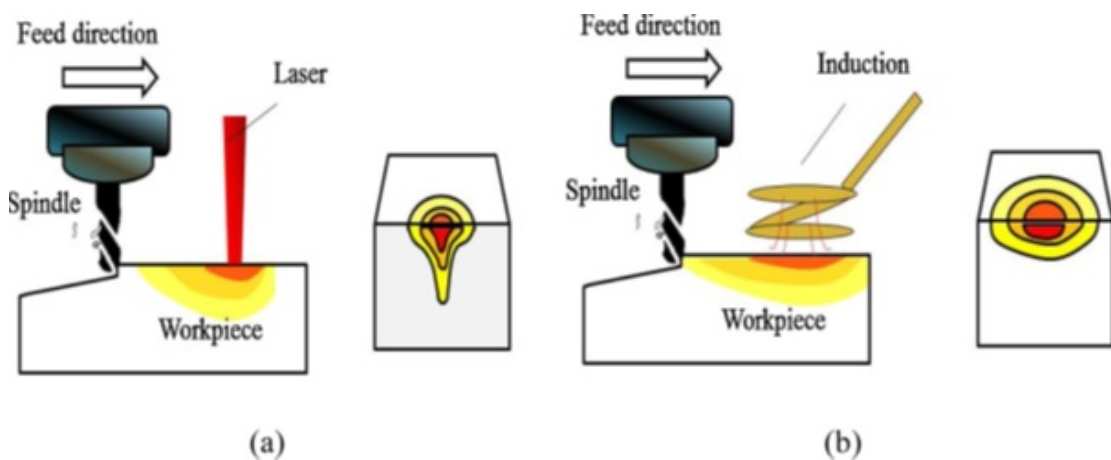
Εκτελέστηκαν ψυχρές και θερμές επαναλήψεις του πειράματος και συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα από το σύνολο των επαναλήψεων. Επίσης αναλύεται η πειραματική διάταξη καθώς και οι συνθήκες και οι παράμετροι του πειράματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 Μελέτη της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα

Στην παρούσα ενότητα γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση της μελέτης των Jun-HwanKima, Eun-JungKimb, Choon-ManLeec, με την οποία εξετάστηκε η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα αλλά και τα χαρακτηριστικά των μηχανικών κατεργασιών στις οποίες υπήρξε θέρμανση του τεμαχίου είτε με λέιζερ είτε με επαγωγή [47].

Ο σκοπός της ανωτέρω μελέτης ήταν να αναλύσει τη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα που παράγεται από λέιζερ και επαγωγής σε υλικά όπως το Inconel 718 και το Ti-6Al-4 V. Επιπλέον, χαρακτηριστικά των μηχανικών κατεργασιών όπως η δύναμη κοπής και η τραχύτητα επιφάνειας συγκρίθηκαν σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας. Η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα, η θερμοκρασία προθέρμανσης και το βάθος κοπής στα Inconel 718 και Ti-6Al-4 V επιβεβαιώθηκαν μέσω θερμικής ανάλυσης και πειράματος προθέρμανσης. Η μελέτη επικεντρώνεται στη θερμότητα που παράγεται από τις πηγές (λέιζερ και επαγωγή) στην επιφάνεια του τεμαχίου. Η θερμότητα που παράγεται από τη διαδικασία κατεργασίας δεν εξετάστηκε. Ένα σχηματικό διάγραμμα των κατεργασιών χρησιμοποιώντας λέιζερ και επαγωγικές πηγές θερμότητας παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1.



Εικ. 2.1 Σχηματική απεικόνιση κατεργασιών ((α) Με χρήση λέιζερ, (β) με χρήση επαγωγής)

Η ανάλυση ζώνης που επηρεάστηκε από τη θερμότητα πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας θερμική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η θερμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η σωστή θερμοκρασία προθέρμανσης και το πραγματικό βάθος κοπής για το πειραματικό δοκίμιο. Η θερμική ανάλυση της πηγής θερμότητας λέιζερ πραγματοποιήθηκε με το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS.

Μια θερμική ανάλυση χρησιμοποιώντας εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία εισόδους εκφράζεται από την Εξ. (2.1).

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + Q \quad (2.1)$$

όπου το ρ αντιπροσωπεύει την πυκνότητα, το C_p είναι ειδική θερμότητα, το k είναι θερμική αγωγιμότητα και το Q είναι παραγωγή ισχύος ανά μονάδα όγκου. Η αρχική κατάσταση δίνεται από την Εξ. (2.2) ως

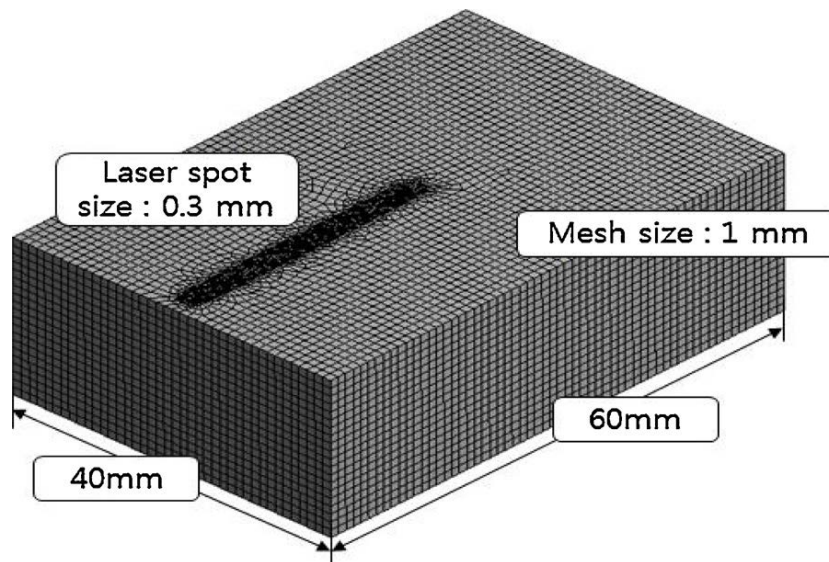
$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2.2)$$

Η οριακές συνθήκες καθορίζονται από την Εξ. (2.3) ως εξής:

$$-k \frac{\delta T}{\delta z} = q(x, y) - h(T - T_o) \quad (2.3)$$

όπου το q αντιπροσωπεύει την ροή θερμότητας, το h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, το T είναι η θερμοκρασία επιφάνειας και το T_0 είναι θερμοκρασία περιβάλλοντος. [43]

Η ροή θερμότητας στην θερμική ανάλυση ορίστηκε ως λέιζερ ισχύος 90 W. Η ταχύτητα κίνησης του σημείου του λέιζερ ορίστηκε ως 50 mm / min. Η αρχική θερμοκρασία ορίστηκε σε 20 °C. Η εικόνα 2.2 δείχνει το αναλυτικό μοντέλο του δείγματος στο LAM και δείχνει το σχήμα της δημιουργίας πλέγματος. Η διάμετρος του σημείου του λέιζερ ήταν 3 mm. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια της θερμικής ανάλυσης, το μέγεθος πλέγματος του δοκιμίου διαιρέθηκε κατά 1 mm και η ζώνη κηλίδας λέιζερ ορίστηκε με μέγεθος πλέγματος 0,3 mm. Το πλέγμα αποτελείται από 253.458 κόμβους και 65.741 στοιχεία. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.



Εικ. 2.2 Θερμικό μοντέλο

Πίνακας 2.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.

Mesh size (mm)	Number of elements	Temperature (°C)
0.25	72,045	905.02
0.3	65,741	901.73
0.5	56,113	908.03
1.0	53,110	916.29

Οι Πίνακες 2.2 και 2.3 δείχνουν τις ιδιότητες του υλικού και τη χημική σύνθεση του Inconel 718. Η ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της πηγής θερμότητας επαγωγής πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Maxwell στο πρόγραμμα ANSYS. Η εξίσωση που διέπει την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση Maxwell που δίνεται από την Εξ. (2.4)

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\delta A}{\delta t} = J_s \quad (2.4)$$

όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα κενού, το μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα, το A είναι το δυναμικό μαγνητικού διανύσματος, το σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το J_s είναι η πυκνότητα ρεύματος πηγής [44].

Η οριακή τιμή στην ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ορίστηκε σε ρεύμα υψηλής συχνότητας 300 kHz και η ροή ρεύματος ρυθμίστηκε σε ένα τμήμα του επαγωγικού πηνίου.

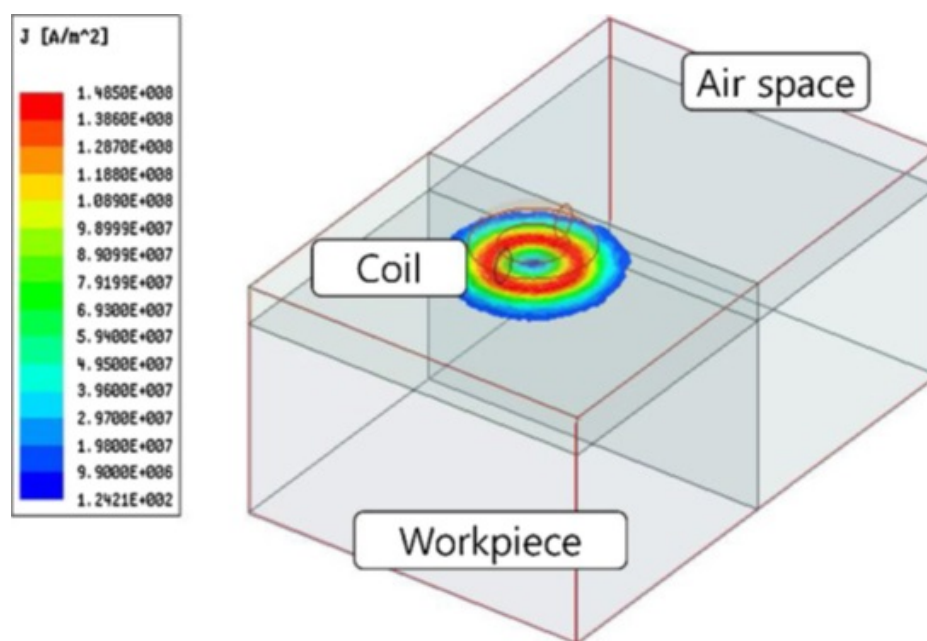
Το μοντέλο ανάλυσης της περίπτωσης που είχαμε επαγωγή αποτελείται από τον αέρα, ένα δοκίμιο και ένα πηνίο για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η διάμετρος του επαγωγικού πηνίου ήταν 8 mm. Η εικόνα 2.3 δείχνει το αναλυτικό μοντέλο του δείγματος και την κατανομή του ρεύματος στο δοκίμιο. Οι πίνακες 2.4 και 2.5 δείχνουν τις ιδιότητες του υλικού και τη χημική σύνθεση του Ti-6Al-4V.

Πίνακας 2.2 Υλικές ιδιότητες του Inconel 718 [45].

Ταση διαρροής (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Επιμήκυνση (%)	Σκληρότητα (HRC)
980	1,280	12	42
Μαγνητική διαπερατότητα	Μαζική αγωγιμότητα [MS / m]	Ειδική θερμότητα [J / kg- °C]	Θερμική αγωγιμότητα [W /
1.0011	80	435–637	11.2–25.8

Πίνακας 2.3 Χημική σύνθεση του Inconel 718 [45].

Στοιχείο	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	C	Mn	Si	Cu
wt%	50–55	17–21	4.75–5.5	2.8–3.3	0.65–1.1 5	0.2–0.8	≤1.0	≤0.08	≤0.35	≤0.35	≤0.3



Εικ. 2.3 Η κατανομή ρεύματος στην κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Πίνακας 2.4 Ιδιότητες υλικού Ti-6Al-4 V [46].

Ταση διαρροής (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Επιμήκυνση (%)	Σκληρότητα (HRc)
830	900	10	36
Μαγνητική διαπερατότητα	Μαζική αγωγιμότητα [MS / m]	Ειδική θερμότητα [J / kg- °C]	Θερμική αγωγιμότητα [W / m-K]
1.00005	56	526	6.7

Πίνακας 2.5 Χημική σύνθεση Ti-6Al-4 V [46].

Στοιχείο	Ti	Al	V	C	H	Fe	N	O
wt%	87.7–91	5.5–6.75	3.5–4.5	≤0.08	≤0.015	≤0.4	≤0.03	≤0.2

2.2 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας

Σε αυτή τη μελέτη, τα χαρακτηριστικά μηχανικής κατεργασίας των Inconel 718 και Ti-6Al-4 V διερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας LAM, IAM. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα θερμικής ανάλυσης και προθέρμανσης για την ανάλυση του αποτελεσματικού βάθους κοπής και της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά κατεργασίας κάθε μεθόδου αναλύθηκαν σύμφωνα με τον ρυθμό τροφοδοσίας υπό ισοδύναμες συνθήκες κατεργασίας. Τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης έχουν ως εξής.

(1) Η θερμοκρασία προθέρμανσης και το πραγματικό βάθος κοπής προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες υλικού των Inconel 718 και Ti-6Al-4 V. Το πείραμα προθέρμανσης πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης.

(2) Συγκρίνοντας την HAZ των Inconel 718 και Ti-6Al-4 V, η HAZ έχει μέγιστο βάθος και πλάτος στο ρυθμό τροφοδοσίας 50 mm / min. Ωστόσο, η HAZ του Inconel 718 ήταν πιο ευκρινής από αυτή του Ti-6Al-4 V επειδή το Ti-6Al-4 V έχει χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Επίσης, η πηγή θερμότητας με λέιζερ έχει υψηλή συγκέντρωση ενέργειας και κατευθύνεται άμεσα στην επιφάνεια του υλικού, αλλά η πηγή θερμότητας επαγωγής προκαλεί ροή ρεύματος στο υλικό. Λόγω αυτής της

διαφοράς, το μέγεθος της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα για τη μέθοδο επαγωγής επηρεάζεται από τον ρυθμό τροφοδοσίας και διαφέρει από τις άλλες μεθόδους. (1) Η θερμοκρασία προθέρμανσης και το πραγματικό βάθος κοπής προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων τις ιδιότητες υλικού των Inconel 718 και Ti-6Al-4 V. Το πείραμα προθέρμανσης πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης.

(3) Μετρήθηκε η δύναμη κοπής των τριών μεθόδων κατεργασίας για τρεις ρυθμούς τροφοδοσίας. Η δύναμη κοπής μειώθηκε έως από 22,6% έως και 56,5% στη κατεργασία του Inconel 718 και από 33,2% έως και 42% στη κατεργασία του Ti-6Al-4 V σε σύγκριση με την μέθοδο IAM και την συμβατική κατεργασία (χωρίς θέρμανση) χρησιμοποιώντας την μέθοδο LAM.

(4) Μετρήθηκε η επιφανειακή τραχύτητα των τριών μεθόδων κατεργασίας για τρεις ρυθμούς τροφοδοσίας. Η τραχύτητα της επιφάνειας βελτιώνεται από 14,8% έως και 34,28% στη μηχανική κατεργασία του Inconel 718, και βελτιώθηκε από 28,5% έως και 54,5% στη μηχανική κατεργασία Ti-6Al-4 V. Η δύναμη κοπής και η τραχύτητα της επιφάνειας βελτιώθηκαν λόγω της μειωμένης δόνησης του εργαλείου κοπής αποτέλεσμα της προθέρμανσης κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

(5) Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι η LAM μπορεί να θεωρηθεί πιο αποτελεσματική μέθοδος από την TAM επειδή η πηγή θερμότητας επαγωγής είναι πιο πιθανό να επηρεάζεται από τους ρυθμούς τροφοδοσίας από την πηγή θερμότητας λέιζερ. Για την επαγωγή τελικά συνιστάται να έχει χαμηλό ρυθμό τροφοδοσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Πειραματική διάταξη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκαν πειραματικά οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία της τόνρευσης σε ψυχρό αλλά και θερμό δοκίμιο. Συνολικά γίναν δεκαοκτώ μετρήσεις εκ των οποίων οι εννέα αφορούσαν ψυχρό δοκίμιο και οι υπόλοιπες το θερμό.

Η θέρμανση του δοκιμίου έγινε με φλόγιστρο επιφανειακά και η μέση θερμοκρασία των δοκιμίων μετρήθηκαν με θερμόμετρο laser να είναι 80 οC.

Οι παράμετροι οι οποίοι μεταβαλλόταν κατά την διαδικασία του πειράματος ήταν το βάθος κοπής (mm) καθώς επίσης και η πρόωση (mm/rev). Οι τιμές οι του βάθους κοπής ήταν 0.2 mm, 0.3 mm και 0.5 mm ενώ αντίστοιχα οι τιμές της πρόωσης ήταν 0.12 mm/rev, 0.2 mm/rev και 0.27 mm/rev.

Η ταχύτητα περιστροφής σε όλες τις επαναλήψεις ήταν 600 RPM. Το υλικό του δοκιμίου ήταν χάλυβας.

