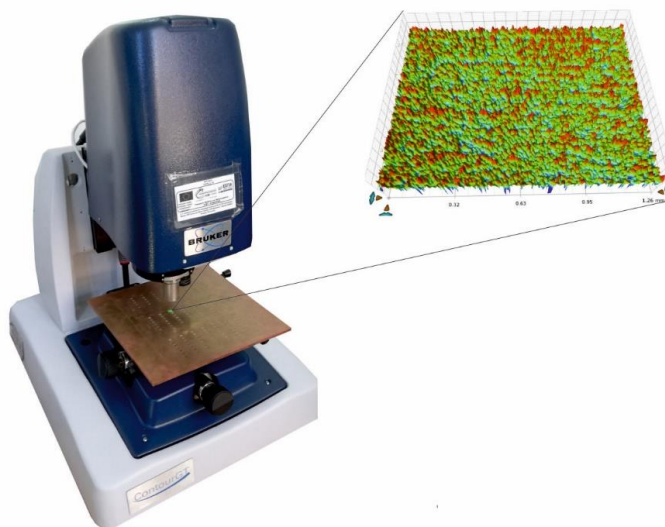




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΧΑΡΑΞΗΣ ΜΕ LASER ΣΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**



### **ΤΖΑΜΠΑΖ ΧΑΣΑΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος των προπτυχιακών σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Αρχικά, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στον καθηγητή Αντωνιάδη Αριστομένη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο, καθώς και για τα μαθήματα ζωής που παραδίδει σε καθημερινή βάση. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Βαγγέλη Νικολιδάκη για την πολύτιμη και απλόχερη βοήθειά του, την οποία μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τα αξιότιμα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κυρίους Μπιλάλη Νικόλαο και Κουλουριδάκη Παύλο για τον χρόνο που διέθεσαν για την αξιολόγηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ, ακόμα, όλα τα παιδιά με τα οποία συνεργαστήκαμε και δουλέψαμε παράλληλα στο εργαστήριο «Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης», γνωστό και ως «m3», δημιουργώντας πάντα ένα ευχάριστο και παραγωγικό περιβάλλον. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, καθώς και τους φίλους μου Ιωάννη Χορευτάκη, Ιωάννη Αλεξάκη, Μασούντ Καριμί, Νικολέττα Θεοδωράκη για τη βοήθεια και στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	3
1.2 Στόχος της εργασίας .....	3
1.3 Δομή της εργασίας .....	4
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	5
2.1 Γενικά για τα Laser .....	5
2.1.1 Ιστορία του Laser .....	5
2.1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας ενός Laser.....	5
2.1.3 Ιδιότητες των Laser .....	6
2.2 Χάραξη με Laser .....	7
2.2.1 Μέθοδοι χάραξης και τύποι laser.....	7
2.2.2 Κατεργαζόμενα Υλικά.....	8
2.2.3 Εφαρμογές των Laser στην Κατεργασία Χάραξης .....	9
2.3 Ανασκόπηση Υλοποιούμενης Έρευνας στο Αντικείμενο της Εργασίας σε Διεθνές Επίπεδο.....	10
2.3.1 Χάραξη με Laser σε Βανάντιο 10 .....	10
2.3.2 Βαθιά Χάραξη Laser σε Ανοξείδωτο Χάλυβα AISI 1045 .....	11
2.3.3 Πειραματική Ανάλυση των Παραμέτρων της Διαδικασίας Laser Engraving σε Κράμα Αλουμινίου-Μαγνησίου .....	13
3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	16
3.1 Κέντρο κατεργασίας DMG .....	16
3.2 Προφιλόμετρο ContourGT-K 3D.....	17
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	21
4.1 Υλικά.....	21
4.2 Διαδικασία χάραξης.....	25
4.2 Καθαρισμός Επιφανειών .....	26
4.3 Διαδικασία μέτρησης στο προφιλόμετρο .....	26
4.3.1 Λογισμικό Vision64 και Ρύθμιση Προφιλόμετρου.....	26
4.3.2 Διαδικασία Σάρωσης .....	32
4.3.2 Ρύθμιση Δεδομένων Σάρωσης για Εξαγωγή της Τραχύτητας.....	33
4.4 Πρωτόκολλα Μετρήσεων.....	38
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	40
5.1 Αλουμίνιο 7075-T6 .....	40
5.2 Ανοξείδωτος Χάλυβας SAE304 .....	47
5.3 Ορείχαλκος C26000 .....	53
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	62

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η τεχνολογία μη παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας υλικών εξελίσσεται τις τελευταίες δεκαετίες με ραγδαίους ρυθμούς. Μια από αυτές τις μεθόδους είναι η αφαίρεση υλικού με δέσμη Laser.

Ο όρος Laser προέρχεται από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (ενίσχυση φωτός με διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Η κατεργασία αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανικές διεργασίες, και κερδίζει συνεχώς έδαφος σε σχέση με τις παραδοσιακές κατεργασίες που χρησιμοποιούν συμβατικά εργαλεία και πλακίδια κοπής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι εδώ δεν χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία, αλλά το υλικό αφαιρείται κυρίως μέσω της ατμοποίησης του, εξαιτίας της ισχυρής ενεργειακής προσβολής. Αυτό σημαίνει αποφυγή πολλών προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση των κοπτικών εργαλείων, όπως είναι η φθορά και η θραύση και άρα υπάρχει ανάγκη για συχνή αντικατάστασή τους, κάτι το οποίο αυξάνει κατά πολύ το κόστος παραγωγής. Επιπλέον με αυτήν την κατεργασία επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στις πραγματοποιούμενες χαράξεις συγκριτικά με άλλες συμβατικές μεθόδους. Για αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η μελέτη των κατάλληλων κάθε φορά συνθηκών κατεργασίας προκειμένου η ποιότητα των κατεργασμένων επιφανειών να είναι η επιθυμητή.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα μιας χάραξης είναι οι συνθήκες κατεργασίας που επιλέγονται. Οι συνθήκες κατεργασίας αποτελούν αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών, στόχος των οποίων είναι η βελτιστοποίηση των κατεργασιών ως προς την ποιότητά τους και η ελαχιστοποίηση του χρόνου και του κόστους παραγωγής. Οι συνθήκες κατεργασίας είναι αυτές που καθορίζουν την τραχύτητα της επιφάνειας που προκύπτει. Η πρόβλεψη των συνθηκών κατεργασίας και ο προσδιορισμός τους, αποτελούν πολύ σημαντικές διαδικασίες. Αφενός η τραχύτητα επηρεάζει τη συναρμολόγηση μηχανολογικών εξαρτημάτων, αφετέρου παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητα του τελικού προϊόντος.

### 1.2 Στόχος της εργασίας

Στην παρούσα έρευνα διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων, σκοπός των οποίων ήταν, ο προσδιορισμός της προκύπτουσας τραχυτητας επιφάνειας από τις αλλαγές των παραμέτρων κατά την διεργασία Laser Engraving. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η μέση ένταση των παλμών, η συχνότητα των παλμών και η ταχύτητα σάρωσης. Για αυτό το σκοπό έγιναν μετρήσεις με διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων σε τρεις διαφορετικές πλάκες χρησιμοποιώντας οπτικό προφιλόμετρο (ContourGT-K 3D Optical Microscope). Τα μέταλλα από τα οποία ήταν φτιαγμένες οι τρεις πλάκες οι οποίες υπέστησαν τις απαιτούμενες κατεργασίες ήταν:

- Αλουμίνιο (7075-T6)

- Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)
- Ορείχαλκος (C26000)

### **1.3 Δομή της εργασίας**

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται αναφορά σε γενικές πληροφορίες σχετικά με τη χάραξη με Laser. Επίσης αναφέρεται ο σκοπός και η δομή της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία, βασικές αρχές λειτουργίας του Laser, χαρακτηριστικά του Laser και χάραξη με Laser. Επίσης παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί ως σήμερα στις κατεργασίες με Laser.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του πειραματικού μέρους της εργασίας, περιγράφονται δηλαδή το κέντρο κατεργασίας και οπτικό μικροσκόπιο.

Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται αναφορά στα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια αναλύεται η πειραματική διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για καθένα από τα στάδια τα οποία υλοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τρία υλικά ξεχωριστά. Περιγράφονται αναλυτικά οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε ένα από τα υλικά. Σε καθένα από τα τέσσερα αυτά υλικά γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα που βασίζονται σε αυτήν την ανάλυση.

Στο Κεφάλαιο 6, γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Γενικά για τα Laser

Κατά τα τελευταία χρόνια με τον όρο «Laser» ονομάζεται η συσκευή που εκπέμπει μια δέσμη φωτός, μέσω μίας διαδικασίας οπτικής ενίσχυσης. Επικρατεί να αποκαλείται ως Laser και η συσκευή εκπομπής, αλλά και η παραγόμενη ακτίνα. Οι βασικές διαφορές μιας δέσμης Laser από το συνηθισμένο φως είναι ότι η ενισχυμένη ακτίνα φωτός (δέσμη Laser) παράγεται από μία πηγή που εκπέμπει ακτινοβολία με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας που είναι πολωμένη, μονοχρωματική χωρίς διαφορά φάσης και η οποία διαδίδεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση σχηματίζοντας στενές δέσμες. Αντίθετα το συμβατικό φως, από έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως για παράδειγμα, έχει μεγάλο φασματικό εύρος και διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις.

#### 2.1.1 Ιστορία του Laser

Το 1917 ο Albert Einstein δημοσίευσε την έρευνά του με τίτλο “Η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας” που αναφέρει τη λεγομένη εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του Laser. Ο Valentin A. Fabrikant, το 1939 εμβάθυνε στην χρήση της διεγερμένης εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Έπειτα ο Charles Hard Townes, το 1953 κατασκεύασε τον πρώτο ενισχυτή ακτινοβολίας μικροκυμάτων (Maser) του οποίου η λειτουργία στηρίζεται στις βασικές θεωρητικές αρχές που διέπουν και τη λειτουργία του Laser.

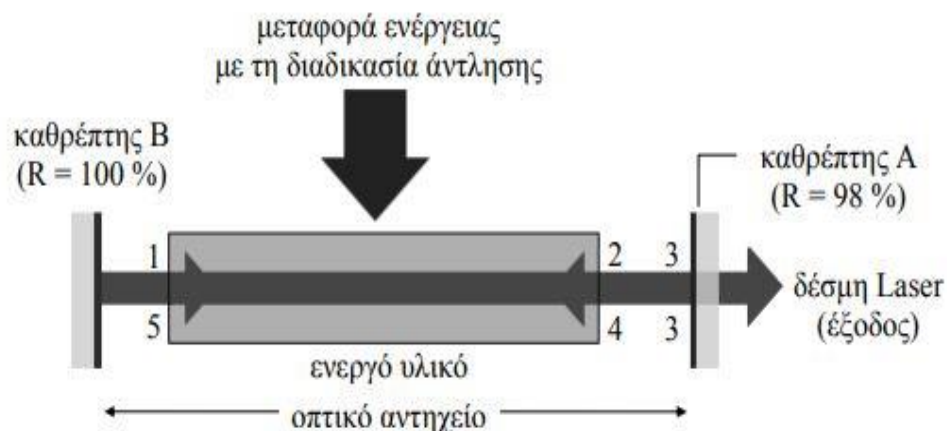
Το 1960 και συγκεκριμένα στις 16 Μαΐου του 1960 ο ερευνητής φυσικός των Εργαστηρίων Hughes (Καλιφόρνια USA), Theodore Maiman χρησιμοποιώντας έναν κύλινδρο από συνθετικό ρουμπίνι (ρουβίδιο), μήκους 2cm και διαμέτρου 1cm με κατάλληλα επαργυρωμένες τις δυο βάσεις του κατόρθωσε να θέσει σε λειτουργία την ενεργή κοιλότητα συντονισμού Fabry Perot και έτσι να δημιουργήσει μια κόκκινη ( $\lambda = 694.3\text{nm}$ ) φωτεινή δέσμη. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτέλεσε το πρώτο Laser. [1] Αξίζει να σημειωθεί ότι η λυχνία που χρησιμοποίησε ο Maiman, προκειμένου να παρέχει στο σύστημα την απαραίτητη προς τούτο ενέργεια, ήταν μία απλή, συνηθισμένη λάμπα από κοινό, φωτογραφικό φλας.

#### 2.1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας ενός Laser

Η ανακάλυψη της μηχανής Laser και η ραγδαία εξέλιξη που γνώρισε ο συγκεκριμένος τύπος μηχανών στο πέρασμα των χρόνων είχε ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση μεγάλου εύρους μηχανών laser, όπου όμως όλες λειτουργούν βάσει κάποιων σταθερών αρχών και αποτελούνται από συγκεκριμένα τμήματα τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια της παραγράφου.

Το ενεργό υλικό, είναι το υλικό που παρέχει τις στάθμες ενέργειας για τις μεταπτώσεις ηλεκτρονίου που οδηγούν σε δράση Laser. Το υλικό αυτό δρα σαν ένας ενισχυτής στην οπτική ακτινοβολία που περνάει δια μέσου αυτού. Αυτή η ακτινοβολία εγκλωβίζεται στο λεγόμενο οπτικό αντηχείο, το οποίο αποτελείται από δύο καθρέπτες. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το φαινόμενο της ανάδρασης (feedback) στην παραγόμενη ακτινοβολία, έτσι ώστε το Laser να λειτουργεί σε μία αυτοσυντηρούμενη ταλάντωση.

Τέλος, με τη λεγόμενη διαδικασία άντλησης είναι δυνατό να μεταφέρεται ενέργεια μέσα στα άτομα του ενεργού υλικού, έτσι ώστε να διατηρείται μία συντηρημένη ταλάντωση μέσα στο οπτικό αντηχείο. Η εν λόγω διαδικασία γίνεται με την παράλληλη ύπαρξη απωλειών οπτικής ενέργειας (εξαιτίας της σκόπιμης απώλειας εξόδου) και ανεπιθύμητων απωλειών (εξαιτίας της κατασκευής του Laser). [2]



Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση Laser [2]

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας μίας συσκευής Laser. Αρχικά ανάμεσα σε δύο καθρέφτες A και B, οι οποίοι αποτελούν το οπτικό αντηχείο, βρίσκεται το ενεργό υλικό.

Μία οπτική ακτινοβολία που διαπερνά το ενεργό υλικό από το σημείο 1 στο σημείο 2 εξέρχεται κατά πολύ ενισχυμένη. Αυτό γίνεται διότι το ενεργό υλικό διοχετεύει την ενέργεια που δέχεται, μέσω της διαδικασίας άντλησης στο πεδίο της ακτινοβολίας που σχηματίζεται. Στη συνέχεια η ακτινοβολία διαδίδεται από το σημείο 2 στο σημείο 3 επάνω στον καθρέπτη A. Ο καθρέπτης A είναι κατασκευασμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε μόνο ένα μικρό κλάσμα της ακτινοβολίας που πέφτει επάνω του να είναι δυνατό να περάσει δια μέσω αυτού. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η ακτινοβολία αποτελεί τη χρήσιμη ακτινοβολία εξόδου του laser. Επίσης υπάρχει ακτινοβολία που παραμένει εντός του οπτικού αντηχείου μέσω της ανάκλασής της από τον καθρέπτη A στην κοντινότερη επιφάνεια του ενεργού υλικού δηλαδή από το σημείο 3 στο σημείο 4. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ακτινοβολία ενισχύεται ξανά με το πέρασμά της διαμέσου του ενεργού υλικού από το σημείο 4 στο σημείο 5, οπότε προσπίπτοντας στον καθρέπτη B ανακλάται ολόκληρη και επιστρέφει ξανά ακολουθώντας την ίδια διαδρομή. Ο καθρέπτης B είναι κατασκευασμένος (σε αντίθεση με τον καθρέπτη A) ώστε να έχει ανακλαστικότητα ίση με 100%.

### 2.1.3 Ιδιότητες των Laser

Τα συστήματα Laser χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, εκτός από κάποια χαρακτηριστικά που διαθέτουν και τα οποία είναι κοινά για όλα τα συστήματα Laser. Τα κοινά χαρακτηριστικά για όλα τα συστήματα Laser είναι τα παρακάτω:

- Μονοχρωματικότητα

- Συμφωνία
- Κατευθυντικότητα
- Ένταση ή Λαμπρότητα [1]

**Μονοχρωματικότητα:** Με αυτόν τον όρο εννοούμε ότι το φως που εκπέμπει μια συσκευή laser είναι σχεδόν μονοχρωματικό, χαρακτηρίζεται δηλαδή από μια συγκεκριμένη τιμή μήκους κύματος. Αν και σήμερα γνωρίζουμε ότι κανένα φως δεν μπορεί να είναι απόλυτα μονοχρωματικό το laser είναι πρακτικά το μόνο φως που μπορεί να υπάρξει στο εργαστήριο και παράλληλα να προσεγγίζει περισσότερο το θεωρητικό αυτό όριο. Έχει υπολογιστεί ότι το φως από laser He-Ne είναι εκατομμύρια φορές πιο μονοχρωματικό από το φως μιας λάμπας εκκένωσης ίδιας σχεδόν απόχρωσης. Έτσι, το εύρος ζώνης για το εκπεμπόμενο μήκος κύματος συνήθως είναι 0.01nm ή ακόμη και μικρότερο.

**Συμφωνία:** Πρόκειται για μια ιδιότητα που έχει να κάνει με το βαθμό συσχέτισης των φάσεων που δημιουργούνται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στις διάφορες περιοχές του χώρου αλλά και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Υπάρχει δηλαδή αντίστοιχα η χωρική αλλά και η χρονική συμφωνία. Οι δέσμες laser εμφανίζουν και εδώ τις καλύτερες δυνατές επιδόσεις, για παράδειγμα το laser He-Ne έχει χρονική συμφωνία μερικά msec και αντίστοιχη χωρική συμφωνία μερικές εκατοντάδες μέτρα. Οι αντίστοιχες τιμές για το φως από μια συμβατική λάμπα νατρίου (Na) είναι για το χρόνο σε sec και για το μήκος συμφωνίας να είναι ένα μικρό μόνο κλάσμα του cm.

**Κατευθυντικότητα:** Πρόκειται για την πιο χαρακτηριστική ίσως ιδιότητα του φωτός ενός laser. Πράγματι αρκεί να δει κάποιος την πολύ στενή δέσμη ενός laser να ταξιδεύει ευθύγραμμο στο χώρο για να εντυπωσιαστεί μοναδικά. Η κατευθυντικότητα χαρακτηρίζει το πόσο «ανοίγει» η δέσμη (δηλαδή μεγαλώνει η διάμετρος του κυκλικού ίχνους της), καθώς η δέσμη αυτή απομακρύνεται από τη συσκευή της δημιουργίας της.

**Ένταση ή Λαμπρότητα:** Η δέσμη ενός laser (ακόμη και του πιο συνηθισμένου) έχει πολύ μεγάλη ένταση. Λόγω της πολύ μεγάλης παραλληλίας τους οι ακτίνες laser όταν συγκλίνουν από ένα π.χ. διαθλαστικό φακό μπορεί να συγκεντρωθούν στο χώρο σε μια σχεδόν σημειακή εστία. Έτσι, η ένταση του φωτός σε εκείνη τη μικροσκοπική περιοχή μπορεί να γίνει ιδιαίτερα μεγάλη. Αυτός εξάλλου είναι και ο λόγος σύμφωνα με τον οποίο δεν πρέπει η δέσμη ισχυρού laser να εισχωρήσει (κατά λάθος) στην οφθαλμική κοιλότητα. Υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να προκληθεί βλάβη στον αμφιβληστροειδή ή οποία μάλιστα ενδέχεται να είναι και μη αναστρέψιμη.

## 2.2 Χάραξη με Laser

Η χάραξη με laser (laser engraving) είναι η πρακτική της χρήσης laser για τη χάραξη ενός αντικειμένου. Πρόκειται για κατεργασία χωρίς επαφή και αυτό δημιουργεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες κατεργασίες που χρησιμοποιούν κοπτικά εργαλεία και πλακίδια κοπής.

### 2.2.1 Μέθοδοι χάραξης και τύποι laser

Οι βασικές μέθοδοι χάραξης (laser engraving) είναι:



- Raster engraving
- Vector engraving

Στη μέθοδο Raster η κίνηση γίνεται όπως σε έναν εκτυπωτή. Έτσι αφαιρείται υλικό ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα Raster αρχεία δημιουργούνται από μικρά τετράγωνα, τα οποία είναι γνωστά ως εικονοστοιχεία (pixels). Τα εικονοστοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση της εικόνας, χωρίζονται σε γραμμές. Η κάθε γραμμή αποτελεί μία σειρά δεδομένων που αντιστοιχούν στα αρχικά στοιχεία της εικόνας. Το σύνολο των γραμμών στοιβάζονται από πάνω προς τα κάτω δημιουργώντας την εικόνα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για μαλακά υλικά όπως ξύλο και δέρμα.

Στη μέθοδο Vector από την άλλη, χρησιμοποιούνται γραμμές και καμπύλες για να δημιουργηθεί η εικόνα που μοιάζει σαν γραμμικό σχέδιο. Ενδείκνυται για μικρά αντικείμενα και είναι πιο αποτελεσματική σε περιπτώσεις που απαιτούνται λεπτομερείς κατεργασίες. Χρησιμοποιείται συνήθως για μέταλλα, όπως χάλυβα, τιτάνιο, ορείχαλκο και αλουμίνιο.

### **Τύποι Laser**

- CO2 Laser
- Nd: YAG laser
- Fiber Laser

Τα Laser CO2 μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως συνεχή είτε ως παλμικά (Q-Switched). Χρησιμοποιούνται κυρίως για σήμανση και βάθος χάραξης, κυρίως για χαράξεις σε μη μεταλλικά υλικά όπως θερμοπλαστικά, συνθετικά, δέρμα και καουτσούκ.

Τα Nd:YAG Laser χρησιμοποιούνται συνήθως για τη χάραξη μεταλλικών υλικών και κάποιων μη μεταλλικών υλικών, αυτό οφείλεται στο μήκος κύματος που προσεγγίζει τα 1.06μm. Τα μη μεταλλικά υλικά δεν μπορούν να δεχθούν επεξεργασία με μεγάλη αποτελεσματικότητα λόγω του μεγάλου μήκους κύματος.

Τα fiber Laser χρησιμοποιούνται κυρίως για κατεργασίες μαρκάρισματος και χάραξης. Δεν μπορούν να χαράξουν μη μεταλλικά υλικά και είναι χρήσιμα στις επεξεργασίες μεταλλικών υλικών.

### **2.2.2 Κατεργαζόμενα Υλικά**

Οι μηχανές Laser μπορούν να επεξεργαστούν μεγάλο εύρος υλικών. Για να επιτευχθεί σωστή κατεργασία σε όλα τα υλικά χρειάζονται και ανάλογες συνθήκες κατεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οικογένειες υλικών, που μπορούν να υποστούν κατεργασία με δέσμη Laser.

