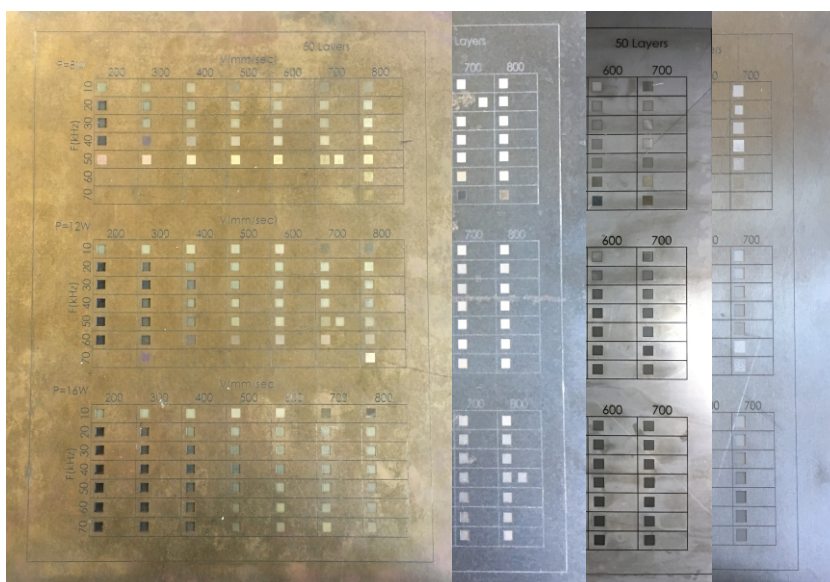




## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΕΓΧΑΡΑΞΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ LASER ENGRAVING**



**ΧΟΡΕΥΤΑΚΗΣ  
ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στον Αρίωνα

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος προπτυχιακών σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά όλους αυτούς που στήριξαν την πορεία αυτή.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο καθώς και για τα μαθήματα ζωής που με τον τρόπο του παραδίδει σε καθημερινή βάση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Βαγγέλη Νικολιδάκη και Άγγελο Μαρινάκη για την πολύτιμη και απλόχερη βοήθεια που μου πρόσφεραν όποτε την χρειάστηκα (όλα καλά). Επίσης όλα τα παιδιά με τα οποία συνεργαστήκαμε και δουλέψαμε παράλληλα στο εργαστήριο, δημιουργώντας πάντα ένα ευχάριστο και δημιουργικό κλίμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους: Κοκονά Ελένη, McKay Anne, Μαντωνανάκη Μάγδα, Πετραντωνάκη Μαρία και Μελετίου Άρη, ο καθένας από τους οποίους με βοήθησαν στην διάρκεια της πορείας αυτής.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς, τα αδέρφια και τους φίλους μου που με την πολύτιμη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια μου δίνουν έμπνευση, κίνητρο και αυτοπεποίθηση για κάθε επόμενο βήμα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
1.1	Αντικείμενο και Στόχος της εργασίας.....	4
1.2	Δομή της εργασίας .....	5
2.	ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	6
2.1	Εισαγωγή στο laser.....	6
2.1.1	Ιστορικές αναφορές για το laser.....	6
2.1.2	Φυσική του laser .....	6
2.1.3	Ιδιότητες Laser .....	7
2.1.4	Τύποι laser.....	8
2.1.5	Τύποι κατεργασίας με Laser .....	10
2.2	Αναφορές σε σχετικά επιστημονικά άρθρα .....	11
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΞΑΧΝΩΣΗΣ.....	24
3.1	Κέντρο κατεργασίας DMG MORI Lasertec 40.....	24
3.2	Υλικά .....	30
3.2.1	Εισαγωγή .....	30
3.2.2	Αλουμίνιο (7075-T6) .....	35
3.2.3	Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304).....	36
3.2.4	Χάλυβας (P355GH).....	37
3.2.5	Ορείχαλκος .....	38
3.3	Συνθήκες Κατεργασίας.....	39
3.3.1	Παράμετροι διεργασίας.....	39
3.3.2	Μέση ένταση Παλμών (Average Output Power) .....	39
3.3.3	Συχνότητα των παλμών .....	40
3.3.4	Ταχύτητα Σάρωσης (Scanning Speed).....	42
3.4	Σχεδιασμός Πειραμάτων .....	42
3.4.1	LpsWin .....	43
3.4.2	LaserSoft3D .....	50
3.4.3	Πειραματική διαδικασία .....	56
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	59
4.1	Εισαγωγή .....	59
4.2	Αλουμίνιο (7075-T6).....	59
4.3	Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304) .....	66
4.4	Χάλυβας (P355GH).....	73
4.5	Ορείχαλκος.....	80
5.	ΣΥΝΟΨΗ.....	87
5.1	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	87
5.2	Αξιοσημείωτες παρατηρήσεις .....	89
5.3	Προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης.....	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	93



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο και Στόχος της εργασίας

Με την ταχύτατη εξέλιξη της σύγχρονης τεχνολογίας, η ακτινοβολία Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) έχει βρει εφαρμογές σε πολλούς και διαφορετικούς μεταξύ τους επιστημονικούς κλάδους.

Η διαδικασία χάραξης με τη χρήση δέσμης laser έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν τεχνικές χάραξης για ένα μεγάλο εύρος επιφανειών και υλικών. Η εγχάραξη με laser είναι μία μη συμβατική μηχανική διεργασία η οποία εξελίσσεται ραγδαία χάρη την υψηλή ακρίβεια που αποδίδει σε περίπλοκα γεωμετρικά σχήματα σε εύρος διαφόρων υλικών.

Οι κατεργασίες με χρήση δέσμης laser κερδίζουν συνεχώς έδαφος σε βάρος των κατεργασιών που χρησιμοποιούν συμβατικά εργαλεία και πλακίδια κοπής, διότι πλεονεκτούν στο γεγονός ότι δεν υπάρχει επαφή του κοπτικού εργαλείου με το κατεργαζόμενο υλικό. Αυτό σημαίνει την αποφυγή πολλών προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση των κοπτικών, όπως είναι η φθορά ή θραύση τους και άρα η ανάγκη για συχνή αντικατάστασής τους, κάτι το οποίο αυξάνει κατά πολύ το κόστος παραγωγής. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς τρόπους κοπής οι κατεργασίες με χρήση laser διευκολύνουν την κατεργασία πολύπλοκων γεωμετρικά τεμαχίων με μικρές διαστάσεις, κάτι που θα ήταν απίθανο σε περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιείται laser, λόγω του περιορισμού της δυνατότητας πρόσβασης και του ελάχιστου μεγέθους του κοπτικού εργαλείου.

Η βασική αρχή λειτουργίας της διεργασίας εγχάραξης με laser είναι ότι μέσω της μηχανής που παράγει τους παλμούς δέσμης laser δημιουργείτε τοπική συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, με σκοπό την εξάχνωση του υλικού που ο χειριστής θέλει να αφαιρέσει. Ο τρόπος και η ποσότητα που θα κατανεμηθεί η θερμική ενέργεια στο υλικό από τους παλμούς laser μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας τις βασικές παραμέτρους της διεργασίας, όπως είναι η ένταση των παλμών του laser, η συχνότητα των παλμών και την ταχύτητα σάρωσης της δέσμης του laser.

Ο κύριος στόχος στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η πειραματική διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι αλλαγές στις παραμέτρους της διεργασίας laser engraving στο τελικό βάθος εγχάραξης. Οι εξεταζόμενες παράμετροι της διεργασίας laser engraving είναι η μέση ένταση των παλμών του laser, η συχνότητα των παλμών και η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης. Για τον σκοπό αυτό έγιναν 588 πειράματα με διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων σε τέσσερις διαφορετικές πλάκες χρησιμοποιώντας την μηχανή Nd:YAG DMG MORI Lasertec 40. Τα μέταλλα από τα οποία είναι φτιαγμένα οι τέσσερις κατεργασμένες πλάκες είναι:

- Αλουμίνιο (7075-T6)
- Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)
- Χάλυβας (P355GH)
- Ορείχαλκος (EN CC755S)

Τα κριτήρια μέτρησης με τα οποία έγινε και η αξιολόγηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων ήταν το πάχος αφαίρεσης στρώματος που εμφάνιζε ανά μονό πέρασμα (layer) το laser.

## 1.2 Δομή της εργασίας

Στην εισαγωγή παρουσιάζεται το αντικείμενο και ο στόχος της εργασίας. Επίσης γίνεται αναφορά σε γενικές πληροφορίες σχετικά με την κατεργασία εγχάραξης με χρήση δέσμης λέιζερ (laser engraving), καθώς και η δομή της εργασίας.

Στη στάθμη των γνώσεων αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία καθώς και κάποια βασικά χαρακτηριστικά σχετικά με τη φυσική του laser, τις ιδιότητές του και τους διάφορους τύπους laser που υπάρχουν. Αναφορά γίνεται και για τους διάφορους τύπους κατεργασίας με τη χρήση laser. Επίσης παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στις κατεργασίες με laser.

Στο κεφάλαιο «Πειράματα Εξάχνωσης» παρουσιάζεται το κέντρο κατεργασίας DMG MORI Lasertec 40, με το οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά στα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν καθώς και στις συνθήκες κατεργασίας οι οποίες διερευνήθηκαν σε κάθε πείραμα. Επίσης γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, δηλαδή αναλύεται η πειραματική διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για κάθε ένα από τα στάδια τα οποία πέρασε: σχεδιασμός & υλοποίηση των πειραμάτων.

Στο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τέσσερα υλικά ξεχωριστά. Περιγράφονται αναλυτικά οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που μας έδωσε για κάθε ένα από τα υλικά. Σε κάθε ένα από τα τέσσερα υλικά γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα βασισμένα σε αυτά.

Τέλος γίνεται ένας συνολικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων και μια γενικευμένη εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς επίσης προτείνονται ενδιαφέρων κομμάτια που θα μπορούσαν να ερευνηθούν περεταίρω.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή στο laser

Κατά τα τελευταία χρόνια με τον όρο laser εννοούμε τόσο την μονοχρωματική ενισχυμένη ακτίνα φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, όσο και τις συσκευές που παράγουν τη συγκεκριμένη ακτίνα φωτός. Η ενισχυμένη ακτίνα φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας παράγεται από μία πηγή που εκπέμπει ακτινοβολία η οποία είναι πολωμένη, μονοχρωματική χωρίς διαφορά φάσης και η οποία διαδίδεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση σχηματίζοντας στενές δέσμες. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι αυτά που διαφοροποιούν μια ακτίνα laser από το συμβατικό φως. Το όνομα laser προέρχεται από την αγγλική λέξη Laser που είναι ακρωνύμια από τα αρχικά γράμματα των λέξεων «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» που αποδίδεται στα ελληνικά ως «ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας».

#### 2.1.1 Ιστορικές αναφορές για το laser

Ιστορικά ενδιαφέρον είναι ότι ο Albert Einstein είχε αποδείξει τη δυνατότητα ύπαρξης της εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας από το 1917 δημοσιεύοντας την ερευνά του με τίτλο «Η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας».

Έπειτα ο Valentin A. Fabrikant εμβάθυνε στη χρήση της διεγερμένης εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μερικά χρόνια αργότερα το 1953 ο Charles Hard Townes κατασκεύασε τον πρώτο ενισχυτή ακτινοβολίας μικροκυμάτων (Maser), η λειτουργία του οποίου στηριζόταν στις βασικές θεωρητικές αρχές που διέπουν και την λειτουργία του laser.

Μια σημαντική ημερομηνία για την εξέλιξη του laser είναι η 16η Μαΐου του 1960 καθώς τέθηκε σε λειτουργία το laser του Maiman το οποίο κατασκευάστηκε στο εργαστήριο της Hughes Research Laboratories στο Malibu της California. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της συσκευής είναι ότι χρησιμοποιούσε ένα συνθετικό κρύσταλλο ρουμπινιού ως ενεργό υλικό και παρήγαγε μία κόκκινη δέσμη με μήκος κύματος στα 694,3nm. Εξέλιξη του συγκεκριμένου laser αποτελεί αυτό που δημιουργήθηκε από τον Kumar Patel στα εργαστήρια της AT&T Bell Labs. Όπου πρόκειται για το πρώτο laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) το οποίο και κυριάρχησε λόγω του χαμηλότερου κόστους και της υψηλότερης απόδοσης που είχε σε σχέση με laser του ρουμπινιού.

#### 2.1.2 Φυσική του laser

Παρόλο που είναι κομμάτι με το οποίο ασχολούνται περισσότερο οι φυσικοί παρά οι μηχανικοί πιστεύω ότι αξίζει να αναφερθούν οι βασικές αρχές λειτουργίας του laser.

Ένα σύστημα Laser αποτελείται από τρία βασικά μέρη, το ενεργό υλικό, το μηχανισμό άντλησης ενέργειας και το οπτικό αντηχείο. Κάθε υλικό που παρουσιάζει αναστροφή πληθυσμών ονομάζεται ενεργό υλικό. Με την αναστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται μια εκπομπή laser, δηλαδή το πλήθος των διεγερμένων ατόμων ή μορίων ανά μονάδα όγκου που βρίσκονται σε ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο που είναι μεγαλύτερο από εκείνο που βρίσκονται σε ένα χαμηλότερο. Αυτό γίνεται με την επιλεκτική απορρόφηση της ενέργειας που διεγείρει τα ηλεκτρόνια της ουσίας σε ανώτερες στάθμες αφήνοντας «κενή» την χαμηλότερή τους στάθμη. Το ενεργό υλικό μπορεί να είναι σε αέρια, στερεή ή υγρή κατάσταση, με την αντίστοιχη πηγή Laser να ονομάζεται Laser αερίων, Laser στερεών ή διοδικών Laser και Laser χρωστικών ουσιών. Για τη δημιουργία αναστροφής πληθυσμών πρέπει να υπάρχει κάποιο είδος μηχανισμού άντλησης που συχνά προέρχεται από μια

λυχνία έκλαμψης, από ηλεκτρική εκκένωση, από χημική αντίδραση ή από την οπτική άντληση ενός άλλου Laser.