Ο συμβατικός τόννος που χρησιμοποιήθηκε είναι FritzKern K.G., μοντέλο D18L και παρατίθεται στην εικόνα 3.1 παρακάτω. Η ταχύτητα περιστροφής του κυμαίνεται από 19 έως 850 rpm, ενώ η πρόωση ρυθμίζεται από 0,044 έως 0,8 mm/rev



Εικ. 3.1 Τόννος στον οποίο εκτελέστηκε το πείραμα

Κατά την κατεργασία των τεμαχίων είναι τοποθετημένο ένα δυναμόμετρο KISTLER 9257A το οποίο κατά την διάρκεια της τórνευσης του τεμαχίου μετρά τις πειραματικές δυνάμεις κοπής οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Το δυναμόμετρο KISTLER (εικόνα 3.2) είναι ένα δυναμόμετρο χαλαζία για τη μέτρηση των τριών συνιστωσών μιας δύναμης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Αξιοπίστο σύστημα μέτρησης δύναμης.
- Είναι κατάλληλο για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής κατά την διάρκεια φρεζαρίσματος, λείανσης και τórνευσης.
- Ενσωματωμένοι ενισχυτές – απλή λειτουργία.
- Τέσσερα μετατρέψιμα επίπεδα μετρήσεων.



Εικ. 3.2 Δυναμόμετρο KISTLER

Οι δυνάμεις οι οποίες υπολογίστηκαν είναι οι F_x , F_y και F_z σε κάθε επανάληψη. Οι αντίστοιχοι άξονες φαίνονται στο κάτωθι σχήμα.

$$\Sigma F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$



Εικ. 3.3 Σύστημα αξόνων που χρησιμοποιήθηκε.



Εικ. 3.4 Δοκίμιο κατά την ψυχρή επανάληψη του πειράματος.



Εικ. 3.5 Δοκίμιο κατά την θερμή επανάληψη του πειράματος.



Εικ. 3.6 Μέτρηση επιφανειακής θερμοκρασίας.

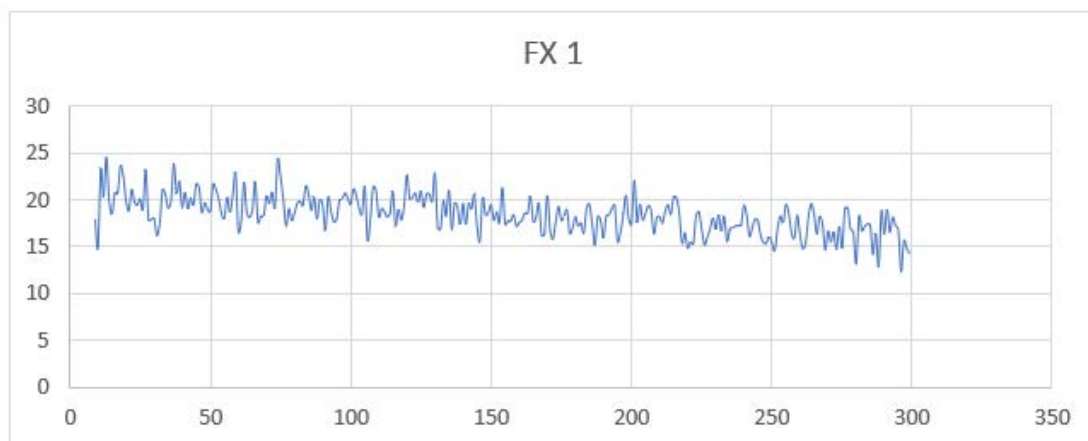
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

5.1 Αποτελέσματα πειράματος - Ψυχρή τόννευση

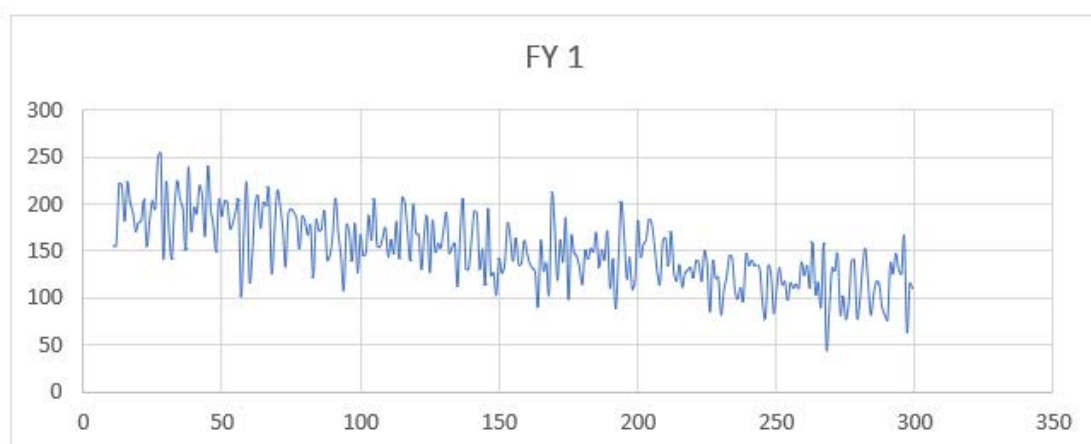
Συνολικά έγιναν εννέα επαναλήψεις του πειράματος για την ψυχρή τόννευση. Οι επαναλήψεις ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την πρόωση κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει τρεις επαναλήψεις για διαφορετικό βάθος κοπής.

5.1.1 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm

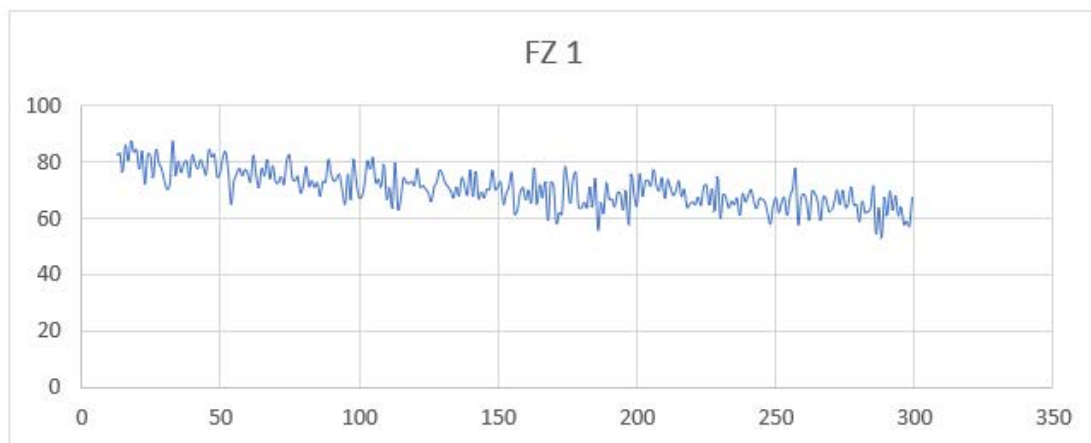
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.1 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.2 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



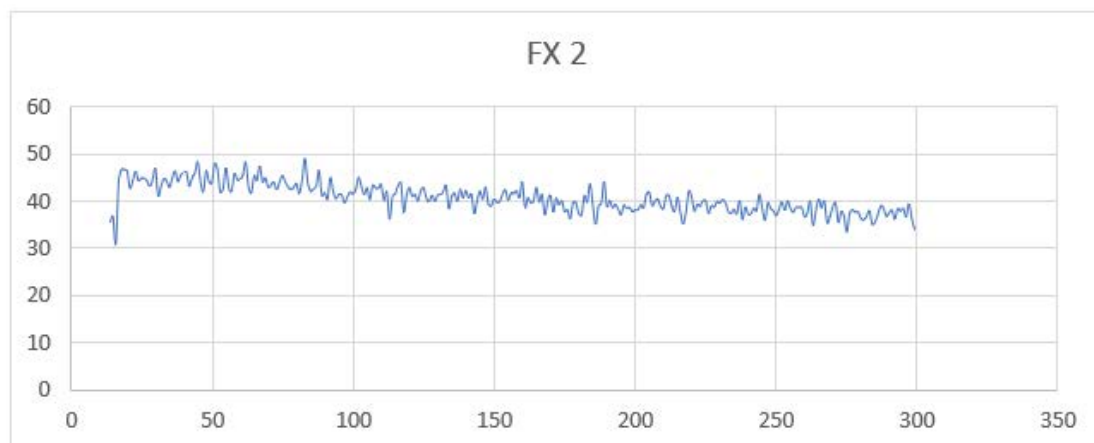
Διάγραμμα 3.3 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.1 Πίνακας στοιχείων

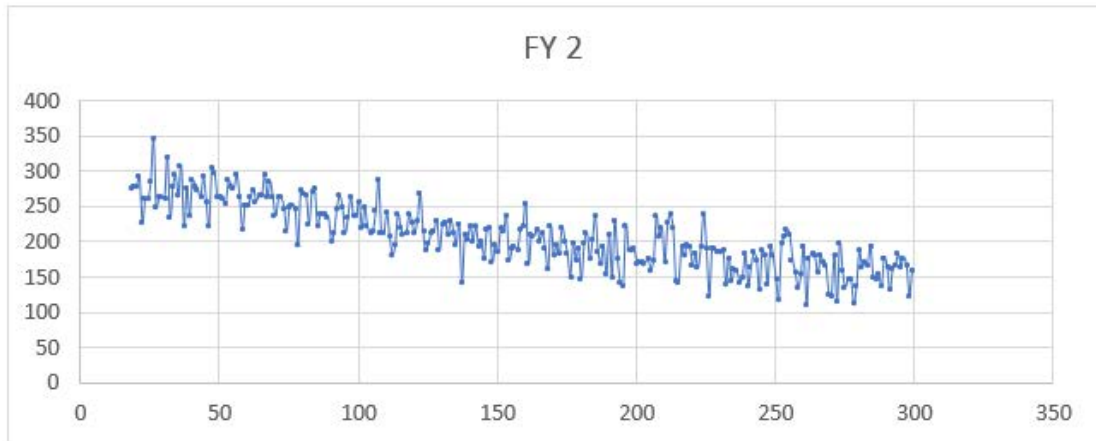
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΩΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 1	18.47	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.12	2.8
FY 1	150.66	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.12	2.8
FZ 1	70.64	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.12	2.8
ΣF	167.42					

5.1.2 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm

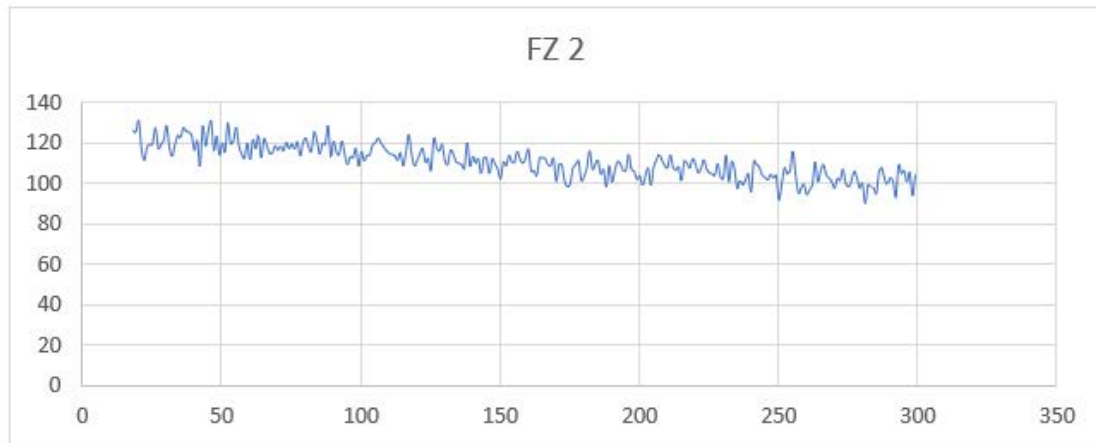
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.4 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.5 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



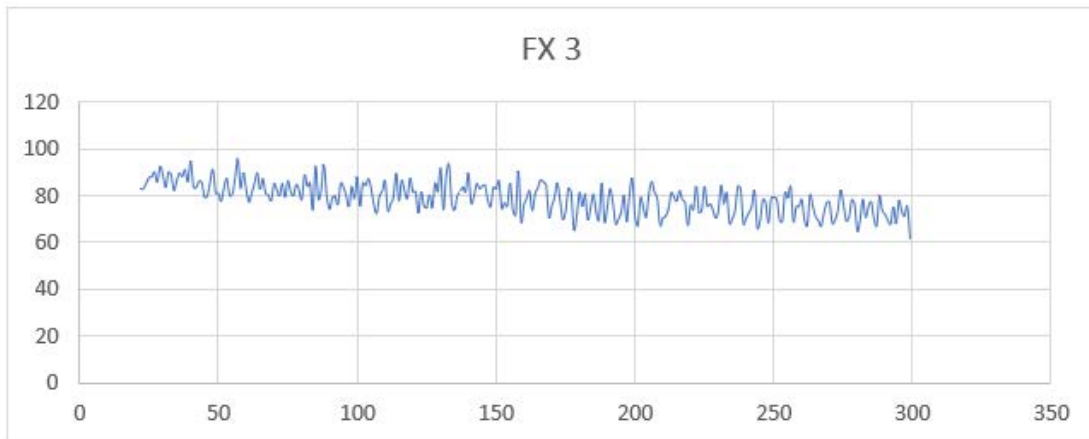
Διάγραμμα 3.6 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.2 Πίνακας στοιχείων

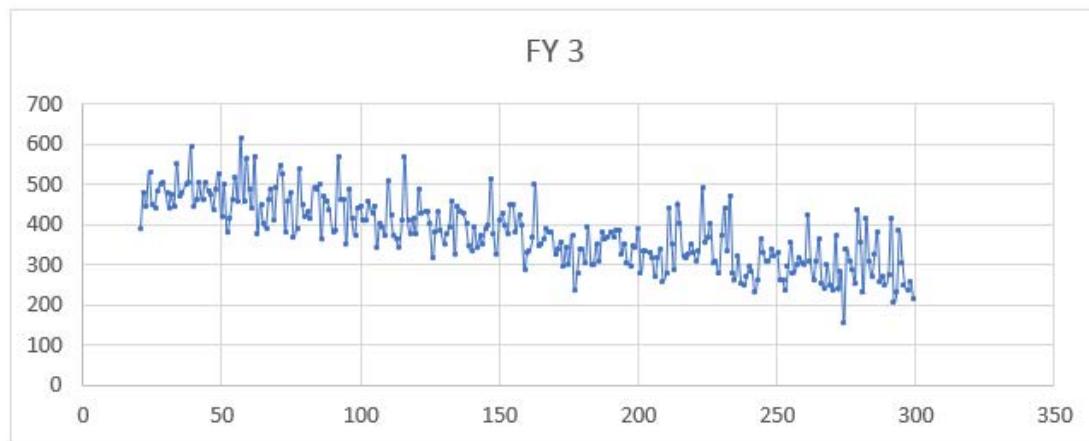
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 2	40.62	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.12	2.8
FY 2	208.76	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.12	2.8
FZ 2	110.47	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.12	2.8
ΣF	239.65					

5.1.3 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm

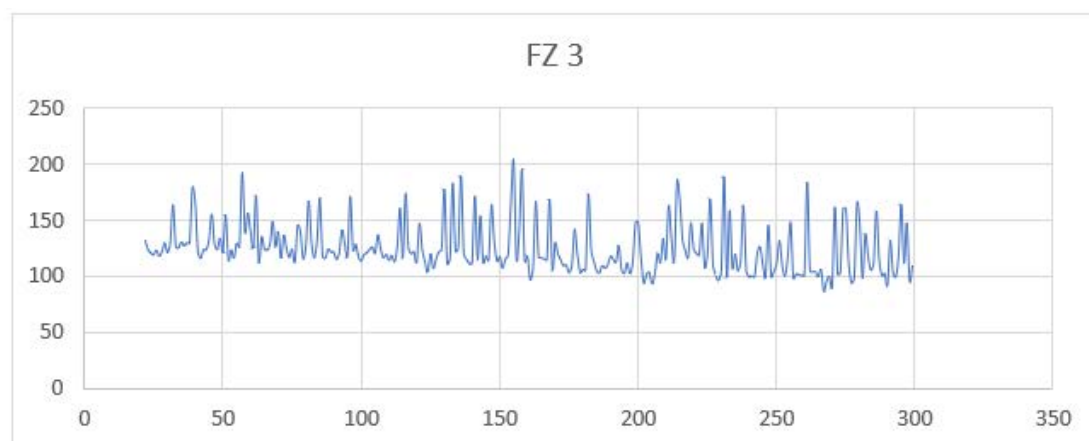
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.7 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.8 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