#### **Φυσικά υλικά**

Η δημιουργία εικόνων στο ξύλο, μέσω της «καύσης» του, από τη δέσμη Laser ήταν μία από τις πρώτες χρήσεις των Laser χάραξης. Ανάλογα με το είδος του ξύλου καθορίζεται και η απαιτούμενη ισχύς του Laser. Έτσι, ενώ τα πιο σκληρά ξύλα, όπως η καρυδιά ή το μαόνι, χαράζονται με πολύ καλά αποτελέσματα, τα πιο μαλακά ξύλα χρειάζονται μεγάλη προσοχή και πλούσια παροχή αέρα, καθώς παρατηρούνται αναφλέξεις και αστάθεια όσων

αφορά το βάθος χάραξης. Επίσης, τα χαρτόνια και τα κόντρα πλακέ παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα χάραξης. Επίσης καλά αποτελέσματα εμφανίζονται σε ορισμένες χημικές ενώσεις του καουτσούκ. Τέλος, στα δέρματα όταν χαράζονται με δέσμη Laser, δημιουργείται επιφάνεια παρόμοια του μαρκαρίσματος με καυτό σίδηρο. Να σημειωθεί εδώ ότι οι γούνες δεν μπορούν να χαραχθούν.

### **Πολυμερή**

Τα ακριλικά πολυμερή και οι ρητίνες έχουν τη δυνατότητα να χαραχθούν με τη χρήση της δέσμης Laser, με αρκετά καλό τελικό αποτέλεσμα επιφάνειας. Το στυρένιο και τα περισσότερα θερμοπλαστικά λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών τείνουν να λιώνουν γύρω από το σημείο χάραξης, να «διπλώνουν» και να αλλάζουν σχήμα. Κάποια άλλα πολυμερή μπορούν μεν να χαραχθούν, αλλά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παράγονται ατμοί οι οποίοι είναι είτε επικίνδυνοι, όπως στην περίπτωση του Kevlar, είτε προκαλούν βλάβες στη μηχανή Laser όπως στην περίπτωση του PVC.

### **Μέταλλα και μέταλλα με επικάλυψη**

Τα μέταλλα θεωρούνται τα καλύτερα υλικά για να χαραχθούν με Laser, παρόλο που ξεκίνησαν ως τα χειρότερα. Το πρόβλημα διορθώθηκε με τη χρήση μηχανών Laser μικρότερου μήκους κύματος, όπως οι μηχανές Yb: Fibre Laser που λειτουργούν στα 1064nm.

### **Πέτρα και γυαλί**

Αν και υλικά όπως η πέτρα και το γυαλί προτιμάται να χαράζονται και να κόβονται είτε με αμμοβολή είτε με τη χρήση διαμαντιού, η χάραξη με Laser παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Όταν η δέσμη Laser έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια των παραπάνω υλικών, επέρχεται θραύση. Έτσι δημιουργούνται μικροί πόροι καθώς το υλικό αποκολλάται σε μικροσκοπικά κομμάτια, λόγω διαστολής των κομματιών αυτών συγκριτικά με το υπόλοιπο υλικό.

### **2.2.3 Εφαρμογές των Laser στην Κατεργασία Χάραξης**

Στις τελευταίες δεκαετίες μέχρι και σήμερα η χάραξη με Laser, βρίσκει εφαρμογή τόσο σε εμπορικό επίπεδο όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο. Η χρήση των Laser αυξάνεται συνεχώς σε αυτά τα δύο επίπεδα καθώς είναι ικανό να αποφέρει αποτελέσματα με πολύ υψηλότερη ποιότητα σε σχέση με τις άλλες κατεργασίες χάραξης.

Σε εμπορικό επίπεδο η χάραξη με Laser βρίσκει εφαρμογές, όπως σε ονομασίες ή σε χαράξεις πολύπλοκων σχημάτων σε ένα μπρελόκ, ή σε τρόπαια ή σε βραβεία, κ.α. Με τη χρήση Laser υπάρχει η δυνατότητα να χαραχθεί ένα πολύπλοκο σχήμα σε κρύσταλλο ή γυαλί. Επίσης η χάραξη με Laser χρησιμοποιείται αρκετά για κοσμήματα, όπως για παράδειγμα για τη χάραξη ενός ονόματος σε ένα δακτυλίδι, μιας υπογραφής σε ένα ρολόι ή ενός μηνύματος σε ένα μπρελόκ.

Η χάραξη με laser σε βιομηχανικό επίπεδο βρίσκει επίσης πολλές εφαρμογές, όπως στην κατασκευή ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, για να χαραχθούν σε τσιπ σειριακοί αριθμοί και άλλες ονομασίες. Επίσης είναι χρήσιμη στην κατασκευή καλουπιών και μητρώων λόγω των

γρήγορων και οικονομικών αποτελεσμάτων με την παράλληλη επίτευξη πολύ καλού ελέγχου κατά την επεξεργασία.

## **2.3 Ανασκόπηση Υλοποιούμενης Έρευνας στο Αντικείμενο της Εργασίας σε Διεθνές Επίπεδο**

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι αλλαγές στις παραμέτρους της διεργασίας laser engraving στην επιφανειακή τραχύτητα. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η μέση ένταση των παλμών του laser (P), η συχνότητα των παλμών (F) και η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης (V).

Πρωταρχικός σκοπός των μικροκατεργασιών με δέσμη Laser είναι η βελτίωση της χαραγμένης επιφάνειας. Προς αυτήν την κατεύθυνση κινούνται πολλές ερευνητικές εργασίες και παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σχετικά αποτελέσματα μέσα από την έρευνα που έχει υλοποιηθεί ή βρίσκεται σε εξέλιξη σε διεθνές επίπεδο, τα οποία επιλέχθηκαν, με κριτήριο τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η ανασκόπηση της σχετικής έρευνας που υλοποιείται σε διεθνές επίπεδο αποσκοπεί στη μελέτη του τρόπου με τον οποίο οι παράμετροι της διαδικασίας επηρεάζουν την επιφανειακή τραχύτητα για διάφορα κράματα.

### **2.3.1 Χάραξη με Laser σε Βανάντιο 10**

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, από την Sefika Kasman, είχε σαν σκοπό τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο οι παράμετροι της διαδικασίας επηρεάζουν το βάθος χάραξης (D) και την επιφανειακή τραχύτητα (Ra) στο Βανάντιο 10. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η συχνότητα παλμού (F), η ταχύτητα σάρωσης (V) και η ένταση ισχύος (P). [3]

Η μηχανή laser που χρησιμοποιήθηκε ήταν παλμικού τύπου Ytterbium fiber laser, με μήκος κύματος 1064 nm και μέγιστη ισχύ 50 W. Το εστιακό μήκος, το οποίο διατηρήθηκε σταθερό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ήταν 160 mm. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση της μεθόδου Taguchi, όπου πρόκειται για μια γραμμική παλινδρόμηση. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με μια ορθογώνια συστοιχία L9.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τις παρακάτω συνθήκες κατεργασίας:

- Συχνότητα παλμού [20, 30 και 40] kHz
- Ταχύτητα σάρωσης [200, 500 και 800] mm/s
- Ένταση ισχύος [25, 37.5 και 50] W

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη έρευνα είναι τα ακόλουθα:

1. Η ταχύτητα σάρωσης φαίνεται να είναι η κύρια αποτελεσματική παράμετρος για τα δύο χαρακτηριστικά απόδοσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αυξανόμενη ταχύτητα σάρωσης μειώνει τόσο την τραχύτητα της επιφάνειας όσο και το τελικό βάθος χάραξης. Για να ελαχιστοποιηθεί η τραχύτητα, η ταχύτητα σάρωσης θα πρέπει να επιλεγεί σε υψηλό επίπεδο (800 mm/s), ενώ για να μεγιστοποιηθεί το

βάθος χάραξης, η ταχύτητα σάρωσης θα πρέπει να επιλεγεί σε χαμηλό επίπεδο (200 mm/s).

2. Το βέλτιστο επίπεδο για την τραχύτητα είναι εκεί όπου η ταχύτητα σάρωσης είναι στα 800 mm/s, η συχνότητα είναι στα 30 KHz και η ισχύς είναι 25W. Τα βέλτιστα επίπεδα για το βάθος χάραξης για κάθε τύπο υλικού αποκτήθηκαν με ταχύτητα σάρωσης 200 mm/s, συχνότητα 30 KHz και με ισχύ στα 50 W.
3. Μετά τον προσδιορισμό του βέλτιστου επιπέδου για κάθε παράμετρο, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα επιβεβαίωσης τόσο για την τραχύτητα επιφάνειας όσο και για το τελικό βάθος χάραξης. Ακολούθησε σύγκριση των αναμενόμενων και πειραματικών αποτελεσμάτων όπου έδειξε ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί ένα καλό φινίρισμα επιφάνειας, προτείνεται υψηλή ταχύτητα σάρωσης στο χαμηλότερο επίπεδο ισχύος.
4. Η ανάλυση ANOVA έγινε για να διερευνηθεί η σημασία κάθε παραμέτρου και να καθοριστεί η εκατοστιαία συνεισφορά τόσο στην τραχύτητα της επιφάνειας όσο και στο τελικό βάθος χάραξης. Η επίδραση της ταχύτητας σάρωσης τόσο στην τραχύτητα όσο και στο βάθος χάραξης ήταν 83,84% και 76,69% αντίστοιχα. Ωστόσο, η επίδραση της συχνότητας είχε ελάχιστη τιμή που καθορίζεται από την τιμή  $P$  (0,367). Η ποσοστιαία συνεισφορά της συχνότητας ήταν 3,47% και 0,56% στην τραχύτητα και βάθος χάραξης, αντίστοιχα.
5. Για να δοκιμαστεί το μοντέλο της προβλεπόμενης γραμμικής παλινδρόμησης, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο πειραμάτων σε διαφορετικές συνθήκες για να εκτιμηθούν τόσο η τραχύτητα όσο και το βάθος χάραξης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι τα προβλεπόμενα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στην πραγματική τιμή. Αυτό σημαίνει ότι η τραχύτητα επηρεάζει το μοντέλο της διαδικασίας χάραξης με laser για το Vanadis 10. Εκτός αυτού, τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα πειράματα δοκιμής εξηγούν επίσης το μοντέλο για το τελικό βάθος χάραξης.

### 2.3.2 Βαθιά Χάραξη Laser σε Ανοξείδωτο Χάλυβα AISI 1045

Η έρευνα που πραγματοποίησε η Anita Pritam, είχε σαν σκοπό τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν οι παράμετροι της διαδικασίας (ταχύτητα σάρωσης, ισχύς laser, συχνότητα και διάστημα πλήρωσης) τη βαθιά χάραξη laser στον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 1045. Επίσης διερευνήθηκαν και οι βέλτιστες συνθήκες των παραμέτρων για την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας και τη μεγιστοποίηση του βάθους χάραξης [4].

Για τη χάραξη χρησιμοποιήθηκε laser τύπου Ytterbium-doped fiber laser με μήκος κύματος 1.064nm όπου η μέγιστη ισχύς εξόδου του laser ήταν 30 W. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για αυτήν την πειραματική μελέτη ήταν ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI 1045. Τα δείγματα κόπηκαν σε διαστάσεις [50 x 200 x 20] mm και γυαλίστηκαν με λείανση για ακρίβεια διαστάσεων στις επιφάνειες.

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη ήταν:

- Ταχύτητα σάρωσης [200, 400, 600 και 800] mm/s
- Συχνότητα [25, 35, 45 και 55] kHz
- Ισχύς λείζερ [12, 18, 24 και 30] W

- Διάστημα πλήρωσης [0.01, 0.02, 0.03 και 0.04] mm

Ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας προσδιορίστηκε με τη μέση επιφανειακή τραχύτητα ( $R_a$ ). Οι τιμές  $R_a$  και το βάθος χάραξης ( $D$ ) μετρήθηκαν με προφیلόμετρο Mitutoyo SJ 301. Για την τραχύτητα, το μέγεθος πεδίου μέτρησης ήταν 4mm. Για κάθε συνθήκη διεργασίας πραγματοποιήθηκαν έξι μετρήσεις στην κατεργασμένη περιοχή, προκειμένου να εξαλειφθεί η επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης. Το μέσο αποτέλεσμα αυτών των έξι τιμών καταγράφηκε ως το τελικό  $R_a$  και  $D$ .

Αφού διεξήχθησαν τα πειράματα, μελετήθηκαν τα αποτελέσματα των παραμέτρων της διαδικασίας πάνω στα χαρακτηριστικά απόδοσης (επιφάνεια, τραχύτητα και βάθος χάραξης). Η επίδραση της κάθε παραμέτρου μελετήθηκε διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.

Η επίδραση της ισχύος του λέιζερ στην τραχύτητα της επιφάνειας μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές ισχύος με εύρος τιμών από 12 έως 30W. Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της ισχύος του λέιζερ αυξάνεται και η τραχύτητα της επιφάνειας. Η τραχύτητα λάμβανε την χαμηλότερη και την υψηλότερη τιμή της, όταν η ισχύς ήταν 12 και 30 W αντίστοιχα. Επίσης η ισχύς του laser επηρέαζε το βάθος χάραξης κατά παρόμοιο τρόπο με την τραχύτητα, δηλαδή όσο αυξανόταν η ισχύς αυξανόταν και το βάθος χάραξης. Η υψηλότερη τιμή για το βάθος χάραξης επιτεύχθηκε για τιμή ισχύος στα 30 W και η χαμηλότερη τιμή επιτεύχθηκε με ισχύ στα 12 W.

Η επίδραση της συχνότητας στην τραχύτητα της επιφάνειας μελετήθηκε για διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας. Προέκυψε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας μειώνεται μεταξύ 25 και 45 kHz και αυξάνεται μεταξύ 35 και 55 kHz. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι οι μεταβολές στη μέση τιμή της επιφανειακής τραχύτητας είναι πολύ μικρές. Ως εκ τούτου, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η επίδραση της συχνότητας στην επιφανειακή τραχύτητα δεν είναι σημαντική. Από τα αποτελέσματα του βάθους χάραξης σε συνάρτηση με τη συχνότητα φάνηκε καθαρά ότι το βάθος χάραξης αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας. Ωστόσο, η επίδραση της συχνότητας στο βάθος μπορεί να αμεληθεί λόγω της μικρής μεταβολής του βάθους.

Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας σάρωσης και της επιφάνειας τραχύτητας έδειξε ότι η επιφανειακή τραχύτητα μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των σημείων, όταν αυξάνεται η ταχύτητα σάρωσης, η διακύμανση της επιφανειακής τραχύτητας μειώνεται σταδιακά. Η υψηλότερη επιφανειακή τραχύτητα λαμβάνεται στην ταχύτητα σάρωσης 200 mm/s, ενώ η χαμηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας λαμβάνεται στην ταχύτητα σάρωσης των 800 mm/s. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του βάθους χάραξης σε συνάρτηση με την ταχύτητα σάρωσης όπως φαίνονται στην κατανομή των σημείων, δείχνουν ότι ο ρόλος της ταχύτητας σάρωσης στο βάθος χάραξης είναι πολύ σημαντικός. Το βάθος χάραξης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Η μεγαλύτερη τιμή βάθους επιτυγχάνεται σε ταχύτητα σάρωσης 200 mm/s, ενώ η χαμηλότερη τιμή βάθους επιτυγχάνεται σε ταχύτητα σάρωσης 800 mm/s.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της επιφανειακής τραχύτητας ως συνάρτηση της απόστασης πλήρωσης προέκυψε ότι στα πειράματα όπου το εύρος κυμαίνεται από 0,01 έως 0,04 mm, η επιφανειακή τραχύτητα παρουσιάζει σημαντική μείωση μεταξύ 0,01 και 0,03 mm, και στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται έως και τα 0,04 mm. Η χαμηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας λαμβάνεται σε απόσταση πλήρωσης 0,03 mm. Είναι σαφές ότι το βάθος χάραξης μειώνεται με την αύξηση της απόστασης πλήρωσης. Η μείωση του βάθους χάραξης παρουσιάζει γραμμική τάση. Η υψηλότερη τιμή βάθους χάραξης επιτυγχάνεται στην απόσταση πλήρωσης 0,01 mm.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη μελέτη είναι τα ακόλουθα:

- Τόσο η επιφανειακή τραχύτητα όσο και το βάθος χάραξης αυξάνονται με την αύξηση της ισχύος του laser.
- Η τραχύτητα της επιφάνειας και το βάθος χάραξης μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης.
- Για δύο υψηλές τιμές της ταχύτητας σάρωσης, η μεταβολή της επιφανειακής τραχύτητας και του βάθους χάραξης είναι μικρή σε σύγκριση με τις χαμηλές ταχύτητες σάρωσης.
- Το βάθος χάραξης είναι υψηλότερο σε χαμηλή ταχύτητα σάρωσης λόγω της υψηλής ενέργειας εισόδου που οφείλεται στον αυξημένο χρόνο αλληλεπίδρασης.
- Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο παλινδρόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της τραχύτητας επιφάνειας και του βάθους χάραξης με μικρή τιμή σφάλματος.
- Τα βάθη χάραξης επηρεάζονται κυρίως από την ταχύτητα σάρωσης, την ισχύ του laser και την απόσταση πλήρωσης.

### **2.3.3 Πειραματική Ανάλυση των Παραμέτρων της Διαδικασίας Laser Engraving σε Κράμα Αλουμινίου-Μαγνησίου**

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους S.L. Campanelli, A.D. Ludovico, C. Bonserio, P. Cavalluzzi, M. Cinqueralmi αξιολογήθηκε η επίδραση των κύριων παραμέτρων που εμπλέκονται στην επιτυχή διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν το βάθος του αφαιρεθέντος υλικού (DP) και η τραχύτητα της επιφάνειας (SR). Ερευνήθηκε ο καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων που οδηγούσε στο βέλτιστο συνδυασμό μεγιστοποίησης του αφαιρεθέντος υλικού και ελαχιστοποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας [5].

Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε δείγματα κράματος αλουμινίου-μαγνησίου χρησιμοποιώντας μηχανή σήμανσης laser (Trumark VMc5 από Trumpf) εφοδιασμένη με παλμικό laser Nd:YVO4 που έχει μήκος κύματος 1064 nm και μέση ισχύ laser 30 W.

Οι παράμετροι του Trumark VMc5 και το εύρος τους είναι:

- |                         |               |
|-------------------------|---------------|
| • Ταχύτητα σάρωσης (V)  | 100-5000 mm/s |
| • Μέγιστη ισχύς (PP)    | 10-40 KW      |
| • Συχνότητα παλμού (Fp) | 1-100 kHz     |
| • Πλάτος παλμού (PW)    | 5 ns          |
| • Μέση ισχύς            | 30 W          |

- Επικάλυψη (O) 40  $\mu\text{m}$

Στη συγκεκριμένη μηχανή Vmc5 ήταν δυνατό να αλλάξει η μέγιστη ισχύς, η συχνότητα παλμού, η ταχύτητα σάρωσης, η επικάλυψη, και το πλάτος παλμού, όπου:

- Η μέγιστη ισχύς είναι η στιγμιαία ισχύς εξόδου laser κατά τη διάρκεια του παλμού του laser.
- Η συχνότητα παλμών ή ο ρυθμός επανάληψης ορίζεται ως ο αριθμός παλμών ανά δευτερόλεπτο από το laser.
- Η ταχύτητα σάρωσης είναι η ταχύτητα με την οποία η ακτίνα laser κινείται πάνω από την επιφάνεια του υλικού.
- Η μέση ισχύς είναι η μέση ισχύς εξόδου σε χρονική βάση αρκετών δευτερολέπτων. Η ενέργεια παλμού laser πολλαπλασιάζεται με τη συχνότητα παλμών και έτσι καθορίζεται η μέση ισχύς εξόδου του laser.
- Ο βαθμός επικάλυσης (overlapping) καθορίζει την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών διαμέτρων της ακτίνας laser και σχετίζεται με τη συχνότητα παλμού και την ταχύτητα σάρωσης μέσω του τύπου:

$$O = \frac{V}{Fp}$$

Για την παράλληλη μελέτη των επιδράσεων των εμπλεκόμενων παραμέτρων στην επιτυχία της διαδικασίας αφαίρεσης υλικού και της επιφανειακής τραχύτητας σχεδιάστηκαν παραγοντικές μελέτες. Διεξήχθησαν δύο διαφορετικές αναλύσεις για τις παραμέτρους εξόδου που αφορούσαν:

- Το βάθος του αφαιρεθέντος υλικού
- Την τραχύτητα της επιφάνειας

Οι προκαταρκτικές δοκιμές έδειξαν ότι θα μπορούσαν να επιτευχθούν σημαντικά αποτελέσματα μόνο με τον καθορισμό της μέγιστης τιμής έντασης και τη διάρκεια των παλμών σε 5 ns.

Επίσης μελετήθηκε η αλληλεπίδραση των παραγόντων του βαθμού επικάλυσης (overlapping) και της συχνότητας στο τελικό βάθος αφαιρεθέντος υλικού. Οι δύο παράγοντες άλλαξαν, αντίστοιχα, σε 7 και 10 επίπεδα με αποτέλεσμα 70 διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των εξεταζόμενων παραγόντων διεργασίας, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Το γενικό γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για το ANOVA και η τιμή πιθανότητας α ορίστηκε στο 0,01. Οι παρατηρήσεις που έγιναν αφορούσαν:

- Και οι δύο παράγοντες να επηρεάζουν το τελικό βάθος αφαιρεθέντος υλικού.
- Η μέγιστη τιμή στο τελικό βάθος του αφαιρεθέντος υλικού να βρίσκεται γύρω από την τιμή  $Fp = 30 \text{ KHz}$ .

Οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις οφείλονταν στην αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων όπου η αλληλεπίδραση ήταν υψηλότερη για χαμηλές τιμές του βαθμού επικάλυσης (overlapping) όπου υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση. Η μέγιστη τιμή βάθους αφαιρεθέντος υλικού για ένα μόνο στρώμα επιτυγχάνεται για την ελάχιστη επικάλυση  $O = 5 \mu\text{m}$  και  $Fp = 30 \text{ kHz}$ .

Η αξιολόγηση της επιφανειακής τραχύτητας απαιτούσε την ανάλυση ενός άλλου παράγοντα εισόδου, της στρατηγικής σάρωσης. Εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι στρατηγικής σάρωσης:

1. Παράλληλες μόνο γραμμές προς την κατεύθυνση της στρωματοποίησης.
2. Παράλληλες γραμμές προς την κατεύθυνση στρωματοποίησης για το πρώτο στρώμα και περιστροφή με  $90^\circ$  γωνιακή αύξηση για τα ακόλουθα στρώματα
3. Γραμμές κεκλιμένες  $45^\circ$  για το πρώτο στρώμα και αύξηση  $90^\circ$  για τα ακόλουθα στρώματα
4. Παράλληλες γραμμές προς την κατεύθυνση στρωματοποίησης για το πρώτο στρώμα και περιστροφή με γωνιακή αύξηση  $45^\circ$  για τα ακόλουθα στρώματα.