Το οπτικό αντηχείο είναι μια κοιλότητα συντονισμού η οποία εγκλωβίζει τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) ακτινοβολίας, που δημιουργείται από τις αποδιεγέρσεις των διεγερμένων ηλεκτρονίων προς τη βασική στάθμη του ατόμου ή μορίου. Ένα οπτικό αντηχείο αποτελείται από το ενεργό υλικό και δύο κάτοπτρα. Το πρώτο κάτοπτρο έχει πολύ υψηλή ανακλαστικότητα ( $R \approx 100\%$ ) και το δεύτερο είναι ημιπερατό ( $T \approx 4\%$ ).

### 2.1.3 Ιδιότητες Laser

Τα συστήματα laser έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες που τα ξεχωρίζουν από τις υπόλοιπες κλασικές πηγές. Τέτοιες ιδιότητες είναι η μονοχρωματικότητα, η κατευθυντικότητα, η συμφωνία (συμφασικότητα), η λαμπρότητα της δέσμης και η πόλωση. Αναλυτικότερα:

- Η **μονοχρωματικότητα** είναι μια ιδιότητα του laser που τα καθιστά μοναδικά στην εκπομπή φωτός με την καλύτερη δυνατή προσέγγιση προς το απόλυτο μονοχρωματικό φως. Οι κλασικές πηγές φωτός εκπέμπουν ένα ορατό φάσμα μήκος κύματος από 380nm έως 780nm, αυτές οι πηγές ονομάζονται πολυχρωμικές. Με την τοποθέτηση χρωματικού φίλτρου επιτυγχάνεται η διέλευση μερικών μόνο μηκών κύματος περίπου του ίδιου χρώματος, είναι σχεδόν μονοχρωματικό φως και οι πηγές ονομάζονται ψευδομονοχρωματικές. Οι μόνες πηγές που χαρακτηρίζονται για την μονοχρωματικότητά τους πρόκειται για τα laser όπου εκπέμπουν φως ενός ιδιαίτερου μήκους κύματος. Τέτοιες πηγές έχουν την δυνατότητα εκπομπής οποιασδήποτε συχνότητας κατά συνεχή τρόπο και χωρίς ενδιάμεσα κενά. Αυτό γίνεται με την τοποθέτηση πλακιδίου Etalon εντός της κοιλότητας είτε με την αλλαγή του μήκους του οπτικού αντηχείου. Με την βοήθεια των lasers χρωστικών ουσιών (dye-Laser) έχουν πολύ ευρύτερες ζώνες εκπομπής, 20 έως 50nm, η σάρωση συχνοτήτων σε ολόκληρη τη ζώνη μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση επιπρόσθετων οπτικών στοιχείων, όπως για παράδειγμα το Lyot filter. Ο μεγαλύτερος αριθμός διαθέσιμων χρωστικών ουσιών έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα παραγωγής ακτινοβολιών laser σε ολόκληρη την οπτική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι μονοχρωματικές πηγές laser άνοιξαν τον δρόμο για έρευνα σε πολλούς επιστημονικούς τομείς.
- Δεύτερη ιδιότητα των lasers είναι η **κατευθυντικότητα**. Πρόκειται για την ιδιότητα που έχει η εξερχόμενη δέσμη από τη συσκευή laser να έχει μια συγκεκριμένης κατεύθυνσης πορεία. Η οποία στη συνέχεια διαχέεται κατά μία γωνία απόκλισης. Μπορεί να θεωρηθεί ότι ακτίνες της εξερχόμενης δέσμης τείνουν να είναι παράλληλες μεταξύ τους με αποτέλεσμα το ισχυρό σήμα μπορεί να διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις. Με αποτέλεσμα τα laser να χρησιμοποιούνται και ως οπτικά ραντάρ για μετρήσεις μεγάλων αποστάσεων.
- Επόμενη ιδιότητα είναι η **οπτική συμφωνία (Coherence)**. Οι θερμικές πηγές εκπέμπουν ασύμφωνο φως και ακολουθούν το μηχανισμό της αυθόρμητης εκπομπής, η οποία πραγματοποιείται με την εκπομπή φωτονίων. Σύμφωνο φως μπορεί να επιτευχθεί χρονικά και χωρικά μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι στις κλασικές φωτεινές πηγές η εκπομπή σύμφωνης ακτινοβολίας πραγματοποιείται μόνο με μεγάλες απώλειες της εξερχόμενης δέσμης. Είναι γνωστό ότι τα Laser αποτελούν πηγές της σύμφωνης ακτινοβολίας

αφού μέσα από το μηχανισμό της εξαναγκασμένης εκπομπής τα φωτόνια βρίσκονται πάντα σε φάση. Η ιδιότητα της χωρικής συμφωνίας δικαιολογεί δύο καταστάσεις. Η πρώτη είναι η παραλληλότητα της φωτεινής δέσμης σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή και η δεύτερη η δυνατότητα εστίασής της σε απειροελάχιστες διαστάσεις, ίσες με το τετράγωνο του μήκους κύματος.

- Η **λαμπρότητα** είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος-ιδιότητα της δέσμης laser αλλά και γενικά οποιασδήποτε πηγής φωτός. Μια δέσμη laser ακόμη και μέτριας ισχύος έχει λαμπρότητα πολλές τάξεις μεγέθους από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός. Ο βασικός λόγος είναι η υψηλή κατευθυντικότητα. Οι πηγές Laser χαρακτηρίζονται για τη μεγάλη τους λαμπρότητα επειδή η συμφωνία, η στενότητα του φασματικού εύρους μίας πηγής και η κατευθυντικότητα της φωτεινής δέσμης αποτελούν κοινό χαρακτηριστικό τους. Αντίθετα οι λαμπτήρες πυρακτώσεως ακτινοβολούν περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι ένα laser χαμηλής ισχύος, αφού έχουν ασύμφωνο φως, μεγάλο φασματικό εύρος και κατανέμονται σε ολόκληρο το χώρο. Αυτές οι πηγές έχουν χαμηλή λαμπρότητα.
- Η **πόλωση** της δέσμης laser. Το φως των περισσότερων φωτεινών πηγών όπως και είναι και το φως του ηλίου συμπεριφέρονται γενικά σαν "μη πολωμένο" ή "τυχαία πολωμένο" φως. Αντίθετα, πολλά laser παράγουν πολωμένο φως. Μπορούμε λοιπόν να πούμε, ότι η ακτινοβολία laser έχει σαν χαρακτηριστική ιδιότητα την πόλωση. Η πόλωση της δέσμης του laser επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός οπτικού πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο. Τα πιο συνηθισμένα είναι οπτικές επιφάνειες σε γωνίες Brewster (παράθυρα Brewster), πρίσματα, φράγματα ανάκλασης, οπτικοί πολωτές κλπ.

#### 2.1.4 Τύποι laser

Τα συστήματα laser μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους, τη «φύση» του οπτικού ενεργού μέσου, το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης δέσμης και τη ζημιά που μπορεί να προκαλέσει η δέσμη laser στο μάτι ή/και το δέρμα. Τα διάφορα συστήματα laser επομένως μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα:

##### Το ενεργό μέσο:

- **Solid State Laser (laser στερεάς κατάστασης):** Είναι τα laser που χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο, ή γυαλί. Το υλικό που παράγει την ακτινοβολία laser, συνήθως ιόντα  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ , ή  $\text{Ho}^{3+}$ , είναι διασκορπισμένο σε κρυσταλλικό πλέγμα.
- **Semiconductor Laser (laser ημιαγωγών ή διοδικά):** Ημιαγώγιμες διατάξεις, οι οποίες αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγώγιμου υλικού σε επαφή. Τα laser αυτού του τύπου είναι πολύ μικρών διαστάσεων και ισχύος και μπορούν να τοποθετηθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.
- **Gas Laser (laser αερίων):** Χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο ένα αέριο ή μείγμα αερίων μέσα σε σωλήνα.
- **Excimer Laser (laser διεγερμένων διμερών):** Μοριακά laser που εμπλέκουν μεταπτώσεις μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρονικών καταστάσεων. (Υποκατηγορία των laser αερίων).

- **Chemical Laser (χημικά laser):** Είναι τα laser εκείνα στα οποία η αναστροφή πληθυσμών παράγεται άμεσα μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Συνήθως τα χημικά laser περιλαμβάνουν στο μηχανισμό άντλησης μία αντίδραση μεταξύ αερίων στοιχείων ή ενώσεων. (Υποκατηγορία των Gas lasers).
- **Dye Laser (laser χρωστικών):** Είναι εκείνα που το ενεργό μέσο αποτελείται από διαλύματα σύνθετων οργανικών χρωστικών σε υγρά όπως η αιθυλική και η μεθυλική αλκοόλη ή το νερό. Κατάλληλη επιλογή της χρωστικής και της συγκέντρωσής της επιτρέπει την παραγωγή δέσμης laser σε μεγάλη περιοχή μηκών κύματος, μέσα και γύρω από το ορατό φάσμα.
- **Laser Χρωματικών Κέντρων:** Χρωματικά κέντρα σε κρυστάλλους αλογονούχων αλκαλίων χρησιμοποιούνται ως αποδοτικά, οπτικά αντλούμενα, laser με πλατιά επιλεκτικότητα στο κοντινό υπέρυθρο.
- **Laser ελευθέρων ηλεκτρονίων:** Τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα διαμέσου ενός περιοδικού μαγνητικού πεδίου και η διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής προέρχεται από την αλληλεπίδραση του H/M πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια. (κυρίως σε πειραματικό στάδιο).

#### Το μήκος κύματος:

- Laser υπέρυθρης ακτινοβολίας
- Laser ορατής ακτινοβολίας
- Laser υπεριώδους ακτινοβολίας
- Laser ακτινών Χ

#### Το τρόπο λειτουργίας:

- **Continuous Wave Lasers - CW (laser συνεχούς λειτουργίας):** Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με σταθερό ρυθμό ισχύος της δέσμης. Στα περισσότερα laser μεγάλης ισχύος υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της, ενώ στα laser αερίων μικρής ισχύος (He-Ne) η ισχύς εξόδου είναι σταθερή εκ κατασκευής και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.
- **Single Pulsed Lasers (laser μονού παλμού):** Τα laser συνήθως έχουν διάρκεια παλμού από μερικές εκατοντάδες microseconds ως μερικά milliseconds. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας αναφέρεται και ως κανονικός τρόπος, ή μακρύς παλμός.
- **Single Pulsed Q-Switched (laser μετατροπής Q):** Είναι εκείνα τα συστήματα laser στα οποία μία καθυστέρηση εκτός της κοιλότητας επιτρέπει στο ενεργό μέσο να αποθηκεύσει το μέγιστο της ενέργειας. Έπειτα, ύστερα από συνθήκες βέλτιστου κέρδους (gain), η εκπομπή συμβαίνει σε μονό παλμό, της τάξης του 10<sup>-8</sup> s. Η ισχύς των παλμών αυτών συνήθως φτάνει σε επίπεδα μεταξύ 106 και 108 W.
- **Παλμικά lasers:** Είναι αυτά τα συστήματα laser που λειτουργούν όπως τα μονού παλμού, με επανάληψη της διαδικασίας με σταθερό ή και μεταβλητό ρυθμό.
- **Mode Locked lasers (laser εγκλειδωσής ρυθμού):** Αυτά λειτουργούν ως αποτέλεσμα των συντονισμένων ρυθμών της οπτικής κοιλότητας, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης δέσμης. Όταν οι

φάσεις των διαφορετικής συχνότητας ρυθμών συγχρονίζονται, τότε οι ρυθμοί συμβάλλουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα στενούς επαναλαμβανόμενους παλμούς. Τα laser αυτής της κατηγορίας παράγουν σειρές από παλμούς με διάρκειες από pico- (10–12 ) ως femto- (10–15 ) seconds.

#### Τη ζημιά που προκαλεί η δέσμη laser στο μάτι ή/και το δέρμα:

- **CLASS I:** Η δέσμη laser δεν βλάπτει τα μάτια ή το δέρμα κυρίως γιατί βρίσκεται εντός της συσκευής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα lasers των εκτυπωτών ή τα CD/DVD.
- **CLASS I M:** Η δέσμη laser δεν βλάπτει τα μάτια ή το δέρμα, όταν δεν παρεμβάλλεται συγκεντρωτικός φακός ή άλλα οπτικά είδη μεγέθυνσης.
- **CLASS II:** Η δέσμη laser δεν βλάπτει τα μάτια ή το δέρμα, όταν η έκθεση δεν ξεπερνά τα 0,25 second. Η δέσμη είναι ορατή στο γυμνό μάτι από τα 400 nm έως τα 700 nm και είναι συνήθως έως 1 mW. Τέτοιες δέσμες laser χρησιμοποιούνται στους laser pointers.
- **CLASS II M:** Η δέσμη laser δεν βλάπτει τα μάτια ή το δέρμα, όταν η έκθεση δεν ξεπερνά τα 0,25 second, όταν δεν παρεμβάλλεται συγκεντρωτικός φακός ή άλλα οπτικά είδη μεγέθυνσης.
- **CLASS III R:** Η δέσμη laser βλάπτει τα μάτια. Είναι συνήθως δέσμες έως 5 mW και μπορούν μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα να προκαλέσουν βλάβη στο σημείο που στοχεύουν στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Η κατηγορία αυτή μέχρι το 2007 λεγόταν 3A.
- **CLASS III B:** Η δέσμη laser προκαλεί άμεση βλάβη στο μάτι και μπορεί να επιφέρει βλάβες και στο δέρμα.
- **CLASS IV:** Η δέσμη laser Είναι άκρως επικίνδυνη για το μάτι και το δέρμα ακόμα και έπειτα από διάχυση σε άλλες επιφάνειες. Επίσης μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη.