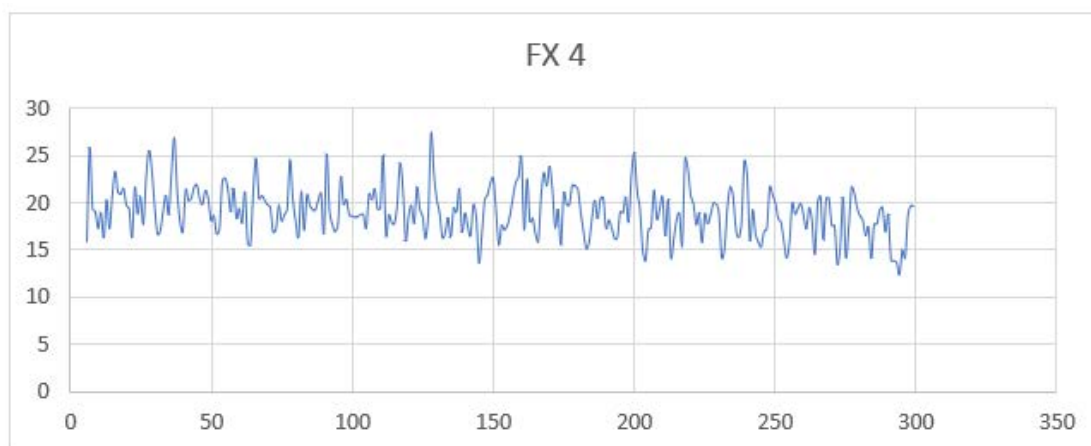
Διάγραμμα 3.9 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.3 Πίνακας στοιχείων

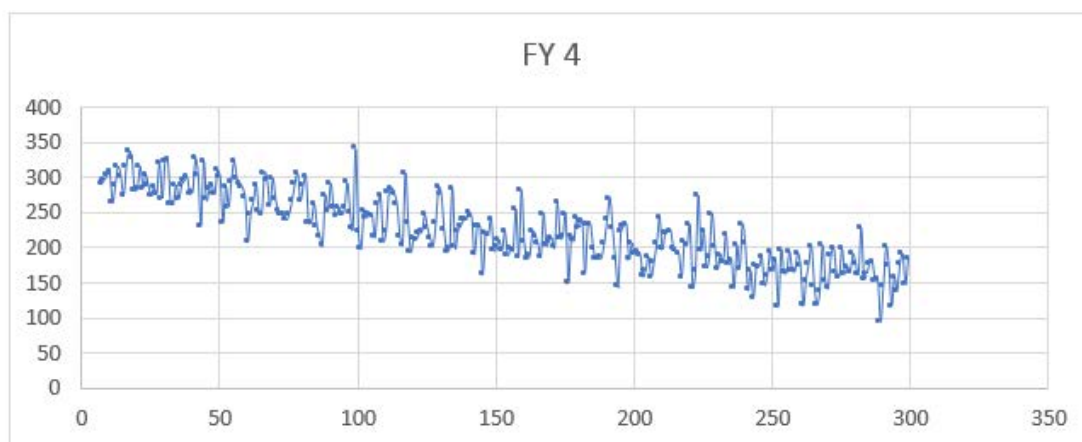
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)		ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 3	78.89	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.12	2
FY 3	379.61	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.12	2
FZ 3	124.85	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.12	2
ΣF	407.33					

5.1.4 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm

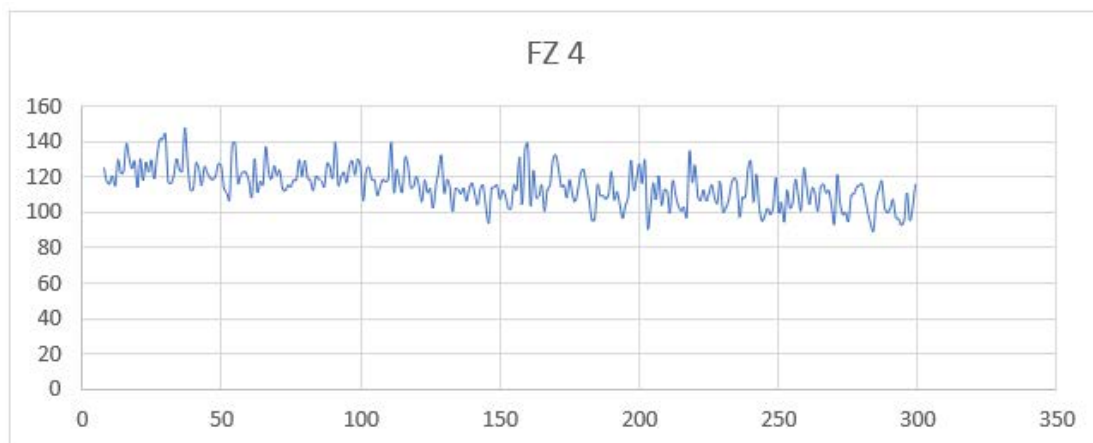
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.10 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.11 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



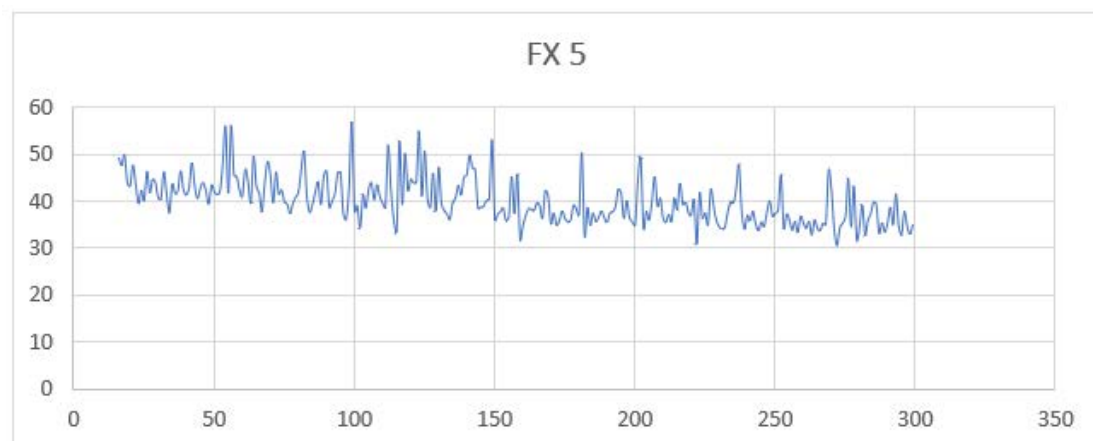
Διάγραμμα 3.12 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.4 Πίνακας στοιχείων

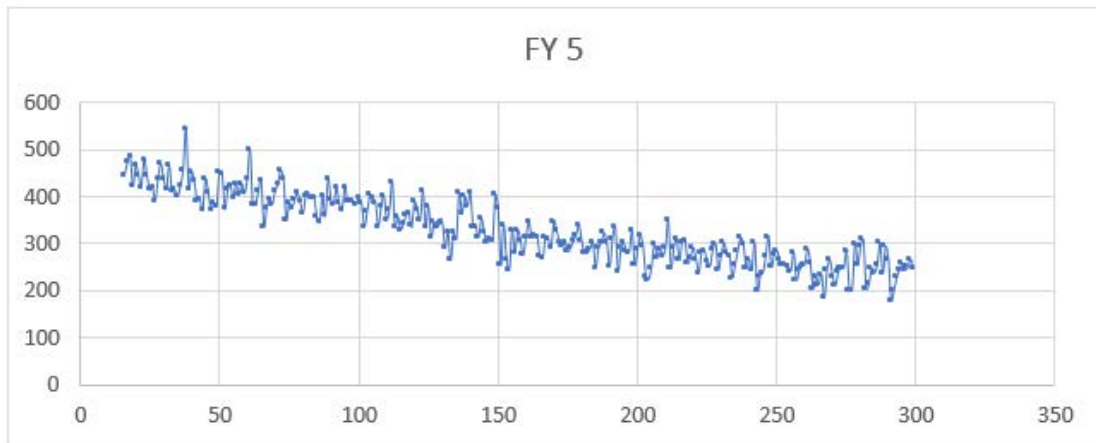
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 4	19.04	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.2	3.4
FY 4	224.78	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.2	3.4
FZ 4	114.86	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.2	3.4
ΣF	253.14					

5.1.5 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm

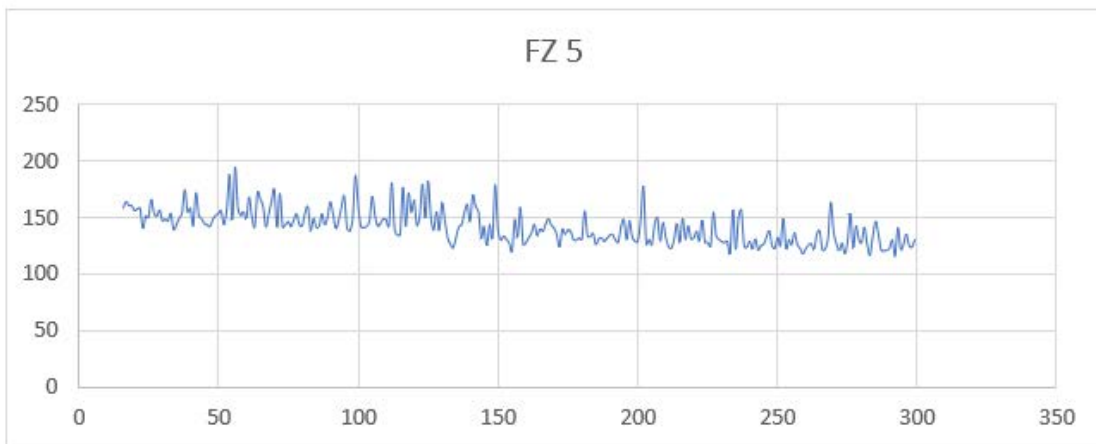
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x, y και z.



Διάγραμμα 3.13 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.14 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



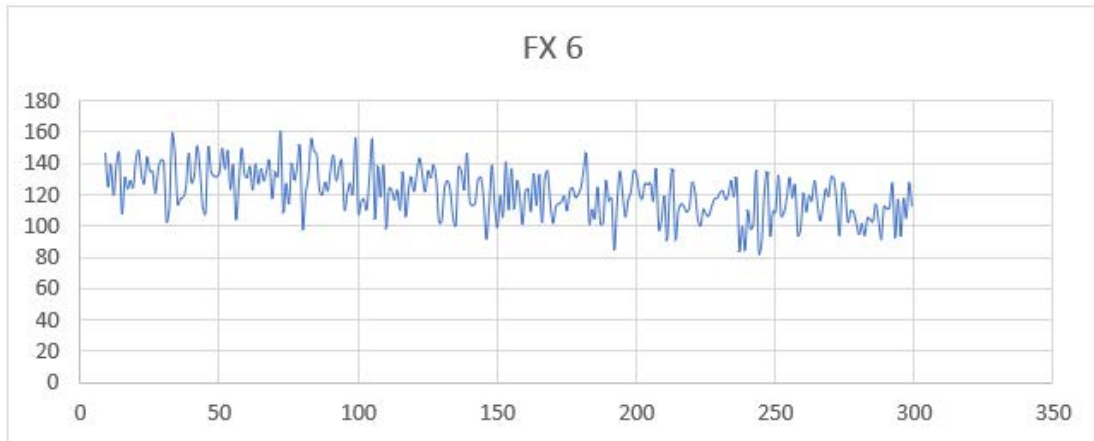
Διάγραμμα 3.15 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.5 Πίνακας στοιχείων

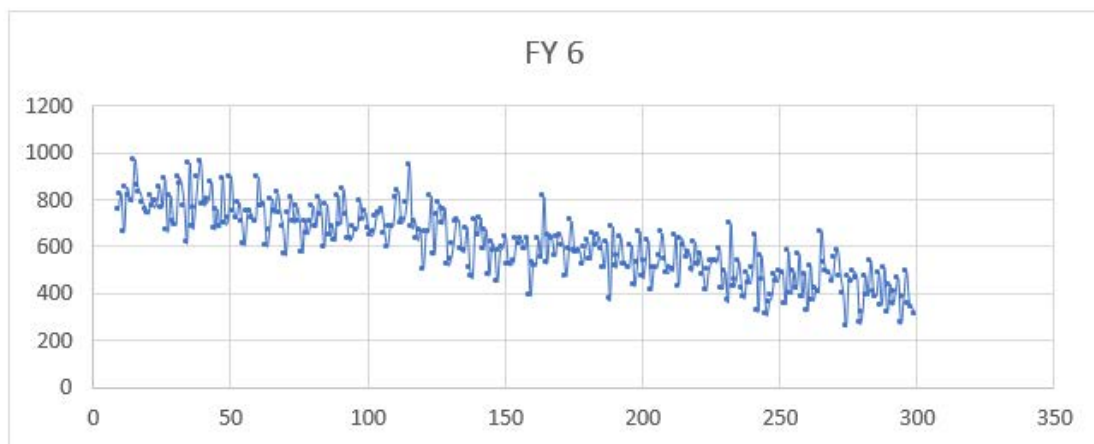
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 5	40.10	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.2	2.6
FY 5	328.03	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.2	2.6
FZ 5	142.24	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.2	2.6
ΣF	359.78					

5.1.6 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm

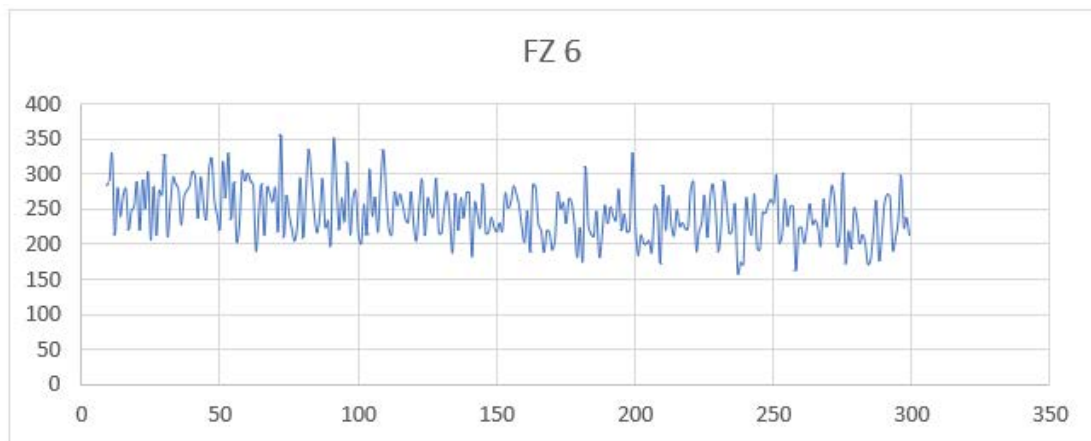
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.16 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.17 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



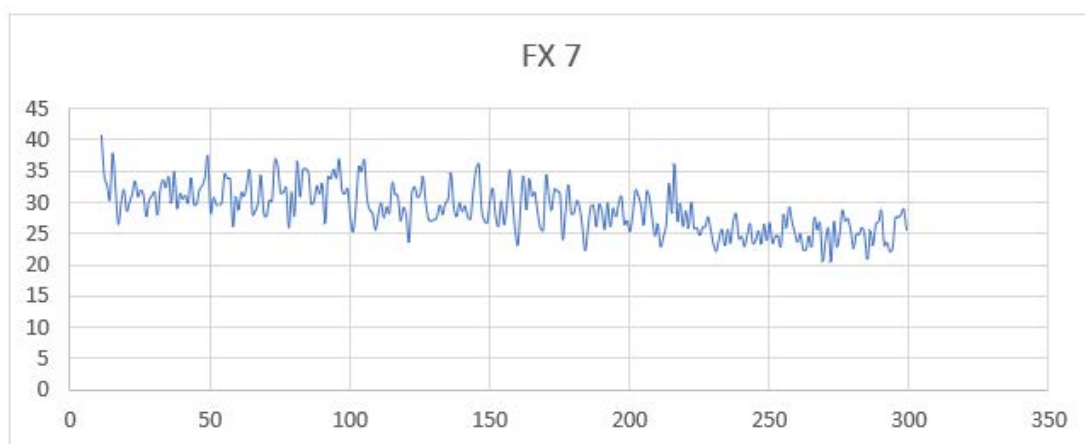
Διάγραμμα 3.18 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.6 Πίνακας στοιχείων

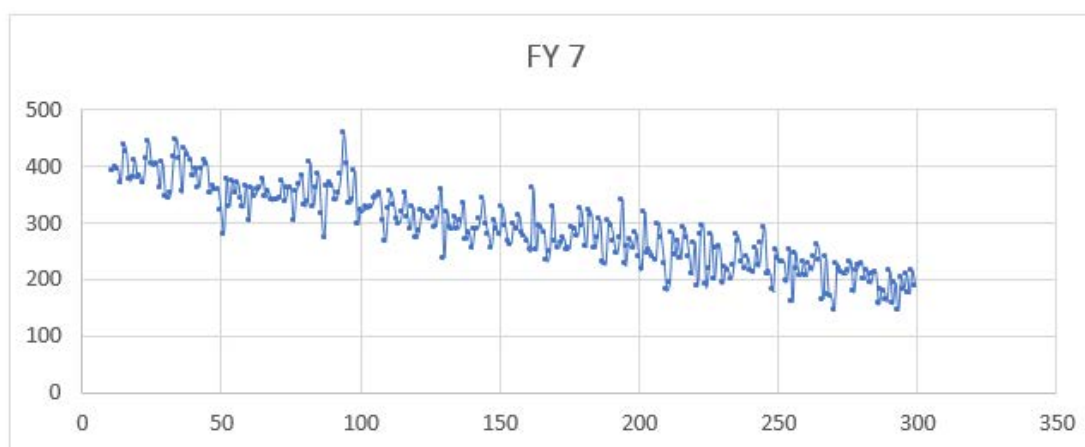
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)		ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΩΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 6	121.51	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.2	3.4
FY 6	610.37	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.2	3.4
FZ 6	243.23	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.2	3.4
ΣF	668.19					