Η ελάχιστη τραχύτητα επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον τέταρτο τύπο σάρωσης, τη συχνότητα που είχε οριστεί σε μέγιστη τιμή 10 kHz και τον βαθμό επικάλυψης που είχε ρυθμιστεί στα 20  $\mu\text{m}$ . Τα αποτελέσματα για τη βελτιστοποίηση της τραχύτητας ήταν ακριβώς αντίθετα από τα αποτελέσματα για τη μεγιστοποίηση του αφαιρεθέντος υλικού. Δηλαδή η τραχύτητα της επιφάνειας με επιλεγμένη στρατηγική σάρωσης τον τέταρτο τύπο και με μεταβλητές τους δύο συντελεστές, βαθμός επικάλυψης (overlapping) και συχνότητα παλμών, έδειξε ότι ήταν δυνατή η πραγματοποίηση χαμηλής τραχύτητας (μικρότερη από 7  $\mu\text{m}$ ) με το μέγιστο βάθος αφαιρεθέντος υλικού, που λαμβάνεται για  $O=5 \mu\text{m}$  και  $Fp=30 \text{ kHz}$ . Αυτή η ρύθμιση παραμέτρων επέτρεψε την υλοποίηση εξαρτημάτων με καλό φινίρισμα επιφάνειας που χαρακτηρίζεται από μέσο βάθος αφαίρεσης υλικού  $DP=17,9 \mu\text{m}$ .

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εργασία ήταν τα ακόλουθα:

- Εάν απαιτείται γρήγορη κατεργασία, η ποσότητα αφαιρεθέντος υλικού πρέπει να μεγιστοποιηθεί, επομένως αυτό επιτυγχάνεται για βαθμό επικάλυψης (overlapping)  $O=5 \mu\text{m}$  και μέγιστη συχνότητα  $Fp=30 \text{ kHz}$ .
- Το αποτέλεσμα της τραχύτητας είναι ακριβώς αντίθετο από τη μεγιστοποίηση του αφαιρεθέντος υλικού, ωστόσο μπορεί να ληφθεί ένα καλό φινίρισμα επιφάνειας επιλέγοντας τις παραπάνω τιμές για βαθμό επικάλυψης και συχνότητα και χρησιμοποιώντας μια στρατηγική σάρωσης με παράλληλες γραμμές προς την κατεύθυνση στρωματοποίησης για το πρώτο πέρασμα και περιστροφή με  $45^\circ$  γωνιακή αύξηση για τα ακόλουθα επίπεδα.



### 3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

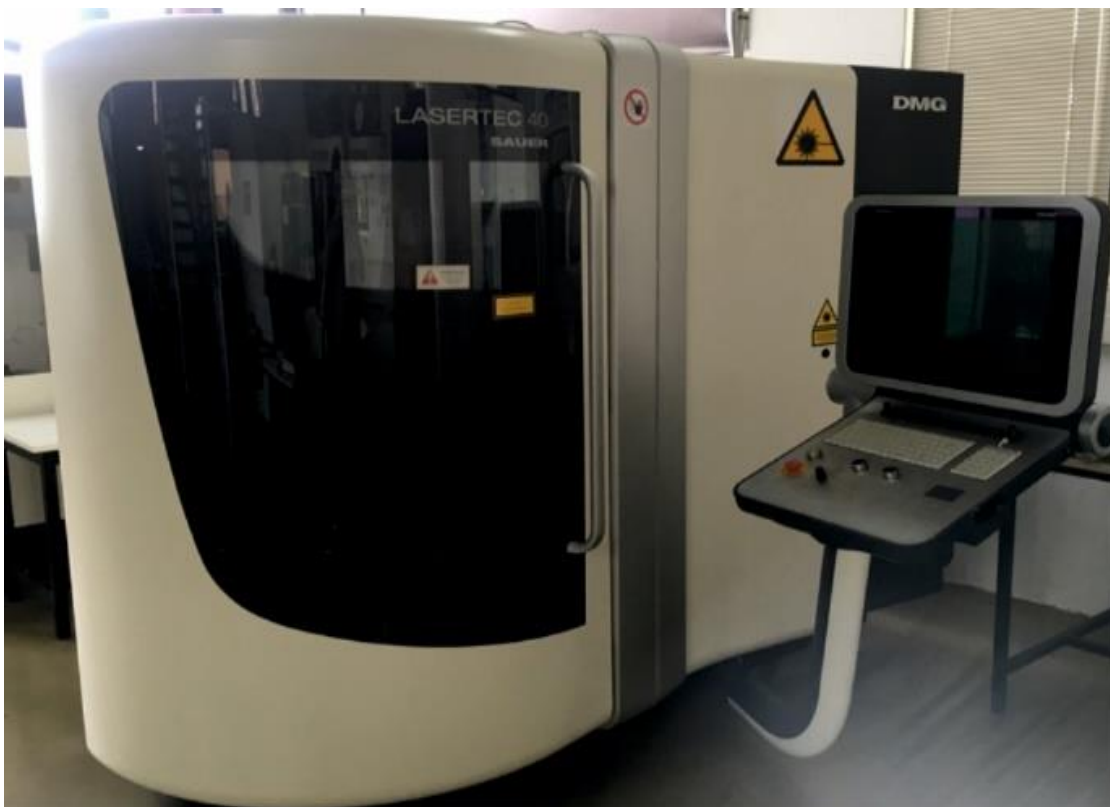
#### 3.1 Κέντρο κατεργασίας DMG

Η Lasertec 40 είναι η εργαλειομηχανή CNC στην οποία υλοποιήθηκε η κατεργασία χάραξης στα υλικά που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία.

Πρόκειται για ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας τριών γραμμικών και δύο οπτικών αξόνων. Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η εν λόγω εργαλειομηχανή. Πρόκειται για ένα αυτοματοποιημένο CNC κέντρο κατεργασίας με δυνατότητα προγραμματισμού καθοδήγησης μέσω των προγραμμάτων LaserSoft 3D και LpsWin. Ο έλεγχος των κατεργασιών της συγκεκριμένης μηχανής γίνεται μέσω ενός ψηφιακού κέντρου ελέγχου το οποίο απαρτίζεται από μια οθόνη TFT 15" (ιντσών) και πληκτρολόγιο με ενσωματωμένο ποντίκι για την εισαγωγή δεδομένων στη μηχανή.

Οι διαστάσεις και το βάρος της μηχανής είναι:

- Μήκος : 2850mm
- Πλάτος : 2476mm
- Ύψος : 2370mm
- Βάρος : 2200kg



Σχήμα 3.1 Κέντρο κατεργασίας Lasertec 40

Στο εσωτερικό του θαλάμου κατεργασίας στο επάνω μέρος υπάρχουν τα εξής:

- Ο φακός του laser.
- Η κάμερα καθοδήγησης - Φακός ρυθμιζόμενης φωτεινότητας.
- Το ακροφύσιο της σκούπας.
- Το probe.

Στο θάλαμο κατεργασίας υπάρχει επίσης η τράπεζα όπου πάνω της τοποθετείται το τεμάχιο που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Διαστάσεις τράπεζας : 400 x 300 mm
- Μέγιστο φορτίο : 50 kg
- Κίνηση τράπεζας στον άξονα X : 400 mm
- Κίνηση τράπεζας στον άξονα Y : 300 mm
- Κίνηση τράπεζας στον άξονα Z : 500 mm
- Ταχύτητα κίνησης τράπεζας :  $\approx 12\text{mm/min}$

Τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά της μηχανής σύμφωνα με το manual της.

- Τύπος μετάδοσης δέσμης : Παλμικός
- Τύπος ενεργού μέσο : Ytterbium fibre
- Μέση ισχύ : 20 W
- Διάρκεια παλμού : 100 ns
- Μήκος κύματος : 1064 nm
- Ταχύτητα σάρωσης δέσμης laser : 50-1000 mm/s
- Διάμετρος δέσμης laser : 30  $\mu\text{m}$
- Πλήρης προστασία καμπίνας με παράθυρα ασφαλείας laser safety glass 1.
- TFT Οθόνη 15 ιντσών.
- Κλιματιζόμενη καμπίνα.
- Μνήμη με σκληρό δίσκο 40 GB.
- Control με 32-bit επεξεργαστή.
- Internet interface

### 3.2 Προφιλόμετρο ContourGT-K 3D

Το προφιλόμετρο ContourGT-K 3D το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2, είναι ένα οπτικό μικροσκόπιο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο με την ικανότητα μέτρησης επιφανειών σε 2D και 3D διαστάσεις. Ο έλεγχος του οπτικού μικροσκοπίου γίνεται μέσω ενός λογισμικού Vision64, το οποίο έχει εγκατασταθεί σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το προφιλόμετρο ContourGT-K 3D είναι ένα οπτικό μικροσκόπιο, το οποίο καταγράφει επιφάνειες και παρουσιάζει προφίλ επιφανειών. Διαθέτει εξαιρετικές δυνατότητες μέτρησης τραχύτητας και σε 2D/3D δυνατότητες μέτρησης, απεικόνιση υψηλής ανάλυσης και φιλικό προς το εργασιακό περιβάλλον του χρήστη. Το ContourGT-K παρέχει πρόσβαση σε μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη προ-προγραμματισμένων φίλτρων και διαθέτει πρωτοποριακή ανάλυση και ακρίβεια στον άξονα Z.



Σχήμα 3.2 Προφιλόμετρο ContourGT-K 3D

Το ContourGT-K είναι όργανο οπτικής καινοτομίας και ηγετικής θέσης στον κλάδο της μη επαφής στη μετρολογία, το χαρακτηρισμό και την απεικόνιση επιφανειών. Παρουσιάζει χαμηλό θόρυβο, υψηλή ταχύτητα, ακρίβεια και αποτελέσματα ακριβείας που απαιτεί η ποσοτική μετρολογία. Με τη χρήση πολλαπλών στόχων και την ενσωματωμένη αναγνώριση χαρακτηριστικών, τα χαρακτηριστικά μπορούν να παρακολουθούνται σε διάφορα οπτικά πεδία και με κατακόρυφη ανάλυση κάτω του νανομέτρου, παρέχει αποτελέσματα ανεξάρτητα από την κλίμακα για εφαρμογές ελέγχου ποιότητας και παρακολούθηση διαδικασιών σε διαφορετικές βιομηχανικές δραστηριότητες.

Στο προφιλόμετρο ContourGT-K 3D και στον υπολογιστή η παροχή ρεύματος γίνεται μέσω ενός πολύπριζου, αλλά για την ομαλή λειτουργία του προφιλόμετρου υπάρχει ο μετατροπέας τάσης. Ο μετατροπέας που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, μετατρέπει την τάση από AC σε DC που απαιτείται για τη λειτουργία του προφιλόμετρου ContourGT-K 3D.



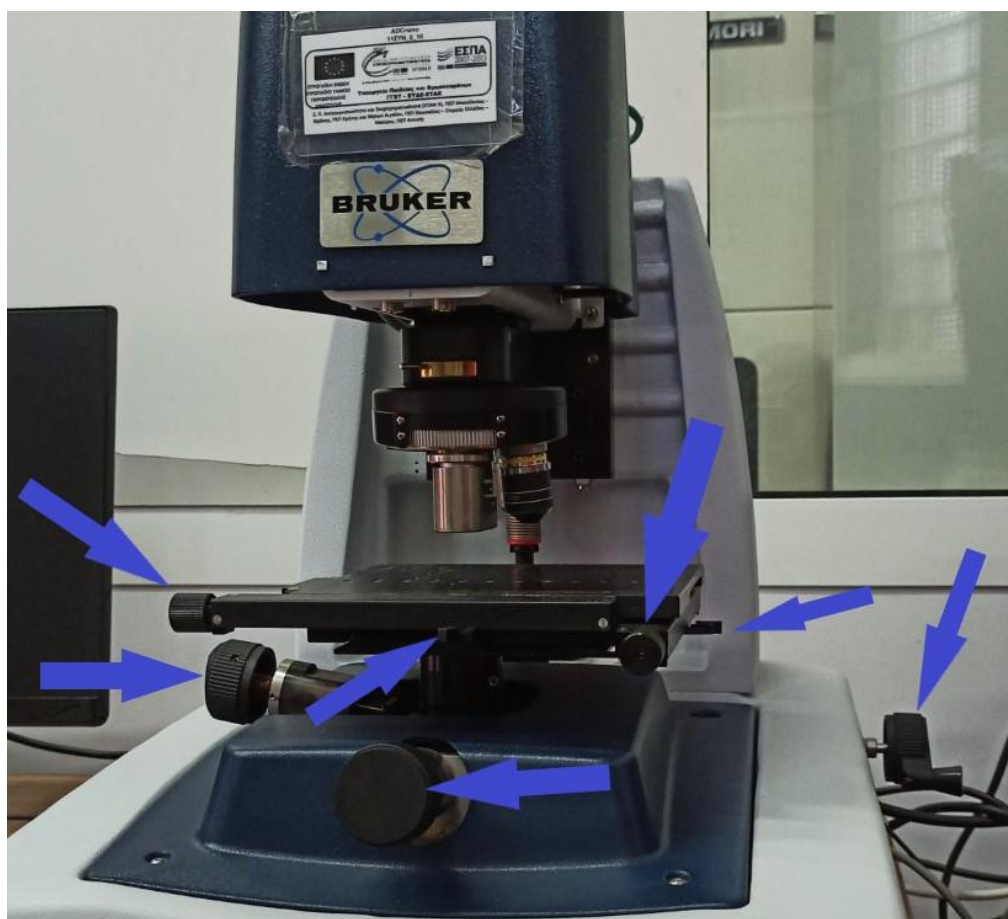
Σχήμα 3.3      Ο μετατροπέας τάσης

Στο προφιλόμετρο υπάρχει επίσης η τράπεζα (σχήμα 3.4) όπου πάνω της τοποθετείται το τεμάχιο όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.



Σχήμα 3.4      Η τράπεζα του προφιλόμετρου

Η μετακίνηση της τράπεζας πραγματοποιείται με τη βοήθεια από 3 μανιβέλες στους άξονες X, Y και Z, 2 μοχλούς για τους άξονες X, Y και 2 μανιβέλες προσαρμογής παραλληλότητας στον άξονα Z. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι μανιβέλες και οι μοχλοί.



Σχήμα 3.4 Μανιβέλες και οι μοχλοί

Τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά του προφιλόμετρου contourGT-K 3D:

- Μέγιστο περιοχή σάρωσης : 10 mm
- Κάθετη ανάλυση : <0,01 nm
- Επαναληψιμότητα RMS (PSI) : 0.01 nm
- Ακρίβεια βήματος ύψους : <0.75%
- Επαναληψιμότητα ύψους βημάτων : <0,1% 1 επαναληψιμότητα
- Μέγιστη σάρωση : 47μm/sec (με τυπική κάμερα)
- Ανακλαστικότητα δείγματος : 0,05% - 100%
- Μέγιστη κλίση δείγματος : Έως 40 ° (γυαλιστερές επιφάνειες) και έως 87 ° (τραχιές επιφάνειες)
- Εστίαση άξονα Z : Χειροκίνητη ή μηχανοκίνητη επιλογή 100mm
- Διαθέσιμοι φακοί ζουμ : 0.55x , 0.75x, 1x, 1.5x , 2x
- Συνολικές διαστάσεις : 492X534X754mm.
- Συνολικό βάρος : 60kg.

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Οι πειραματικές διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης. Προτού ξεκινήσει η διαδικασία των πειραμάτων προηγήθηκε μια εκπαίδευση με στόχο την εξοικείωση με το κέντρο κατεργασίας LASERTEC 40, το προφιλόμετρο ContourGT-K 3D και τη λήψη των απαιτούμενων γνώσεων για τις λειτουργίες και τις δυνατότητές τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

### 4.1 Υλικά

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι αλλαγές στις παράμετρους της διεργασίας laser engraving στην τραχύτητα της επιφάνειας, σε τρία διαφορετικά υλικά που είναι:

- Αλουμίνιο (7075-T6)
- Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)
- Ορείχαλκος (C26000)

Η επιλογή των υλικών πάνω στα οποία γίνονται τα πειράματα είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να σκεφτεί ο χειριστής της εργαλειομηχανής. Η επιλογή των υλικών σχετίζεται άμεσα με τις ιδιότητές τους (μηχανικές, φυσικές, χημικές και κατασκευαστικές).

- Οι μηχανικές ιδιότητες καθορίζουν αν τα υλικά είναι κατάλληλα για τις αναμενόμενες συνθήκες φόρτισης κάτω από τις οποίες θα χρησιμοποιηθούν.
- Οι φυσικές ιδιότητες όπως είναι η πυκνότητα, αγωγιμότητα, ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες, καθώς και οι χημικές ιδιότητες όπως είναι η οξείδωση, τοξικότητα και σταθερότητα καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το υλικό σε κανονικές και ακραίες συνθήκες λειτουργίας που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό και τη χρήση του.
- Οι κατασκευαστικές ιδιότητες των υλικών καθορίζουν την κατεργασιμότητά τους, καθώς και το είδος της εκάστοτε κατεργασίας που είναι κατάλληλο να ακολουθηθεί για την επίτευξη της επιθυμητής τελικής μορφής.

#### **Αλουμίνιο (7075-T6)**

Το αλουμίνιο ή αργίλιο προέρχεται από τον ορυκτό βωξίτη και αποτελεί υλικό φυσικής προέλευσης. Το αργίλιο βρίσκεται στη φύση και πιο συγκεντρωμένα στα ορυκτά του αργίλου και στους κρυστάλλους του κουρουνδίου, ζαφειριού και του ρουμπινιού, αλλά και σε πολύ μεγάλο αριθμό πυριτικών κυρίως ορυκτών. Το αλουμίνιο δεν υπάρχει στη φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες. Ο βωξίτης, ο οποίος από βιομηχανικής απόψεως, αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά ορυκτά, περιέχει το αργίλιο υπό την μορφή οξειδίων, ένυδρων οξειδίων ή υδροξειδίων (αλουμίνα) και οξείδια σιδήρου που του δίνουν το ελαφρώς κοκκινωπό χρώμα του. Θεωρείται οικονομικά εκμεταλλεύσιμος όταν έχει περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 55% σε αλουμίνα. Μετά την εξόρυξή του, ο βωξίτης μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης



μετατρέπεται στο γνωστό μέταλλο το αλουμίνιο, ένα πραγματικά πολύτιμο υλικό για την παγκόσμια και Ελληνική βιομηχανία και οικονομία.

Το αλουμίνιο 7075 -T6 συγκεκριμένα, αποτελεί κράμα αλουμινίου με βασικό στοιχείο τον ψευδάργυρο. Τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου 7075-T6 παρουσιάζονται στο πίνακα 4.1.

Σύσταση Αλουμίνιο (7075-T6) (% by weight)	
Συστατικό	Wt. %
Al	87.1-91.4
Cr	0.18-0.28
Cu	1.2-2
Fe	Max. 0.5
Mg	2.1-2.9
Mn	Max. 0.3
Si	Max. 0.4
Ti	Max. 0.2
Zn	5.1-6.1
Orther, total	Max. 0.15

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά του κράματος αλουμινίου.

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος AA 7075-T6 σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

- Σκληρότητα, Brinell [500 g load, 10 mm ball] : 150
- Σκληρότητα, Knoop [μετατροπή από Brinell] : 191
- Σκληρότητα, Rockwell A [μετατροπή από Brinell] : 53,5
- Σκληρότητα, Rockwell B [μετατροπή από Brinell] : 87
- Σκληρότητα, Vickers [μετατροπή από Brinell] : 175
- Αντοχή στον εφελκυσμό [MPa] : 572
- Αντοχή διαρροής [MPa] : 503
- Επιμήκυνση A50 [%] : 11
- Αναλογία Poisson : 0,33
- Αντοχή στην κόπωση [MPa] : 159
- Κατεργασιμότητα [Κλίμακα 0-100 για κράματα Αλουμινίου] : 70%
- Μέτρο διάτμησης [GPa] : 26,9
- Διατμητική αντοχή [MPa] : 331

Οι φυσικές ιδιότητες του κράματος AA 7075-T6 σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

- Πυκνότητα [g/mm<sup>3</sup>] : 2,81
- Μέτρο Ελαστικότητας [GPa] : 71,7
- Θερμική αγωγιμότητα [W/mxK] : 130
- Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgxK] : 0,96
- Σημείο τήξης [°C] : 477 – 635

Το αλουμίνιο 7075-T6 έχει υψηλές τιμές αντοχής και πυκνότητας, σε σύγκριση με πολλούς χάλυβες, καλό μέσο όρο κατεργασιμότητας, υψηλότερη αντίσταση στη φθορά και μικρότερο βάρος. Αυτά τα πλεονεκτήματα σε συνδυασμό με τη χαμηλή τιμή του, έχουν οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης του σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας.

### **Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)**

Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα-χρωμίου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 10,5% κ.β. Το χρώμιο δημιουργεί ένα μικροσκοπικό στρώμα τριοξειδίου του χρωμίου, το οποίο προστατεύει το μεταλλικό υπόστρωμα από την οξείδωση και τη διάβρωση. Εκτός του χρωμίου ο ανοξείδωτος χάλυβας μπορεί να περιέχει και άλλα πραγματικά στοιχεία όπως νικέλιο, μολυβδαινίο και μαγγάνιο.

Σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες εκτός από την πολύ υψηλή αντοχή στη διάβρωση, παρουσιάζουν και υψηλότερη μηχανική αντοχή. Ωστόσο είναι πιο σκληροί από τους κοινούς χάλυβες και για αυτό το λόγο είναι και πιο δύσκολη η κατεργασία τους. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν επίσης χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες.

Τα χαρακτηριστικά κράματος του ανοξείδωτου χάλυβα SAE304 φαίνονται στον πίνακα 4.2.

Σύσταση Ανοξείδωτος Χάλυβας (% by weight)	
Συστατικό	Wt. %
<b>C</b>	Max. 0.08
<b>Cr</b>	18-20
<b>Fe</b>	66.345
<b>Mn</b>	Max. 2
<b>Ni</b>	8-10.5
<b>P</b>	Max. 0.045
<b>S</b>	Max. 0.03
<b>Si</b>	Max. 1

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά του κράματος SAE304

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος SAE304 σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

- Σκληρότητα, Brinell [500 g load, 10 mm ball] : 123
- Σκληρότητα, Knoop [μετατροπή από Brinell] : 138
- Σκληρότητα, Rockwell A [μετατροπή από Brinell] : 28
- Σκληρότητα, Rockwell B [μετατροπή από Brinell] : 70
- Σκληρότητα, Vickers [μετατροπή από Brinell] : 129
- Αντοχή στον εφελκυσμό [MPa] : 505
- Αντοχή διαρροής [MPa] : 215
- Επιμήκυνση A50 [%] : 70
- Αναλογία Poisson : 0,33



- Αντοχή στην κόπωση [MPa] : 159
- Κατεργασιμότητα [Κλίμακα 0-100 για κράματα Αλουμινίου] : 70%
- Μέτρο διάτμησης [GPa] : 26,9
- Διατμητική αντοχή [MPa] : 331

Οι φυσικές ιδιότητες του κράματος SAE304 σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

- Πυκνότητα [g/mm<sup>3</sup>] : 8
- Μέτρο Ελαστικότητας [GPa] : 193 - 200
- Θερμική αγωγιμότητα [W/mxK] : 16.2
- Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgxK] : 0.5
- Σημείο τήξης [°C] : 1400–1455

### Ορείχαλκος (C26000)

Ο ορείχαλκος είναι κράμα χαλκού-ψευδαργύρου που χρησιμοποιείται απο την Ελληνιστική εποχή μέχρι και σήμερα σε πάρα πολλές εφαρμογές. Η περιεκτικότητα του ορείχαλκου σε ψευδάργυρο καθορίζει και τις ιδιότητες του μετάλλου. Επίσης αναλογα με την περιεκτικότητά του σε ψευδάργυρο αλλάζει το χρώμα του. Συχνά στους ορείχαλκους προστίθεται και μόλυβδος σε πολύ μικρό ποσοστό. Ο μόλυβδος δεν διαλύεται στις κύριες φάσεις του ορείχαλκου, αλλά δημιουργεί μικρά κατακρημνίσματα στα όρια των κρυστάλλων. Η παρουσία των κατακρημνισμάτων μολύβδου κάνει τον ορείχαλκο πιο ευκατέργαστο σε μηχανουργικές κατεργασίες.