#### **2.1.5 Τύποι κατεργασίας με Laser**

##### Κοπή με laser (Laser cutting)

Η κοπή με laser είναι τεχνολογία που χρησιμοποιεί laser για την κοπή υλικών. Πρόκειται για την πλήρη απομάκρυνση και τον διαχωρισμό του υλικού που βρίσκεται στην άνω επιφάνεια έως την κάτω επιφάνεια κατά μήκος του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η κοπή με laser μπορεί να γίνει σε μονής στρώσης τεμάχια ή σε τεμάχια πολλαπλών στρωμάτων. Κατά την κοπή πολυστρωματικού κατεργαζόμενου τεμαχίου, η δέσμη laser πρέπει να ελεγχθεί και να μελετηθεί με ακρίβεια για να κόψει το άνω στρώμα χωρίς να κόψει τα άλλα στρώματα του υλικού.

##### Χάραξη με laser (Laser engraving) / Σημάδεμα με laser (laser marking)

Η χάραξη με laser (laser engraving) είναι η πρακτική της χρήσης δέσμης laser για την χάραξη ενός αντικειμένου. Η σήμανση laser (laser marking), είναι μια ευρύτερη κατηγορία μεθόδων που αφήνουν σημάδια στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, το οποίο συνήθως

περιλαμβάνει την αλλαγή χρώματος λόγω χημικής / μοριακής αλλοίωσης, εξάχνωσης, τήξης, αποκοπής και πολλά άλλα.

Ο όρος σήμανση με laser (laser marking) χρησιμοποιείται επίσης ως γενικός όρος που καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών επιφανειακής επίστρωσης, συμπεριλαμβανομένης της εκτύπωσης, της επίδειξης θερμών χαρακτήρων και της συγκόλλησης με laser. Οι μηχανές για τη χάραξη με laser και τη σήμανση με laser είναι οι ίδιες, έτσι ώστε οι δύο όροι να συγχέονται μερικές φορές.

## **2.2 Αναφορές σε σχετικά επιστημονικά άρθρα**

Ο κύριος στόχος στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η πειραματική διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι αλλαγές στις παραμέτρους της διεργασίας laser engraving (μέση ένταση των παλμών του laser, συχνότητα των παλμών και ταχύτητα σάρωσης της δέσμης) στο τελικό βάθος εγχάραξης. Όμως είναι σημαντικό να γίνει και μια σύντομη παρουσίαση κάποιων σημαντικών διεθνών ερευνητικών έργων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διεργασίες με χρήση μηχανών laser δεν είναι τόσο διαδεδομένες όσο με τις συμβατικές μηχανές αφαίρεσης υλικού (φρέζα, τόνος). Κάτι που είναι απολύτως λογικό δεδομένου ότι η τεχνολογία του laser βρίσκεται σε αρχικά στάδια, αν συμεριστεί κάποιος ότι η ανακάλυψη της τεχνολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 1960. Καίτοι, ο αριθμός των επιστημονικών ερευνών στο κομμάτι των κατεργασιών με χρήση laser, τόσο σε διεθνή όσο και σε εθνικό επίπεδο αυξάνονται. Παράγοντας έτσι λύσεις και δεδομένα για τους επόμενους, όπως είναι η βελτιστοποίηση της παραγόμενης επιφάνειας, η μείωση της κατανάλωσης ισχύος, αύξηση ταχύτητας κατεργασίας, κατεργασιμότητα νέων υλικών και πολλά ακόμα. Παρακάτω θα δούμε κάποια από τα ερευνητικά έργα.

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους V. Kovalenko, J. Yao, Q. Zhang, M. Nayeibi, M. Anyakin, R. Zhuk, O. Stepura και P. Kondrashev [1], στόχος της οποίας ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων που θα επιφέρουν την βέλτιστη παραγωγή και ποιότητα στις κατεργασίες πολύ σκληρών υλικών (intractable materials). Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα Q-Switched YAG laser, με μήκος κύματος 1,06  $\mu\text{m}$ , μέση ισχύος μέχρι έως 100W (για την πειραματική διαδικασία από 10 έως 40W), διάρκεια παλμού 100-500ns και συχνότητας μέχρι και 50kHz. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική διαδικασία ήταν το VK8 κράμα [VK8 σύσταση: 92%WC (καρβίδια βολφραμίου) και 8%Co (κοβάλτιο)] και νιτρίδιο του βορίου (Borazon). Ο κρατήρες που παρατηρήθηκε ότι δημιουργούνται ήταν διαμέτρου 10-200  $\mu\text{m}$  και βάθους από 1 $\mu\text{m}$  έως 100 $\mu\text{m}$ . Η κακή επιφάνεια που δημιουργείτε στο κατεργαζόμενο τεμάχιο οφείλετε στους κρατήρες, αναγκάζοντας πολλές φορές τον χειριστή να επαναλάβει την διαδικασία προκειμένου να βελτιώσει την επιφάνεια, κάτι που αυξάνει αισθητά τον χρόνο κατεργασίας. Επομένως για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα, κατέστη απαραίτητο να αυξηθεί ο αριθμός των περασμάτων του «εργαλείου» ανά μονάδα χρόνου (ταχύτητα επεξεργασίας VS), διατηρώντας τον συντελεστής επικάλυψης OD αμετάβλητο (συνήθως ο συντελεστής επικάλυψης είναι περίπου 80-90% όταν η απόσταση μεταξύ των γειτονικών κρατήρων είναι 1 έως 10  $\mu\text{m}$  και η απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων φρεζαρίσματος StepOX είναι περίπου 5-10  $\mu\text{m}$ ). Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των αυλακώσεων (και η μείωση του χρόνου κατεργασίας) θα μπορούσε να επιτευχθεί αλλάζοντας τη γωνία που το αυλάκι επρόκειτο να κατεργαστεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή του συντελεστή επικάλυψης OD θα μπορούσε να διατηρηθεί σταθερή με την αύξηση της συχνότητας παλμού η που θα ισούταν με 30-50 kHz. Αυτό οδηγεί στη μείωση της μέγιστης ισχύος PP ενός παλμού λόγω της αύξησης της διάρκειας παλμού tP (αν και η



μέση ισχύς Pm είναι αυξημένη) και μειώνει το πάχος του υλικού που θα μπορούσε να αφαιρείται ανά layer (πέρασμα). Παρατηρήθηκε ότι η υπολογισμένη ζώνη καταστροφής (διαχωρισμού) του Borazon (νιτρίδιο βορίου) είναι σημαντικά υψηλότερη από το ζώνη διάσπασης του σκληρού κράματος VK8. Σε σύγκριση με το σκληρό κράμα VK8, το Borazon (νιτρίδιο βορίου) έχει χαμηλότερη πυκνότητα και θερμοχωρητικότητα (αν και η θερμική αγωγιμότητα των υλικών είναι σχεδόν ίση). Προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατεργασία με λέιζερ των κραμάτων που διαχωρίζονται σε ξεχωριστά χημικά στοιχεία (τεχνητά και φυσικά διαμάντια, Borazon, κεραμικά) δεν αποτελούν πρόβλημα και είναι δυνατό να φτάσει σε ένα επίπεδο την επεξεργασία όπου το περίγραμμα της κατεργασμένης επιφάνειας θα ταυτίζεται με το πέρασμα της δέσμης του λέιζερ. Προφανώς, όταν στην κατεργασία μειωθεί η τιμή StepOX (απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων φρεζαρίσματος) το βάθος και τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας μειώνεται εξίσου.

Σε διεξαγωγή προκαταρκτικών πειραμάτων τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατεργασία με λέιζερ σε χαμηλές συχνότητες αφαιρεί μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Από την άλλη πλευρά η τραχύτητα της επιφάνειας σε παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα, δεδομένου ότι το υλικό αφαίρεσης που είναι σε υγρή φάση λόγω της δέσμης του λέιζερ, σταθεροποιείται επί της κατεργασμένης επιφάνειας. Αυτή είναι μια κοινή υπόθεση όχι μόνο για τα σκληρά κράματα αλλά και για τους συνήθεις χάλυβες. Άρα η συνεχής (από στρώση σε στρώση) αλλαγή γωνίας με την οποία σχηματίζονται αυλακώσεις από το πέρασμα της δέσμης λέιζερ οδηγεί σε μικρότερες τιμές τραχύτητας επιφανείας. Εν κατακλείδι συγκεκριμένη έρευνα κατέληξε στα εξής δύο συμπεράσματα:

- Διαπιστώθηκε ότι κατά την κατεργασία με λέιζερ πολύ σκληρών υλικών (intractable materials) με Q-switched, Solid State Laser (laser στερεάς κατάστασης) είναι δυνατόν να επιτευχθεί το μέγιστο βάθος χάραξης χωρίς απαραίτητα το σχηματισμό της υγρής φάσης.
- Προκειμένου να υπάρξει ο μέγιστος βαθμός παραγωγικότητας σε συνδυασμό με την καλύτερη δυνατή ποιότητα επιφάνειας στις κατεργασίες με χρήση λέιζερ, στην περίπτωση που δημιουργείτε ένα βαρυσήμαντο ποσό υγρής φάσης (ανθεκτικά υλικά, σκληρά κράματα) είναι σκόπιμο να κατεργαζόμαστε το αντικείμενο σε δύο περάσματα. Στο πρώτο πέρασμα το λέιζερ σχηματίζει κρατήρες οι οποίοι δημιουργούνται συμμετρικά στο κατεργαζόμενο αντικείμενο και στο δεύτερο πέρασμα η δέσμη του λέιζερ διασπά τις γέφυρες ανάμεσα στους κρατήρες και έτσι σχηματίζεται η τελική επιφάνεια με την απαιτούμενη τραχύτητα

Στην κατεύθυνση της διερεύνησης κατεργασιμότητας υλικών κατευθύνθηκε και η Sefika Kasman [2]. Η μελέτη της οποίας διερευνά την ικανότητα επεξεργασίας σκληρών μετάλλων και προτείνει μια νέα προσέγγιση σχετικά με την χάραξη με λέιζερ των κονιομεταλλουργικών υλικών. Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι να προσδιοριστεί η επίδραση της διαδικασίας χάραξης με λέιζερ στο Βανάντιο 10. Για το σκοπό αυτό, τρεις παράμετροι της διαδικασίας: η ταχύτητα σάρωσης, η συχνότητα και η ένταση ισχύος του λέιζερ - συσχετίστηκαν με την επιφανειακή τραχύτητα και βάθος εγχάραξης. Η μηχανή λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε παλμικού τύπου Ytterbium fiber laser, με μήκος κύματος 1064 nm και μέγιστη ισχύ 50 W. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε η χρήση της μεθόδου Taguchi όπου πρόκειται για μια γραμμική παλινδρόμηση. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με μια ορθογώνια συστοιχία L9. Βρέθηκε ότι η ταχύτητα

σάρωσης έχει στατιστικά σημαντική επίδραση τόσο στην τραχύτητα όσο και στο βάθος εγχάραξης. Επιπρόσθετα, ένα μαθηματικό μοντέλο για αμφότερα την τραχύτητα και το βάθος εγχάραξης καθορίστηκαν και εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση. Το μοντέλο δοκιμάστηκε επίσης χρησιμοποιώντας διαφορετικές πειραματικές συνθήκες από αυτές της πειραματικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις νέες πειραματικές συνθήκες δείχνουν ότι τα προβλεπόμενα μοντέλα θα μπορούσαν να εξηγήσουν τη διαδικασία. Τέλος η έρευνα καταλήγει στα εξής:

- 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).
- 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.
- 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. Τα συγκρινόμενα και πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους. Για να επιτύχετε ένα καλό φινίρισμα επιφάνειας, συνιστάται υψηλή ταχύτητα σάρωσης στο χαμηλότερο επίπεδο ισχύος.
- 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 είναι 83,84% και 76,69% αντίστοιχα. Ωστόσο, η επίδραση της συχνότητας έχει ελάχιστη τιμή που καθορίζεται από την τιμή p (0,367). Η ποσοστιαία συνεισφορά της συχνότητας είναι 3,47% και 0,56% στην τραχύτητα και βάθος χάραξης, αντίστοιχα.
- 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 δείχνουν ότι τα προβλεπόμενα αποτελέσματα (τα αποτελέσματα των δοκιμών) είναι πολύ κοντά στην πραγματική τιμή. Αυτό σημαίνει ότι η τραχύτητα εξηγεί το μοντέλο της διαδικασίας χάραξης με λείζερ για το Vanadis 10. Εκτός αυτού, τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα πειράματα δοκιμής εξηγούν επίσης το μοντέλο για το τελικό βάθος χάραξης.