5.1.7 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm

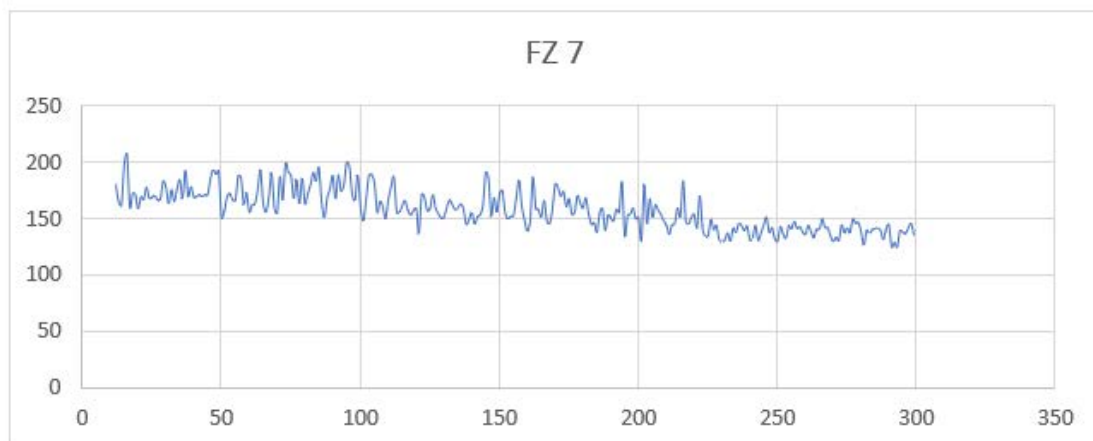
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.19 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.20 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



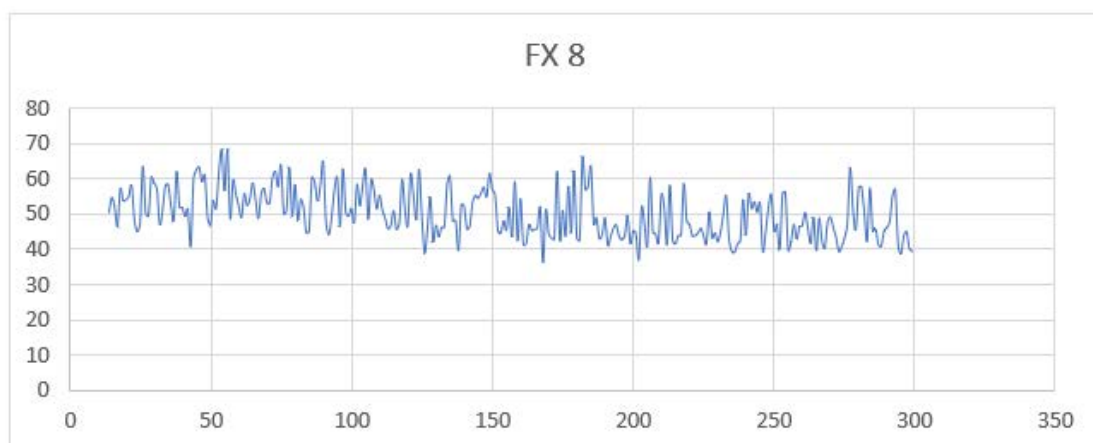
Διάγραμμα 3.21 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.7 Πίνακας στοιχείων

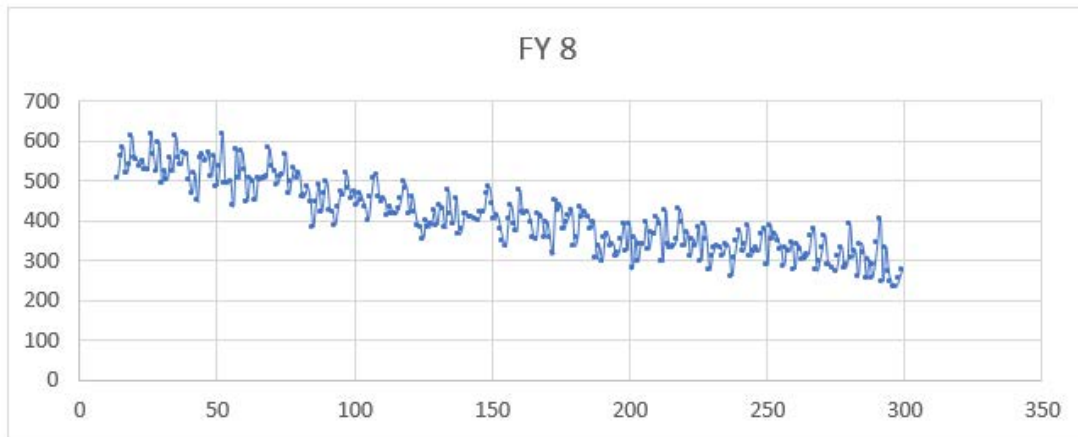
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 7	28.78	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.27	2.0
FY 7	291.65	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.27	2.0
FZ 7	158.30	ΨΥΧΡΗ	600	0.2	0.27	2.0
ΣF	333.09					

5.1.8 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm

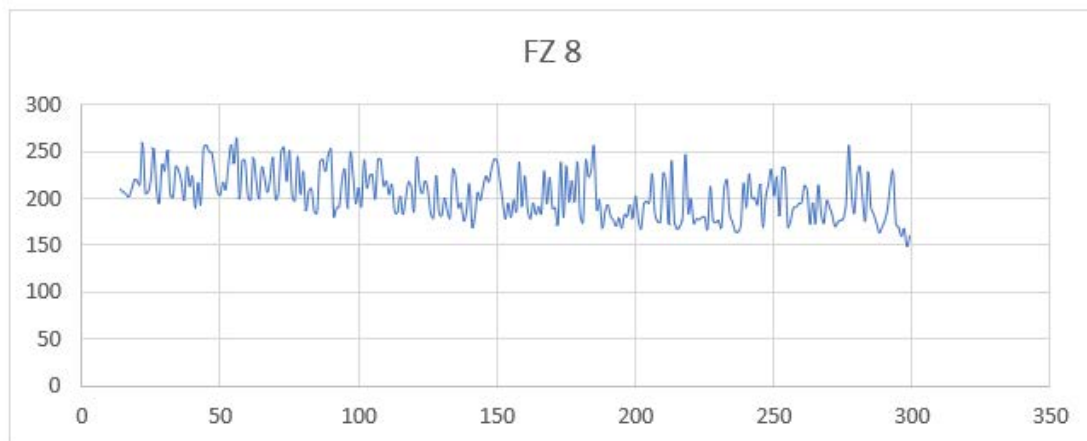
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.22 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.23 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



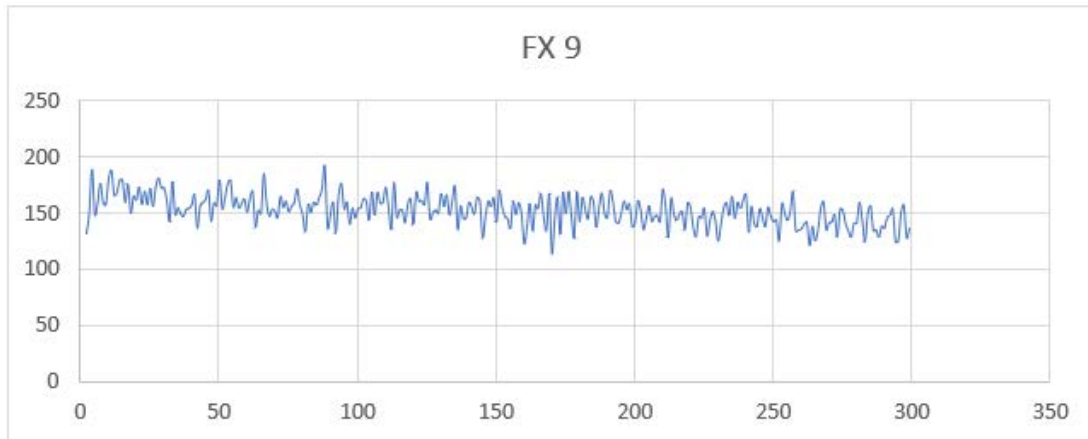
Διάγραμμα 3.24 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.8 Πίνακας στοιχείων

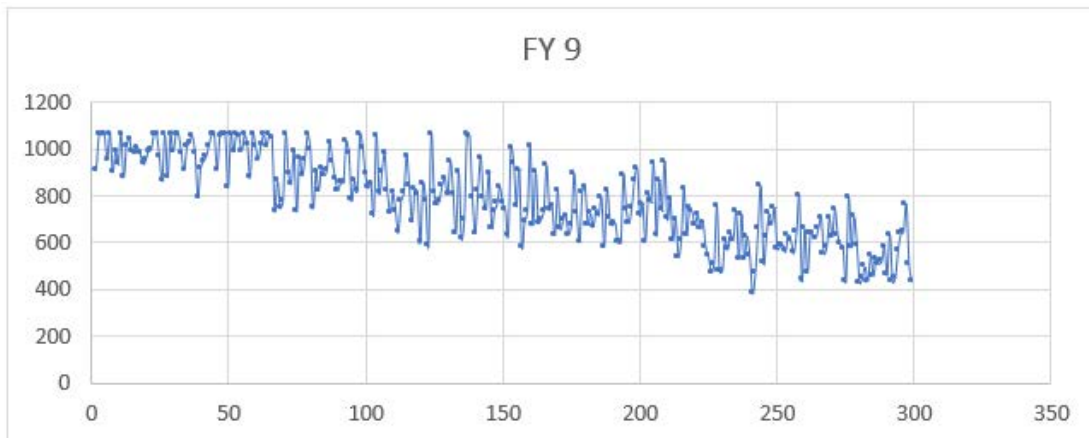
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 8	50.20	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.27	5.8
FY 8	409.38	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.27	5.8
FZ 8	204.26	ΨΥΧΡΗ	600	0.3	0.27	5.8
ΣF	460.26					

5.1.9 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm

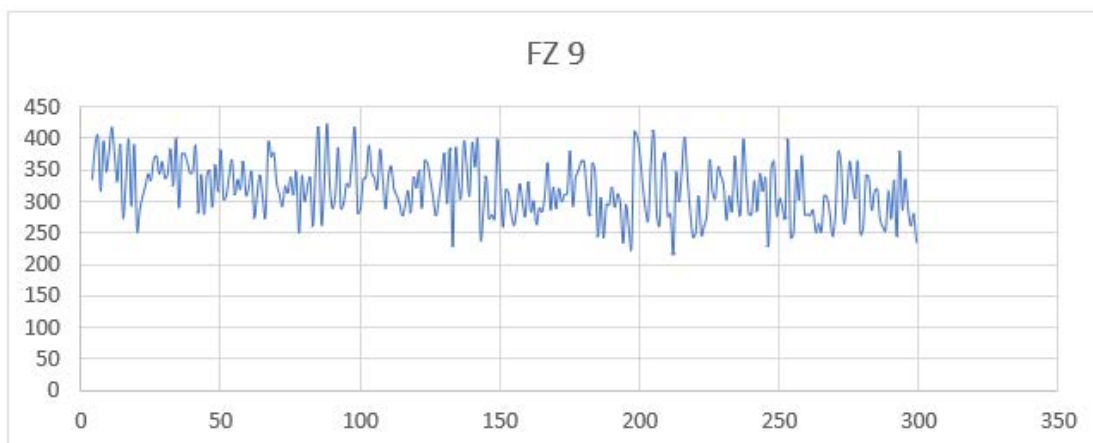
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.25 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.26 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



Διάγραμμα 3.27 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

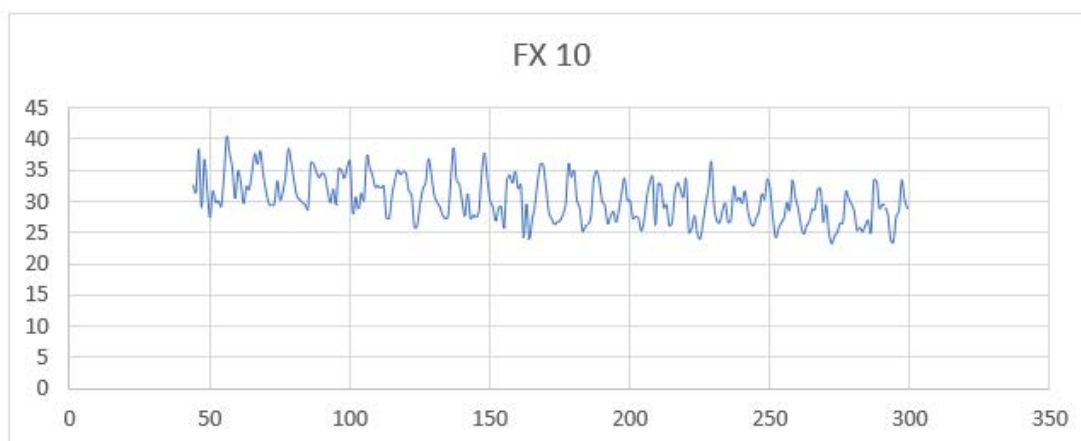
Πίνακας 4.9 Πίνακας στοιχείων

ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 9	152.08	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.27	4.0
FY 9	787.68	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.27	4.0
FZ 9	320.21	ΨΥΧΡΗ	600	0.5	0.27	4.0
ΣF	863.77					

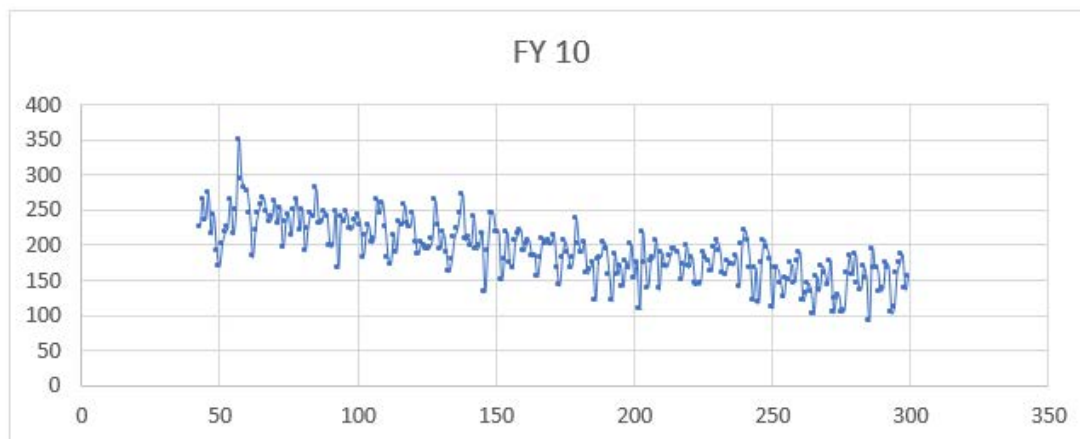
5.2 Αποτελέσματα πειράματος – Θέρμη τόννευση

5.2.1 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm

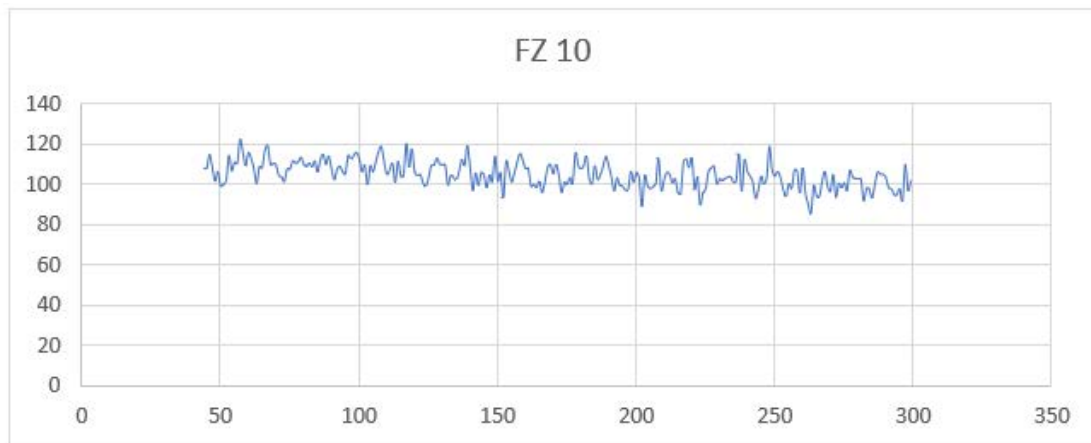
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.28 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.29 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