Ο ορείχαλκος χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές. στην παραγωγή βαλβίδων και τριβείων, σωλήνων χωρίς ραφή και άλλων εξαρτημάτων ύδρευσης, στην κατασκευή όπλων και εξαρτημάτων μηχανών, στην κατασκευή πνευστών μουσικών οργάνων, κ.α.

Τα χαρακτηριστικά του κράματος C26000 παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Σύσταση Ορείχαλκου (C26000) (%by weight)	
Συστατικό	Wt. %
<b>Cu</b>	59.5-61
<b>Zn</b>	35.8-38.9
<b>Pb</b>	1.2-17
<b>Al</b>	0.4-07
<b>Sn</b>	2.1-2.9
<b>Fe</b>	0- 0.3
<b>Ni</b>	0.05-0.2
<b>Mn</b>	0-0.05
<b>Si</b>	0-0.05

#### Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά του κράματος C26000

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος C26000 σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

• Σκληρότητα, Brinell [500 g load, 10 mm ball]	: 110
• Σκληρότητα, Knoop [μετατροπή από Brinell]	: 126
• Σκληρότητα, Rockwell A [μετατροπή από Brinell]	: 46
• Σκληρότητα, Rockwell B [μετατροπή από Brinell]	: 60
• Σκληρότητα, Vickers [μετατροπή από Brinell]	: 120
• Αντοχή στον εφελκυσμό [MPa]	: 250 - 390
• Αντοχή διαρροής [MPa]	: 355
• Επιμήκυνση A50 [%]	: 9,5
• Αναλογία Poisson	: 0,31
• Αντοχή στην κόπωση [MPa]	: 159
• Μέτρο διάτμησης [GPa]	: 40
• Διατμητική αντοχή [MPa]	: 331

Οι φυσικές ιδιότητες του κράματος EN C26000 σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

• Πυκνότητα [g/mm <sup>3</sup> ]	: 8,1
• Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	: 71,7
• Θερμική αγωγιμότητα [W/mxK]	: 120
• Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgxK]	: 0,96
• Σημείο τήξης [°C]	: 780 - 820

## 4.2 Διαδικασία χάραξης

Η εξάχνωση των κατεργαζόμενων υλικών που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είχε ήδη υλοποιηθεί στον ίδιο εργαστηριακό χώρο, στο κέντρο κατεργασίας LASERTEC 40 (που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα), σε προγενέστερη διπλωματική εργασία από το φοιτητή Χορευτάκη Ι. (Τίτλος εργασίας: «Πειραματικός Προσδιορισμός της Επίδρασης των Συνθηκών Κατεργασίας στο Βάθος Εγχάραξης της Κατεργασίας Laser Engraving») στην οποία μελετήθηκε το βάθος χάραξης.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η τραχύτητα της επιφάνειας των κατεργαζόμενων μετάλλων.

### Συνθήκες Κατεργασίας χάραξης

Στο κέντρο κατεργασίας Nd:YAG Lasertec 40, που χρησιμοποιήθηκε για την εξάχνωση των κατεργαζόμενων υλικών, υπάρχουν οι εξής παράμετροι διεργασίας.

- Τύπος μετάδοσης δέσμης : Παλμικός
- Τύπος ενεργού μέσο : Ytterbium fibre
- Διάρκεια παλμού : 100 ns
- Μήκος κύματος : 1064 nm
- Διάμετρος δέσμης laser : 30  $\mu$ m

Οι συνθήκες κατεργασίας που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία για το πως επηρεάζουν την επιφανειακή τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας (και είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί και για τη χάραξη των υλικών από την προηγούμενη εργασία του Χορευτάκη Ι.) είναι:

- Μέση ένταση Παλμών (Average Output Power)
- Συχνότητα των παλμών
- Ταχύτητα Σάρωσης (Scanning Speed)

## **4.2 Καθαρισμός Επιφανειών**

### **Αλουμίνιο (7075-T6)**

Στο αλουμίνιο για να καθαριστεί η επιφάνεια από επιφανειακά στρώματα, σκουριά και σκουπίδια, χρησιμοποιήθηκε το λιπαντικό WD-40 στην επιφάνεια του κατεργασθέντος υλικού. Έπειτα για να φύγει το λιπαντικό έγινε καθαρισμός με βενζίνη και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε αέρας υπό πίεση, προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα.

### **Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)**

Στον ανοξείδωτο χάλυβα για να καθαριστεί η επιφάνεια από επίστρωση καμμένων αποβλήτων και οξείδωση, χρησιμοποιήθηκε οξύ σε όλη την κατεργασμένη επιφάνεια. Έπειτα έγινε πλύση με πολύ νερό για να απομακρυνθεί το οξύ. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε αέρας υπό πίεση για να στεγνώσει και να απομακρυνθεί η επίστρωση τυχόν καμένων αποβλήτων. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές για να διασφαλιστεί στο μέγιστο βαθμό ότι έχουν φύγει όλες οι επιστρώσεις καμμένων αποβλήτων και οξειδώσεων.

### **Ορείχαλκος (C26000)**

Για τον καθαρισμό του ορείχαλκου από διάφορα σκουπίδια και επιφανειακά στρώματα χρησιμοποιήθηκε καθαρή βενζίνη και στη συνέχεια αέρας υπό πίεση, προκειμένου να καθαριστεί καλά η επιφάνεια που θα μετρηθεί η τραχύτητα

## **4.3 Διαδικασία μέτρησης στο προφیلόμετρο**

### **4.3.1 Λογισμικό Vision64 και Ρύθμιση Προφιλόμετρου**

Στον υπολογιστή υπάρχει εγκατεστημένο το λογισμικό Vision64 (σχήμα 4.1), το οποίο χρησιμοποιεί ο χειριστής ως λογισμικό του προφιλόμετρου. Το Vision64 είναι ένα λογισμικό ανάλυσης και αναφοράς δεδομένων της Bruker. Το Vision64 επιτρέπει πιο περιεκτική τρισδιάστατη απεικόνιση επιφανείας και αναλυτικά δεδομένα με συστήματα οπτικού μικροσκοπίου Bruker 3D. Επίσης διευκολύνει τη λεπτομερή απεικόνιση τρισδιάστατης επιφάνειας και τα αναλυτικά δεδομένα, προσφέροντας μια ολόκληρη ροή εργασίας μετρολογίας από αυτόματη λήψη δεδομένων και σύγχρονη ανάλυση δεδομένων, έως ισχυρή απεικόνιση και αναφορά δεδομένων. Το λογισμικό Vision64 χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση πειραμάτων στο προφιλόμετρο contourGT-K 3D.



Σχήμα 4.1 Λογισμικό Vision64

Στο πίσω μέρος του προφιλόμετρου υπάρχει ένα πολύμπριζο, το οποίο έχει την παροχή ρεύματος της μηχανής και του υπολογιστή (βλέπε σχήμα 4.2(α)). Στα δεξιά του προφιλόμετρου υπάρχει ο μετατροπέας τάσης του προφιλόμετρου (βλέπε σχήμα 4.2(β)). Ο μετατροπέας τάσης έχει το διακόπτη **on-off** που είναι και ο μοναδικός διακόπτης του. Με το πάτημα του διακόπτη στο **on**, ο μετατροπέας μετατρέπει την τάση από AC σε DC που απαιτείται για τη λειτουργία του προφιλόμετρου ContourGT-K 3D.



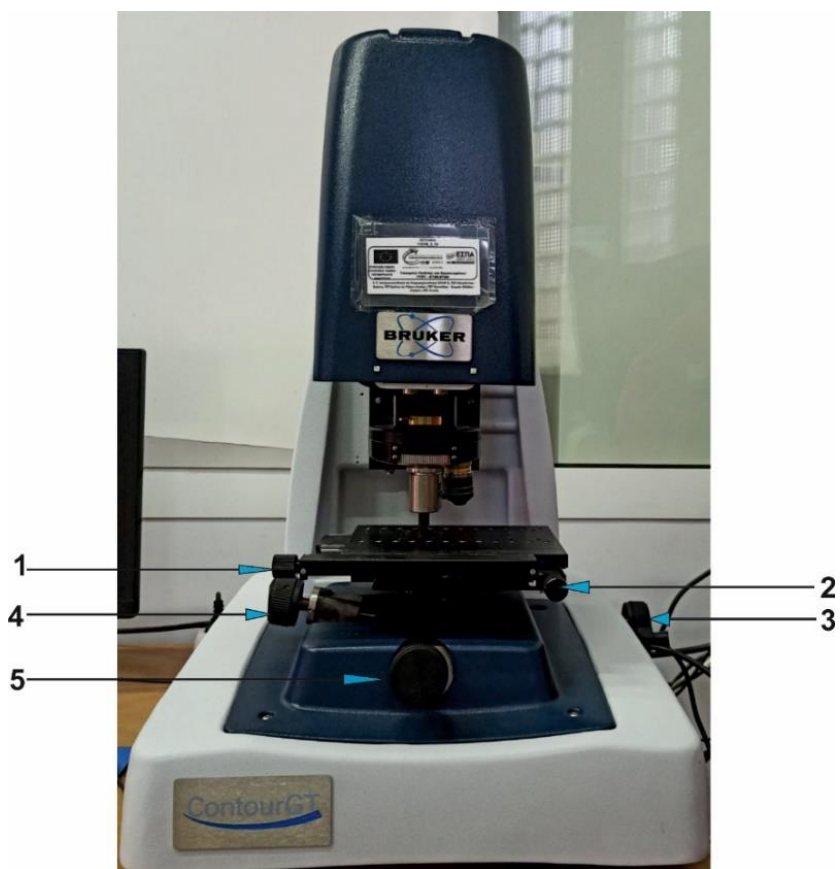
α



β

Σχήμα 4.2 α) Παροχή ρεύματος, β) Μετατροπέας Τάσης

Στο προφιλόμετρο υπάρχουν 5 μανιβέλες και 2 μοχλοί για τη μετακίνηση της τράπεζας. Οι δύο είναι για τη μετακίνηση στον άξονα X και Y με μικρή ταχύτητα, οι άλλες δυο είναι για την παραλληλότητα του τεμαχίου με το φακό, και η 5<sup>η</sup> μανιβέλα είναι για τον άξονα Z. Οι δυο μοχλοί είναι για τον άξονα X και Y με ταχύτητα του σώματος.

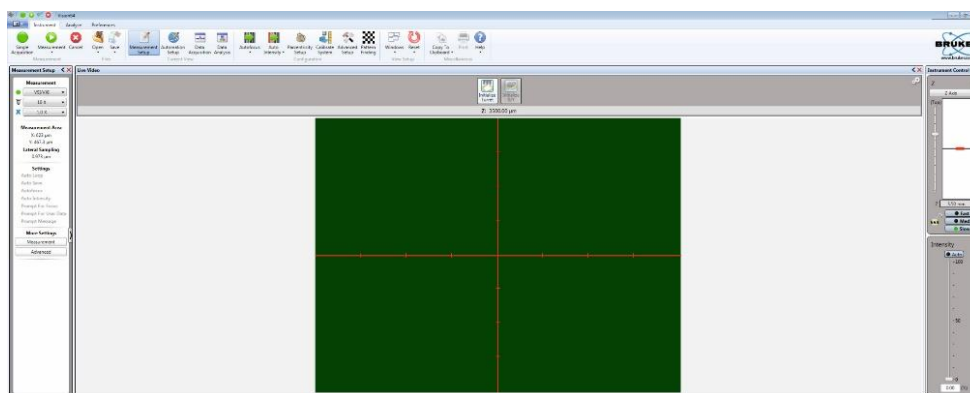


Σχήμα 4.3 Απεικόνιση των μανιβελών.

Στο σχήμα 4.3 βλέπουμε το προφιλόμετρο και τις μανιβέλες.

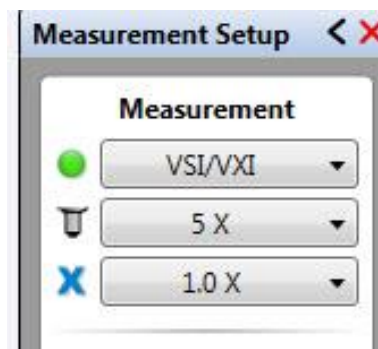
1. Μανιβέλα μετακίνησης της τράπεζας κατά τον άξονα X
2. Μανιβέλα μετακίνησης της τράπεζας κατά τον άξονα Y.
3. Μανιβέλα ρύθμισης απόστασης φακού από την τράπεζα κατά τον άξονα Z. Όταν στρίψει δεξιόστροφα η τράπεζα κατεβαίνει προς τα κάτω.
4. Μανιβέλα ευθυγράμμισης και προσαρμογής παραλληλότητας του τεμαχίου στους άξονες X και Z. Όταν στρίψει δεξιόστροφα η τράπεζα σηκώνεται προς τα δεξιά.
5. Μανιβέλα ευθυγράμμισης και προσαρμογής παραλληλότητας του τεμαχίου στους άξονες Y και Z. Όταν στρίψει δεξιόστροφα η τράπεζα σηκώνεται προς τα πίσω.

Με το άνοιγμα του λογισμικού Vision64, το πρόγραμμα εμφανίζει ένα προειδοποιητικό μήνυμα το οποίο μας ενημερώνει ότι πρέπει να απομακρύνουμε το τραπέζι τουλάχιστον «3.5cm» μακριά από το φακό, οπότε με την μανιβέλα 3 απομακρύνουμε την τράπεζα από το φακό τουλάχιστον 3.5cm και στη συνέχεια επιλέγουμε την ένδειξη «Continue». Στη συνέχεια εμφανίζεται η αρχική οθόνη του λογισμικού Vision64 σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Αρχική οθόνη του προγράμματος Vision64

Έπειτα επιλέγουμε το φακό που έχουμε τοποθετήσει να κάνουμε τις σαρώσεις από τον πίνακα «measurement setup» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Στο «measurement setup» υπάρχουν τρεις ρυθμίσεις, η μέθοδος επεξεργασίας, η επιλογή φακού και το οπτικό πεδίο.



Σχήμα 4.5 Measurement Setup

Στη ρύθμιση της μεθόδου επεξεργασίας υπάρχουν τρεις μέθοδοι οι οποίες είναι:

**VSI** (Παρεμβολή με κάθετη σάρωση): Η κάθετη παρεμβολή με σάρωση είναι αποτελεσματική για τη μέτρηση αντικειμένων με τραχιές επιφάνειες. Η λειτουργία VSI αποδίδει ακρίβεια στην περιοχή των nm. Το μέγιστο μήκος σάρωσης για σάρωση VSI είναι 10 mm.

**PSI** (παρεμβολή μετατόπισης φάσης): Η παρεμβολή μετατόπισης φάσης συνήθως χρησιμοποιείται για τη δοκιμή λείων επιφανειών (τραχύτητα μικρότερη από 30nm). Είναι πολύ ακριβής. Ωστόσο στις κάθετες μετρήσεις με ανάλυση (nm) δεν μπορεί να αποκτήσει ένα σωστό προφίλ για αντικείμενα που έχουν μεγάλες αλλαγές ύψους.

**VSI/VXI**: Το VXI είναι χρήσιμο για σαρώσεις μεγάλου εύρους (<50μm) με ελάχιστο θόρυβο. Δείχνει πολύ καλύτερη λεπτομέρεια από μια κανονική μέτρηση VSI.

Στην επιλογή φακού υπάρχουν τρεις επιλογές οι οποίες είναι:

- 5X
- 10X
- 20X

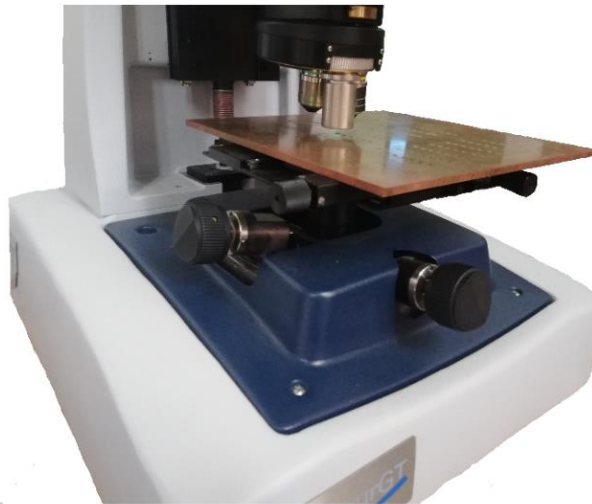
Στην επιλογή οπτικού πεδίου υπάρχουν τρεις επιλογές οι οποίες είναι:

- 0.55X
- 1.0X
- 2.0X

Οι παράμετροι από το «measurement setup» που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρουσας διπλωματικής είναι οι ακόλουθες:

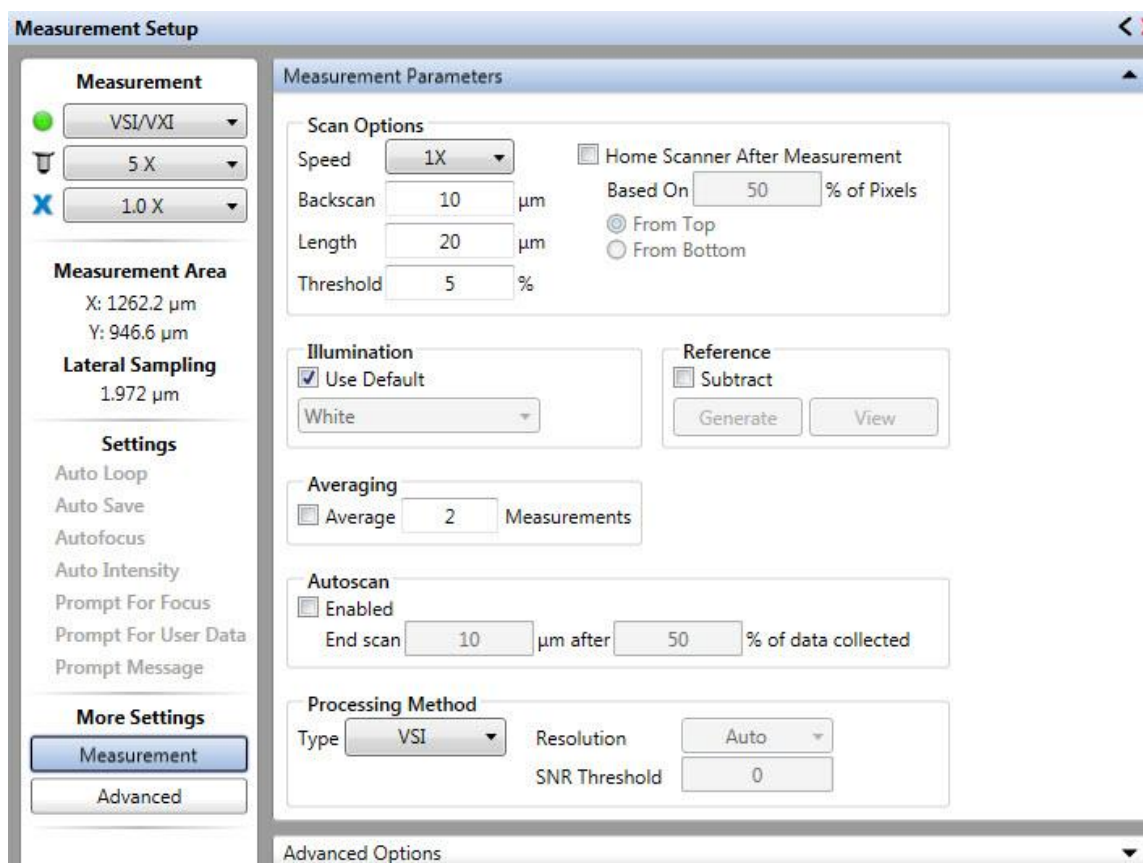
- VSI/VXI
- 5X
- 1.0X

Στη συνέχεια απομακρύνουμε την τράπεζα αρκετά μακριά από το φακό, για να τοποθετήσουμε την πλάκα με ασφάλεια έτσι ώστε να μην χτυπήσουμε το φακό του προφιλόμετρου, κατά τη διάρκεια τοποθέτησης (βλέπε σχήμα 4.6). Από τη μανιβέλα «1» και «2» πάμε στο σημείο που θα γίνει η σάρωση.



Σχήμα 4.6 Τοποθέτηση πλάκας στο μηχάνημα

Έπειτα πατάμε την ένδειξη «Measurement» η οποία εμφανίζεται κάτω αριστερά της αρχικής οθόνης του προγράμματος. Έπειτα εμφανίζεται η καρτέλα «Measurement Parameters» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Measurement Parameters

Στις ρυθμίσεις του **Scan Options** υπάρχουν 4 παραμέτροι οι οποίες είναι:

- **Speed:** Ταχύτητα που κινείται ο φακός κατά την διάρκεια σάρωσης. Υπάρχουν η επιλογές 1X, 3X και 5X. Οι επιλογή 1X προτείνεται σε σχέση με τις άλλες, γιατί καθώς αυξάνεται η ταχύτητα χάνει ανάλυση και η 1X είναι αρκετά γρήγορη.
- **Backscan:** Η απόσταση που ο φακός κινείται προς τα πίσω πριν ξεκινήσει μία σάρωση. Προτείνεται να ρυθμιστεί ώστε να λάβει την μεγαλύτερη κορυφή.
- **Length:** Η απόσταση που κινείται ο φακός κατακόρυφα κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Προτείνεται η ρύθμισή του να είναι 10% με 20% μεγαλύτερη από το πιο αρνητικό επίπεδο.
- **Threshold:** Το Threshold είναι μια ποσοστιαία τιμή που υποδηλώνει τα εικονοστοιχεία (pixels) που θεωρούνται αποδεκτά. Όσο μειώνεται η τιμή λαμβάνονται κακής ποιότητας δεδομένα. Αν αυξηθεί πολύ η τιμή, τότε δεν λαμβάνονται υψηλής ποιότητας δεδομένων.

Τα όρια των παραμέτρων από το «Scan Options» που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα είναι τα παρακάτω:

- **Speed:** 1X
- **Backscan:** 20
- **Length:** 60
- **Threshold:** 3



Στη συνέχεια ελέγχεται ο φωτισμός του φακού στο «illumination». Για να επιτευχθεί αυτό αποδεδσμέυεται η ένδειξη «Use Default», έτσι ώστε να επιλεχθεί ο κατάλληλος φωτισμός του φακού που θα χρησιμοποιηθεί.