Στην έρευνα που πραγματοποίησαν οι Matti Manninen, Marika Hirvimäki, Ilkka Poutiainen και Antti Salminen [3], είχαν σαν στόχο την πειραματική διερεύνηση της συσχέτισης που έχει η διάρκεια του παλμού (παράμετρος της διεργασίας, μέτρηση σε ns) με την αποτελεσματικότητα σε ανοξειδωτο χάλυβα 304. Χρησιμοποιήθηκε λείζερ παλμικού τύπου

Ytterbium fiber laser, με μήκος παλμού από 4 έως 200 ns με σταθερή μέση ισχύ 20 W, η συχνότητα επανάληψης παλμού από 1,6 έως 1000 kHz, η μέγιστη ενέργεια παλμού 1 mJ ενώ η διάμετρος της ακτίνας του λέιζερ είναι 40μm. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο ήταν μια πλάκα SAE 304 (ανοξείδωτο χάλυβα) πάχους 1mm. Τα κριτήρια μέτρησης αποτελεσματικότητας της χάραξης με λέιζερ ήταν η επίτευξη υψηλού ρυθμού απομάκρυνσης υλικού (MMR), η καλή οπτική ποιότητα της χαραγμένη επιφάνεια και η χαμηλή θερμοκρασία κατά την διάρκεια της επεξεργασίας. Ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού μετρήθηκε με ζύγιση των δειγμάτων πριν και μετά από την κατεργασία εγχάραξης. Η οπτική ποιότητα αξιολογήθηκε από μεγεθυμένες εικόνες. Η θερμοκρασία επιφάνειας των δειγμάτων μετρήθηκε από δύο Laser θερμόμετρα τύπου K που βρίσκονταν κοντά στην περιοχή επεξεργασίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τα τρία αυτά κριτήρια επελέγησαν επειδή είναι τα πιο κρίσιμοι παράγοντες για τον προσδιορισμό της συνολικής αποτελεσματικότητας μιας κατεργασίας χάραξης με λέιζερ στη βιομηχανική παραγωγή. Μια βέλτιστη κατεργασία θα πρέπει να είναι γρήγορη, ιδανικά χωρίς την δημιουργία ζώνης επηρεασμού θερμότητας (HAZ) και όσο το δυνατόν πιο ακριβέστερη και καθαρή (τραχύτητα επιφάνειας). Ο λόγος που αυτή η μελέτη επικεντρώνεται μόνο σε παλμούς νανοδευτερολέπτων (nanosecond) είναι επειδή τα nanosecond παλμικά λέιζερ χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία και παρόλα αυτά υπάρχει έλλειψη επιστημονικών ερευνών. Επιπροσθέτως, τα nanosecond λέιζερ τυπικά προσφέρουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη διάρκεια του παλμού, παρόλο που είναι δύσκολο να κατανοηθεί ποια είναι τα οφέλη και τα μειονεκτήματα στις εναλλαγές της διάρκειας των παλμών και πόση διαφορά μπορεί να υπάρχει μεταξύ τους. Σε όλα τα πειράματα, η ακτίνα λέιζερ κινήθηκε επανειλημμένα σε ένα τετράγωνο σχήμα 4 × 4 mm, αφήνοντας κενά χάραξης 20 μm σε δύο διαστάσεις. Χρησιμοποιήθηκε σταθερά η μέγιστη μέση ισχύς και το βάθος ορίστηκε στα 0,2mm, η μέγιστη μέση ισχύς επιλέχθηκε επειδή η μελέτη αυτή είχε ως στόχο την πιο αποτελεσματική και βέλτιστη αφαίρεση υλικού ενώ όσο αναφορά το βάθος εγχάραξης στα 0,2 mm έχει να κάνει με το ότι χρησιμοποιείται ευρέως για πολλές εφαρμογές, π.χ. στην κατασκευή καλουπιών ή στη χημική βιομηχανία.

Διεξήχθησαν οκτώ πειράματα, ένα για κάθε διαφορετική διάρκεια παλμού. Η ταχύτητα της δέσμης λέιζερ διατηρήθηκε στα 2000 mm / s εκτός από τις περιπτώσεις όπου η διάρκεια παλμών όπου το PRR (ρυθμός επανάληψης παλμών) ήταν τόσο χαμηλό ώστε η ταχύτητα έπρεπε να μειωθεί για να διατηρηθεί η ελάχιστη επικάλυψη παλμών. Η ελάχιστη επικάλυψη (PO) παλμών ήταν 50% για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη αφαίρεση του υλικού. Η επικάλυψη παλμών υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$PO = 1 - \frac{v}{PRR \times D} \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

όπου v είναι η ταχύτητα της δέσμης λέιζερ και το D η διάμετρος της ακτίνας. Η παλμική ενέργεια υπολογίστηκε διαιρώντας την ισχύ με ρυθμός επανάληψης παλμών (PRR). Αυτές οι παράμετροι καταρτίζονται στον πίνακα 2.1.

Περίπτωση	Διάρκεια Παλμού (ns)	Ενέργεια Παλμού (mJ)	PRR (kHz)	Επικάλυψη παλμών PO (%)	Ταχύτητα σάρωσης ακτίνας Laser (mm/sec)
1 <sup>η</sup>	4	0.040	500	90	2000
2 <sup>η</sup>	8	0.100	200	75	2000
3 <sup>η</sup>	14	0.160	125	60	2000
4 <sup>η</sup>	20	0.190	105	52	2000

5 <sup>η</sup>	30	0.235	85	50	1700
6 <sup>η</sup>	50	0.333	60	50	1200
7 <sup>η</sup>	100	0.500	40	50	800
8 <sup>η</sup>	200	1.000	20	50	400

Πίνακας 2.1: Παράμετροι του Laser στην πειραματική κατεργασία

Τέλος παίρνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα από τα πειράματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2 οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR) οκταπλασιάζεται καθώς ξεκινάμε από σύντομους προς μεγάλης διάρκειας παλμούς, αλλά παρόλα αυτά δεν είναι πάντα προτιμητέα η ύπαρξη μεγάλης διάρκειας παλμού. Καθώς παρατηρείται άμεση αύξηση της θερμοκρασίας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο καθώς και κακή ποιότητα επιφάνειας. Έτσι εξάγετε το συμπέρασμα ότι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την κατεργασία είναι με την χρήση μεγάλης διάρκειας παλμών για την αφαίρεση του κύριου όγκου του υλικού και βραχύτερους παλμούς για την αποπεράτωση της κατεργασίας, όπου θα επιφέρει και καλύτερη ποιότητα στη τελική επιφάνεια. Φυσικά, σε εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στην αύξηση της θερμοκρασίας, η χρήση παλμών μεγάλης διάρκειας δεν είναι εφικτή.

Περίπτωση	Διάρκεια Παλμού (ns)	Θερμοκρασία (K)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR) (mm <sup>3</sup> /min)	Τελική ποιότητα τεμαχίου (0 έως 10)
1 <sup>η</sup>	4	488	0.27	9.0
2 <sup>η</sup>	8	453	0.33	9.5
3 <sup>η</sup>	14	493	0.38	9.0
4 <sup>η</sup>	20	528	0.41	9.0
5 <sup>η</sup>	30	513	0.48	8.0
6 <sup>η</sup>	50	538	0.76	6.0
7 <sup>η</sup>	100	553	1.47	5.0
8 <sup>η</sup>	200	549	2.26	3.0

Πίνακας 2.2: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα

Παρατηρήθηκε επίσης κάποια ιδιότυπη συμπεριφορά στη διαδικασία. Με βραχείς παλμούς (<20 ns), η θερμοκρασία αυξανόταν σταθερά καθώς συνεχιζόταν η διαδικασία χάραξης, ενώ με μεγαλύτερης διάρκειας παλμούς η θερμοκρασία άρχιζε σταδιακά να μειώνεται αφού αρχικά είχε φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Συμπτωματικά παρατηρήθηκε ότι το σύννεφο πλάσματος που ήταν λευκό-μπλε όταν χρησιμοποιήθηκαν μικρές διάρκειες παλμών συνοδεύονταν ή είχε μετατραπεί σε ένα κίτρινο-πορτοκαλί σύννεφο. Επιπρόσθετα, τα δεδομένα θερμοκρασίας δείχνουν ένα αρχικό θερμικό σοκ που συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερης διάρκειας παλμοί, το οποίο συμβαίνει λόγω της ταχείας οξειδώσεως του επιφανειακού στρώματος του τεμαχίου κατεργασίας. Τέλος από την οπτική ανάλυση των δειγμάτων παρατηρήθηκε ότι η λιωμένη και έπειτα στερεοποιημένη δομή του πυθμένα φαίνεται να έχει ρωγμές και πόρους στην επιφάνεια όταν χρησιμοποιήθηκε διάρκεια παλμών  $\leq 50$  ns. Αυτά εμφανίζονται ως αποτέλεσμα των κύκλων ταχείας θήξης και επαναστερεοποίησης, αλλά μπορεί επίσης να είναι ένα σημάδι αφαίρεσης ανισόρροπου υλικού.

Στην έρευνα που πραγματοποιήσαν οι S.L. Campanelli, G. Casalino, N. Contuzzi [4], είχε σαν στόχο την διεξαγωγή μιας πολυκριτήρια ανάλυση βελτιστοποίησης της κατεργασίας με χρήση Laser σε κράμα αλουμινίου 5754. Όλες οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν με μία μηχανή λέιζερ Nd: YAG με μήκος κύματος 1064 nm. Η ταχύτητα σάρωσης κυμαίνεται από 0 – 5000 mm/sec ενώ η συχνότητα των παλμών από 0 – 65 kHz. Το λέιζερ ήταν σε θέση να λειτουργεί τόσο σε συνεχή όσο και με παλμικό τρόπο, φθάνοντας αντίστοιχα σε μέγιστη ισχύ 100 W και 20 W. Η διάμετρος της ακτίνας λέιζερ ήταν σταθερά στα 70  $\mu$ m. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία ήταν κράμα αλουμινίου – μαγνησίου (5754) και η μορφή τους σε κυλινδρικά φύλλα. Τα πειράματα προγραμματίστηκαν ώστε να υπάρξει η ταυτόχρονη μελέτη των επιδράσεων των εμπλεκόμενων παραμέτρων στην επιτυχία της κατεργασίας από την άποψη του βάθους του αφαιρεθέντος υλικού, τον ρυθμό αφαίρεσης του υλικού και της τραχύτητας της τελικής επιφάνειας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο στρατηγικές σάρωσης της δέσμης λέιζερ για την αφαίρεση υλικού: (α) παράλληλος τρόπος χάραξης, ο οποίος χαρακτηρίζεται από παράλληλες κατευθύνσεις χάραξης προς διεύθυνση x, (β) μικτός τρόπος χάραξης, που χαρακτηρίζεται από παράλληλες κατευθύνσεις χάραξης προς διεύθυνση x και y και κατευθύνσεις χάραξης με κλίση  $\pm 45^\circ$ . Η μέση ισχύς ρυθμίστηκε στη μέγιστη τιμή των 20 W, ο αριθμός των αφαιρεθέντων στρωμάτων (layers) ήταν σταθερός και ορίστηκε σε 25. Το αποτέλεσμα της κατεργασίας σχηματικά ήταν τετράγωνα διαστάσεων 15 x 15 mm. Η έρευνα διεξήχθη χρησιμοποιώντας ένα φάσμα πειραμάτων, το οποίο χαρακτηρίζεται από τρεις παράγοντες (ταχύτητα σάρωσης, συχνότητα παλμών και τρόπο χάραξης), με τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ταχύτητας σάρωσης (400, 800, 1200 και 1600 mm/sec), τρία επίπεδα για τη συχνότητα των παλμών (25, 30, 40 kHz) και δύο επίπεδα στρατηγικής σάρωσης (0, 1) για ένα σύνολο είκοσι τεσσάρων συνδυασμών των παραμέτρων. Η στρατηγική σάρωσης 0 αναφέρεται στο παράλληλο τρόπο χάραξης και η στρατηγική σάρωσης 1 στο μικτό τρόπο χάραξης. Ο πίνακας 2.3 δείχνει το γενικό πλάνο των πειραμάτων.