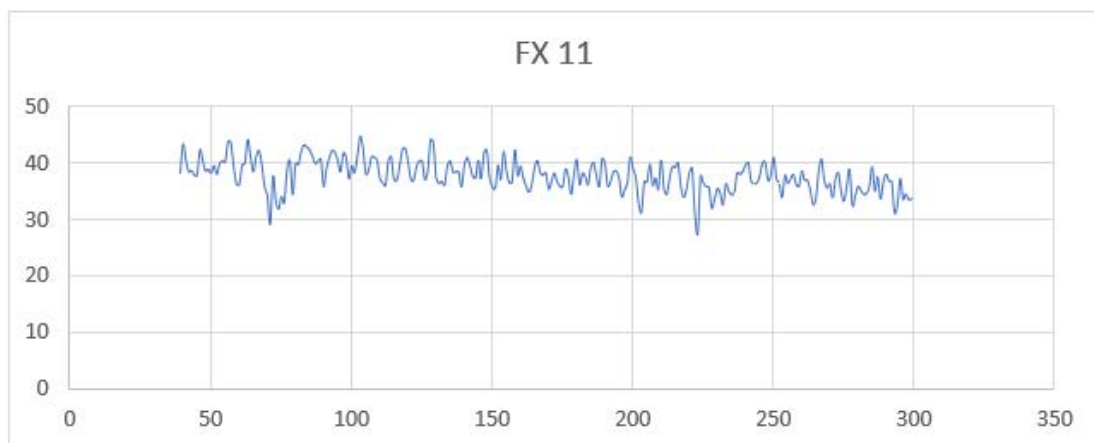
Διάγραμμα 3.30 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.10 Πίνακας στοιχείων

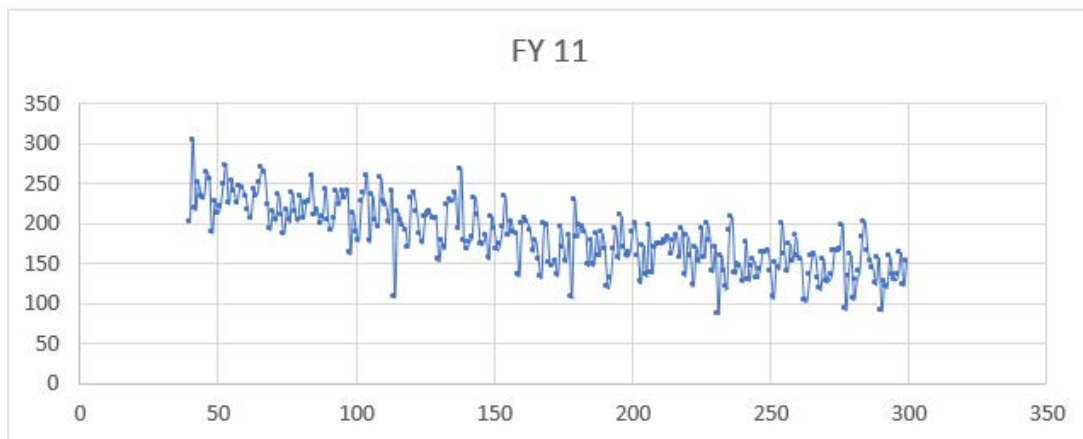
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)		ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 10	30.33	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.12	-
FY 10	109.38	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.12	-
FZ 10	104.76	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.12	-
ΣF	154.47					

5.2.2 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm

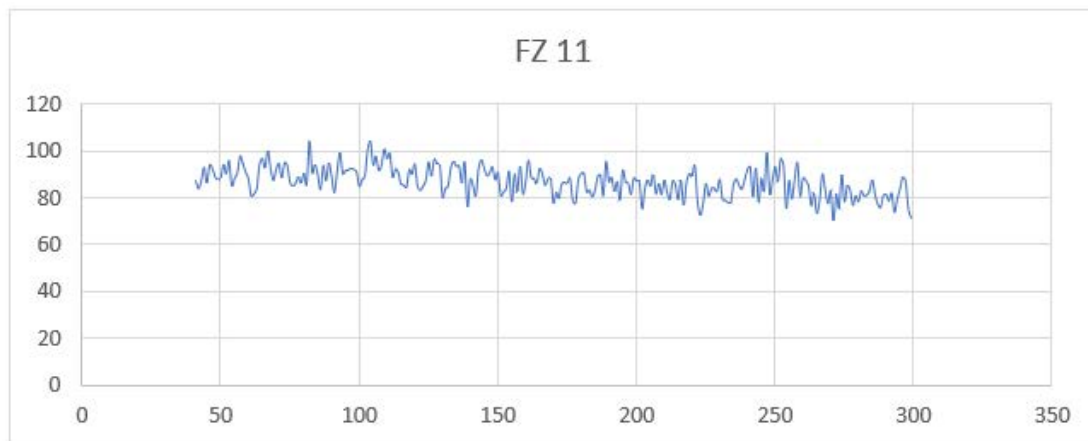
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.31 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.32 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



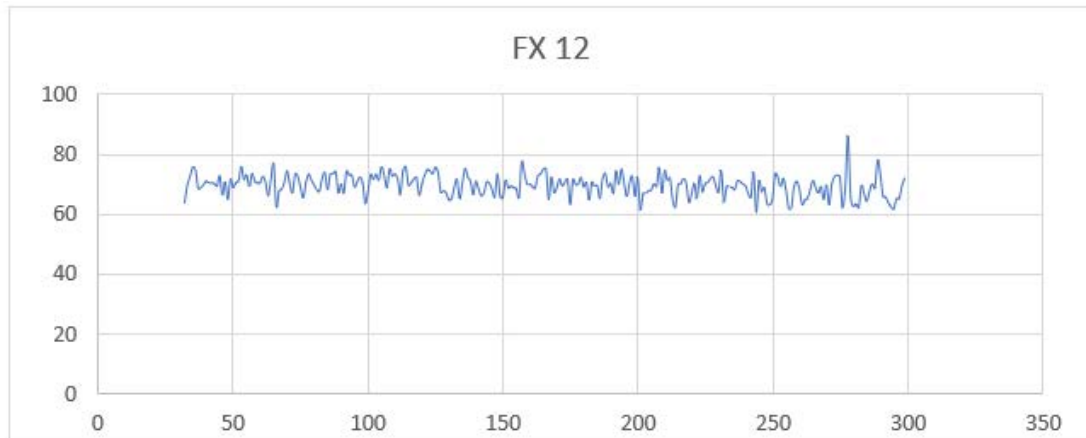
Διάγραμμα 3.33 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.11 Πίνακας στοιχείων

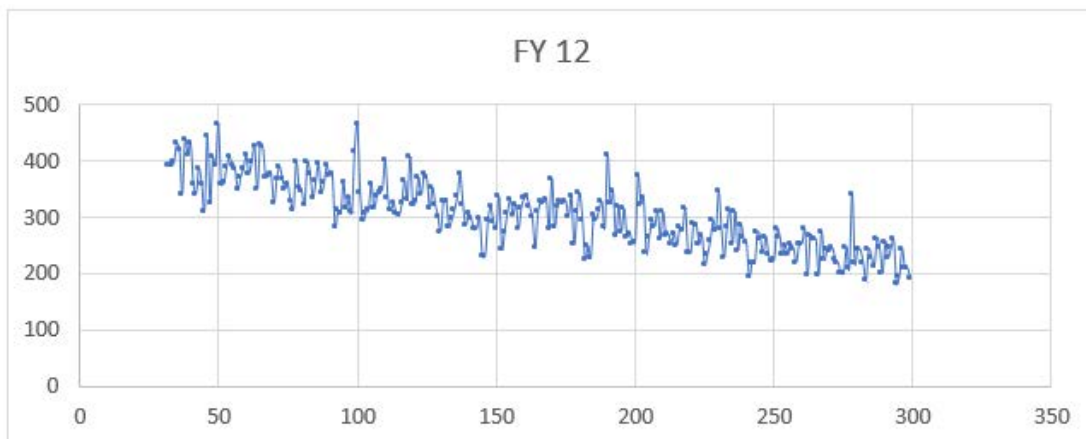
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)		ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 11	37.83	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.12	-
FY 11	183.69	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.12	-
FZ 11	86.73	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.12	-
ΣF	206.63					

5.2.3 Πρόωση 0.12 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm

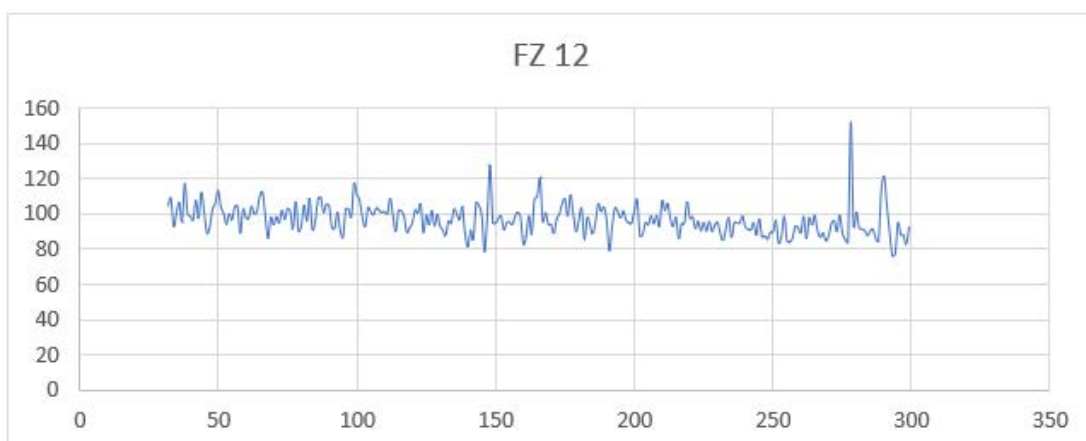
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.34 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.35 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



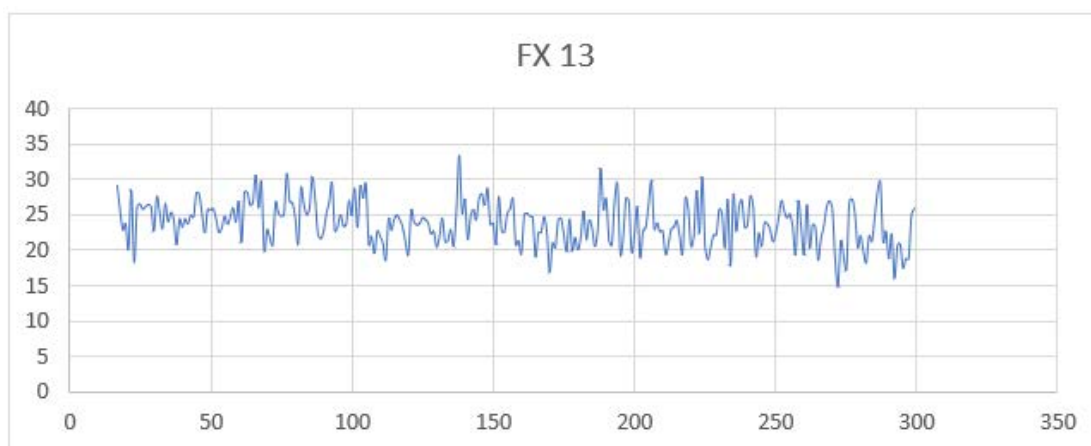
Διάγραμμα 3.36 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.12 Πίνακας στοιχείων

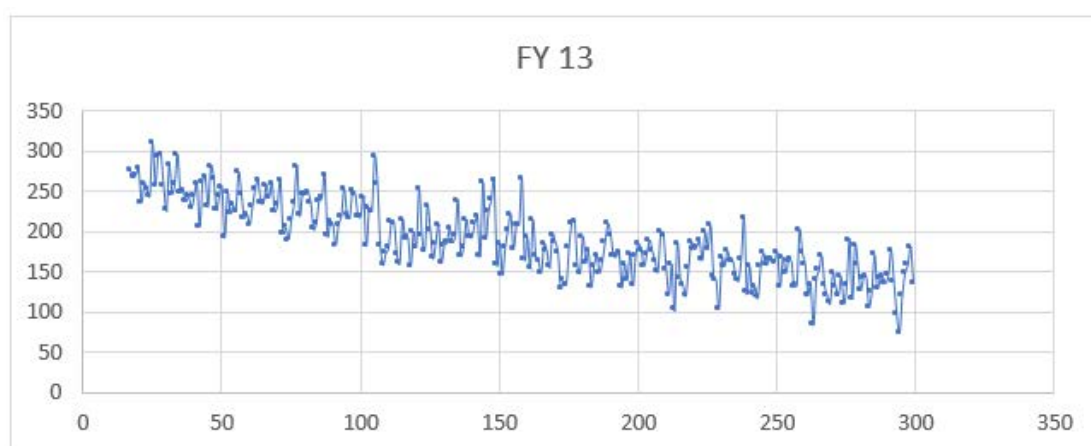
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 12	69.51	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.12	-
FY 12	304.96	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.12	-
FZ 12	96.78	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.12	-
ΣF	327.41					

5.2.4 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm

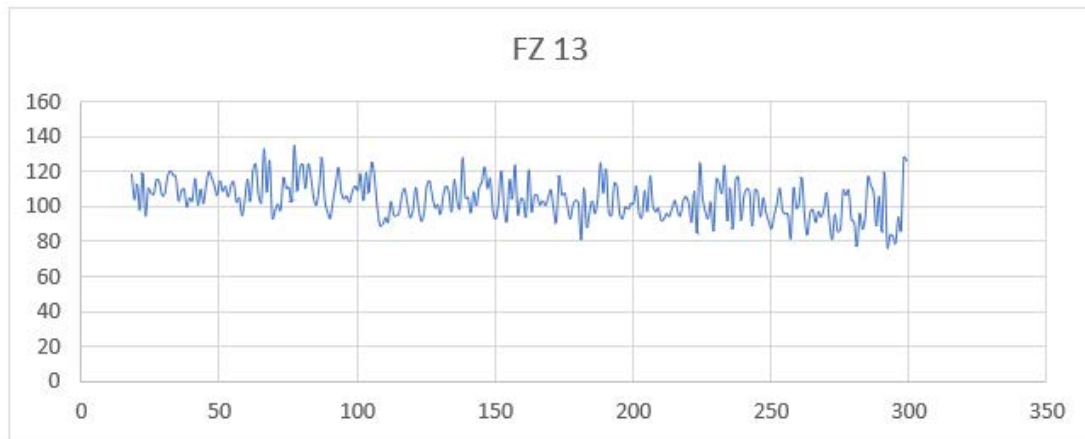
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.37 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.38 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



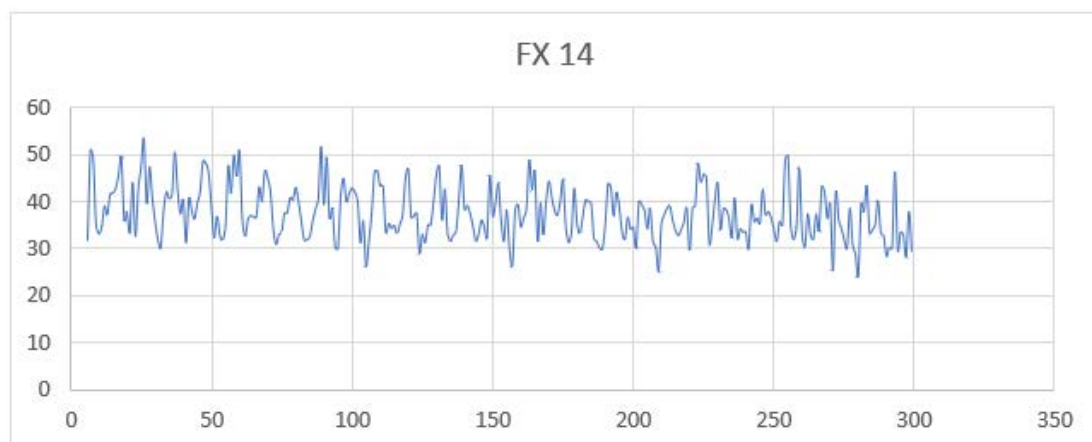
Διάγραμμα 3.39 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.13 Πίνακας στοιχείων

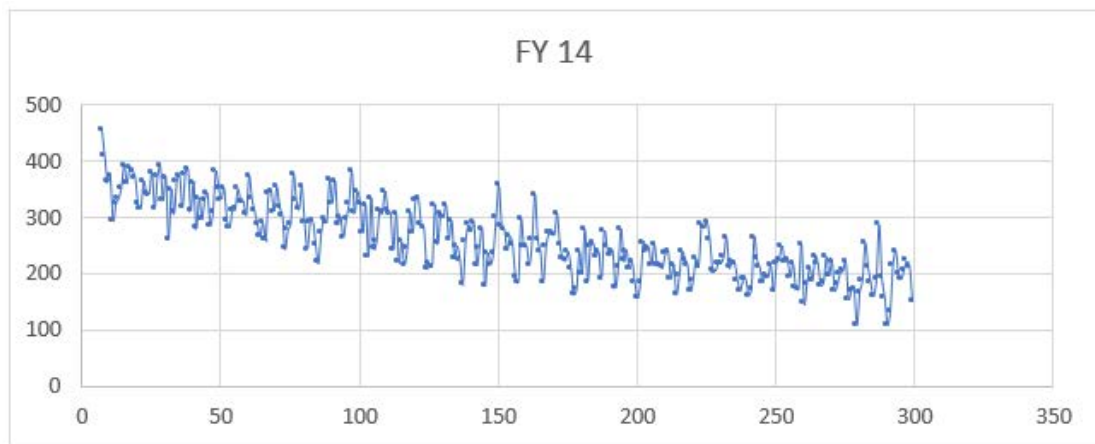
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 13	23.75	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.2	-
FY 13	190.69	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.2	-
FZ 13	104.10	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.2	-
ΣF	218.55					