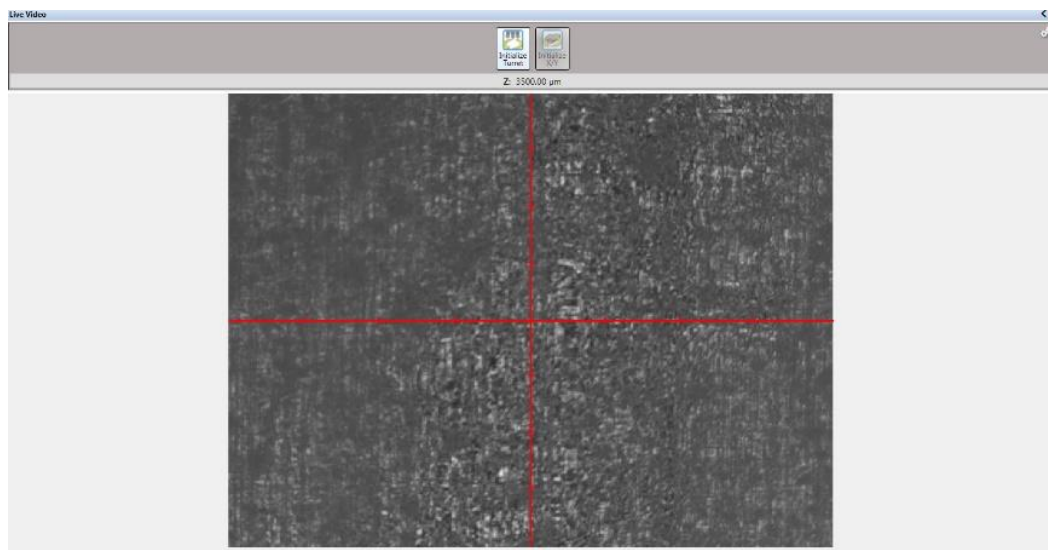
Υπάρχουν δύο επιλογές φωτισμού:

- **White:** Έχει μεγάλο εύρος ζώνης (200nm). Είναι κατάλληλος για ταχύτητες 1X και 3X.
- **Green:** Έχει πολύ στενότερο εύρος ζώνης (25nm). Είναι χρήσιμος για τις τραχιές επιφάνειες και κατάλληλος για ταχύτητες 5X ή μεγαλύτερες.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο φωτισμός «green».

#### 4.3.2 Διαδικασία Σάρωσης

Στην αρχική οθόνη του λογισμικού, κάτω δεξιά υπάρχει η ένταση φωτισμού της σάρωσης «Intensity» επιλέγοντας την ένδειξη αυτόματος ρυθμίζεται ο φωτισμός σάρωσης σε «auto». Μετά την επιλογή της ένδειξης «auto» ενεργοποιείται η κάμερα σάρωσης, με την μανιβέλα «3», ρυθμίζεται η απόσταση με σιγανό ρυθμό έτσι ώστε στον υπολογιστή να εμφανίζεται διαυγής η εικόνα του σημείου σάρωσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 τότε στο κέντρο της εικόνας ή σε κάποιο σημείο εμφανίζονται κρόσσοι συμβολής.



Σχήμα 4.8 Εμφάνιση κροσσών συμβολής

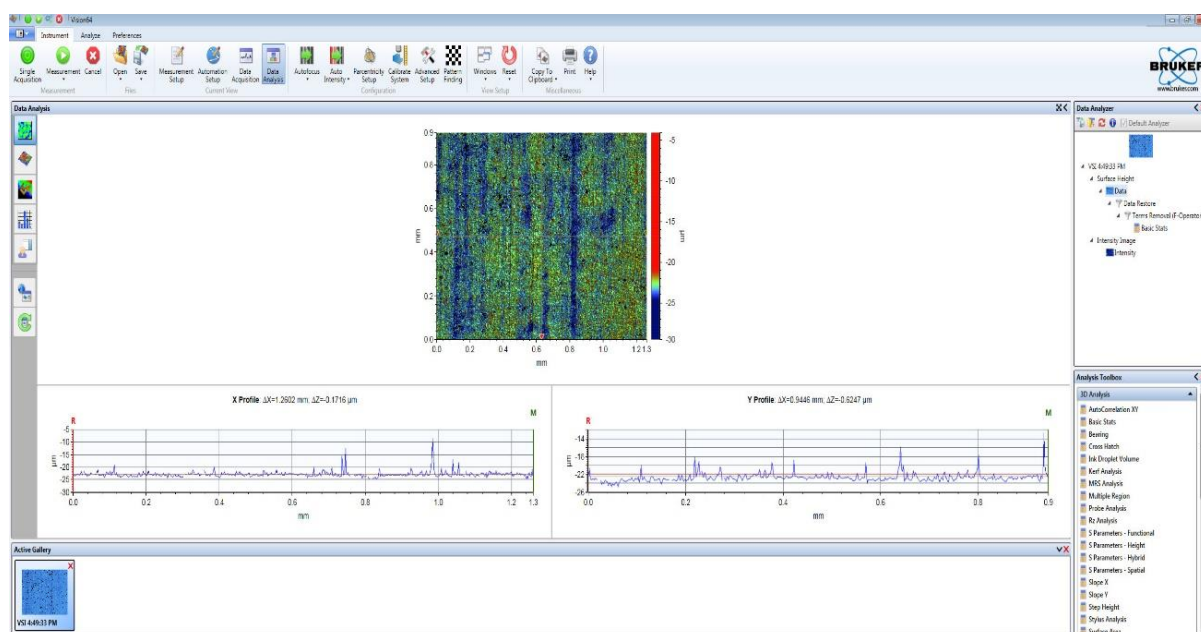
Ο λόγος εμφάνισης των κροσσών συμβολής καθορίζει τη σωστή απόσταση της τράπεζας από το φακό για να γίνει η σάρωση. Για να επιτευχθεί σωστή σάρωση πρέπει πρώτα η τράπεζα να βρίσκεται σε παραλληλία με το φακό και αυτό συμβαίνει όταν οι κροσσοί συμβολής έχουν απλωθεί ομοιόμορφα σε όλη την οθόνη. Για να παραλληλιστεί η τραπεζα με το φακό χρησιμοποιούνται οι μανιβέλες «4» και «5». Ξεκινώντας με τη μανιβέλα «4» επιδιώκεται να τοποθετηθούν οι κροσσοί συμβολής παράλληλα με τον άξονα X με πολύ αργές κινήσεις. Έπειτα με τη βοήθεια της μανιβέλας «5» γίνεται ο παραλληλισμός με τον

άξονα Υ. Όταν γίνει ο παραλληλισμός και με τον άξονα Υ εμφανίζονται οι κροσσοί συμβολής οι οποίοι έχουν απλωθεί ομοιόμορφα σε όλη την οθόνη.

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι να μειωθεί η φωτεινότητα του φακού για την καλύτερη δυνατή σάρωση. Αυτό πραγματοποιείται με τη μανιβέλα «3» πηγαίνοντας πάνω κάτω στα όρια των κροσσών συμβολής. Κατά αυτόν τον τρόπο μειώνεται επιτυχώς η φωτεινότητα φτάνοντας στο επιθυμητό όριο. Τέλος, πατώντας την ένδειξη «measurement» γίνεται η σάρωση της περιοχής.

**Προσοχή** πρέπει να δίνεται κατά τη διάρκεια της σάρωσης προκειμένου να απομακρύνεται οποιοδήποτε αντικείμενο μπορεί να φέρει δόνηση στον πάγκο εργασίας, όπου βρίσκεται το προφιλόμετρο. Το μηχάνημα εκτελεί σάρωση σε νανόμετρα και χρειάζεται απόλυτα σταθερό πάγκο εργασίας.

Μετά την εκτέλεση της σάρωσης εμφανίζονται τα αποτελέσματα της σάρωσης όπως στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Αποτελέσματα σάρωσης

#### 4.3.2 Ρύθμιση Δεδομένων Σάρωσης για Εξαγωγή της Τραχύτητας

Στη συνέχεια υλοποιείται η παραμετροποίηση των διαφόρων ρυθμίσεων στο data Analyzer προκειμένου να γίνει η τραχυμέτρηση της επιφάνειας. Αρχικά διαγράφονται οι παράμετροι που ήδη υπάρχουν στο «data analyzer», αφήνοντας μόνο κατά σειρά το «surface height» και «data». Έπειτα παραμετροποιείται το σύστημα σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Αρχικά, στον πίνακα με τα «3D Filter» επιλέγεται η παράμετρος «Data Restore» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Το Data Restore συμπληρώνει σε μικρή περιοχή επιπλέον εικονοστοιχεία χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ύψους της περιοχής εκεί που θα βάλει τα επιπλέον εικονοστοιχεία.



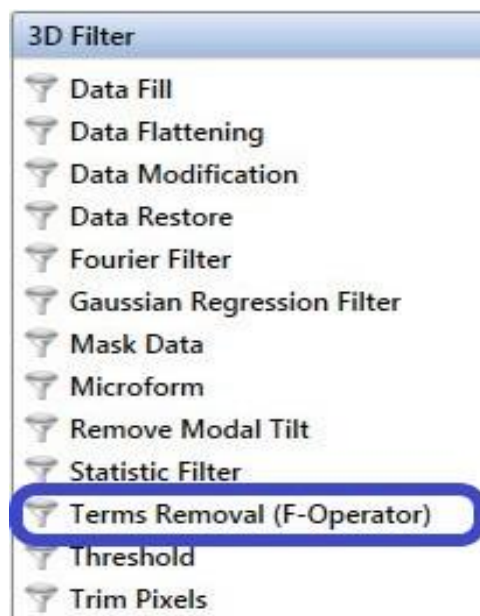
Σχήμα 4.10 Επιλογή «data Restore»

Στη συνέχεια πατώντας δεξί κλικ στο «Data Restore» επιλέγεται το «Data Restore options», ώστε να επιλεχθεί η μέθοδος η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της σάρωσης. Επιλέγεται η πρότυπη μέθοδος ή αλλιώς «Standard», στη μέγιστη ποιότητα «high Quality» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.



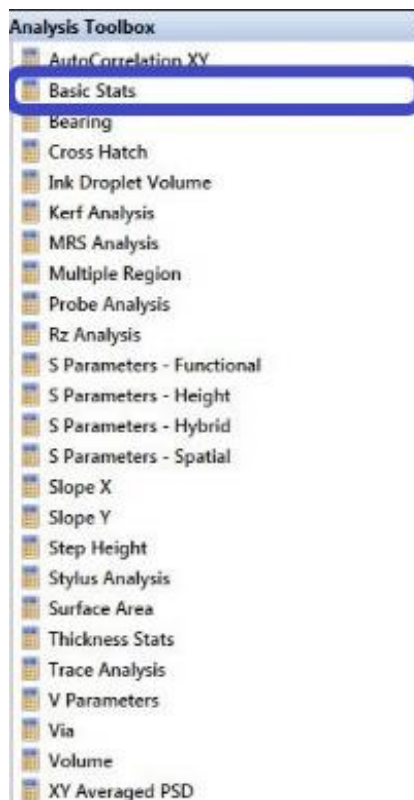
Σχήμα 4.11 Data restore options

Στο επόμενο βήμα γίνεται επιστροφή στα «3D Filter» για να επιλεχθεί η υποκατηγορία για το Data Restore που θα είναι το «Terms Removal (F-Operator)», όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Το «Term Removal (F-Operator)» αφαιρεί κάποια σημεία της σάρωσης για βελτίωση των αποτελεσμάτων, όπως την κλίση και καμπυλότητα.



Σχήμα 4.12 Επιλογή terms Removal (F-Operator)

Για τα αποτελέσματα της μέτρησης χρειάζεται να επιλεγθεί από τον πίνακα «Analysis Toolbox» το «Basic Stats» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13. Το Basic Stats αναλύει τα δεδομένα και επιστρέφει τα αποτελέσματα τραχυμέτρησης της επιφάνειας.



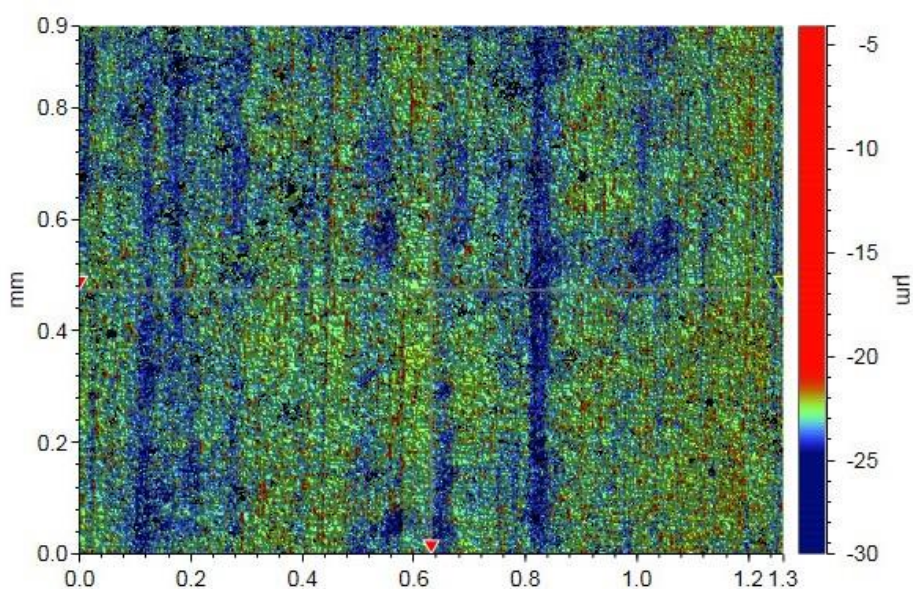
Σχήμα 4.13 Επιλογή basic stats από Analysis Toolbox

Έπειτα εμφανίζονται τα αποτελέσματα της τραχύτητας επιφάνειας σάρωσης όπως φαίνονται στο σχήμα 4.14.

Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	0.0004	nm
Data Points	307096.992	
Percent Data Points	99.97	%
Ra	0.592	μm
Rp	18.785	μm
Rq	0.96	μm
Rt	25.378	μm
Rv	-6.593	μm

Σχήμα 4.14 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας της επιφάνειας σάρωσης

Μετάπειτα διαμορφώνεται η κλίμακα που εμφανίζεται δίπλα στη 2D εικόνα (βλέπε σχήμα 4.15), για να υπάρχει σταθερή κλίμακα για όλες τις μετρήσεις.

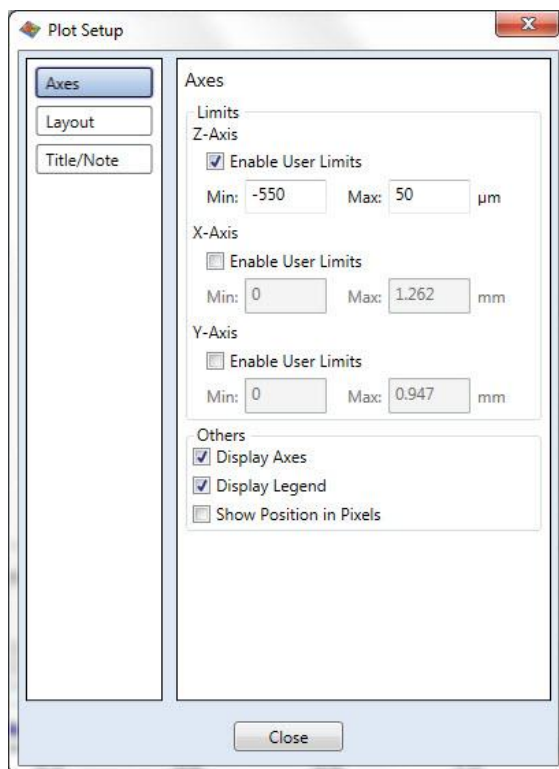


Σχήμα 4.15 Αποτελέσματα τραχυμέτρησης σε 3D εικόνα

Κάνοντας δεξί κλικ πάνω στην κλίμακα εμφανίζεται η καρτέλα «plot setup» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16. Η καρτέλα «plot setup» με τρεις υποκαρτέλες, για την προσαρμογή της κλίμακας, στην υποκαρτέλα «Axe», στην κατηγορία «limits», στο «Z-Axis» γίνεται κλικ στο «Enable User Limits», ώστε να εισαχθεί η επιθυμητή κλίμακα. Η κλίμακα για όλες τις

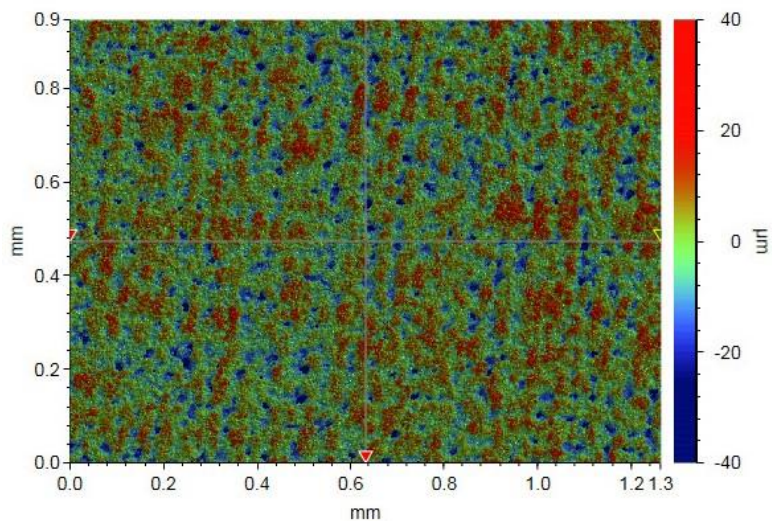


μετρήσεις που επιτεύχθηκαν είναι σταθερή και τα όριά της είναι από -40 έως 40 ( $\mu\text{m}$ ). Μετά την καταχώρηση της κλίμακας που χρειάζεται επιλέγεται η ένδειξη close.



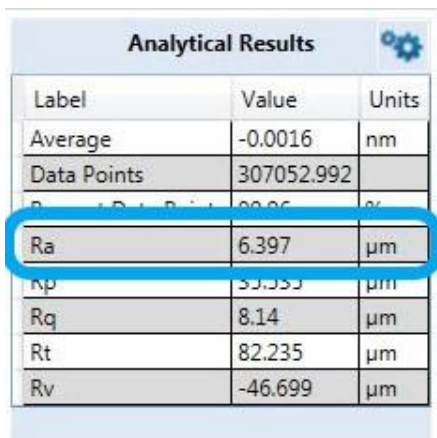
Σχήμα 4.16 Καρτέλα plot setup

Ύστερα από τις παραπάνω ρυθμίσεις γίνεται η αποθήκευση του αρχείου. Το αρχείο αποθηκεύεται ως OPDx και με όνομα από τις συνθήκες κατεργασίας της ποκέτας. Μετά αποθηκεύεται μια εικόνα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.17 για να χρησιμοποιηθεί στη συμπλήρωση του πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4.17 2D εικόνα της επιφάνειας σάρωσης

Τέλος παίρνουμε απο τον πίνακα Analytical Results την τραχύτητα Ra όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18, για να συμπληρωθεί στο πρωτόκολλο.



Label	Value	Units
Average	-0.0016	nm
Data Points	307052.992	
Standard Deviation	88.86	nm
Ra	6.397	μm
Rp	33.353	μm
Rq	8.14	μm
Rt	82.235	μm
Rv	-46.699	μm

Σχήμα 4.18 Αποτέλεσμα της τραχύτητας Ra

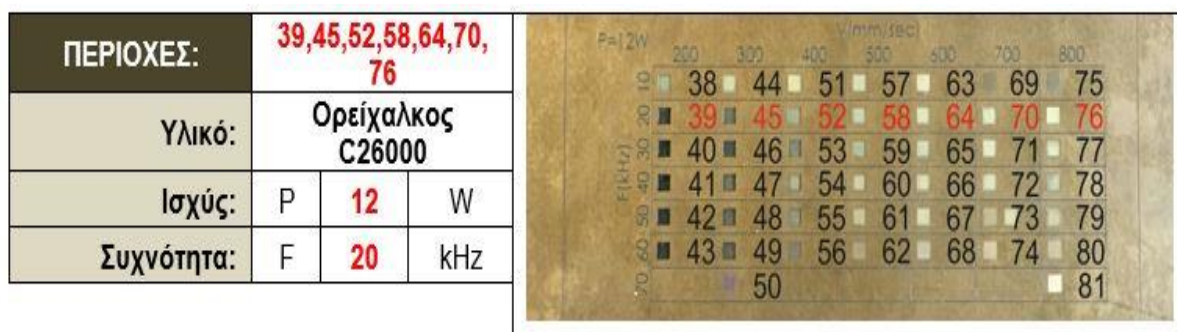
#### 4.4 Πρωτόκολλα Μετρήσεων

Έπειτα από τις ρυθμίσεις που έγιναν στην προηγούμενη ενότητα, προχωράμε με τη συμπλήρωση του πρωτοκόλλου της διπλωματικής εργασίας. Το πρωτόκολλο της διπλωματικής εργασίας ουσιαστικά χωρίζεται σε τρία κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι, το οποίο βρίσκεται στο πάνω μέρος του πρωτοκόλλου, καθορίζει το υλικό και τις περιοχές όπου έγιναν οι μετρήσεις. Το δεύτερο κομμάτι δείχνει το βάθος της ποκέτας. Στο τρίτο κομμάτι περιλαμβάνονται οι μετρήσεις που έγιναν σε κάθε ποκέτα.

Ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας προσδιορίστηκε με τη μέση επιφανειακή τραχύτητα (Ra). Για κάθε συνθήκη διεργασίας πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις στην κατεργασμένη περιοχή. Το μέσο αποτέλεσμα αυτών των πέντε τιμών καταγράφηκε ως το τελικό Ra. Τέλος στο τελευταίο κομμάτι παρουσιάζεται μία εικόνα 2D από τις μετρήσεις που έγιναν, όπου η εικόνα είναι τυχαία επιλεγμένη από μία μετρήση που περιέχει το πρωτόκολλο. Παρακάτω παρουσιάζεται ξεχωριστά και αναλυτικά το κάθε κομμάτι.

Το πρώτο κομμάτι που είναι στο πάνω μέρος του πρωτοκόλλου (βλέπε σχήμα 4.19) περιέχει τα παρακάτω:

- **Εικόνα:** Είναι μία εικόνα που περιέχει το τεμάχιο που υπέστη κατεργασία σε μία ισχύ που εξετάστηκε σε αυτήν την διπλωματική.
- **Περιοχές:** Αποτυπώνονται οι περιοχές που μετρήθηκαν στο δοκίμιο (εικόνα δεξιά).
- **Υλικό:** Αφορά το υλικό που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση.
- **Ισχύς:** Στις περιοχές που γίνονται μετρήσεις η τιμή της ισχύος.
- **Συχνότητα:** Στις περιοχές που γίνονται μετρήσεις οι τιμές της συχνότητας.



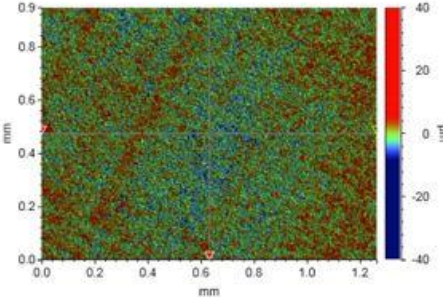
Σχήμα 4.19 Το πρώτο κομμάτι του πρωτοκόλλου

Το δεύτερο κομμάτι του πρωτοκόλλου που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.20 δείχνει το βάθος Z της ποκέτας για κάθε ταχύτητα σάρωσης.