Περίπτωση	Στρατηγική χάραξης (0-1)	Ταχύτητα σάρωσης ακτίνας Laser (mm/sec)	Συχνότητα των παλμών (kHz)	Επικάλυψη παλμών PO (%)
01	0	400	25	77
02	0	400	30	81
03	0	400	40	86
04	0	800	25	54
05	0	800	30	62
06	0	800	40	71
07	0	1200	25	31
08	0	1200	30	43
09	0	1200	40	57
10	0	1600	25	9
11	0	1600	30	24
12	0	1600	40	43
13	1	400	25	77
14	1	400	30	81
15	1	400	40	86
16	1	800	25	54
17	1	800	30	62

18	1	800	40	71
19	1	1200	25	31
20	1	1200	30	43
21	1	1200	40	57
22	1	1600	25	9
23	1	1600	30	24
24	1	1600	40	43

Πίνακας 2.3: Γενικό πλάνο πειραμάτων

Το hatch distance (Hd) υποδεικνύει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών λείζερ. Σχετίζεται με την ταχύτητα σάρωσης και τον ρυθμό επανάληψης με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Hd = \frac{v}{F_p} \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

Ο βαθμός επικάλυψης (overlap) των μεμονωμένων παλμών λείζερ μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη εξίσωση, η οποία λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα σάρωσης, τον ρυθμό επανάληψης καθώς και την διάμετρο της ακτίνας λείζερ:

$$O = \left[ 1 - \frac{v}{F_p} \right] \% \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

Το βάθος της χάραξης μετρήθηκε για κάθε συνδυασμό παραμέτρων διεργασίας από ένα οπτικό μικροσκόπιο Optiphot-2 Nikon. Η τιμή του Δz αναφέρεται στο βάθος χάραξης μετά από το μονό πέρασμα (layer) όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.4, όπου n είναι ο αριθμός των αφαιρεθέντων στρωμάτων (25 σε αυτή την περίπτωση) και Δzn είναι η τελική τιμή βάθους χάραξης που μετράτε μετά από n περάσματα (layers).

$$\Delta Z = \frac{\Delta Z n}{n} \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού (MRR) υπολογίστηκε για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων ως ο λόγος μεταξύ του όγκου του αφαιρεθέντος υλικού και του χρόνου κατεργασίας. Οι δοκιμές τραχύτητας διεξήχθησαν σε όλα τα δείγματα κατά μήκος των κατευθύνσεων x και y, προκειμένου να καθοριστεί η μέση τιμή του στο επίπεδο xy για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων κατεργασίας. Ο δείκτης Ra μετρήθηκε για τραχύτητα χρησιμοποιώντας το όργανο Taylor-Hobson Surtronic 25.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των εξεταζόμενων παραγόντων διεργασίας στην ποιότητα των τεμαχίων, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της διασποράς (ANOVA). Οι παράγοντες που εξετάστηκαν ήταν το βάθος χάραξης Δz, ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού (MRR) και η τραχύτητα της τελικής επιφάνειας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μας δείχνουν ότι είναι δυνατή η μείωση του χρόνου κατεργασίας παράλληλα με μια καλή ποιότητα επιφάνειας λαμβάνοντας υπόψη παράλληλα και τη βελτιστοποίηση του ρυθμού απομάκρυνσης υλικού (MRR). Η ζώνη αποδοτικότητας περιλαμβάνει τιμές παραμέτρων διεργασίας που δεν αντιστοιχούν στη μεγιστοποίηση του βάθους, αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να γίνουν κατανοητά παρατηρώντας ότι η ταχύτητα σάρωσης σε μια κατεργασία χάραξης είναι μια αρκετά σημαντική παράμετρος.

Στην πραγματικότητα, σε χαμηλότερες ταχύτητες, το βάθος μεγιστοποιείται, αλλά ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση αφαίρεσης ενός στρώματος (layer) είναι υψηλότερος ενώ σε υψηλότερες ταχύτητες το βάθος του αφαιρεθέντος υλικού είναι χαμηλότερο, αλλά το μονό στρώμα αφαιρείται γρηγορότερα. Έτσι, οι ταχύτητες σάρωσης που αντιστοιχούν στη ζώνη αποδοτικότητας αντιπροσωπεύουν ενδιαμέσες τιμές που είναι σε θέση να μεγιστοποιήσουν το MRR και να βελτιώσουν την ποιότητα της επιφάνειας.

Εν κατακλείδι η μεθοδολογία βελτιστοποίησης έδειξε ότι οι τιμές των παραμέτρων διεργασίας  $F$  και  $v$  που μεγιστοποιούν το βάθος χάραξης  $\Delta z$  διαφέρουν από εκείνες που μεγιστοποιούν το MRR. Επομένως, προκειμένου να βελτιωθεί η παραγωγικότητα, είναι απαραίτητο να μεγιστοποιηθεί το MRR.

Μέσο των πειραμάτων ήταν δυνατός ο προσδιορισμός ενός εύρους για τις παραμέτρους της διαδικασίας  $F$  και  $v$  στο οποίο μεγιστοποιήθηκε η παραγωγικότητα της διαδικασίας και ελαχιστοποιήθηκε η τραχύτητα της επιφάνειας (ζώνη αποτελεσματικότητας).

Η συγκριτική ανάλυση των δύο στρατηγικών χάραξης έδειξε ότι η χρήση μίας παράλληλης στρατηγικής χάραξης σε σχέση με τον μικτό τρόπο χάραξης περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου εύρους απόδοσης των παραμέτρων διεργασίας.

Η ανάλυση της φθοράς λείζερ υποδεικνύει ότι οι υψηλότερες τιμές του MRR αντιστοιχούν στις υψηλότερες τιμές των ροών ( $F > 15 \text{ J/cm}^2$ ). Ο βαθμός επικάλυψης (overlap,  $O\%$ ) επηρέασε σημαντικά το SR. Οι υψηλότερες τιμές SR παρατηρήθηκαν για χαμηλότερο βαθμό επικάλυψης και στις δύο στρατηγικές σάρωσης. Επιπλέον, υπήρξε ένα διάστημα τιμών τιμών του βαθμού επικάλυψης, μεταξύ 40% και 70%, στις οποίες το SR μειώθηκε σε τιμές τόσο χαμηλές όσο 5 mm. Η μικρότερη τιμή του SR ήταν 2,6 mm που αντιστοιχεί σε επικάλυψη μεταξύ 40% και 60%.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή την έρευνα παρέχουν μια εικόνα για τους αντικρουόμενους στόχους μεγιστοποίησης της παραγωγικότητας της διαδικασίας παράλληλα με τη βελτίωσης της ποιότητας της επιφάνειας.

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Daniel Teixidor, Ines Ferrer, Joaquim Ciurana, Tugrul Ozel [5], η ερευνητική προσπάθεια επικεντρώνεται στην κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας φρεζαρίσματος με λείζερ στην τελική γεωμετρική και επιφανειακή ποιότητα των μικρών αυλακώσεων που κατασκευάστηκαν σε κατεργαζόμενο τεμάχιο χάλυβα AISI H13. Η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων της διεργασίας είναι εξαιρετικά σημαντική για την επιτυχή απομάκρυνση του υλικού και την υψηλή διαστατική και επιφανειακή ποιότητα για εφαρμογές μήτρας-καλουπιού μικρού μεγέθους. Για τον λόγο αυτό διεξήχθησαν μια σειρά πειραμάτων σε ένα παλμικό λείζερ με χρήση χάλυβα AISI H13 ως υλικού εργασίας. Αυτό το υλικό επιλέχθηκε επειδή χρησιμοποιείται συνήθως για ένθετα καλούπια. Τα πειράματα διεξήχθησαν με μηχανικές κατεργασίες μικρο-διαύλων πλάτους 200  $\mu\text{m}$  και βάθους 50  $\mu\text{m}$ . Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση μηχανής Deckel Maho Lasertec 40, μια παλμική μηχανή laser στερεής κατάστασης Nd: YAG, με μέση ισχύ λείζερ 100 W, μήκος κύματος 1064 nm και με διάμετρο σημείου δέσμης λείζερ 0.03 mm. Οι διάφορες σειρές των μικρών αυλακώσεων κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ένα φάσμα παραμέτρων διεργασίας όπως ταχύτητα σάρωσης (scanning speed, SS), ένταση παλμού (pulse intensity, PI) και συχνότητα παλμών (pulse frequency, PF). Η σχέση μεταξύ παραμέτρων διεργασίας και

ποιοτικών χαρακτηριστικών μελετήθηκε με πειραματική μοντελοποίηση. Η πολυκριτήρια ανάλυση για τα υλικά και τις παραμέτρους της διεργασίας που θα επιλεγούν, έχοντας σαν στόχο την καλή ποιότητα επιφάνεια και την διαστατική ακρίβεια, έγινε με την χρήση μιας εξελικτικής μεθόδου υπολογισμού που βασίζεται στη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization ,PSO).

Στα πειράματα η ταχύτητα σάρωσης (SS), η συχνότητα παλμών (PF) και το επίπεδο έντασης παλμού (PI) ενός ποσοστού της ιδανικής μέγιστης έντασης παλμού θεωρήθηκαν ως παράμετροι εισόδου.

Κατά την διεργασία με λέιζερ η προσπίπτουσα δέσμη λέιζερ κατευθύνεται στο υλικό που πρόκειται να αφαιρεθεί. Μια εστιασμένη, υψηλής ενέργειας και έντασης δέσμη δημιουργείται για να εξαχνώσει το υλικό που πρέπει να αφαιρεθεί. Αν και το επίπεδο έντασης παλμού στην κατεργαζόμενη επιφάνεια δεν μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ένα ιδανικό επίπεδο έντασης παλμού, με βάση τα τεχνικά δεδομένα του συστήματος λέιζερ, μπορεί να δοθεί από:

$$PI = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \quad (\text{Εξίσωση 2.5})$$

όπου P είναι η ισχύς λέιζερ (100 W) και d είναι η διάμετρος της δέσμης λέιζερ (0,03 mm). Η ιδανική ένταση παλμού εκτιμήθηκε σε 141,4 kW/mm<sup>2</sup>. Επιπλέον, η ιδανική μέγιστη παλμική ισχύς (PPP) μπορεί να καθοριστεί από:

$$PPP = \frac{P}{\tau} \quad (\text{Εξίσωση 2.6})$$

όπου P είναι η ισχύς λέιζερ (100 W) και τ είναι η διάρκεια του παλμού λέιζερ (10 ns). Για τα χαρακτηριστικά λέιζερ που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη, η μέγιστη παλμική ισχύς υπολογίζεται ότι είναι 10 MW/s.

Η μέτρηση διαστάσεων εκτελέστηκε με στερεοσκοπικό μικροσκόπιο ZEISS SteREO Discovery.V12 προσαρτημένο στην ψηφιακή φωτογραφική μηχανή DeltaPix για τη συλλογή ψηφιακών εικόνων με υψηλή ανάλυση και αντίθεση και πολύ καλή ποιότητα εγγραφής του χρώματος. Αυτές οι εικόνες υποβλήθηκαν σε αριθμητική επεξεργασία χρησιμοποιώντας το λογισμικό Quartz PCI.

Η μέτρηση τραχύτητας της επιφανείας Ra επί της κάτω επιφάνειας του μικρο-καναλιού διεξήχθη με το τραχύμετρο Mitutoyo SV2000 Surftest, με αποκοπή 0,8 mm, σύμφωνα με το ISO/DIS 4287/1E. Η παράμετρος Ra επιλέχθηκε σε σχέση με άλλες παραμέτρους τραχύτητας για να μελετηθεί η τραχύτητα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου επειδή χρησιμοποιείται ευρέως στην επιστημονική κοινότητα. Η ικανότητα ενός προφιλόμετρου να λάβει τις πιο ακριβείς και γρήγορες μετρήσεις επιφάνειας επηρεάζεται από την μειωμένη κλίμακα των μικρο-καναλιών. Για να αντισταθμιστεί αυτή η δυσκολία, έγιναν μετρήσεις χρησιμοποιώντας μεγεθυντικό φακό και έντονο φωτισμό προς την κατεύθυνση του τεμαχίου.

Για τον προσδιορισμό των επιδράσεων της έντασης των παλμών, της ταχύτητας σάρωσης και της συχνότητας των παλμών έγινε ένας πειραματικός παραγοντικός σχεδιασμός ο οποίος οδήγησε σε ένα σύνολο 54 μοναδικών συνδυασμών. Οι συντελεστές και τα επίπεδα των παραγόντων συνοψίζονται στον πίνακα 2.4. Από την πειραματική διαδικασία προέκυψαν συνολικά ένας αριθμός 54 μικρό αυλακώσεων, ακολουθώντας το πειραματικό



σχέδιο που προαναφέρθηκε. Οι μεταβλητές που προκύπτουν είναι η τραχύτητα της επιφάνειας, το  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) στο κάτω μέρος της διαμέτρου πλάτους μικροκαναλιού ( $\mu\text{m}$ ), και η διάσταση βάθους του μικροκαναλιού ( $\mu\text{m}$ ).

Παράμετροι	Επίπεδα Παραμέτρων		
Scanning speed (SS) (mm/s)	200	225	250
	275	300	325
	350	375	400
Pulse intensity (PI) (%)	35	40	45
Pulse frequency (PF) (kHz)	35	40	-

Πίνακας 2.4: Παράμετροι και επίπεδα παραμέτρων

Η τραχύτητα της επιφάνειας μετρήθηκε σε πέντε διαφορετικά σημεία κάθε μικρο-καναλιού για να ληφθεί η μέση τιμή ολόκληρου του καναλιού και η μεταβολή κατά μήκος του. Στη συνέχεια, κάθε κανάλι κόπηκε σε τρία μέρη για να ληφθούν τα προφίλ διατομής όπου οι μετρήσεις βάθους και πλάτους λήφθηκαν από τις ψηφιακές εικόνες που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας το λογισμικό που περιγράφηκε προηγουμένως. Και πάλι, ελήφθησαν πέντε διαφορετικές μετρήσεις, αναλογικά κατανεμημένες κατά μήκος του βάθους και του πλάτους. Η μέση τιμή ( $\mu$ ) και η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα επεξεργασμένα χαρακτηριστικά για όλους τους συνδυασμούς μεταβλητών παραγόντων αποτέλεσαν τα δεδομένα για την μετέπειτα ανάλυση.

Η επίδραση των παραμέτρων της ταχύτητας σάρωσης και της έντασης του παλμού στο βάθος των μικρο-καναλιών δείχνει ότι επιτυγχάνεται η πλησιέστερη επιθυμητή τιμή βάθους με τη χαμηλότερη ταχύτητα σάρωσης και τον υψηλότερο συνδυασμό έντασης παλμών. Είναι σαφές ότι όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα σάρωσης, τόσο περισσότερο χρόνο η δέσμη λέιζερ πρέπει να επεξεργάζεται την επιφάνεια και να επιτυγχάνει υψηλότερα βάθη. Η ένταση του παλμού παίζει σημαντικό ρόλο στις τιμές βάθους. Οι υψηλότερες εντάσεις παλμών παράγουν βαθύτερες αυλακώσεις με κάθε πέρασμα δέσμης λέιζερ ενώ η συχνότητα των παλμών δεν φαίνεται να επηρεάζει την τιμή βάθους.