5.2.5 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm

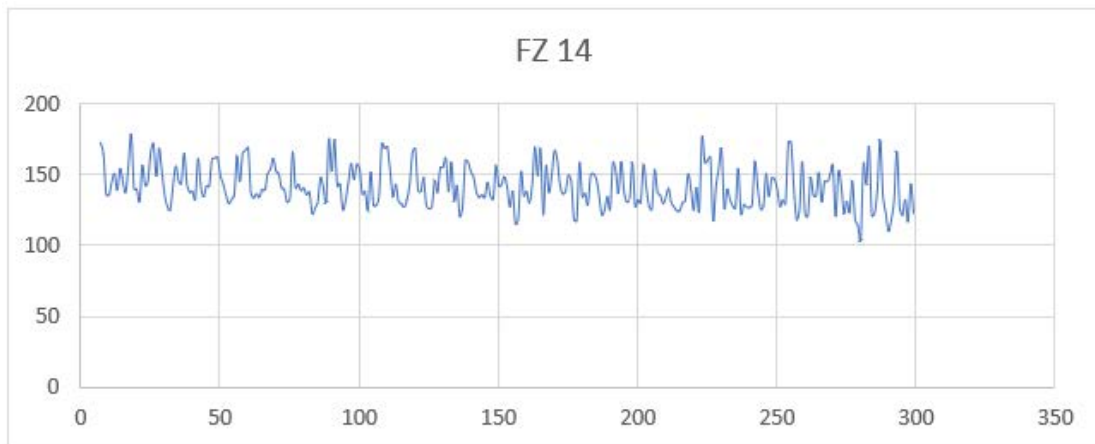
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.40 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.41 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



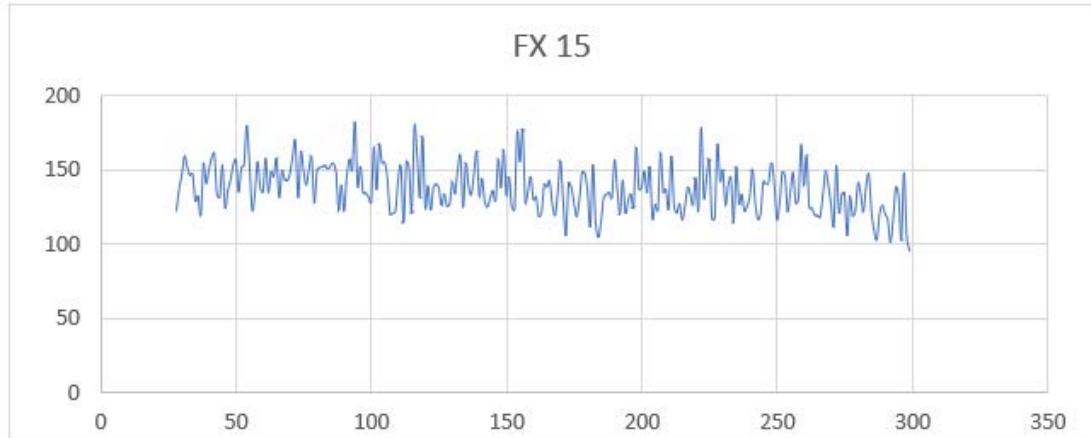
Διάγραμμα 3.42 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.14 Πίνακας στοιχείων

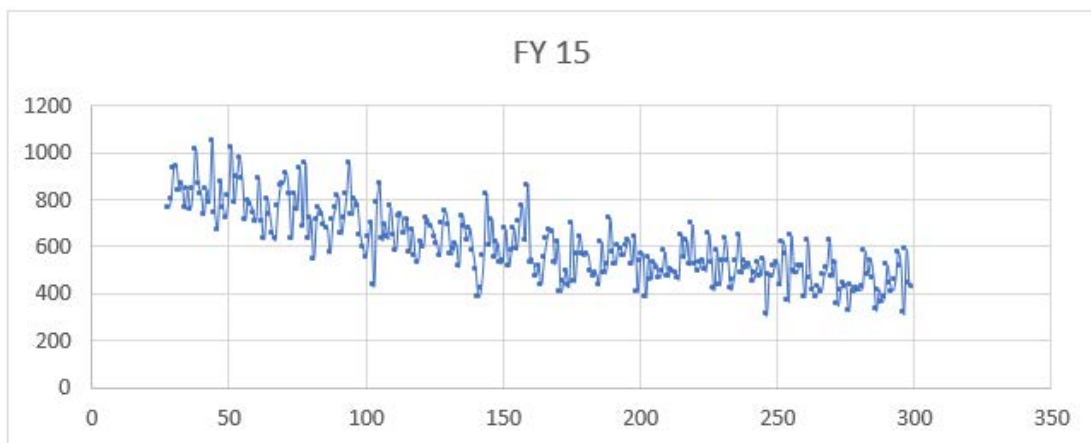
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 14	37.63	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.2	-
FY 14	260.99	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.2	-
FZ 14	141.75	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.2	-
ΣF	299.38					

5.2.6 Πρόωση 0.2 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm

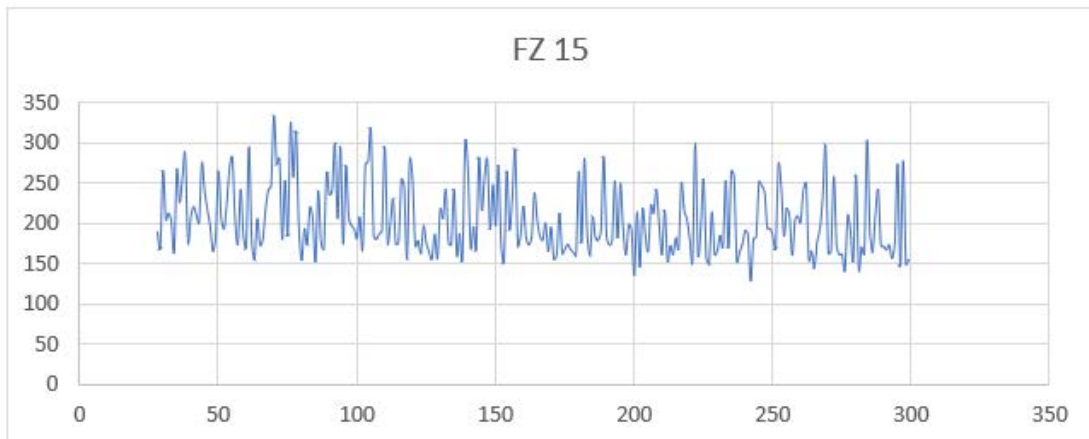
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.43 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.44 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



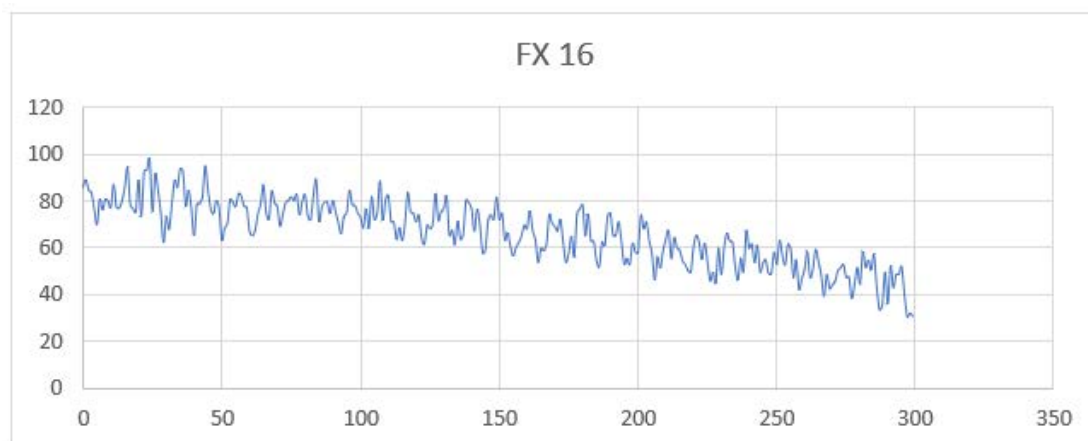
Διάγραμμα 3.45 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.15 Πίνακας στοιχείων

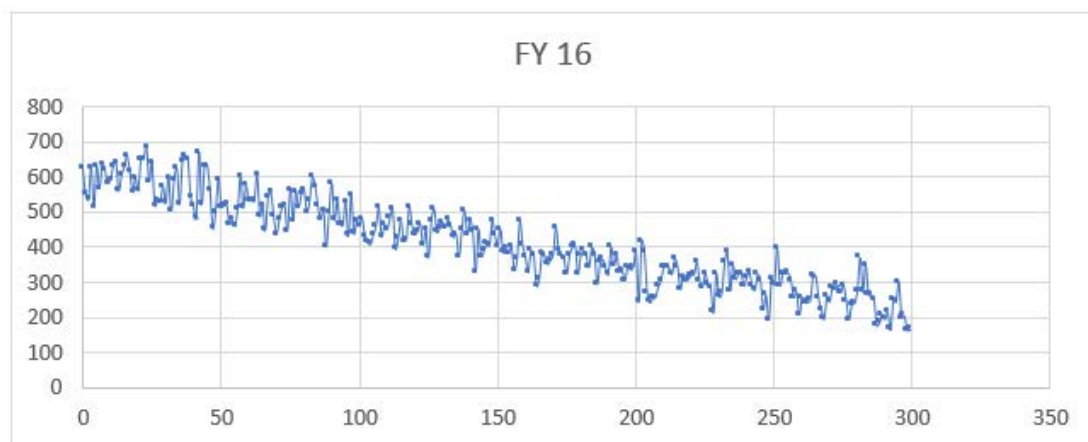
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)		ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 15	137.45	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.2	2.08
FY 15	608.39	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.2	2.08
FZ 15	204.13	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.2	2.08
ΣF	656.27					

5.2.7 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.2 mm

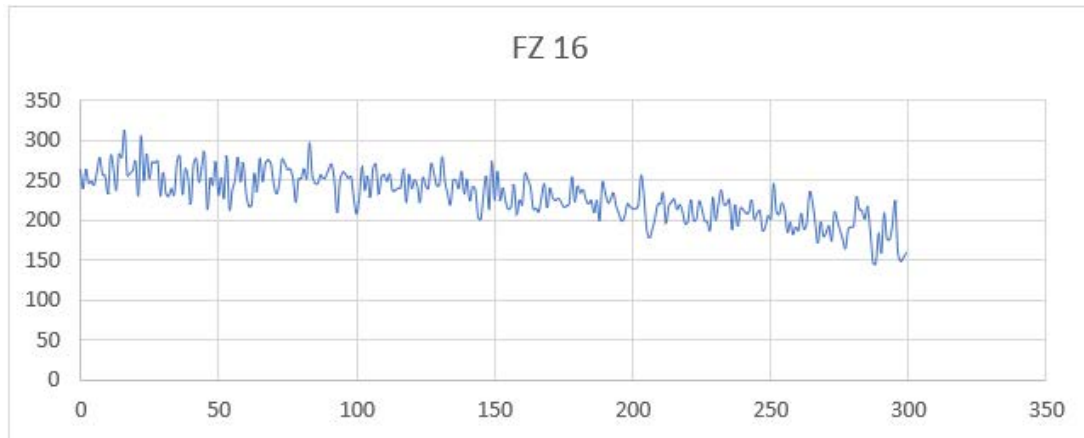
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.46 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.47 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



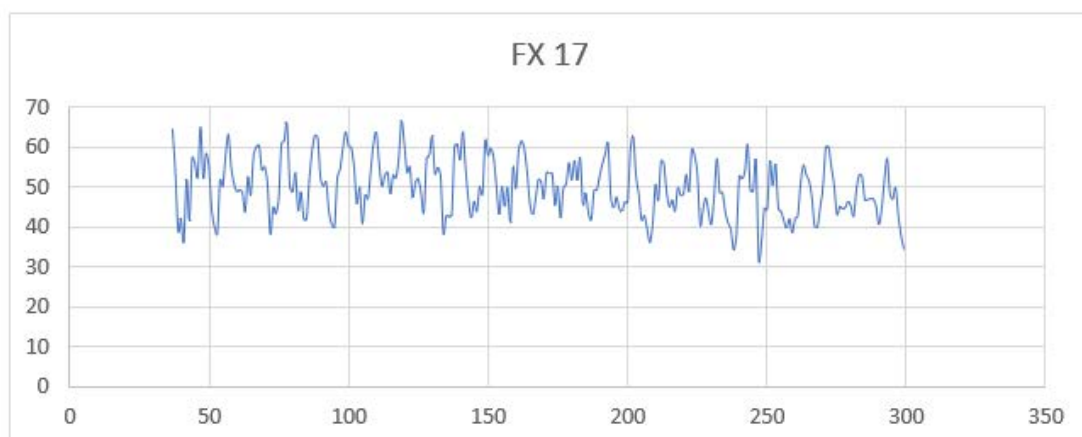
Διάγραμμα 3.48 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.16 Πίνακας στοιχείων

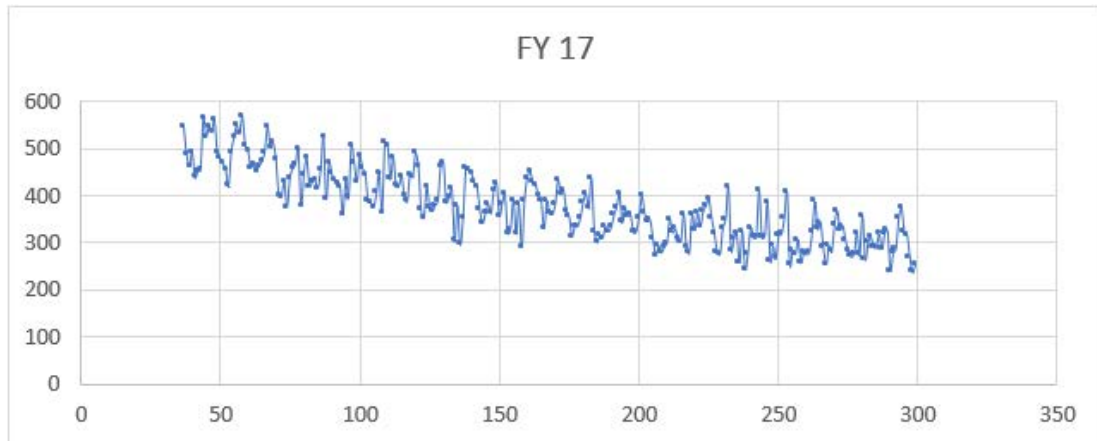
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 16	49.97	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.27	2.08
FY 16	207.64	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.27	2.08
FZ 16	214.30	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.2	0.27	2.08
ΣF	302.55					

5.2.8 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.3 mm

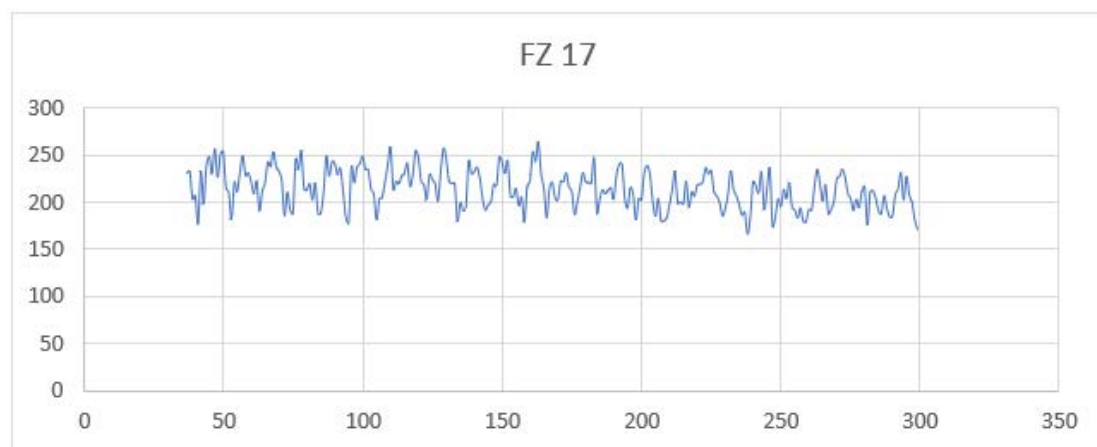
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.49 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.50 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