Μετρήσεις βάθους Dz							
Dz [mm]	Ταχύτητα V [mm/s]						
	200	300	400	500	600	700	800
Dz [mm]	14,765	7,613	5,087	3,767	2,875	2,244	1,754

Σχήμα 4.20 Το δεύτερο κομμάτι του πρωτοκόλλου

Στο τρίτο κομμάτι του πρωτοκόλλου που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.21, αποτυπώνονται οι πέντε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την τραχύτητα της επιφάνειας για κάθε ποκέτα και η μέση τιμή τους. Στα δεξιά παρουσιάζεται μια εικόνα 2D τυχαία επιλεγμένη από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Μετρήσεις τραχύτητας Ra (μm)								
		1	2	3	4	5	Mean	2D Κατατομή επιφάνειας
Ταχύτητα V [mm/s]	200	4,29	4,17	4,32	4,63	4,72	4,43	
	300	3,26	3,08	3,09	2,98	3,04	3,09	
	400	2,13	2,08	2,06	2,28	2,20	2,15	
	500	3,16	3,21	3,16	3,03	3,16	3,14	
	600	2,93	2,88	2,95	2,63	2,69	2,82	
	700	2,32	2,25	2,24	2,32	2,33	2,29	
	800	1,75	1,77	1,65	1,73	1,74	1,74	

Σχήμα 4.21 Το τρίτο κομμάτι του πρωτοκόλλου



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της τραχύτητας από διεργασίες laser engraving με διαφορετικές παραμέτρους σε τρεις διαφορετικές πλάκες. Τα τρία υλικά όπου μετρήθηκε η τραχύτητα είναι τα παρακάτω:

- Αλουμίνιο (7075-T6)
- Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE 304)
- Ορείχαλκος (C26000)

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι:

- Ταχύτητα σάρωσης  $V[\text{mm/sec}]$ ,
- Συχνότητα των παλμών  $F[\text{kHz}]$
- Μέση ένταση των παλμών  $P[\text{W}]$ .

Κάθε πλάκα έχει τρεις πίνακες που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές τιμές μέσης έντασης παλμών  $P[\text{W}]$ :

- 8W (40%)
- 12W (60%)
- 16 W (80%)

Για κάθε πίνακα υπάρχουν 7 διαφορετικές τιμές ταχύτητας σάρωσης  $V$  με εύρος 100 έως 800 mm/sec και 7 διαφορετικές τιμές συχνότητας των παλμών  $F$  με εύρος 10 έως 80 kHz. Για τη μέτρηση της τραχύτητας, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε το οπτικό προφیلόμετρο ContourGT-K 3D.

### 5.1 Αλουμίνιο 7075-T6

Στο αλουμίνιο το εύρος των τιμών, που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, είναι: ταχύτητα 200 – 500 mm/sec και συχνότητα 40 kHz. Ωστόσο για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν και τιμές εκτός εύρους τιμών σε σχέση με το εγχειρίδιο.

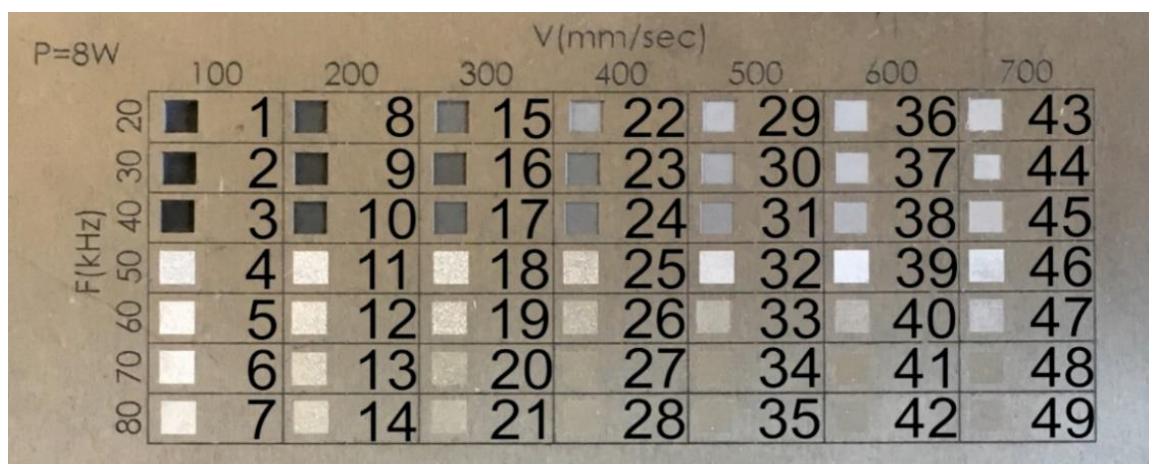
Το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στο αλουμίνιο ήταν:

- Μέση ένταση παλμών: [8, 12, 16] W
- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] mm/sec

Στα σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3 παρουσιάζονται οι πίνακες έτσι όπως είχαν χαραχθεί στην προγενέστερη διπλωματική εργασία του κ. Χορευτάκη Ι. στο δοκίμιο του αλουμινίου 7075-T6, όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τραχύτητας στο προφیلόμετρο ContourGT-K 3D. Όπως φαίνεται στα σχήματα τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα και παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι στους πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3.

Ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας προσδιορίστηκε με τη μέση επιφανειακή τραχύτητα ( $R_a$ ). Οι τιμές  $R_a$  μετρήθηκαν με οπτικό μικροσκόπιο και προφιλόμετρο ContourGT-K 3D. Για την τραχύτητα το μέγεθος του πεδίου μέτρησης ήταν 2D με  $Y=0.9\text{mm}$  και  $X=1.2\text{mm}$ . Για κάθε συνθήκη διεργασίας πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις στην κατεργασμένη περιοχή. Το μέσο αποτέλεσμα αυτών των πέντε τιμών καταγράφηκε ως το τελικό  $R_a$ .

Στο σχήμα 5.1 για τις συχνότητες  $F=50, 60, 70, 80$  kHz και στο σχήμα 5.2 για τις συχνότητες  $F=70, 80$  kHz δεν ήταν δυνατή η εκτέλεση της διαδικασίας χαράξης με laser και επομένως δεν μετρήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές τραχύτητας. Επιπλέον, οι ποκέτες στα σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3 δεν μετρήθηκαν με ταχύτητα σάρωσης  $100\text{ mm/s}$  επειδή το συνολικό τους βάθος ήταν μεγάλο και ο φακός του οπτικού προφιλόμετρου δεν μπορούσε να φτάσει αρκετά κοντά στο κάτω μέρος της ποκέτας για να εστιάσει για τη μέτρηση.

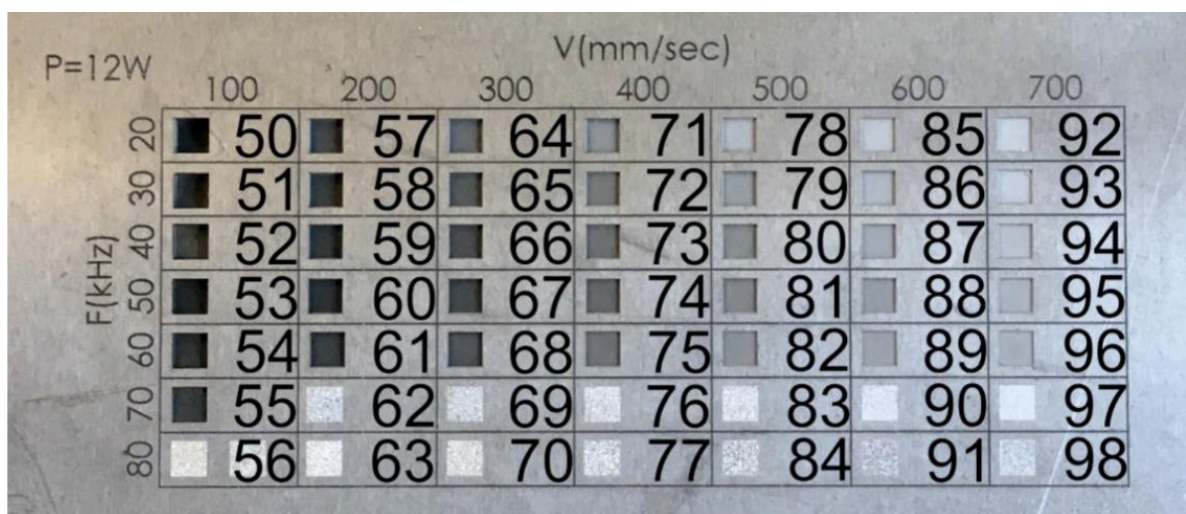


Σχήμα 5.1 Πίνακας έντασης  $P=8\text{ W}$

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
1	100	20	-	26	400	60	-
2	100	30	-	27	400	70	-
3	100	40	-	28	400	80	-
4	100	50	-	29	500	20	2.75
5	100	60	-	30	500	30	2.97
6	100	70	-	31	500	40	3.69
7	100	80	-	32	500	50	-
8	200	20	6.21	33	500	60	-
9	200	30	5.73	34	500	70	-
10	200	40	6.93	35	500	80	-
11	200	50	-	36	600	20	2.43
12	200	60	-	37	600	30	2.36
13	200	70	-	38	600	40	3.12
14	200	80	-	39	600	50	-

15	300	20	4.88	40	600	60	-
16	300	30	4.22	41	600	70	-
17	300	40	6.17	42	600	80	-
18	300	50	-	43	700	20	2.47
19	300	60	-	44	700	30	2.35
20	300	70	-	45	700	40	2.64
21	300	80	-	46	700	50	-
22	400	20	3.61	47	700	60	-
23	400	30	3.82	48	700	70	-
24	400	40	4.24	49	700	80	-
25	400	50	-				

Πίνακας 5.1 Τιμές παραμέτρων για P=8 W

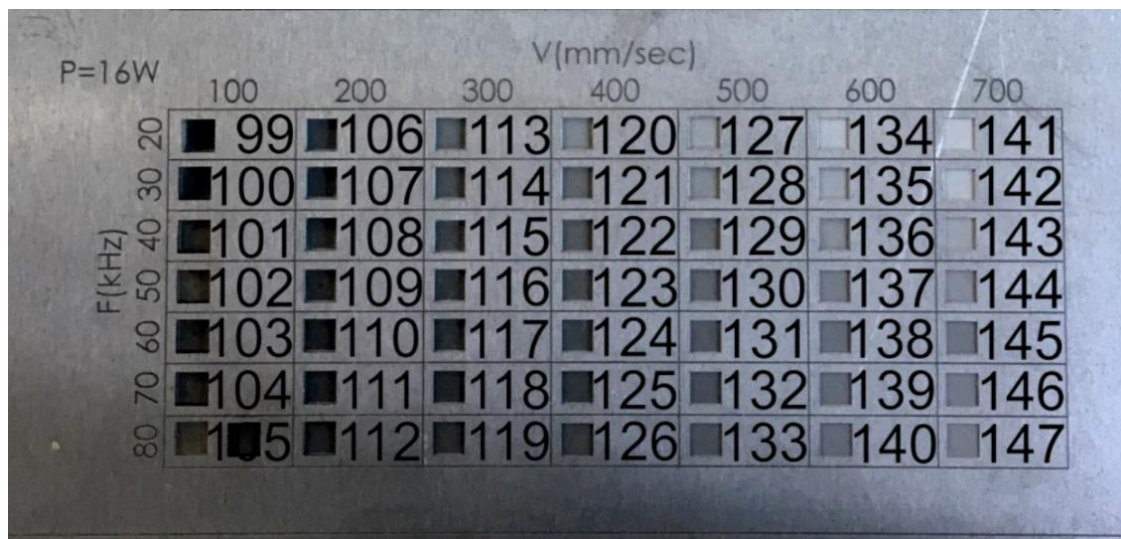


Σχήμα 5.2 Πίνακας έντασης P=12 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
50	100	20	-	75	400	60	6.77
51	100	30	-	76	400	70	-
52	100	40	-	77	400	80	-
53	100	50	-	78	500	20	4.11
54	100	60	-	79	500	30	4.47
55	100	70	-	80	500	40	4.4
56	100	80	-	81	500	50	3.94
57	200	20	9.13	82	500	60	5.47
58	200	30	6.95	83	500	70	-
59	200	40	6.79	84	500	80	-
60	200	50	7.09	85	600	20	3.18
61	200	60	8.92	86	600	30	3.71

62	200	70	-	87	600	40	4.13
63	200	80	-	88	600	50	3.63
64	300	20	6.39	89	600	60	4.16
65	300	30	6.09	90	600	70	-
66	300	40	5.26	91	600	80	-
67	300	50	5.93	92	700	20	3.24
68	300	60	8.15	93	700	30	3.05
69	300	70	-	94	700	40	2.9
70	300	80	-	95	700	50	3.35
71	400	20	5.24	96	700	60	3.39
72	400	30	5.11	97	700	70	-
73	400	40	4.61	98	700	80	-
74	400	50	5.15				

Πίνακας 5.2 Τιμές παραμέτρων για P=12 W



Σχήμα 5.3 Πίνακας έντασης P=16W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
99	100	20	-	124	400	60	5.71
100	100	30	-	125	400	70	7.41
101	100	40	-	126	400	80	8.71
102	100	50	-	127	500	20	6.69
103	100	60	-	128	500	30	4.98
104	100	70	-	129	500	40	5.04
105	100	80	7.23	130	500	50	4.78
106	200	20	12.27	131	500	60	4.84
107	200	30	9.82	132	500	70	5.44

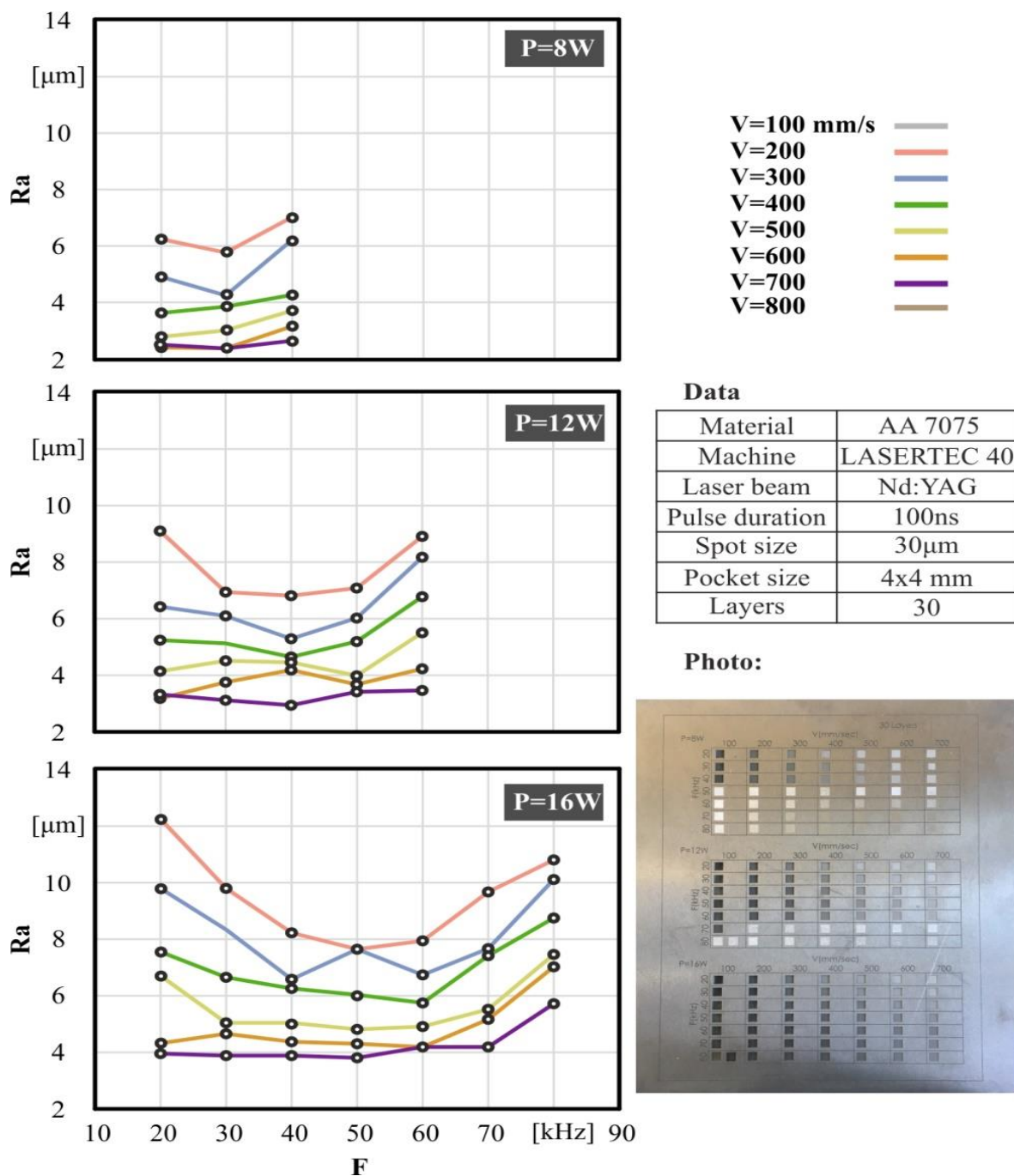
108	200	40	8.21	133	500	80	7.36
109	200	50	7.65	134	600	20	4.27
110	200	60	7.91	135	600	30	4.63
111	200	70	9.68	136	600	40	4.28
112	200	80	10.8	137	600	50	4.31
113	300	20	9.81	138	600	60	4.14
114	300	30	8.36	139	600	70	5.12
115	300	40	6.55	140	600	80	6.91
116	300	50	7.63	141	700	20	3.94
117	300	60	6.71	142	700	30	3.84
118	300	70	7.58	143	700	40	3.81
119	300	80	10.06	144	700	50	3.75
120	400	20	7.57	145	700	60	4.13
121	400	30	6.62	146	700	70	4.14
122	400	40	6.22	147	700	80	5.67
123	400	50	6.01				

Πίνακας 5.3 Τιμές παραμέτρων για P=16 W

Στη συνέχεια στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για τον κάθε πίνακα του υλικού, δηλαδή ένα για κάθε μέση ισχύ 8, 12, 16 W.

Στον οριζόντιο άξονα είναι η συχνότητα των παλμών και στον κάθετο άξονα η επιφανειακή τραχύτητα (Ra). Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν 6 διαφορετικές καμπύλες, η καθεμία με άλλο χρώμα. Επίσης κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.





Σχήμα 5.4 Διαγράμματα τραχύτητας - συχνότητας για τις ταχύτητες σάρωσης [200, 300, 400, 500, 600, 700 , 800] mm/sec

Τα αποτελέσματα της τραχύτητας για το αλουμίνιο 7075 φαίνονται στο Σχήμα 5.4. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των σημείων από τα διαγράμματα, διαπιστώνουμε ότι η επίδραση της μέση ισχύς P του laser στην τραχύτητα της επιφάνειας (Ra), με την αύξηση της μέσης ισχύος αυξάνεται και η τραχύτητα της επιφάνειας. Στο διάγραμμα για P=8 W η ελάχιστη τραχύτητα είναι στα Ra=2.335 μm, στο διάγραμμα για P=12 W η ελάχιστη τραχύτητα είναι στα Ra=2,9 μm και στο διάγραμμα για P=16 W η ελάχιστη τραχύτητα είναι στα Ra=2.335 μm.

Επίσης λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των σημείων από τα τρία διαγράμματα συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα σάρωσης, ανεξαρτήτως της μέσης ισχύος, παρατηρείται και μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας. Βλέποντας και τα τρία διαγράμματα διαπιστώνεται ότι οι μωβ καμπύλες, με τη μεγαλύτερη ταχύτητα σάρωσης  $V=700$  mm/s, έχουν πάντα την ελάχιστη τιμή τραχύτητας της επιφάνειας συγκριτικά με τις υπόλοιπες καμπύλες αντίστοιχων συχνοτήτων. Η υψηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας βρίσκεται στην  $V=200$  mm/s, ενώ η χαμηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας βρίσκεται στην  $V=700$  mm/s.

Στο διάγραμμα με μέση ισχύ  $P=8$  W παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας σάρωσης  $V$  οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας  $R_a$ . Όσον αφορά στις συχνότητες  $F$ , για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[200,300,700]$  mm/s, παρατηρείται ότι με την αύξηση της συχνότητας οι καμπύλες είναι αρχικά φθίνουσες μέχρι την ελαχιστοποίησή τους στη συχνότητα  $F=30$  kHz και έπειτα παίρνουν αύξουσα μορφή. Για τις υπόλοιπες ταχύτητες σάρωσης  $V=[400,500,600]$  mm/s, η μείωση της συχνότητας  $F$  οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας  $R_a$ . Επίσης παρατηρείται για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[600,700]$  mm/s ενώ αυξάνεται η συχνότητα, η τιμή της τραχύτητας δεν μεταβάλλεται σημαντικά και είναι ανάμεσα στα  $2,4$   $\mu\text{m}$  με  $3$   $\mu\text{m}$ . Για τη χαμηλή μέση ισχύ του  $P=8$  W, η ελάχιστη τραχύτητα μετρήθηκε για  $F=30$  kHz και  $V=700$  mm/s και ισούται με  $R_a=2,4$   $\mu\text{m}$ .

Στο διάγραμμα της μέσης ισχύος  $P=12$  W, η αύξηση της ταχύτητας σάρωσης  $V$  οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας  $R_a$ . Εξαίρεση αποτελεί η ταχύτητα σάρωσης  $V=600$  mm/s, καθώς στη συχνότητα  $F=20$  kHz έχει ελάχιστη τραχύτητα από την  $V=700$  mm/s. Όσον αφορά στις συχνότητες  $F$ , για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[200,300,400,700]$  mm/s, παρατηρείται ότι με την αύξηση της συχνότητας οι καμπύλες είναι αρχικά φθίνουσες, δηλαδή η τραχύτητα μειώνεται, στη συχνότητα  $F=40$  kHz ελαχιστοποιείται και έπειτα παίρνει αύξουσα μορφή, οπότε η τραχύτητα αυξάνεται. Σε ταχύτητες σάρωσης  $V=[500,600]$  mm/s αρχικά με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η τραχύτητα. Εξαίρεση αποτελεί η συχνότητα  $F=50$  kHz όπου μειώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας. Ένα επιπλέον συμπέρασμα για την ταχύτητα σάρωσης  $V=700$  mm/s, είναι ότι η τιμή της τραχύτητας μεταβάλλεται πολύ λίγο σε σχέση με τις άλλες ταχύτητες σάρωσης, δηλαδή με την αύξηση της συχνότητας, η τιμή της τραχύτητας είναι περίπου  $R_a=3.15\pm0.25$   $\mu\text{m}$ . Η τραχύτητα  $R_a$  ελαχιστοποιείται για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[200,300,400,700]$  mm/s στη συχνότητα  $F=40$  kHz. Για ταχύτητα σάρωσης  $V=600$  mm/s είναι στη συχνότητα  $F=20$  kHz και για ταχύτητα σάρωσης  $V=500$  mm/s είναι στη συχνότητα  $F=50$  kHz. Η ελάχιστη τραχύτητα για τη μέση ισχύ  $P=12$  W εμφανίζεται για  $F=40$  kHz,  $V=700$  mm/s και ισούται με  $R_a=2,9$   $\mu\text{m}$ .