Η επίδραση της ταχύτητας σάρωσης και της έντασης του παλμού στο πλάτος των μικρο-καναλιών, σε αντίθεση με το βάθος, οι πειραματικές τιμές είναι πιο κοντά στο επιθυμητό πλάτος (0,2 mm) όταν η ταχύτητα σάρωσης είναι υψηλή και η ένταση του παλμού είναι χαμηλή. Αυτά τα αντίθετα αποτελέσματα στο βάθος και το πλάτος οφείλονται στη μορφολογία των αυλακώσεων που είναι πραγματικά δύσκολο να επιτευχθούν. Έτσι, όταν αυξάνεται το βάθος στο κανάλι, το πλάτος μειώνεται και επιτυγχάνεται μια μικρότερη μέση τιμή πλάτους. Επίσης, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα παλμών, τόσο υψηλότερο είναι το πλάτος των μικρο-καναλιών.

Η επίδραση της ταχύτητας σάρωσης και της έντασης παλμού στην τραχύτητα της επιφάνειας είναι λιγότερο ξεκάθαρη. Παρόλα αυτά παρατηρήθηκε ότι οι καλύτερες τιμές τραχύτητας επιφάνειας ελήφθησαν με συνδυασμό της υψηλότερης έντασης παλμού και της υψηλότερης ταχύτητας σάρωσης. Η επίδραση της ταχύτητας σάρωσης στην τραχύτητα της επιφάνειας στις διαδικασίες μηχανικής επεξεργασίας λέιζερ μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: η ακτίνα λέιζερ μπορεί να μην επηρεάζει την τραχύτητα της επιφάνειας

τόσο πολύ όταν η κίνηση είναι γρήγορη, αλλά όταν η κίνηση είναι αργή, η τραχύτητα της επιφάνειας δεν βελτιώνεται. Ωστόσο, οι πειραματικές τιμές δεν δείχνουν τόσες πολλές διαφορές λόγω της κλίμακας όπου κυμαίνονται μεταξύ 0,4 και 0,55 mm. Η παράμετρος της συχνότητας των παλμών δεν έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας.

Τέλος η ανάλυση δείχνει ότι το εύρος των τιμών των παραμέτρων ελέγχου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο για να δοθούν αποτελέσματα κοντά στο βέλτιστο. Εντούτοις, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα:

1. Αν και οι διαστάσεις και το σχήμα των μικρο-καναλιών που παρήχθησαν μέσω της κατεργασίας με λέιζερ παρουσιάζουν μεταβολές, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η μηχανική κατεργασία με λέιζερ είναι μια διαδικασία ικανή να παράγει αισθητά μικρές γεωμετρίες.
2. Η κατεργασία με λέιζερ είναι μια σύνθετη διαδικασία και δεν είναι εύκολο να βρεθεί ο σωστός συνδυασμός των παραμέτρων διεργασίας για την επίτευξη διαφορετικών ποιοτικών αποτελεσμάτων.
3. Μια πολυκριτήρια μέθοδο ταξινόμησης και επιλογής παραμέτρων μπορεί να βρει τον καλύτερο συνδυασμό εκείνων που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αποτελεσμάτων μεταξύ καθορισμένων περιοχών ποιότητας.
4. Οι αναλύσεις βέλτιστων λύσεων στο μεταβλητό χώρο αποφάσεων δείχνουν ότι οι συγκεκριμένες βέλτιστες παράμετροι κατεργασίας είναι στα όρια του αντικειμενικού χώρου λειτουργίας.

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους S.L. Campanelli, A.D. Ludovico, C. Bonserio, P. Cavalluzzi, M. Cinquepalmi [6], σκοπός της οποίας ήταν να εκτιμηθεί η επίδραση των κύριων παραμέτρων που εμπλέκονται στη διαδικασία της εξάχνωσης από την άποψη του βάθους του αφαιρεθέντος υλικού και της τραχύτητας της επιφάνειας. Ερευνήθηκε ο καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων που οδήγησε στη σύγχρονη μεγιστοποίηση του αφαιρεθέντος υλικού και την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν σε δείγματα κράματος αλουμινίου-μαγνησίου χρησιμοποιώντας μηχανή σήμανσης λέιζερ (Trumark VMc5 από Trumpf) εφοδιασμένη με παλμικό λέιζερ Nd: YVO<sub>4</sub> που έχει μήκος κύματος 1064 nm και μέση ισχύ λέιζερ 30 W. Στην συγκεκριμένη μηχανή VMc5 ήταν δυνατό να αλλάξει η μέγιστη ισχύς (peak power, PP), η συχνότητα παλμού (pulsing frequency, Fp), η ταχύτητα σάρωσης (scan speed, V), η επικάλυψη (overlapping, O), όπου:

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

$$O = \frac{V}{F_p} \quad (\text{Εξίσωση 2.7})$$

Για την παράλληλη μελέτη των επιδράσεων των εμπλεκόμενων παραμέτρων στην επιτυχία της διαδικασίας αφαίρεσης υλικού και επιφανειακής τραχύτητας σχεδιάστηκαν παραγοντικές μελέτες. Διεξήχθησαν δύο διαφορετικές αναλύσεις για τις παραμέτρους εξόδου: βάθους του αφαιρεθέντος υλικού και τραχύτητα της επιφάνειας. Οι προκαταρκτικές δοκιμές έδειξαν ότι θα μπορούσαν να επιτευχθούν σημαντικά αποτελέσματα μόνο με τον καθορισμό της μέγιστης τιμής έντασης και την διάρκεια των παλμών σε 5 ns. Ο καθορισμός της μέγιστης έντασης επιτρέπεται να διατίθεται πάντοτε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας με μέση ισχύ 30 W, αυτό επέτρεψε την επίτευξη μεγαλύτερης ενεργειακής ώθησης και μεγαλύτερης δεσμευόμενης ποσότητας ενέργειας στο κατασκευασμένο υλικό. Ρύθμιση της διάρκειας του παλμού με την ελάχιστη τιμή των 5 ns επέτρεψε την επίτευξη μεγαλύτερης μέγιστης ισχύος από εκείνη που είναι διαθέσιμη σε κανονική λειτουργία παλμού: αυτό συμβαίνει λόγω του τρόπου λειτουργίας του λέιζερ που σε αυτή την περίπτωση λειτουργεί σε τρόπο Q-switch, στην πραγματικότητα οι μεγαλύτερες τιμές διάρκειας παλμού μειώνουν κυρίως την ενέργεια του μοναδικού παλμού έτσι παρά την αύξηση της μέγιστης ισχύος, μεταφέρεται στο υλικό μικρότερη ποσότητα ενέργειας και αυτή η ποσότητα συχνά δεν επαρκεί για την εξάχνωση. Η λειτουργία σε τρόπο λειτουργίας Q-switch δεν είναι κατάλληλη όταν επιθυμείτε ομοιόμορφη απομάκρυνση υλικού, οπότε σε αυτή την περίπτωση είναι βολικό να λειτουργούν με χαμηλές τιμές διάρκειας παλμού.

Επίσης μελετήθηκε η αλληλοεπίδραση των παραγόντων: βαθμός επικάλυψης (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 η ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA). Το γενικό γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για το ANOVA και η τιμή πιθανότητας α ορίστηκε στο 0,01. Δύο παρατηρήσεις έγιναν: αμφότεροι οι παράγοντες επηρεάζουν το τελικό βάθος αφαιρεθέντος υλικού καθώς και η μέγιστη τιμή στο τελικό βάθος αφαιρεθέντος υλικού υφίσταται γύρω από την τιμή  $F_p = 30 \text{ KHz}$ . Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων. Η αλληλεπίδραση είναι υψηλότερη για χαμηλές τιμές του βαθμού επικάλυψης (overlapping) όπου υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση. Η μέγιστη τιμή βάθους αφαιρεθέντος υλικού για ένα μόνο στρώμα επιτυγχάνεται για την ελάχιστη επικάλυψη  $O = 5 \mu\text{m}$  και  $F_p = 30 \text{ kHz}$ .

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 από  $45^\circ$  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 το τέταρτο τύπο σάρωσης, τη συχνότητα που έχει οριστεί σε μέγιστη τιμή 10 kHz και τον βαθμό επικάλυψης που έχει ρυθμιστεί στα 20  $\mu\text{m}$ . Τα αποτελέσματα για τη βελτιστοποίηση της τραχύτητας είναι ακριβώς αντίθετα στα 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, δείχνει ότι είναι δυνατή η πραγματοποίηση χαμηλής τραχύτητας (μικρότερη από

7  $\mu\text{m}$ ) με το μέγιστο βάθος αφαιρεθέντος υλικού, που λαμβάνεται για  $O=5\text{ }\mu\text{m}$  και  $F_r=30\text{ kHz}$ .

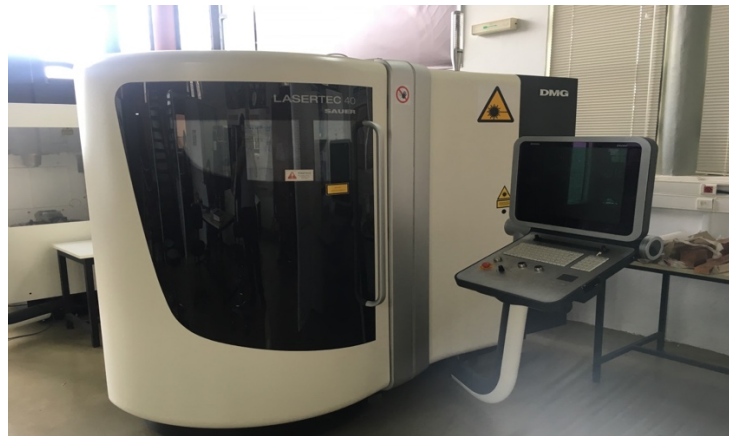
Αυτή η ρύθμιση παραμέτρων επιτρέπει την υλοποίηση εξαρτημάτων με καλό φινίρισμα επιφάνειας που χαρακτηρίζεται από μέσο βάθος αφαίρεσης υλικού  $DP=17,9\text{ }\mu\text{m}$ .

Συνοψίζοντας η ποιότητα της διαδικασίας αφαίρεσης μπορεί να μετρηθεί με βάση το βάθος αφαιρεθέντος υλικού και την τραχύτητα επιφάνειας. Εάν απαιτείται γρήγορη κατεργασία, η ποσότητα αφαιρεθέντος υλικού πρέπει να μεγιστοποιηθεί, επομένως αυτό επιτυγχάνεται για βαθμός επικάλυψης (overlapping)  $O=5\text{ }\mu\text{m}$  και τη μέγιστη συχνότητα  $F_r=30\text{ kHz}$ . 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. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΞΑΧΝΩΣΗΣ

#### 3.1 Κέντρο κατεργασίας DMG MORI Lasertec 40

Η Lasertec 40 είναι η εργαλειομηχανή CNC η οποία χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής. Πρόκειται για ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας τριών γραμμικών και δύο οπτικών αξόνων. Διαθέτει παλμικό Ytterbium fibre τύπου laser με μέγιστη μέση ισχύ τα 20 Watt. Στο [σχήμα 3.1](#) παρουσιάζεται η εργαλειομηχανή Lasertec 40. Όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.2](#) διαθέτει πλήρης προστασία καμπίνας έχοντας ενσωματωμένο το παράθυρο ασφαλείας laser safety glass 1 στην συρόμενη πόρτα της καμπίνας. Πρόκειται για ένα αυτοματοποιημένο CNC κέντρο κατεργασίας με δυνατότητα προγραμματισμού καθοδήγησης μέσω των προγραμμάτων LpsWin και LaserSoft 3D (χρησιμοποιώντας αρχεία τύπου .stl και .dxf). Ο έλεγχος της μηχανής και της κατεργασίας 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 (βλέπε [σχήμα 3.3](#)).



Σχήμα 3.1: Κέντρο κατεργασίας Lasertec 40



Σχήμα 3.2: Συρόμενη πόρτα της καμπίνας με ενσωματωμένο το παράθυρο ασφαλείας



Σχήμα 3.3: Ψηφιακό κέντρο ελέγχου

Οι διαστάσεις και το βάρος τη μηχανής είναι:

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

Στο πίσω μέρος του κέντρου κατεργασίας υπάρχει ένας μικρός πίνακας βλέπε [σχήμα 3.4](#). Ο οποίος έχει τον διακόπτη για την γενική παροχή ρεύματος στη μηχανή και για τον φωτισμό του εσωτερικού θαλάμου. Καθώς και κάποιες βασικές πληροφορίες της μηχανής σχετικά με την παροχή ρεύματος, το βάρος της και τις συνολικές ώρες που έχει τεθεί σε λειτουργία.



Σχήμα 3.4: Γενική παροχή ρεύματος στη μηχανή και φωτισμός του εσωτερικού θαλάμου

Επίσης στο σχήμα 3.5 φαίνεται η κλιματιστική μονάδα η οποία κρατάει σε σταθερή θερμοκρασία το εσωτερικό του θαλάμου κατεργασίας, με σκοπό να μην αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της εκάστοτε κατεργασίας.



Σχήμα 3.5: Μονάδα ψύξης θαλάμου κατεργασίας

Τέλος στο σχήμα 3.6 παρατηρείται το φίλτρο αέρα της σκούπας, που έχει σαν σκοπό να φιλτράρει και να καθαρίζει τον αέρα από τα μικρορινίσματα που ρουφάει η σκούπα από το εσωτερικό του θαλάμου κατεργασίας.