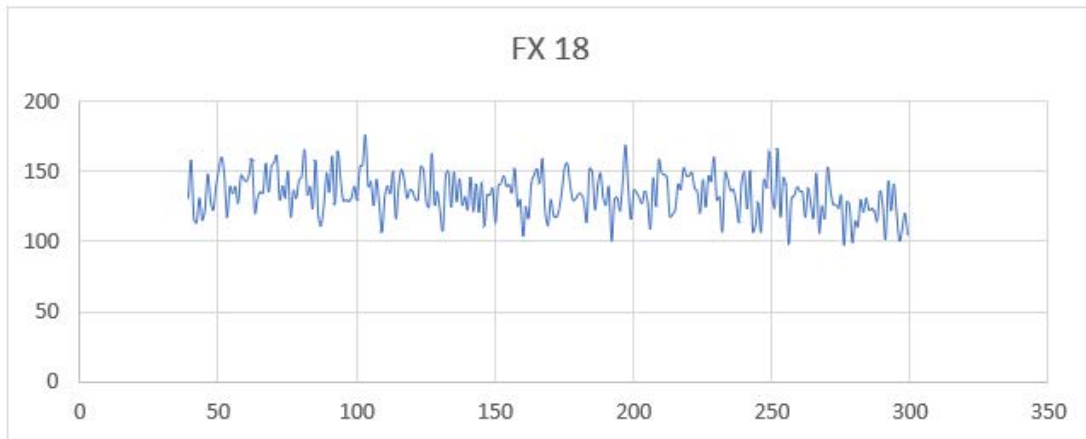
Διάγραμμα 3.51 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.17 Πίνακας στοιχείων

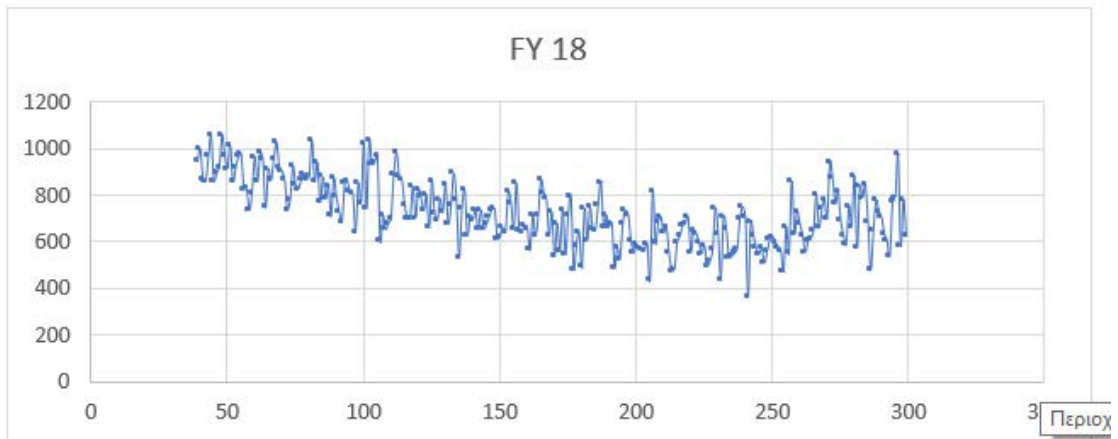
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)	ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)	
FX 17	66.38	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.27	1.45
FY 17	383.44	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.27	1.45
FZ 17	230.16	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.3	0.27	1.45
ΣF	452.12					

5.2.9 Πρόωση 0.27 mm/rev – Βάθος κοπής 0.5 mm

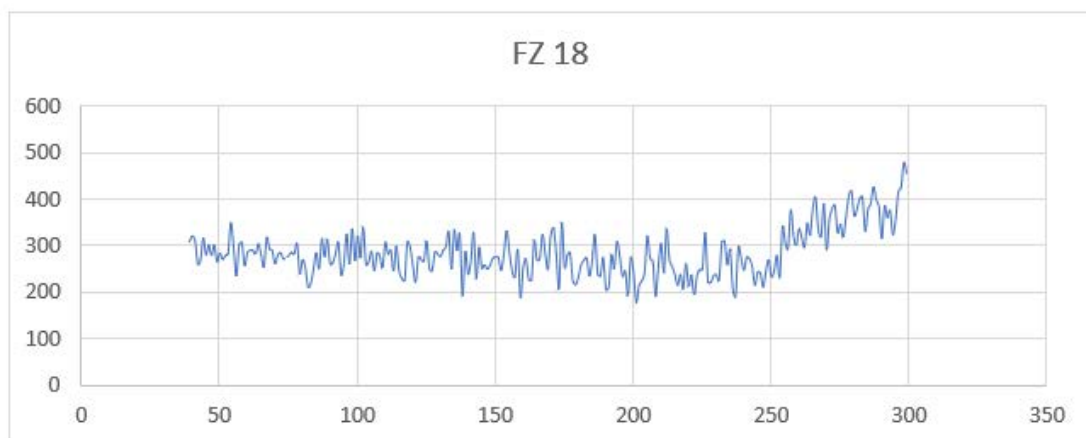
Σε αυτή την επανάληψη προέκυψαν τα κάτωθι διάγραμμα για τις δυνάμεις στους άξονες x,y και z.



Διάγραμμα 3.52 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα x



Διάγραμμα 3.53 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα y



Διάγραμμα 3.54 Δυνάμεις που αναπτύχθηκαν κατά τον άξονα z

Πίνακας 4.18 Πίνακας στοιχείων

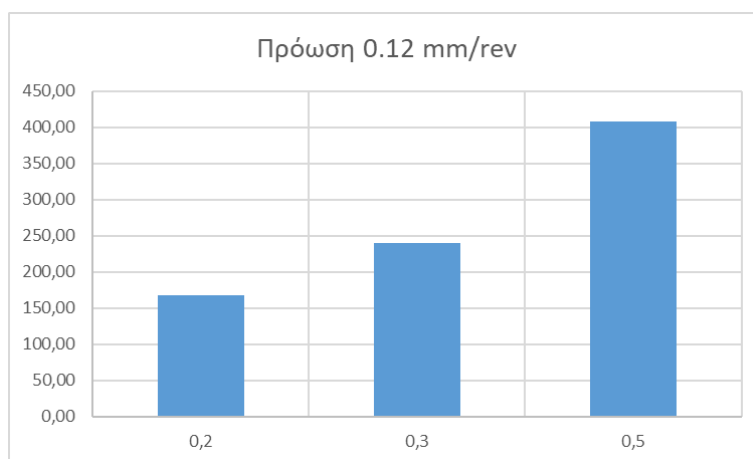
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (N)		ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ (mm)	ΠΡΟΩΣΗ (mm/rev)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (μm)
FX 18	133.36	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.27	1.38
FY 18	724.92	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.27	1.38
FZ 18	283.05	ΘΕΡΜΗ (80 οC)	600	0.5	0.27	1.38
ΣF	789.57					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

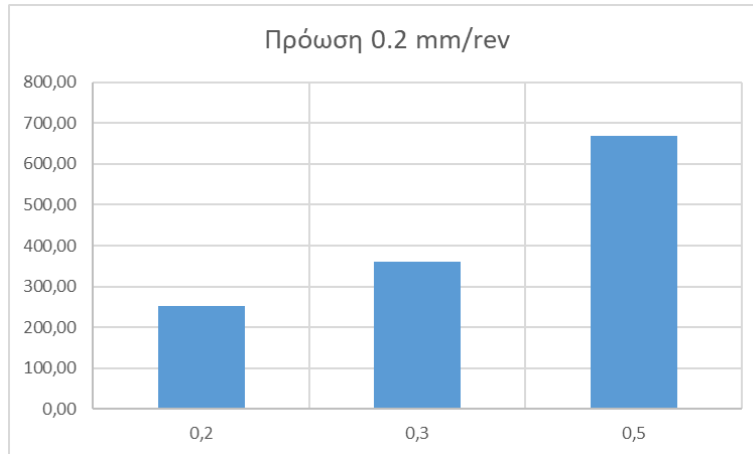
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από το πείραμα με μορφή διαγραμμάτων και πινάκων. Σκοπός είναι η σύγκριση της μέσης συνισταμένης δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ των θερμών και των ψυχρών επαναλήψεων του πειράματος.

Έγινε ομαδοποίηση των διαγραμμάτων ανά ταχύτητα πρόωσης (0.12mm/rev, 0.2 mm/rev και 0.27 mm/rev) όπου για τα τρία βάθη κοπής, φαίνονται οι τιμές της συνισταμένης δύναμης όπου αναπτύσσεται στο δοκίμιο.

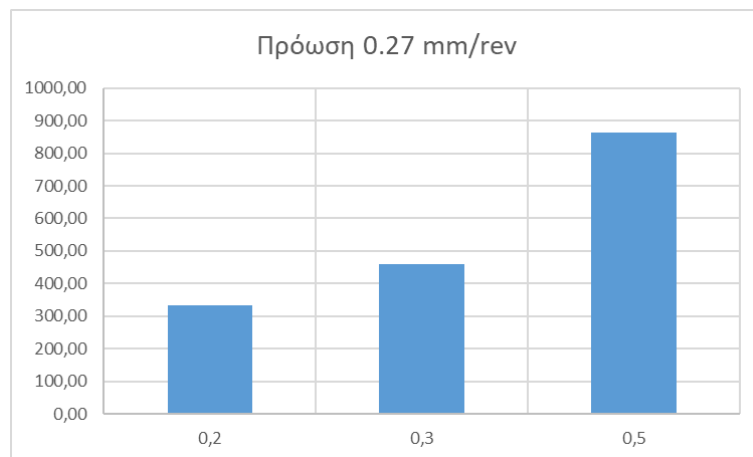


Διάγραμμα 5.1 Συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,12 mm/rev για τα διαφορετικά βάθη κοπής (Ψυχρή επανάληψη)

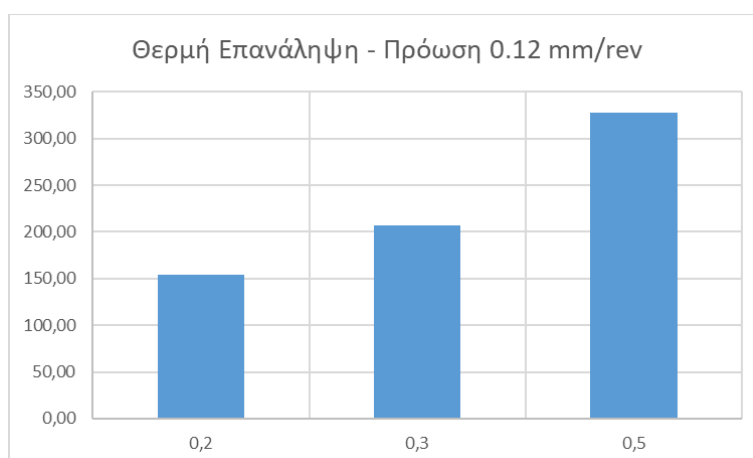
Στο ανωτέρω διάγραμμα παρατηρούμε πως για μεγαλύτερα βάθη κοπής η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος κοπής



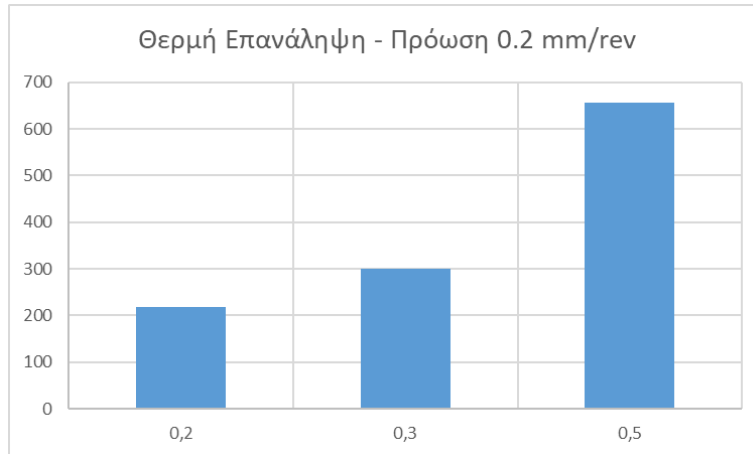
Διάγραμμα 5.2 Συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,2 mm/rev για τα διαφορετικά βάθη κοπής (Ψυχρή επανάληψη)



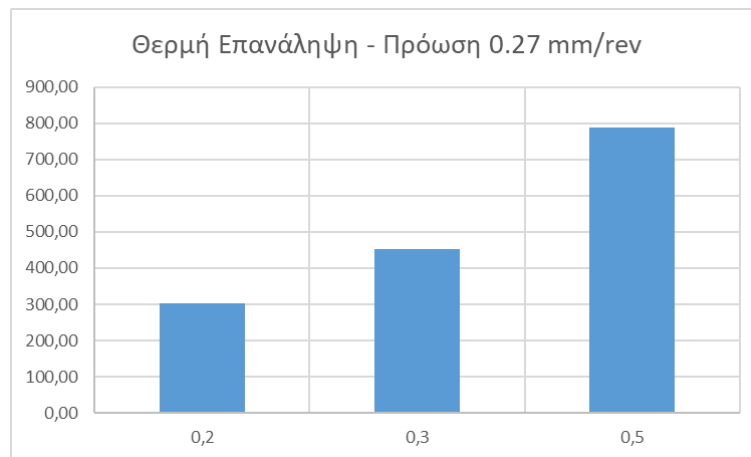
Διάγραμμα 5.3 Συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,27 mm/rev για τα διαφορετικά βάθη κοπής (Ψυχρή επανάληψη)



Διάγραμμα 5.4 Συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,12 mm/rev για τα διαφορετικά βάθη κοπής (Θερμή επανάληψη)



Διάγραμμα 5.5 Συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,2 mm/rev για τα διαφορετικά βάθη κοπής (Θερμή επανάληψη)



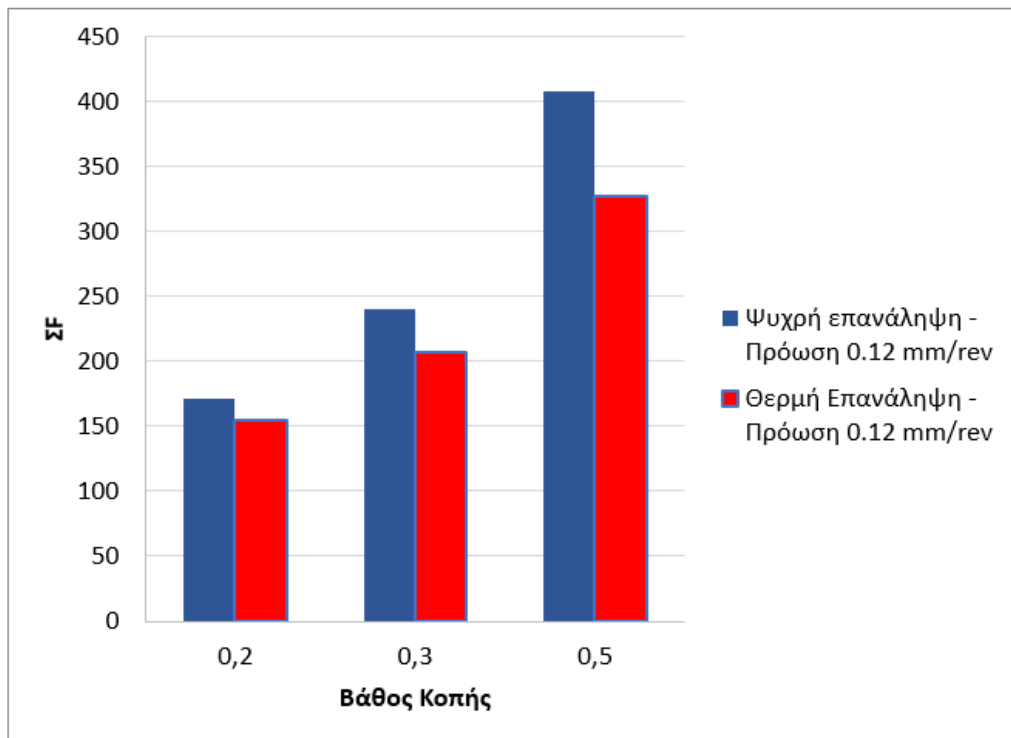
Διάγραμμα 5.6 Συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,27 mm/rev για τα διαφορετικά βάθη κοπής (Θερμή επανάληψη)

Πίνακας 5.1 Σύγκριση μεταξύ ψυχρών και θερμών επαναλήψεων

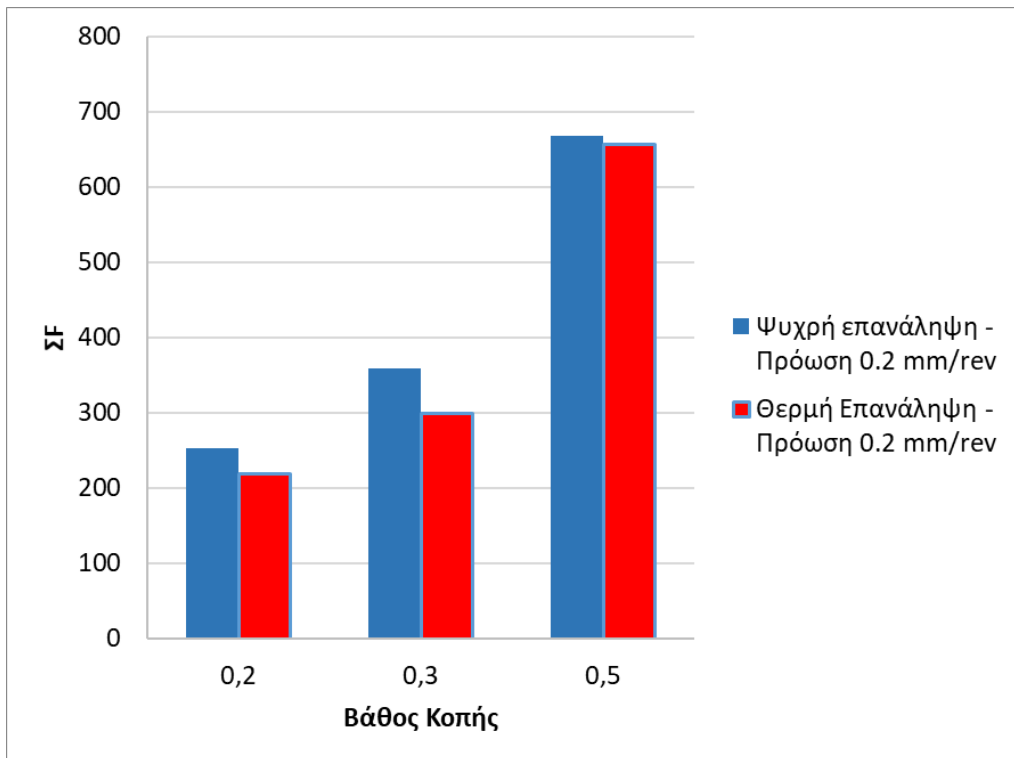
Πρόωση 0.12 mm/rev				
Βάθος Κοπής (mm)	Ψυχρή (N)	Θερμή (N)	Διαφορά (N)	Ποσοστό (%)
0,2	171,66	154,47	17,19	10,54%
0,3	239,65	206,63	33,02	14,80%
0,5	407,33	327,41	79,91	21,75%