Για την υψηλή μέση ισχύ  $P=16$  W, εμφανίζεται παρόμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες τιμές μέσης ισχύος, δηλαδή με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης  $V$ , μειώνεται η τραχύτητα  $R_a$ . Όσον αφορά τις συχνότητες  $F$ , για ταχύτητα σάρωσης  $V=700$  mm/s παρατηρείται ότι από τη συχνότητα  $F=20$  kHz έως την  $F=70$  kHz η τραχύτητα της επιφάνειας δεν μεταβάλλεται σημαντικά και είναι περίπου ίση με  $R_a=3.95\pm0.20$   $\mu\text{m}$ . Επίσης, παρατηρείται ίδια συμπεριφορά και στην ταχύτητα σάρωσης  $V=600$  mm/s, αλλά και στις συχνότητες  $F=20$  kHz έως  $F=60$  kHz. Η τραχύτητα ελαχιστοποιείται για τη συχνότητα  $F$  από  $50$  kHz έως  $60$  kHz. Για την υψηλή μέση ισχύ  $P=16$  W, η ελάχιστη τραχύτητα είναι  $R_a=3,75$   $\mu\text{m}$  για  $F=50$  kHz και  $V=700$  mm/s.

## 5.2 Ανοξείδωτος Χάλυβας SAE304

Στον ανοξείδωτο χάλυβα το εύρος των τιμών που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής που μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη μηχανή είναι: Ταχύτητα 200 mm/sec, Συχνότητα 40 kHz. Ωστόσο για τα πειράματα που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν τιμές εκτός εύρος τιμών σε σχέση με το εγχειρίδιο.

Το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στο ανοξείδωτο χάλυβα ήταν:

- Μέση ένταση παλμών: [8 ,12,16 ] W
- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] mm/sec

Στα σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται οι πίνακες έτσι όπως είχαν χαραχθεί στην προγενέστερη διπλωματική εργασία απο τον κ. Χορευτάκη Ι. στο δοκίμιο του ανοξείδωτου χάλυβα SAE304, όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τραχύτητας στο προφیلόμετρο contourGT-K 3D. Όπως φαίνεται στα σχήμα τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι, στους πίνακες 5.4, 5.5 και 5.6.

Ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας προσδιορίστηκε με τη μέση επιφανειακή τραχύτητα (Ra). Οι τιμές Ra μετρήθηκαν με οπτικό μικροσκόπιο προφιλόμετρο contourGT-K 3D. Για την τραχύτητα το μέγεθος πεδίου μέτρησης ήταν 2D και με Y=09mm X=1.2mm. Για κάθε συνθήκη διεργασίας πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις στην κατεργασμένη περιοχή. Το μέσο αποτέλεσμα αυτών των πέντε τιμών καταγράφηκε ως το τελικό Ra.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο οι ποκέτες στα σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7 δεν μετρήθηκαν με ταχύτητα σάρωσης 100 mm/s επειδή το συνολικό τους βάθος ήταν μεγάλο και ο φακός του οπτικού προφιλόμετρου δεν μπορούσε να φτάσει αρκετά κοντά στο κάτω μέρος της ποκέτας για να εστιαστεί για τη μέτρηση.

P=8W		V(mm/sec)							50 Layers	
		100	200	300	400	500	600	700		
F(kHz)	20	1	8	15	22	29	36	43		
	30	2	9	16	23	30	37	44		
	40	3	10	17	24	31	38	45		
	50	4	11	18	25	32	39	46		
	60	5	12	19	26	33	40	47		
	70	6	13	20	27	34	41	48		
	80	7	14	21	28	35	42	49		



Σχήμα 5.5 Πίνακας έντασης P=8 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/ A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
1	100	20	-	26	400	60	1.64
2	100	30	-	27	400	70	1.04
3	100	40	-	28	400	80	1.14
4	100	50	-	29	500	20	1.25
5	100	60	-	30	500	30	1.49
6	100	70	-	31	500	40	1.44
7	100	80	-	32	500	50	1.16
8	200	20	1.95	33	500	60	1.35
9	200	30	2.72	34	500	70	1.07
10	200	40	4.25	35	500	80	1.20
11	200	50	7.1	36	600	20	1.09
12	200	60	8.68	37	600	30	1.2
13	200	70	12.74	38	600	40	1.24
14	200	80	1.07	39	600	50	1.22
15	300	20	1.73	40	600	60	1.11
16	300	30	1.71	41	600	70	1.02
17	300	40	1.97	42	600	80	1.09
18	300	50	2.29	43	700	20	2.24
19	300	60	2.54	44	700	30	1.05
20	300	70	10.17	45	700	40	1.18
21	300	80	1.06	46	700	50	1.08
22	400	20	1.3	47	700	60	1.08
23	400	30	1.7	48	700	70	0.88
24	400	40	1.39	49	700	80	0.92
25	400	50	1.36				

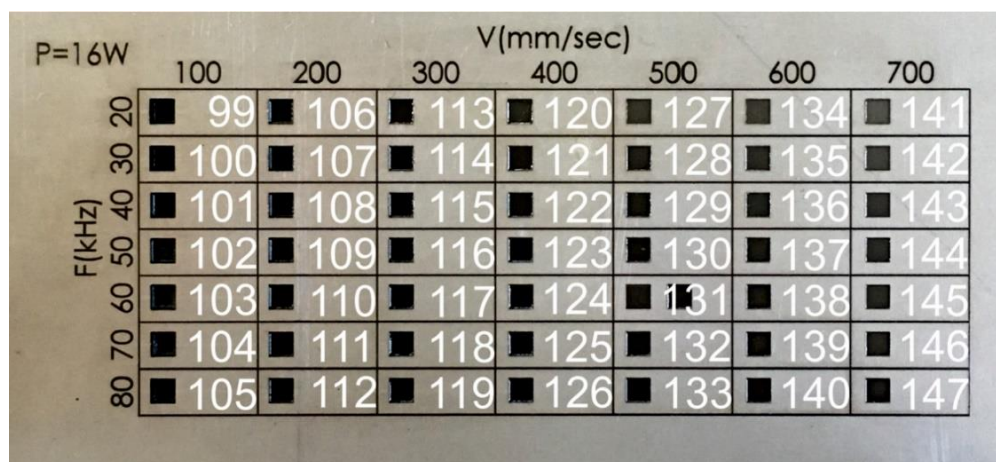
Πίνακας 5.4 Τιμές παραμέτρων για P=8 W

P=12W		V(mm/sec)													
		100		200		300		400		500		600		700	
F(kHz)	20	■	50	■	57	■	64	■	71	■	78	■	85	■	92
	30	■	51	■	58	■	65	■	72	■	79	■	86	■	93
	40	■	52	■	59	■	66	■	73	■	80	■	87	■	94
	50	■	53	■	60	■	67	■	74	■	81	■	88	■	95
	60	■	54	■	61	■	68	■	75	■	82	■	89	■	96
	70	■	55	■	62	■	69	■	76	■	83	■	90	■	97
	80	■	56	■	63	■	70	■	77	■	84	■	91	■	98

Σχήμα 5.6 Πίνακας έντασης P=12 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
50	100	20	-	75	400	60	2.71
51	100	30	-	76	400	70	2.85
52	100	40	-	77	400	80	3.40
53	100	50	-	78	500	20	1.49
54	100	60	-	79	500	30	1.69
55	100	70	-	80	500	40	1.7
56	100	80	-	81	500	50	1.68
57	200	20	4.18	82	500	60	1.78
58	200	30	10.21	83	500	70	1.8
59	200	40	10.65	84	500	80	2.09
60	200	50	10.91	85	600	20	1.5
61	200	60	7.54	86	600	30	1.51
62	200	70	7.54	87	600	40	1.77
63	200	80	6.51	88	600	50	1.77
64	300	20	1.72	89	600	60	1.44
65	300	30	2.34	90	600	70	1.42
66	300	40	2.9	91	600	80	1.55
67	300	50	3.51	92	700	20	2.62
68	300	60	5.08	93	700	30	1.32
69	300	70	9.67	94	700	40	1.67
70	300	80	9.26	95	700	50	1.56
71	400	20	1.41	96	700	60	1.48
72	400	30	1.98	97	700	70	1.36
73	400	40	1.81	98	700	80	1.28
74	400	50	1.98				

Πίνακας 5.5 Τιμές παραμέτρων για P=12 W

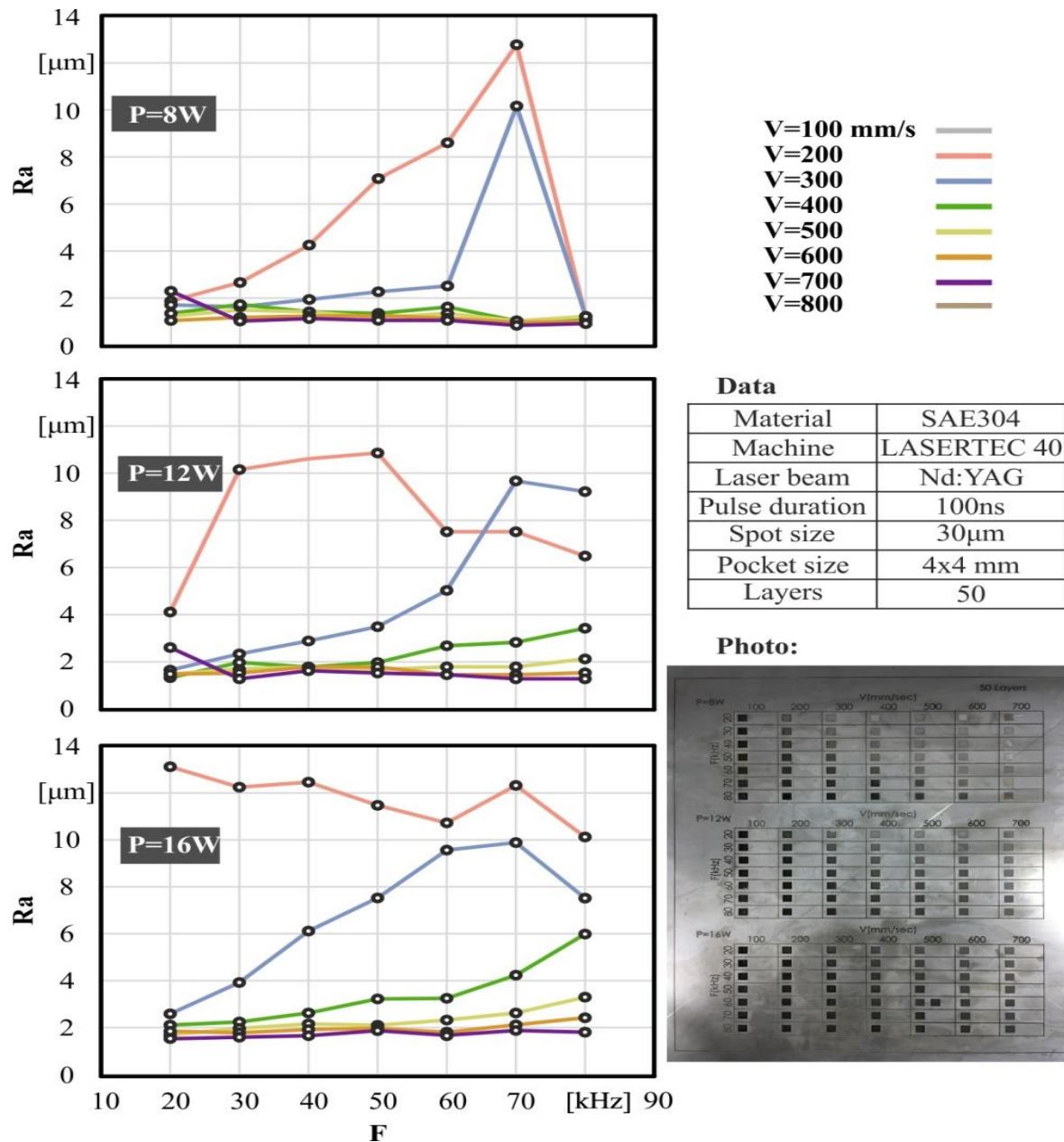


Σχήμα 5.7 Πίνακας έντασης P=16 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
99	100	20	-	124	400	60	3.24
100	100	30	-	125	400	70	4.26
101	100	40	-	126	400	80	5.98
102	100	50	-	127	500	20	1.75
103	100	60	-	128	500	30	2
104	100	70	-	129	500	40	2.18
105	100	80	-	130	500	50	2.09
106	200	20	13.1	131	500	60	2.36
107	200	30	12.25	132	500	70	2.65
108	200	40	12.44	133	500	80	3.31
109	200	50	11.46	134	600	20	1.88
110	200	60	10.73	135	600	30	1.79
111	200	70	12.26	136	600	40	1.93
112	200	80	10.12	137	600	50	1.99
113	300	20	2.62	138	600	60	1.78
114	300	30	3.94	139	600	70	2.12
115	300	40	6.13	140	600	80	2.43
116	300	50	7.53	141	700	20	1.54
117	300	60	9.54	142	700	30	1.58
118	300	70	9.9	143	700	40	1.71
119	300	80	7.52	144	700	50	1.93
120	400	20	2.11	145	700	60	1.7
121	400	30	2.28	146	700	70	1.92
122	400	40	2.63	147	700	80	1.86
123	400	50	3.27				

Πίνακας 5.6 Τιμές παραμέτρων για P=16 W

Στη συνέχεια στο σχήμα 5.8 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για τον κάθε πίνακα υλικού, δηλαδή ένα για κάθε μέση ισχύ 8, 12, 16 W. Στον οριζόντιο άξονα είναι η συχνότητα των παλμών και στον κάθετο άξονα η επιφανειακή τραχύτητα (Ra). Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν 6 διαφορετικές καμπύλες, η καθεμία με άλλο χρώμα. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 5.8 Διαγράμματα τραχύτητας - συχνότητας για τις ταχύτητες σάρωσης [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] mm/sec

Τα αποτελέσματα για την τραχύτητα που μετρήθηκαν για τον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 φαίνονται στο Σχήμα 5.8. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των

σημείων από τα διαγράμματα, διαπιστώνουμε ότι την επίδραση της ισχύος του laser στην τραχύτητα της επιφάνειας ( $R_a$ ), όπου με την αύξηση της μέσης ισχύος αυξάνεται και η τραχύτητα της επιφάνειας. Η χαμηλότερη επιφανειακή τραχύτητα ( $R_a$ ) βρίσκεται στην ισχύ του laser  $P=8\text{ W}$  με τραχύτητα  $R_a=0,88\text{ }\mu\text{m}$ . Στη μέση ισχύ  $P=12\text{ W}$  η χαμηλότερη τραχύτητα είναι  $R_a=1,32\text{ }\mu\text{m}$  και για τη μέση ισχύ  $P=16\text{ W}$  η χαμηλότερη τραχύτητα είναι  $R_a=1,54\text{ }\mu\text{m}$ .

Αναφορικά για την ταχύτητα σάρωσης ( $V$ ), λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των σημείων από τα τρία διαγράμματα προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα σάρωσης ανεξαρτήτως της μέσης ισχύος ( $P$ ), παρατηρείται μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας. Βλέποντας και τα τρία διαγράμματα παρατηρείται ότι οι μωβ καμπύλες με τη μεγαλύτερη ταχύτητα σάρωσης  $V=700\text{ mm/s}$  έχουν πάντα ελάχιστη τιμή τραχύτητας της επιφάνειας από τις υπόλοιπες καμπύλες σε αντίστοιχες συχνότητες. Εξάιρεση αποτελεί η ταχύτητα σάρωσης  $V=700\text{ mm/s}$ , για τις τιμές μέσης ισχύος  $P=8\text{ W}$  και  $P=12\text{ W}$ , που η ταχύτητα σάρωσης  $V=700\text{ mm/s}$  στη συχνότητα  $F=20\text{ kHz}$  έχει μεγαλύτερη τραχύτητα από τις επόμενες. Η υψηλότερη επιφανειακή τραχύτητα βρίσκεται στην  $V=200\text{ mm/s}$ , ενώ η χαμηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας βρίσκεται στην  $V=700\text{ mm/s}$ .

Στην περίπτωση ποκέτας χαραγμένη με χαμηλή μέση ισχύ  $P=8\text{ W}$  παρατηρείται για ταχύτητες σάρωσης  $V$  από 400 έως 700 mm/s χαμηλή τραχύτητα επιφάνειας, όπου εμφανίζονται τιμές  $R_a$  περίπου 1,2 $\mu\text{m}$  και υπάρχει μια τάση να μειωθεί η τραχύτητα με αύξηση της ταχύτητας σάρωσης  $V$  και αύξηση της συχνότητας  $F$ . Για ταχύτητες σάρωσης 200 και 300 mm/s η τραχύτητα είναι πολύ υψηλότερη σε σύγκριση με τις άλλες ταχύτητες σάρωσης. Για τη συχνότητα  $F=80\text{ kHz}$  παρατηρείται ότι όλες οι ταχύτητες σάρωσης έχουν μικρή τραχύτητα κοντά στο  $R_a=1\text{ }\mu\text{m}$ . Για χαμηλή μέση ισχύ  $P=8\text{ W}$  μετριέται ελάχιστη τραχύτητα για συχνότητα  $F=70\text{ kHz}$  και ταχύτητα σάρωσης  $V=700\text{ mm/s}$  και ισούται με  $R_a=0,88\text{ }\mu\text{m}$ .

Για ποκέτες χαραγμένες με μέση ισχύ  $P=12\text{ W}$ , παρατηρείται ότι για τις ταχύτητες σάρωσης επιτυγχάνονται χαμηλές τιμές τραχύτητας περίπου 1,6  $\mu\text{m}$ . Για ταχύτητες σάρωσης 200-400 mm/s οι τιμές τραχύτητας αυξάνονται. Όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας σάρωσης, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας σάρωσης οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας. Η συχνότητα για υψηλές ταχύτητες σάρωσης 500-700 mm/s δεν φαίνεται να έχουν κανένα αποτέλεσμα, ενώ για χαμηλές ταχύτητες σάρωσης 300 mm/s και 400 mm/s η αύξηση της συχνότητας οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας. Για μέση ισχύ  $P=12\text{ W}$ , η χαμηλότερη τιμή της τραχύτητας που μετριέται είναι  $R_a=1,28\text{ }\mu\text{m}$  για  $F=80\text{ kHz}$  και  $V=700\text{ mm/s}$ .

Για την υψηλή μέση ισχύ  $P=16\text{ W}$ , παρόμοια με την προηγούμενη, για χαμηλές ταχύτητες σάρωσης  $V=200$ -400 mm/s οι τιμές τραχύτητας είναι υψηλές, ενώ για υψηλές ταχύτητες σάρωσης  $V=500$ -700 mm/s υπάρχουν χαμηλές τιμές τραχύτητας περίπου  $R_a=2,0\text{ }\mu\text{m}$ . Η αύξηση της ταχύτητας σάρωσης εδώ οδηγεί επίσης σε μείωση της τραχύτητας ενώ η μείωση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας. Για την υψηλή μέση ισχύ  $P=16\text{ W}$ , η ελάχιστη τιμή τραχύτητας προκύπτει για  $F=20\text{ kHz}$ ,  $V=700\text{ mm/s}$  και ισούται με  $R_a=1,54\text{ }\mu\text{m}$ .



### 5.3 Ορείχαλκος C26000

Στον ορείχαλκο το εύρος των τιμών που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής μπορεί ο χειριστής να τη χρησιμοποιήσει είναι: Ταχύτητα 200–500 mm/sec, Συχνότητα 40 kHz. Ωστόσο για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τιμές εκτός εύρος τιμών σε σχέση με το εγχειρίδιο.

Το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στον ανοξείδωτο χάλυβα ήταν:

- Μέση ένταση παλμών: [8 ,12,16] W
- Συχνότητα παλμών: [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70] kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [200, 300, 400, 500, 600, 700,800] mm/sec

Στα σχήματα 5.9, 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται οι πίνακες έτσι όπως είχαν χαραχθεί στην προηγούμενη διπλωματική εργασία από τον κ. Χορευτάκη Ι. στο δοκίμιο του ορείχαλκου C26000, όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τραχύτητας στο προφιλόμετρο contourGT-K 3D. Όπως φαίνεται στα σχήμα τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι, στους πίνακες 5.7, 5.8 και 5.9.

Ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας προσδιορίστηκε με τη μέση επιφανειακή τραχύτητα (Ra). Οι τιμές Ra μετρήθηκαν με οπτικό προφιλόμετρο contourGT-K 3D. Για την τραχύτητα το μέγεθος πεδίου μέτρησης ήταν 2D με Y=0,9 mm X=1,2 mm. Για κάθε συνθήκη διεργασίας πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις στην κατεργασμένη περιοχή. Το μέσο αποτέλεσμα αυτών των πέντε τιμών καταγράφηκε ως το τελικό Ra.