Σχήμα 3.6: Φίλτρο αέρα της σκούπας

Στο εσωτερικό του θαλάμου κατεργασίας στο επάνω μέρος (βλέπε σχήμα 3.7) υπάρχουν τα εξής:

- **Ο φακός του laser**  
Από τον οποίο βγαίνει η δέσμη laser.
- **Η κάμερα καθοδήγησης - Φακός ρυθμιζόμενης φωτεινότητας**  
Η κάμερα καθοδήγησης βοηθάει να πραγματοποιηθεί η εστίαση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και να οριστεί το σημείο "μηδέν" της εκάστοτε κατεργασίας ανάλογα με την γεωμετρία του και την κατεργασία την οποία θέλει να



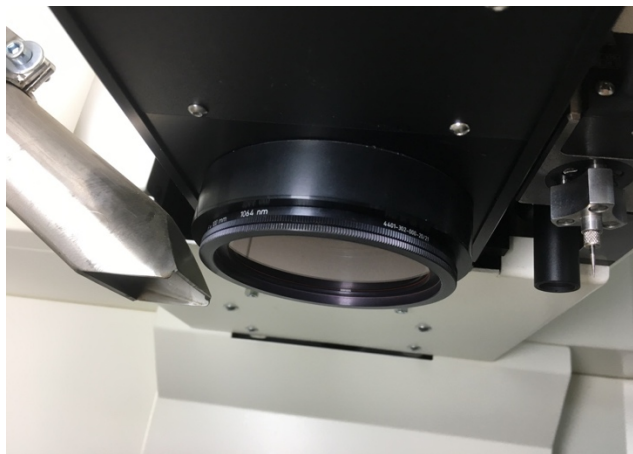
πραγματοποιήσει ο χειριστής της εργαλειομηχανής. Η ανάλυση της κάμερας φτάνει μέχρι τα 4  $\mu\text{m}$ . Βρίσκεται δίπλα στον φακό του laser, ενεργοποιείται μέσω του προγράμματος LaserSoft 3D το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χειριστή της εργαλειομηχανής να ρυθμίσει την αντίθεση, την φωτεινότητα καθώς και τις διαστάσεις του σταυρού εστίασης. Επίσης η κάμερα καθοδήγησης λειτουργεί και σαν φακός ρυθμιζόμενης φωτεινότητας. Χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει το φωτισμός του θαλάμου στο σημείο το οποίο δείχνει κάμερα, με σκοπό ο χειριστής της εργαλειομηχανής να έχει την βέλτιστη εικόνα της επιφάνειας, στην οποία γίνεται ο μηδενισμός και η μετέπειτα επεξεργασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτό είναι αρκετά χρήσιμο καθώς ο βαθμός αντανάκλασης κάθε κατεργαζόμενου τεμαχίου διαφέρει ανάλογα το υλικό και την επιφάνειά του. Ο χειρισμός του φακού πραγματοποιείται από τον πίνακα ελέγχου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.

- **Το ακροφύσιο της σκούπας**

Η οποία μπαίνει σε λειτουργία όταν ξεκινάει η κατεργασία με σκοπό να ρουφάει τα μικρορινίσματα τα οποία δημιουργούνται από την εξάχνωση του υλικού στο σημείο που επικεντρώνεται η δέσμη laser.

- **Το probe**

Το probe είναι ένας κατακόρυφος αισθητήρας, ο οποίος χρησιμοποιείται αφού έχει γίνει ο πρώτος μηδενισμός με την κάμερα καθοδήγησης. Με ακρίβεια της τάξης 1 $\mu\text{m}$  επαληθεύει και συνήθως αντικαθιστά την μέτρηση της κάμερας καθοδήγησης μόνο για τον άξονα Z. Πρόκειται για μια μυτερή ακίδα η οποία με το που δοθεί η εντολή μηδενισμού με probe από τον χειριστή της εργαλειομηχανής κατεβαίνει στον άξονα Z και "ακουμπάει" το τεμάχιο επαληθεύοντας έτσι τον προηγούμενο μηδενισμό που έχει πραγματοποιηθεί με την βοήθεια της κάμερας καθοδήγησης.



Σχήμα 3.7: Εσωτερικό θαλάμου κατεργασίας

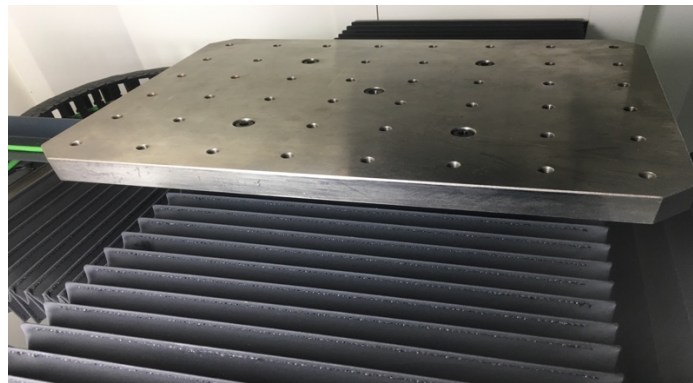




Σχήμα 3.8: Χειρισμός φωτεινότητας κάμερας από το κέντρο ελέγχου

Στο θάλαμο κατεργασίας υπάρχει επίσης η τράπεζα όπου πάνω της τοποθετείται το τεμάχιο που επρόκειτο να επεξεργαστεί (βλέπε [σχήμα 3.9](#)). 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 :  $\approx 12\text{mm/min}$

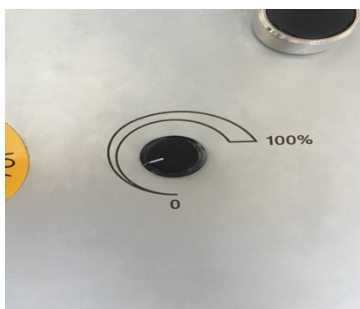


Σχήμα 3.9: Τράπεζα που τοποθετείτε το κατεργαζόμενο τεμάχιο

Η μετακίνηση της τράπεζας πραγματοποιείται με την βοήθεια των κουμπιών «+» και «-» όπως φαίνονται στο [σχήμα 3.10](#). Έχοντας επιλέξει πρώτα ένα από τους τρεις άξονες στον οποίο επρόκειτο να μετακινηθεί η τράπεζα προς τα θετικά «+» ή προς τα αρνητικά «-» του άξονα. Στο [σχήμα 3.11](#) φαίνεται ο μοχλός που είναι ενσωματωμένος στο ψηφιακό κέντρο ελέγχου με τον οποίο ο χειριστής ρυθμίζει την ταχύτητα με την οποία θα κινείται η τράπεζα τόσο κατά την διαδικασία μηδενισμού όσο και στην διάρκεια της κατεργασίας.



Σχήμα 3.10: Τα κουμπιά του κέντρου ελέγχου που μετακινούν την τράπεζα



Σχήμα 3.11: Ρυθμιστής ταχύτητας τραπέζης

Ενσωματωμένα στο ψηφιακό κέντρο ελέγχου υπάρχουν δύο ακόμα σημαντικά κουμπιά της μηχανής, το ένα είναι όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.12](#) για την παροχή ρεύματος στο laser και το κουμπί εκτάκτου τερματισμού λειτουργίας «Emergency - Stop» ([σχήμα 3.13](#)). Ενώ υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού δίσκου / USB καθώς υπάρχουν τέσσερις ενσωματωμένες θύρες usb στην οθόνη του κέντρου ελέγχου ([σχήμα 3.14](#)).



Σχήμα 3.12: Παροχή ρεύματος στο laser



Σχήμα 3.13: Κουμπί εκτάκτου τερματισμού λειτουργίας «Emergency - Stop»



Σχήμα 3.14: Ενσωματωμένες θύρες USB στην οθόνη του κέντρου ελέγχου

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

- Τύπος μετάδοσης δέσμης : Παλμικός
- Τύπος ενεργού μέσο : Ytterbium fibre
- Μέση ισχύς : 20 W
- Διάρκεια παλμού : 100 ns
- Μήκος κύματος : 1064 nm
- Ταχύτητα σάρωσης δέσμης laser : 50-1000 mm/s
- Διάμετρος δέσμης laser : 30  $\mu$ 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 Υλικά

### 3.2.1 Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πειραματική διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν σε τέσσερις μεταλλικές πλάκες οι αλλαγές στις παραμέτρους της διεργασίας laser engraving στο τελικό βάθος εγχάραξης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Αλουμίνιο (7075-T6)
- Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)
- Χάλυβας (P355GH)
- Ορείχαλκος

Η επιλογή των υλικών πάνω στα οποία θα γινόντουσαν τα πειράματα είναι ένα από τα βασικά πράγματα που πρέπει να σκεφτεί ο χειριστής της εργαλειομηχανής. Η επιλογή των υλικών σχετίζεται άμεσα με τις ιδιότητές του (μηχανικές, φυσικές, χημικές και κατασκευαστικές). Οι μηχανικές ιδιότητες καθορίζουν αν τα υλικά είναι κατάλληλα για τις αναμενόμενες συνθήκες φόρτισης κάτω από τις οποίες θα χρησιμοποιούνται. Οι φυσικές όπως είναι η πυκνότητα, αγωγιμότητα, ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες καθώς και οι

χημικές όπως είναι η οξειδωση, τοξικότητα και σταθερότητα καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το υλικό σε κανονικές και ακραίες συνθήκες λειτουργίας που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον σχεδιασμό και την χρήση του. Οι κατασκευαστικές ιδιότητες των υλικών καθορίζουν την κατεργασιμότητα τους, καθώς και το είδος της εκάστοτε κατεργασίας που είναι κατάλληλο για την επίτευξη της επιθυμητής τελικής μορφής.

Τα τεχνικά μεταλλικά υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα **σιδηρούχα** και στα **μη σιδηρούχα**. Τα σιδηρούχα μεταλλικά υλικά περιλαμβάνουν τους χάλυβες και τους χυτοσιδήρους ενώ τα μη σιδηρούχα περιλαμβάνουν κυρίως τα κράματα χαλκού, αλουμινίου, τιτανίου, μαγνησίου, ψευδαργύρου και μολύβδου.

Σχετικά με τα **σιδηρούχα** κράματα υπάρχουν οι χάλυβες που ανάλογα με τη χημική σύστασή τους μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες:** Περιέχουν έως 1.0% Mn και ελάχιστα ποσοστά προσμείξεων θείου (S) και φωσφόρου (P) έως 0.05%. Πρόκειται για μαλακούς χάλυβες (για μικρή περιεκτικότητα C) οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα.
- **Κραματωμένοι χάλυβες:**
  1. Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις έως 2%. Τέτοιοι είναι οι δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.
  2. Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10%.
  3. Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις πάνω από 10%. Τέτοιοι είναι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging), με μεγάλα ποσοστά βολφράμιου (W), βανάδιου (V), μολυβδαίνιου (Mo), χρωμίου (Cr), νικέλιου (Ni) και κοβάλτιου (Co).

Όσον αφορά τον προσδιορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- **Χάλυβες διαμόρφωσης:** Αυτοί υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση).
- **Χυτοχάλυβες:** Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή «χελωνών»

Όσον αφορά την χρήση, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- **Χάλυβες κατασκευών:** Είναι χάλυβες με μικρά σχετικά ποσοστά κραματικών στοιχείων (συνήθως Mn, Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κ.λπ., αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως π.χ. άξονες διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κ.λπ..
- **Ανοξείδωτοι χάλυβες:** Είναι οι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr (>13%) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως π.χ. στη χημική βιομηχανία. Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι σωλήνες, πτερωτές, δοχεία, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό υγρό, καθώς επίσης σε ιατρικά εργαλεία (π.χ. χειρουργικά νυστέρια) και είδη οικιακής χρήσης.
- **Εργαλειοχάλυβες:** Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων ( ), τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικού τόρνου,

φρέζας, πλάνης, κ.λπ.) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης).

- **Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών:** Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών κ.λπ..

### Κραματωμένοι χάλυβες

Προστίθενται επιπλέον στοιχεία στο χάλυβα τα οποία έχουν στόχο να βελτιώσουν τη δομή, τις μηχανικές του ιδιότητες, την αντοχή σε φθορά και διάβρωση. Ορισμένες από τις δράσεις των στοιχείων προσθήκης αναφέρονται παρακάτω:

- Σταθεροποίηση του φερρίτη (α-φερρογόνα στοιχεία): **Cr, Mo, W, V, Si**
- Σταθεροποίηση του ωστενίτη (γ-φερρογόνα στοιχεία): **Mn, Ni, Co**
- Τάση σχηματισμού καρβιδίων (καρβιδιογόνα στοιχεία): **Co, Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Ti**
- Τάση διάσπασης καρβιδίων σε γραφίτη (γραφιτίζοντα στοιχεία): **Ni, Si, Al**
- Μετατόπιση των καμπυλών TTT προς τα δεξιά - αύξηση της εμβαιότητας: **μικρή για Mn, Cr, σημαντική για Ni και μεγάλη Mo, W, V**
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση: **Cr, Ni, Si**
- Τάση εκλέπτυνσης των κόκκων: **V, Al**
- Αύξηση κατεργασιμότητας: **Mn**
- Αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας: **Si**

### Ανοξειδωτοι χάλυβες

Είναι χάλυβες εξαιρετικής αντοχής στην οξείδωση και στη διάβρωση γενικότερα. Η αντοχή τους αυτή οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητά τους σε χρώμιο (Cr) που κυμαίνεται από 12-30% κ.β.. Το Cr αντιδρά χημικά με το οξυγόνο του αέρα και δημιουργείται επιφανειακά το οξείδιο του χρωμίου  $Cr_2O_3$  που προστατεύει το μέταλλο βάσης από την οξείδωση. Το φαινόμενο αυτό προστασίας ονομάζεται παθητικοποίηση. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο ψαθυροποιούνται με παρατεταμένη θέρμανση κοντά στους 900°C, λόγω κατακρήμνισης της σ-φάσης (FeCr), η οποία είναι πολύ σκληρή και εύθραυστη.