Πρόωση 0.20 mm/rev				
Βάθος Κοπής (mm)	Ψυχρή (N)	Θερμή (N)	Διαφορά (N)	Ποσοστό (%)
0,2	253,14	218,55	34,59	14,67%
0,3	359,78	299,38	60,41	18,33%
0,5	668,18	656,27	11,91	1,80%

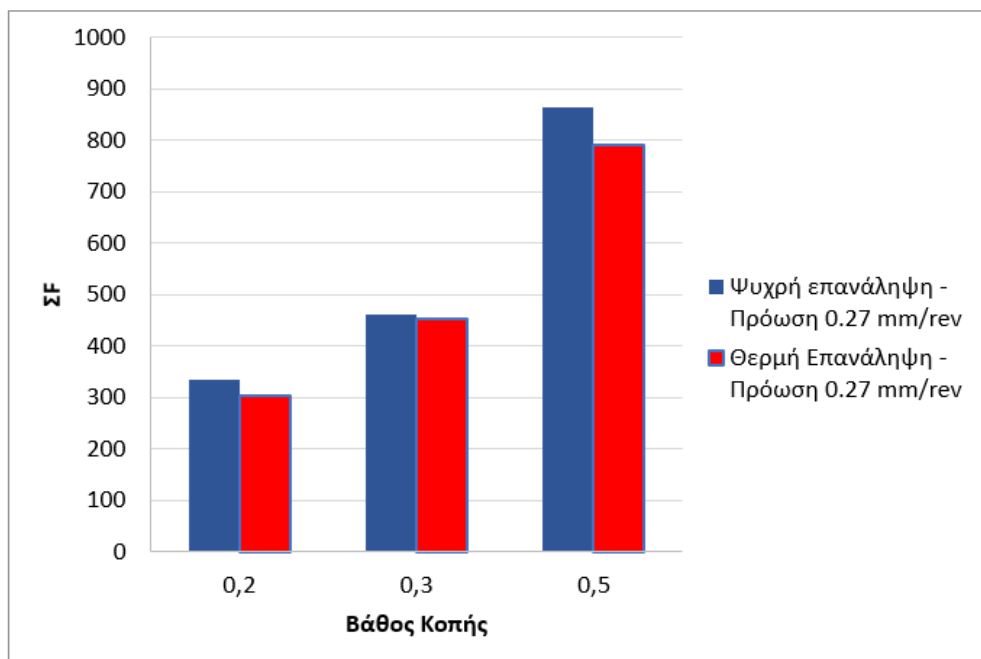
Πρόωση 0.27 mm/rev				
Βάθος Κοπής (mm)	Ψυχρή (N)	Θερμή (N)	Διαφορά (N)	Ποσοστό (%)
0,2	333,09	302,55	30,54	9,61%
0,3	460,26	452,12	8,14	1,78%
0,5	863,77	789,57	74,20	8,98%



Διάγραμμα 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα συνισταμένης δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,12 mm/rev



Διάγραμμα 5.8 Συγκριτικό διάγραμμα συνισταμένης δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,2 mm/rev



Διάγραμμα 5.9 Συγκριτικό διάγραμμα συνισταμένης δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο για πρόωση 0,27 mm/rev

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρούμε πως υπάρχει μείωση της αναπτυσσόμενης δύναμης στα δοκίμια από 1,78 % (ελάχιστη τιμή) για πρόωση 0,27 mm/rev και βάθος κοπής 0,3 mm μέχρι και 21,75 % (μέγιστη τιμή) για πρόωση 0,27 mm/rev και βάθος κοπής 0,5 mm.

Γενικά σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε μείωση της αναπτυσσόμενης δύναμης για ίδιες συνθήκες πρόωσης και βάθους κοπής όταν εφαρμόζουμε θερμή τόννευση σε σχέση με την ψυχρή τόννευση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6.1 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος που εκτελέστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία σαν γενικό συμπέρασμα προκύπτει ότι:

➤ Κατά γενικό κανόνα όλες οι θερμές επαναλήψεις του πειράματος για ίδιες ταχύτητες πρόωσης και βάθη κοπής είχαν μικρότερο μέτρο αναπτυσσόμενης δύναμης από τις αντίστοιχες για τις ψυχρές επαναλήψεις.

Συγκεκριμένα για κάτωθι παρουσιάζονται τα ποσοστά διαφορές που προέκυψαν:

Πίνακας 6.1 Ποσοστό διαφοροποίησης αναπτυσσόμενης δύναμης για τις διαφορετικές παραμέτρους

Πρόωση 0.12 mm/rev	
Βάθος Κοπής (mm)	Ποσοστό (%)
0,2	10,54%
0,3	14,80%
0,5	21,75%

Πρόωση 0.20 mm/rev	
Βάθος Κοπής (mm)	Ποσοστό (%)
0,2	14,67%
0,3	18,33%
0,5	1.80%

Πρόωση 0.27 mm/rev	
Βάθος Κοπής (mm)	Ποσοστό (%)
0,2	9,61%
0,3	1,78%
0,5	8,98%

➤ Αναλύοντας τον ανωτέρω πίνακα ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο μπορούμε να εξάγουμε είναι το ότι όσο το βάθος κοπής μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερο είναι και το

ποσοστό διαφοράς μεταξύ της αναπτυσσομένης δύναμης μεταξύ των θερμών και των ψυχρών επαναλήψεων.

6.2 Προτάσεις βελτίωσης

Κατά την διάρκεια του πειράματος που εκτελέστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρχαν συγκεκριμένες συνθήκες (ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής , τρόπος θέρμανσης κτλ.)

Μια πρόταση για μελλοντικές μελέτες είναι η θέρμανση του δοκιμίου να εκτελεστεί σε ειδικά διαμορφωμένη συσκευή θέρμανσης (φούρνος) με σκοπό την ομοιόμορφη και συνολική θέρμανση του δοκιμίου σε επιθυμητή θερμοκρασία.

Επίσης ένα άλλο θέμα που χρήζει έρευνας είναι η τιμή της βέλτιστης θερμοκρασίας για συγκεκριμένου τύπου χάλυβα ώστε να έχουμε την μεγαλύτερη μείωση της αναπτυσσόμενης δύναμης χωρίς όμως να επηρεάζεται το δοκίμιο η το εργαλείο κοπής.

Ακόμα η ταχύτητα περιστροφής του τόρνου θα πρέπει να ελεγχθεί. Στο πείραμα που εκτελέστηκε η ταχύτητα περιστροφής ήταν συγκεκριμένη, οπότε μια πρόταση για μελλοντική μελέτη είναι η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής του τόρνου στο τελικό αποτέλεσμα.

BIBΛIOΓPAΦIA

1. Copley, S. M. Laser Shaping of Materials, Lasers in Materials Processing. In Conference Proceedings of the American Society for Metals, Los Angeles, CA, 1983, pp 82–92.
2. Konig, W.; Wagemann, A. Machining of Ceramic Components: Process-Technological Potentials. In Machining of Advanced Materials, NIST Special Publication, 1990, Vol. 847, pp 3–16.
3. Talantov, N. V.; Amin, A. K. M. N.; Chereomushnikov, N. P. Temperature Deformation Laws of Chatter Formation during Metal Cutting Process. In Abstracts of the papers presented at the 5th Soviet National Conference, Teplofizika Technologicheskikh Processov, Volgograd, 1980, p 92.
4. Amin, A. K. M. N.; Talantov, N. V. Influence of the Instability of Chip Formation and Preheating of Work on Tool Life in Machining High Temperature Resistant Steel and Titanium Alloys. Mech. Eng. Res. Bull. 1986, 9, 52–62.
5. J. Kopac, 2001, “Hardening phenomena of Mnaustenite steels in the cutting process”, Journal of Materials Processing Technology, 109 (1-2), 96-104
6. W. Konig and A. K. Zaboklicki, 1993, “Laser-assisted hot machining of ceramics and composite materials”, International Conference on Machining of Advanced Materials, 847, pp. 455–463, 1993
7. B.O. Tilghman, 1889, “Cutting metal by electricity”, US Patent No:416873, 3 pages
8. O. Çakır E. Altan, 2005, “A brief review of hot machining”, Proc. of the 9th Int. Research/Expert Conference (TMT 2005), Antalya, Turkey, 41-44
9. E. Altan, 1993, “Hot machining”, Metal-Makina, January 1993, 12-17 (in Turkish)
10. N. Larin, G.A. Martynov, 1966, “Methods of heating components during machining”, Russian Engineering Journal, 16 (8),74-77
11. I.A. Dickter, C.L. Mehl, R.F. Henke, 1963, “High temperature machining methods”, US Armed Services Technical Information Agency, ASD-TDR-63-125, Final Technical Documentary Report, 372 pages
12. K.A.Patel, S.B.Patel, K.A.Patel, 2014, “Performance evaluation and parametric optimization of hot machining process on EN-8 material”, International Journal For Technological Research In Engineering, 1 (10), 1265-1268

13. Amin, A. K. M. N.; Abdelgadir, M. Control of Chatter Arising during Machining on Vertical Machining Center and Improvement of Tool Life and Surface Finish of the Machined Part by Preheating of the Workpiece by Induction Heating. Malaysia Patent MY-126082-A, 1982.
14. Amin, A. K. M. N.; Abdelgadir, M. The Effect of Preheating of Work Material on Chatter during End Milling of Medium Carbon Steel Performed on a Vertical Machining Center. *J. Mater. Sci. Eng. Trans. ASME*, USA 2003, 125, 667–680.
15. Amin, A. K. M. N.; Abraham, I.; Khairusshima, N. Performance of Circular Carbide Inserts in End Milling of Carbon Steel Under Preheating Condition. In *Proceedings of the ICAMT*, 2004, pp 65–73.
16. Amin, A. K. M. N.; Abdelgadir, M.; Kamaruddin, K. Effect of Workpiece Preheating on Machinability of Titanium Alloy. In *Proceedings of the International Conference ICAMT*, 2004, pp 145–152.
17. Steen, W. *Laser Material Processing*, 3rd ed.; Springer: New York, 2003.
18. Sun, S.; Brandt, M.; Dargusch, M. S. Thermally Enhanced Machining of Hard-to-Machine Materials – A Review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2010, 50, 2010, 663–680.
19. Weck, M.; Zeppelin, W. V.; Hermanns, C. Laser – A Tool for Turning Centers. In *Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94*. Vol. 1; Geiger, M., Vollertsen, F., Eds.; Meisenbach: Bamberg, 1994; pp 427–437.
20. Rajagopal, S.; Plankenhorn, D. J.; Hill, V. L. Machining Aerospace Alloys with the Aid of a 15kW Laser. *J. Appl. Metalwork.* 1982, 2, 170–184.
21. Sun, S.; Harris, J.; Brandt, M. Parametric Investigation of Laser-Assisted Machining of Commercially Pure Titanium. *Adv. Eng. Mater.* 2008, 10, 565–572.
22. Anderson, M.; Patwa, R.; Shin, Y. C. Laser-Assisted Machining of Inconel 718 with an Economic Analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006, 46, 1879–1891.
23. Ding, H.; Shin, Y. C. Laser-Assisted Machining of Hardened Steel Parts with Surface Integrity Analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2010, 50, 106–114.
24. Shin, Y.C. Laser Assisted Machining Process with Distributed Lasers. US Patent 0062920A1, 2007.
25. Salem, W. B.; Marot, G.; Moisan, A.; Longuemard, J. P. Laser Assisted Turning during Finishing Operation Applied to Hardened Steels and Inconel 718. In *Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94*. Vol. 1; Geiger, M.,

- Vollertsen, F., Eds.; Meisenbach: Bamberg, 1994; pp 455–464. Proceedings of the LANE'94.
26. Armitage, K. Laser Assisted Machining of High Chromium White Cast Iron. Thesis for Master of Engineering, Swinburne University of Technology, 2005.
 27. Walter, J.; Ritzi, R. Increasing Tool Life by Laser Assisted Turning. In Laser Assisted Net Shape Engineering 4, Proceedings of the LANE 2004, Vol. 2; Geiger, M., Otto, A., Eds.; Meisenbach: Bamberg, 2004; pp 1157–1164.
 28. Yang, B.; Lei, S. Laser-Assisted Milling of Silicon Nitride Ceramic: A Machinability Study. *Int. J. Mechatron. Manuf. Syst.* 2008, 1, 116–130.
 29. Lacalle, L. N. L. D.; Sanchez, J. A.; Lamikiz, A.; Celaya, A. Plasma Assisted Milling Heat-Resistant Superalloys. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 2004, 126, 274–285.
 30. Thomas, T.; Vigneau, J. O. Laser-Assisted Milling Process. US Patent 5,906,459, 1999.
 31. Konig, W. K.; Zaboklicki, A. K. Laser-Assisted Hot Machining of Ceramics and Composite Materials. In International Conference on Machining of Advanced Materials, NIST Special Publication, Gaithersburg, MD, 1993, Vol. 847, pp 455–463.
 32. Demmer, A.; Bausch, S.; Groll, K. Perspectives for Laser-Assisted Machining: Cost-Effective Processing of Difficult-to Machine Materials. *Ind. Laser User* 2005, 38–41.
 33. Tian, Y.; Wu, B.; Anderson, M.; Shin, Y. C. Laser-Assisted Milling of Silicon Nitride and Inconel 718. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 2008, 130, 031013-1–031013-9.
 34. Komanduri, R.; Flom, D. G.; Lee, M. Highlights of DARPA Advanced Machining Research Program. In American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED 12, 1984; pp 15–36.
 35. Uehara, K.; Takeshita, H. Cutting Ceramics with a Technique of Hot Machining. *Ann. CIRP* 1986, 35 (1), 55–58.
 36. Konig, W.; Zaboklicki, U. Laser-Assisted Hot Machining of Ceramics and Composite Materials. In Machining of Advanced Materials, NIST Special Publication, 1993, Vol. 847, pp 455–463.

37. Chryssolouris, G.; Anifantis, N.; Karagiannis, S. Laser Assisted Machining: An Overview, 75th anniversary Issue. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 1997, 119, 766–769.
38. Bucher T, Brandal G, Chen H, Yao YL. Quantifying the heat affected zone in laser scribing of thin film solar cells. *Manuf Lett* 2017;13:11–4.
39. Ma C, Peng Q, Mei J, Han EH, Ke W. Microstructure and corrosion behavior of the heat affected zone of a stainless steel 308L-316L weld joint. *J Mater Sci Technol* 2018;34:1823–34.
40. Tanigawa D, Abe N, Tsukamoto M, Tsukamoto M, Hayashi Y, Yamazaki H, et al. The effect of particle size on the heat affected zone during laser cladding of Ni-Cr-Si-B alloy on C45 carbon steel. *Opt Lasers Eng* 2018;101:23–37.
41. Anicic O, Jovic S, Skrijelj H, Nedic B. Prediction of laser cutting heat affected zone by extreme learning machine. *Opt Lasers Eng* 2017;88:1–4.
42. Joshi P, Sharma A. Simultaneous optimization of kerf taper and heat affected zone in Nd-YAG laser cutting of AL 6061-T6 sheet using hybrid approach of grey relational analysis and fuzzy logic. *Precis Eng* 2018;54:302–13.
43. Woo WS, Lee CM. A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling. *Int J PrecisEngManufTechnol* 2018;5(5):593–604.
44. Jog CS, Nandy A. Mixed finite elements for electromagnetic analysis. *Comput Math Appl* 2014;6
45. Everhart JL. Engineering properties of nickel and nickel alloys. 1st ed Springer; 1971.8:887–902.
46. Boyer R, Welsch G, Collings EW. Materials properties handbook: titanium alloys. 4th ed ASM International; 2007.
47. Jun-Hwan Kima, Eun-Jung Kimb, Choon-Man Leec. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficultto cut materials in laser and induction assisted machining