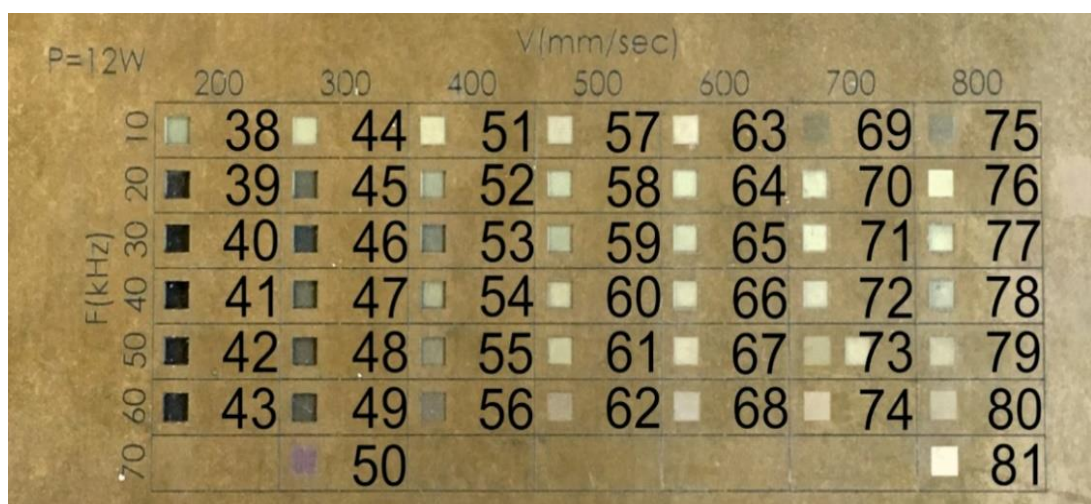
Στο σχήμα 5.9 για τις συχνότητες F=[50, 60, 70] kHz και στο σχήμα 5.10 για τη συχνότητα F=70 kHz δεν ήταν δυνατή η εκτέλεση της διαδικασίας χαράξης με laser και επομένως δεν μετρήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές τραχύτητας. Επιπλέον, οι ποκέτες στα σχήματα 5.9, 5.10 και 5.11 με συχνότητα F=10 kHz δεν μετρήθηκαν επειδή είχαν κακή ποιότητα χαραξης για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

		V(mm/sec)							
		200	300	400	500	600	700	800	
F(kHz)	10	1	6	11	16	21	26	31	
	20	2	7	12	17	22	27	32	
	30	3	8	13	18	23	28	33	
	40	4	9	14	19	24	29	34	
	50	5	10	15	20	25	30	35	
	60							36	
	70							37	

Σχήμα 5.9 Πίνακας έντασης P=8 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
1	200	10	-	20	500	50	-
2	200	20	3.55	-	500	60	-
3	200	30	12.3	-	500	70	-
4	200	40	13.32	21	600	10	-
5	200	50	-	22	600	20	1.91
-	200	60	-	23	600	30	2.326
-	200	70	-	24	600	40	4.43
6	300	10	-	25	600	50	-
7	300	20	3.07	-	600	60	-
8	300	30	6.574	-	600	70	-
9	300	40	11.106	26	700	10	-
10	300	50	-	27	700	20	1.53
-	300	60	-	28	700	30	1.956
-	300	70	-	29	700	40	3.294
11	400	10	-	30	700	50	-
12	400	20	2.36	-	700	60	-
13	400	30	3.066	-	700	70	-
14	400	40	8.396	31	800	10	-
15	400	50	-	32	800	20	2.15
-	400	60	-	33	800	30	1.513
-	400	70	-	34	800	40	2.404
16	500	10	-	35	800	50	-
17	500	20	2.46	36	800	60	-
18	500	30	2.776	37	800	70	-
19	500	40	7.264				

Πίνακας 5.7 Τιμές παραμέτρων για P=8 W

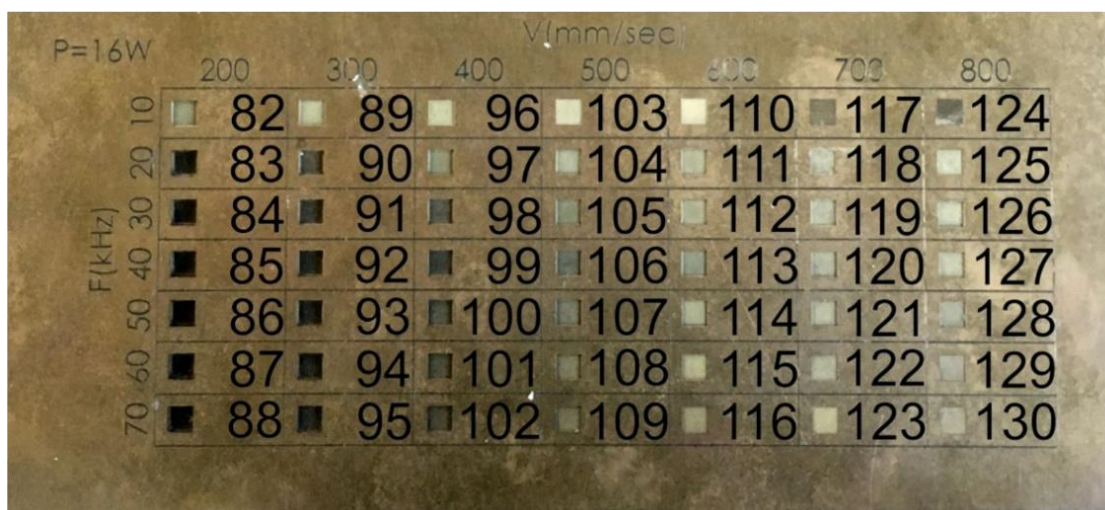


Σχήμα 5.10 Πίνακας έντασης P=12 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V(mm/sec)	F(kHz)	Ra(μm)	A/A	V(mm/sec)	F(kHz)	Ra(μm)
38	200	10	-	61	500	50	8.07
39	200	20	4.43	62	500	60	10.21
40	200	30	4.64	-	500	70	-
41	200	40	6.1	63	600	10	-
42	200	50	6.19	64	600	20	2.82
43	200	60	6.85	65	600	30	1.99
-	200	70	-	66	600	40	1.97
44	300	10	-	67	600	50	5.99
45	300	20	3.09	68	600	60	8.79
46	300	30	3.65	-	600	70	-
47	300	40	7.71	69	700	10	-
48	300	50	13.12	70	700	20	2.29
49	300	60	9.64	71	700	30	1.66
50	300	70	-	72	700	40	1.89
51	400	10	-	73	700	50	4.78
52	400	20	2.15	74	700	60	8.03
53	400	30	2.84	-	700	70	-
54	400	40	4.6	75	800	10	-
55	400	50	11.55	76	800	20	1.74
56	400	60	10.5	77	800	30	2.44
-	400	70	-	78	800	40	1.94
57	500	10	-	79	800	50	3.96
58	500	20	3.14	80	800	60	6.92
59	500	30	2.28	81	800	70	-
60	500	40	2.23				



Πίνακας 5.8 Τιμές παραμέτρων για P=12 W



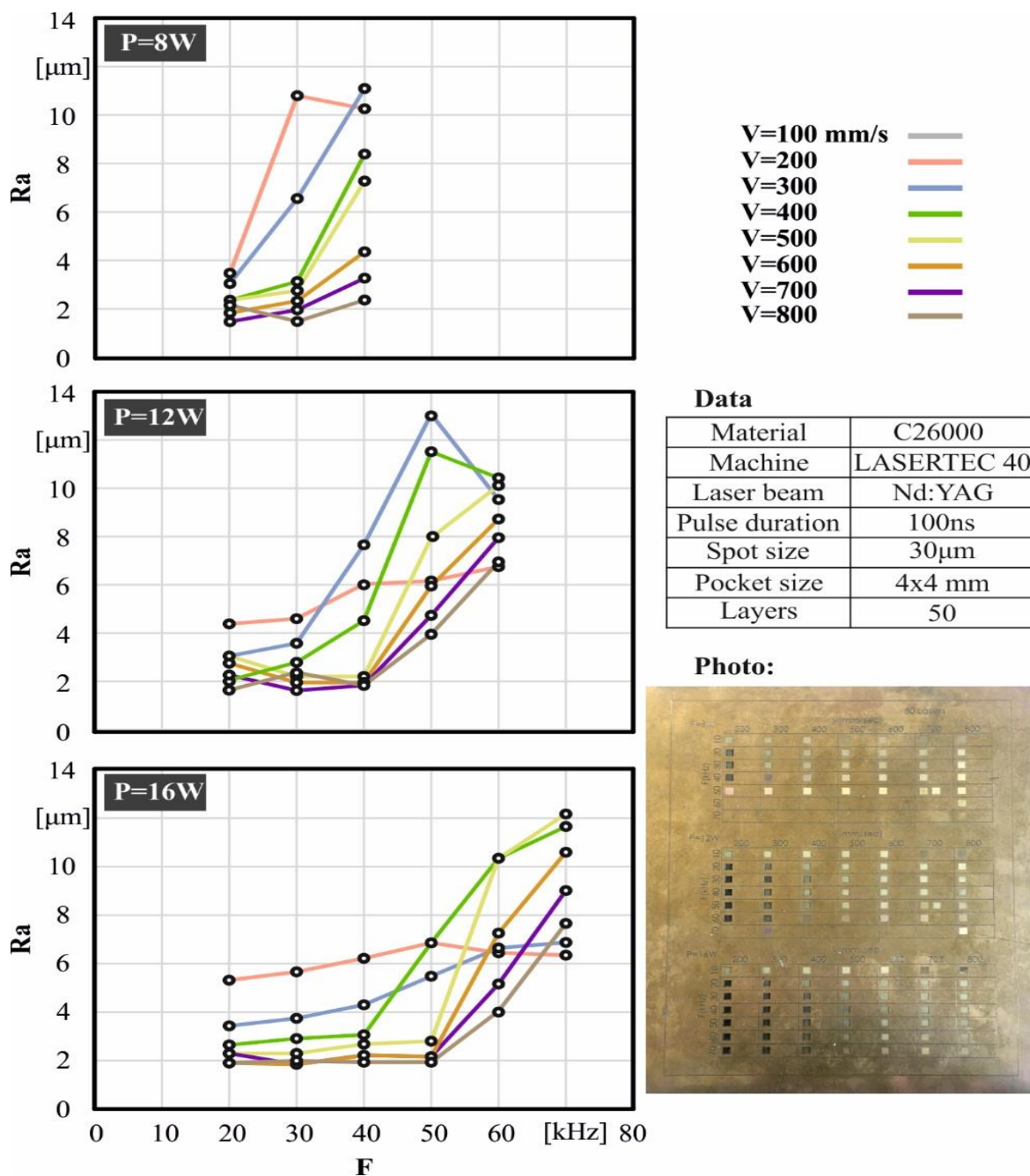
Σχήμα 5.11 Πίνακας έντασης P=16 W

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα		Ταχύτητα	Συχνότητα	Τραχύτητα
A/A	V(mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)	A/A	V(mm/sec)	F (kHz)	Ra (μm)
82	200	10	-	107	500	50	2.73
83	200	20	5.3	108	500	60	10.33
84	200	30	5.61	109	500	70	12.16
85	200	40	6.16	110	600	10	-
86	200	50	6.87	111	600	20	1.88
87	200	60	6.42	112	600	30	1.8
88	200	70	6.33	113	600	40	2.12
89	300	10	-	114	600	50	2.07
90	300	20	3.41	115	600	60	7.17
91	300	30	3.68	116	600	70	10.53
92	300	40	4.28	117	700	10	-
93	300	50	5.44	118	700	20	2.23
94	300	60	6.62	119	700	30	1.82
95	300	70	6.87	120	700	40	2.16
96	400	10	-	121	700	50	2.08
97	400	20	2.59	122	700	60	5.1
98	400	30	2.85	123	700	70	9.03
99	400	40	3.1	124	800	10	-
100	400	50	6.87	125	800	20	1.79
101	400	60	10.35	126	800	30	1.89
102	400	70	11.66	127	800	40	1.88
103	500	10	-	128	800	50	1.92
104	500	20	2.24	129	800	60	3.89

105	500	30	2.25	130	800	70	7.54
106	500	40	2.61				

Πίνακας 5.9 Τιμές παραμέτρων για P=16 W

Στη συνέχεια στο σχήμα 5.12 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για τον κάθε πίνακα υλικού, δηλαδή ένα για κάθε μέση ισχύ [8, 12, 16] W. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η συχνότητα των παλμών και στον κάθετο άξονα η επιφανειακή τραχύτητα (Ra). Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν 7 διαφορετικές καμπύλες, η καθεμία με άλλο χρώμα. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 5.12 Διαγράμματα τραχύτητας - συχνότητας για τις ταχύτητες σάρωσης [200, 300, 400, 500, 600, 700, 800] mm/sec

Τα αποτελέσματα της τραχύτητας για τον ορείχαλκο C26000 φαίνονται στο Σχήμα 5.12. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των σημείων από τα διαγράμματα, όπως έγινε και στα προηγούμενα υλικά, για τον ορείχαλκο ισχύει ότι με την αύξηση της μέσης ισχύος  $P$ , προκαλείται μικρή αύξηση στην τραχύτητα της επιφάνειας  $R_a$ . Στο διάγραμμα  $P=8$  W η ελάχιστη τραχύτητα είναι στα  $R_a=1.51$   $\mu\text{m}$ , στο διάγραμμα  $P=12$  W η ελάχιστη τραχύτητα είναι στα  $R_a=1.66$   $\mu\text{m}$  και στο διάγραμμα  $P=16$  W η ελάχιστη τραχύτητα είναι στα  $R_a=1.79$   $\mu\text{m}$ .

Επίσης λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και την κατανομή των σημείων από τα τρία διαγράμματα συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα σάρωσης, ανεξαρτήτως της μέσης ισχύος, παρατηρείται μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας. Εξαίρεση αποτελεί η ταχύτητα σάρωσης  $V=200$  mm/s που δίνει λιγότερη τραχύτητα από τις επόμενες τιμές, για τη μέση ισχύ  $P=12$  W. Για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[200, 300]$  mm/s, και για συχνότητα μεγαλύτερη από  $F=50$  kHz ισχύει ότι σχηματίζουν χαμηλότερη τραχύτητα από τις επόμενες, για μέση ισχύ  $P=16$  W. Η υψηλότερη επιφανειακή τραχύτητα ( $R_a$ ) λαμβάνεται στην ταχύτητα σάρωσης  $V=200$  mm/s, ενώ η χαμηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας ( $R_a$ ) λαμβάνεται στην ταχύτητα σάρωσης  $V=800$  mm/s.

Για τη χαμηλή μέση ισχύ  $P=8$  W από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι επικρατεί μια τάση να μειώνεται η τραχύτητα με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Όσον αφορά τις συχνότητες  $F$ , η μείωση της συχνότητας  $F$  οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας  $R_a$ , ενώ εξαιρούνται οι περιπτώσεις στις ταχύτητες σάρωσης  $V=200$  mm/s και  $V=800$  mm/s, καθώς για ταχύτητα σάρωσης  $V=200$  mm/s η ελάχιστη τραχύτητα βρίσκεται στη συχνότητα  $F=30$  kHz και για την ταχύτητα σάρωσης  $V=800$  mm/s παρατηρείται μεταξύ των συχνοτήτων  $F=20$  kHz και  $F=30$  kHz μια απότομη αύξηση της τραχύτητας. Για τη χαμηλή μέση ισχύ  $P=8$  W, η ελάχιστη τραχύτητα είναι  $R_a=1,5$   $\mu\text{m}$  για συχνότητα  $F=30$  kHz και ταχύτητα σάρωσης  $V=800$  mm/s.

Για τη μέση ισχύ  $P=12$  W παρατηρείται ότι με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης η τραχύτητα μειώνεται. Εξαίρεση αποτελεί η ταχύτητα σάρωσης  $V=200$  mm/s η οποία για συχνότητα μεγαλύτερη από  $F=40$  kHz σχηματίζει χαμηλότερη τραχύτητα από τις επόμενες. Όσον αφορά τη συχνότητα, παρατηρείται ότι για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[200, 300, 400]$  mm/s, η μείωση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας, ενώ για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[500, 600, 700, 800]$  mm/s η αύξηση της συχνότητας προκαλεί αύξηση της τραχύτητας μέχρι κάποια συχνότητα  $F$  και έπειτα μειώνεται η τραχύτητα ή το αντίθετο. Και η τραχύτητα ελαχιστοποιείται για συχνότητα περίπου  $F=30$  kHz έως  $F=40$  kHz. Για τη μέση ισχύ  $P=12$  W, η ελάχιστη τραχύτητα είναι  $R_a=1,7$   $\mu\text{m}$  για  $F=30$  kHz,  $V=700$  mm/s.

Για την υψηλή μέση ισχύ  $P=16$  W, η τραχύτητα μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης και τη μείωση της συχνότητας. Εξαίρεση αποτελούν οι ταχύτητες  $V=200$  mm/s και  $300$  mm/s οι οποίες για συχνότητα μεγαλύτερη από  $50$  kHz σχηματίζουν χαμηλότερη τραχύτητα από τις επόμενες και για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=[500, 600, 700, 800]$  mm/s παρατηρείται ότι μεταξύ των συχνοτήτων  $F=20$  kHz και  $F=50$  kHz η τραχύτητα της

επιφάνειας δεν μεταβάλλεται αρκετά. Για την υψηλή μέση ισχύ  $P=16\text{ W}$ , η ελάχιστη τιμή τραχύτητας προκύπτει για  $F=20\text{ kHz}$ ,  $V=800\text{ mm/s}$  και ισούται με  $Ra=1,8\text{ }\mu\text{m}$ . Επίσης στον ορείχαλκο C26000 παρατηρείται ότι για μεγάλες συχνότητες  $F$  και μεγάλη μέση ισχύ  $P$  οι ταχύτητες σάρωσης  $V=200, 300\text{ mm/s}$  έχουν μικρότερη τραχύτητα από τις άλλες ταχύτητες σάρωσης.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έπειτα από την ολοκλήρωση των μετρήσεων της τραχύτητας στα τρία διαφορετικά υλικά και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, καθίσταται εφικτή η διεξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων και ένας συνοπτικός σχολιασμός για το πώς επηρεάζουν οι συνθήκες κατεργασίας την επιφανειακή τραχύτητα.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα τραχύτητας - συχνότητας στην προηγούμενη ενότητα, εξάγονται κάποια γενικά συμπεράσματα και για τα τρία υλικά. Αρχικά, παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται η ταχύτητα σάρωσης, μειώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας. Αυτό διακρίνεται εύκολα αν παρατηρήσουμε τις καμπύλες με τις μεγαλύτερες ταχύτητες σάρωσης, οι οποίες είναι πάντα πιο κοντά στον οριζόντιο άξονα. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι για να επιτευχθεί μικρότερη τραχύτητα, ανεξαρτήτως των άλλων παραμέτρων, πρέπει να υπάρχει μεγάλη ταχύτητα σάρωσης. Από την άλλη, όσο αυξάνουμε τη μέση ισχύ του laser, παρατηρείται πως υπάρχει μια μικρή αυξητική μεταβολή στην τιμή της τραχύτητας, επομένως όσο αυξάνεται η μέση ισχύς αυξάνεται και η τραχύτητα της επιφάνειας.

Για το **Αλουμίνιο 7075-T6**. Παρατηρώντας τα διαγράμματα της προηγούμενης ενότητας διαπιστώνουμε ότι η ταχύτητα σάρωσης  $V$  είναι μια παράμετρος που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το αποτέλεσμα της επιφανειακής τραχύτητας  $R_a$ . Πιο αναλυτικά, για να επιτευχθεί η μικρότερη τραχύτητα είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούμε μεγάλες ταχύτητες σάρωσης εύρους 600-700 mm/s. Όσον αφορά στη συχνότητα  $F$ , παρατηρούμε ότι η μικρότερη τραχύτητα βρίσκεται σε διάφορα σημεία ανάλογα με τη μέση ισχύ  $P$ . Για παράδειγμα, όταν έχουμε μέση ισχύ  $P=8$  W, η μικρότερη τραχύτητα βρίσκεται στη συχνότητα  $F=30$  kHz, ενώ στη μέση ισχύ  $P=12$  W η μικρότερη τραχύτητα εντοπίζεται στη συχνότητα  $F=40$  kHz. Τέλος, για τη μέση ισχύ  $P=16$  W η μικρότερη τραχύτητα παρατηρείται στη συχνότητα  $F=50$  kHz. Επομένως, η συχνότητα επηρεάζεται από τις άλλες παραμέτρους για την εύρεση της βέλτιστης τραχύτητας της επιφάνειας. Για τη μέση ισχύ διαπιστώνεται ότι με μέση ισχύ  $P=8$  W έχουμε τις βέλτιστες τραχύτητες. Οπότε, για να πετύχουμε βέλτιστη τραχύτητα στο αλουμίνιο θα πρέπει να χρησιμοποιούμε μικρή μέση ισχύ με εύρος  $P=8-12$  W, συχνότητα εύρους  $F=30-40$  kHz και μεγάλη ταχύτητα σάρωσης με εύρος  $V=600-700$  mm/s. Στο αλουμίνιο 7075-T6 η μικρότερη τραχύτητα  $R_a=2,35$   $\mu\text{m}$  βρίσκεται στη μέση ισχύ  $P=8$  W, σε συχνότητα  $F=30$  kHz και σε ταχύτητα σάρωσης  $V=700$  mm/s.

Για τον **Ανοξείδωτο Χάλυβα SAE304**, διαπιστώνουμε ότι για ταχύτητα σάρωσης με εύρος τιμών  $V=500-700$  mm/s, ανεξαρτήτως της μέσης ισχύος  $P$  και της συχνότητας  $F$ , έχουμε βέλτιστες τραχύτητες, με ελάχιστη μεταβολή στην τιμή της τραχύτητας. Όσον αφορά στη συχνότητα  $F$  παρατηρείται ότι σε μεγάλες τιμές ταχύτητας σάρωσης, έχουμε πολύ μικρές μεταβολές στα αποτελέσματα της τραχύτητας. Για τη μέση ισχύ διαπιστώνεται ότι όσο μικρότερη είναι η μέση ισχύς, τόσο επικρατούν βέλτιστες τραχύτητες. Οπότε, για να επιτευχθούν βέλτιστες τραχύτητες στον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 θα πρέπει να χρησιμοποιούμε μικρή μέση ισχύ  $P=8$  W, μεγάλη ταχύτητα σάρωσης με εύρος  $V=500-700$  mm/s και συχνότητα με εύρος  $F=30-50$  kHz.

Τέλος, για τον **Ορείχαλκο C26000** διαπιστώνουμε ότι για μεγάλες ταχύτητες σάρωσης με εύρος  $V=600-800$  mm/s η επίδραση της συχνότητας με εύρος  $F=20-30$  kHz δεν μεταβάλλει πολύ την τιμή της τραχύτητας για τη μέση ισχύ  $P=8$  W. Επίσης όσο μεγαλώνει η τιμή της μέσης ισχύος μεγαλώνει το εύρος της συχνότητας και της ταχύτητας σάρωσης. Για παράδειγμα, όταν έχουμε μέση ισχύ  $P=12$  W, το εύρος της συχνότητας που δεν μεταβάλλει την τιμή της τραχύτητας είναι  $F=20-40$  kHz για τις ταχύτητες σάρωσης  $V=500-800$  mm/s και όταν έχουμε μέση ισχύ  $P=16$  W η τιμή της τραχύτητας δεν μεταβάλλεται πολύ για το εύρος των συχνοτήτων  $F=20-50$  kHz. Επίσης στον ορείχαλκο C26000 παρατηρείται, για μεγάλες συχνότητες  $F$  και μεγάλη μέση ισχύ  $P$ , ότι οι ταχύτητες σάρωσης  $V=200-300$  mm/s έχουν μικρότερη τραχύτητα σε σχέση με άλλες ταχύτητες σάρωσης. Για να επιτευχθούν βέλτιστες τραχύτητες στον ορείχαλκο C26000 θα πρέπει να χρησιμοποιούμε μικρή μέση ισχύ  $P=8$  W, μεγάλη ταχύτητα σάρωσης με εύρος  $V=700-800$  mm/s και συχνότητα με εύρος  $F=20-30$  kHz.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ, «ΦΩΣ LASER: 50 ΧΡΟΝΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ,» Τεχνολογικά χρονικά, pp. 22-28, 10-12 2010.
- [2] Γ. Μήτσου, ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ LASER ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ, Αθήνα, 2014.
- [3] Ş. Kasman, «Impact of parameters on the process response: A Taguchi orthogonal analysis for laser engraving,» Measurement, τόμ. 46, αρ. 8, pp. 2577-2584, 2013.
- [4] A. Pritam, «EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER DEEP ENGRAVING PROCESS FOR AISI 1045,» International Journal of Information Research and Review, τόμ. 03, αρ. 01, pp. 1730-1734, 2019.
- [5] S.L. Campanelli, «Experimental analysis of the laser milling process parameters,» Journal of Materials Processing Technology, τόμ. 191, αρ. 1-3, pp. 220-223, 1 August 2007.
- [6] Μ.Μπενής, ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ LASER, ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2013.
- [7] Δ. Χ. ΒΛΑΣΙΟΣ, «ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕ ΧΑΡΑΞΗ ΜΕ LASER,» ΧΑΝΙΑ, 2016.
- [8] Χ. ΙΩΑΝΝΗΣ, «ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΕΓΧΑΡΑΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ LASER ENGRAVING,» ΧΑΝΙΑ, 2019.
- [9] Π. ΣΤΑΥΤΟΣ, «ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΣΑ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΜΕ LASER,» ΧΑΝΙΑ, 2011.