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες εμφανίζουν το φαινόμενο της ευαισθητοποίησης κατά την θέρμανσή τους στο διάστημα 600-870°C (π.χ. κατά την συγκόλληση). Στο θερμοκρασιακό αυτό διάστημα σχηματίζονται καρβίδια του χρωμίου, τύπου  $Cr_{23}C_6$  και  $Cr_7C_3$ , στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Η ζώνη γύρω από τα καρβίδια είναι ελαττωμένης περιεκτικότητας σε Cr και επομένως παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε διάβρωση. Έτσι, παρουσία οξέων ή άλλων διαβρωτικών μέσων, η ζώνη γύρω από τα καρβίδια ευαισθητοποιείται και διαβρώνεται με μεγάλους ρυθμούς, με αποτέλεσμα τη χαλάρωση της συνάφειας των ορίων των κόκκων. Η χαρακτηριστική αυτή περίπτωση διάβρωσης ονομάζεται περικρυσταλλική διάβρωση και οδηγεί σε περικρυσταλλική ψαθυρή θραύση του υλικού. Με αυτό το μηχανισμό εξηγείται και η φθορά και τελικά η αστοχία συγκολλήσεων ανοξειδωτων τεμαχίων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Οι τρόποι πρόληψης της ευαισθητοποίησης είναι οι παρακάτω:

- μείωση του ποσοστού του άνθρακα κάτω από 0.03%,
- αύξηση του ποσοστού του χρωμίου πάνω από 16%,

- προσθήκη Nb, Ti τα οποία είναι περισσότερο καρβιδιογόνα από το χρώμιο και έτσι ευνοείται ο σχηματισμός των καρβιδίων τους σε σχέση με τα καρβίδια του χρωμίου,
- θερμική κατεργασία με γρήγορη ψύξη για τη διαλυτοποίηση των καρβιδίων του χρωμίου ( $>900^{\circ}\text{C}$ ) και διατήρησή τους στο στερεό διάλυμα (ωστενίτη) μετά από την ψύξη.

### **Εργαλειοχάλυβες**

Οι εργαλειοχάλυβες είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή και κυρίως μεγάλη σκληρότητα και αντίσταση σε φθορά, όπως π.χ. κοπτικά εργαλεία, μήτρες διαμόρφωσης, έμβολα διέλασης, ράουλα έλασης. Η χρήση γίνεται πάντα μετά από θερμική κατεργασία βαφής - επαναφοράς (επιβελτίωσης). Τα κύρια κραματικά στοιχεία που συμβάλλουν στη μηχανική ενίσχυση είναι τα ακόλουθα: Ni, Cr, Mo, W, V, Mn, Si, Co. Βασικό χαρακτηριστικό των εργαλειοχαλύβων είναι η ύπαρξη καρβιδίων, (δηλαδή ενώσεων μετάλλου-άνθρακα) είτε σφαιρικού σχήματος (π.χ. καρβίδια του μολυβδαινίου και βολφραμίου στους ταχυχάλυβες) είτε ακανόνιστου-μακρόστενου σχήματος (π.χ. καρβίδια του χρωμίου στους εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου).

Η παρουσία σκληρών καρβιδίων (1500-2500 HV) αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα και την αντοχή σε φθορά-τριβή. Επιπλέον σε ορισμένες κατηγορίες (ταχυχάλυβες) επιδρούν και στην εν θερμώ αντοχή. Κατά την καταπόνηση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. σε κοπή υψηλής ταχύτητας, σχηματίζονται νέα καρβίδια (δευτερογενή καρβίδια), αυξάνοντας τη σκληρότητα και την αντίσταση σε φθορά του εργαλείου (δευτερογενής σκλήρυνση).

### **Κράματα χαλκού**

Πηγαίνοντας στα μη σιδηρούχα μεταλλικά υλικά η πρώτη μεγάλη κατηγορία που συναντάμε είναι ο χαλκός οποίος είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, είτε καθαρό είτε με τη μορφή κράματος. Ο χαλκός ως καθαρό μέταλλο έχει κόκκινο χρώμα, κρυσταλλώνεται στο κυβικό ενδροκεντρωμένο (κ.ε.) κρυσταλλικό πλέγμα και λιώνει στους  $1083^{\circ}\text{C}$ . Η πυκνότητά του είναι ίση με  $8.9 \text{ g/cm}^3$ . Ο χαλκός παρουσιάζει μεγάλη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ η ολκιμότητά του είναι τέτοια ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα σε εξαρτήματα διαφόρων γεωμετριών, π.χ. σε ράβδους και σύρματα με διέλαση και σε φύλλα με έλαση. Ο καθαρός χαλκός χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ηλεκτρολογία (κατασκευή συρμάτων, πυκνωτών) λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η καθαρότητα του χαλκού ( $>99.9\%$ ) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για πολλές ηλεκτρολογικές εφαρμογές, εφόσον αυτή επιδρά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η κατασκευή υπερκαθαρού χαλκού γίνεται, είτε θερμικά (σε φούρνους τήξεως), είτε ηλεκτρολυτικά (ηλεκτρολυτικός χαλκός). Υπάρχει επίσης μια ποιότητα χαλκού υψηλών απαιτήσεων που ονομάζεται χαλκός OFHC (Oxygen Free High Conductivity Copper/ Χαλκός Ελεύθερος Οξυγόνου Υψηλής Αγωγιμότητας). Ο χαλκός αυτός περιέχει μικρό ποσοστό φωσφόρου (0.05%) ο οποίος βοηθά στην αποξείδωση κατά την χύτευση, δεσμεύοντας το οξυγόνο και δημιουργώντας στρώμα  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή δημιουργίας  $\text{Cu}_2\text{O}$  κατά την χύτευση το οποίο παρουσία  $\text{H}_2$  οδηγεί σε ψαθυροποίηση του μετάλλου.

Τα κράματα του χαλκού, λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν (ηλεκτρική-θερμική αγωγιμότητα, αντοχή στη διάβρωση, αντοχή στη φθορά-τριβή) και της αυξημένης διαμορφωσιμότητας (της δυνατότητας με την οποία μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν),

χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική, στη μηχανολογία, στην κοσματοποιία, στην ωρολογοποιία, στην αρχιτεκτονική, στην κατασκευή εναλλακτών θερμότητας κ.λπ..

Πολλές φορές, οι προσθήκες κραματικών στοιχείων στο χαλκό βελτιώνουν βασικές ιδιότητες, για παράδειγμα η προσθήκη ψευδαργύρου (Zn) βελτιώνει τη μηχανική αντοχή, η προσθήκη κασσιτέρου (Sn) βελτιώνει την αντοχή σε διάβρωση, η προσθήκη μολύβδου (Pb) την κατεργασιμότητα στην κοπή. Τα βασικά κράματα του χαλκού είναι τα ακόλουθα:

- Κράμα Cu-Zn (**ορείχαλκος**)
- Κράμα Cu-Sn (**μπρούντζος**)
- Κράμα Cu-Al (**χαλκοαλουμίνιο**)
- Κράμα Cu-Ni (**χαλκονικέλιο**)

Άλλα κράματα είναι το χαλκοπυρίτιο (Cu-Si) και το χαλκοβηρύλλιο (Cu-Be). Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, διακρίνονται σε χυτά κράματα και κράματα διαμόρφωσης.

### **Κράματα Cu-Zn (Ορείχαλκοι)**

Η προσθήκη του ψευδαργύρου μέχρι ποσοστού 30% βοηθά στην αύξηση της μηχανικής αντοχής του κράματος. Αυξανόμενου επίσης του ποσοστού ψευδαργύρου, το χρώμα από κόκκινο γίνεται σταδιακά κίτρινο. Με αναλογία ψευδαργύρου 0-39% δημιουργείται μονοφασικό κράμα φάσης α, κυβικού εδροκεντρωμένου πλέγματος (α-ορείχαλκοι). Όταν ο ψευδαργύρος βρίσκεται σε ποσοστό 40-45%, τότε το κράμα είναι διφασικό, δηλαδή περιέχει δύο διαφορετικές φάσεις α και β' (α+β' ορείχαλκοι). Το ποσοστό του ψευδαργύρου δεν πρέπει να ξεπερνά το 45%, διότι σε μεγάλη αναλογία οδηγεί στο σχηματισμό εύθραυστων φάσεων και στην ψαθυροποίηση του υλικού. Στην πράξη δηλαδή χρησιμοποιούνται δύο βασικά είδη ορείχαλκου:

- **οι α-ορείχαλκοι ή μονοφασικοί ορείχαλκοι (Zn<39%)**
- **οι α+β' ορείχαλκοι ή διφασικοί ορείχαλκοι (Zn>39%)**

Οι μονοφασικοί α-ορείχαλκοι διαμορφώνονται ευκολότερα εν ψυχρώ, ενώ οι διφασικοί α+β' ορείχαλκοι διαμορφώνονται ευκολότερα εν θερμώ. Αυτό συμβαίνει, γιατί η β' φάση είναι σκληρή και εύθραυστη και μόνο με θέρμανση πάνω από τους 450°C μετατρέπεται στη β-φάση, η οποία είναι και όλκιμη. Η σκληρότητα των ορείχαλκων ανάλογα με την κατεργασία (ανόπτηση, ψυχρή παραμόρφωση) κυμαίνεται από 60-180 HV.

Οι ορείχαλκοι με ποσοστό ψευδαργύρου μεγαλύτερο από 10% εμφανίζουν το φαινόμενο της εποχιακής ρωγμάτωσης. Αυτό οφείλεται στην εργοδιάβρωση, δηλαδή στην ταυτόχρονη επίδραση της διάβρωσης γύρω από τα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική), λόγω της υγρασίας της ατμόσφαιρας και των εσωτερικών τάσεων που υπάρχουν σε ορειχάλκινα εξαρτήματα, έπειτα από κατάλληλη ψυχρή παραμόρφωση (π.χ. έλαση, βαθεία κοίλανση). Η εργοδιάβρωση αντιμετωπίζεται με ανόπτηση σε θερμοκρασία 250-300°C, μετά από την ψυχρή διαμόρφωση για την εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων.

Ένα άλλο συχνό φαινόμενο αστοχίας ορειχάλκινων εξαρτημάτων, π.χ. σωλήνων, που έρχονται σε επαφή με υγρό περιβάλλον, είναι η αποψευδαργύρωση. Αυτή είναι η σταδιακή διάλυση του ψευδαργύρου του ορείχαλκου μέσα σε υγρά, η οποία γίνεται αντιληπτή με την εμφάνιση «κρατήρων» στην επιφάνεια του μετάλλου. Αυτό οφείλεται στην εκλεκτική διάβρωση του ψευδαργύρου (ηλεκτρόλυση) έναντι του χαλκού ο οποίος θεωρείται ευγενέστερο μέταλλο. Η αποψευδαργύρωση αντιμετωπίζεται με μικρή προσθήκη μικρών ποσοτήτων κασσιτέρου Sn (1%) ή αρσενικού As (0.01-0.20%) μέσα

στο κράμα. Η προσθήκη αλουμινίου σε ποσοστό περίπου 2% έχει θετική επίδραση στην αντοχή στη διάβρωση.

Η προσθήκη μολύβδου (Pb) στον ορείχαλκο σε ποσοστό έως 3% βελτιώνει την κατεργασιμότητα του μετάλλου στην κοπή. Πιο συγκεκριμένα επειδή ο μολύβδος διασπείρεται υπό μορφή σφαιρικών σωματιδίων μέσα στη δομή του υλικού, βοηθά στη μείωση της τριβής και φθοράς του εργαλείου κοπής και στον κατατεμαχισμό των αποβλήτων της κοπής (δημιουργεί δηλαδή ασυνεχές απόβλητο).

### 3.2.2 Αλουμίνιο (7075-T6)

Το αλουμίνιο ή αργίλιο είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που συναντάται στον στερεό φλοιό της γης και αποτελεί περίπου το 8% κατά βάρος του. Προέρχεται από το ορυκτό (ή μίγμα ορυκτών) βωξίτης, αποτελεί υλικό φυσικής προέλευσης και είναι μετά τον σίδηρο το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Το αργίλιο, εκτός από τον βωξίτη, βρίσκεται στη φύση στα ορυκτά της αργίλου και στους κρυστάλλους του ρουμπινιού, του ζαφειριού και του κουρουνδίου αλλά και σε πολύ μεγάλο αριθμό πυριτικών κυρίως ορυκτών. Σε αντίθεση όμως με τον σίδηρο, τον χαλκό και τον χρυσό, το αλουμίνιο δεν υπάρχει στη φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες και γι' αυτό το λόγο η απομόνωση του καθυστέρησε ιδιαίτερα. Η παραγωγή του έγινε δυνατή μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού. 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 και θεωρείται οικονομικά εκμεταλλεύσιμος όταν έχει περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 55% σε αλουμίνα. Μετά την εξόρυξη του, ο βωξίτης μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης μετατρέπεται στο γνωστό μας μέταλλο αλουμίνιο, ένα πραγματικά πολύτιμο υλικό για την παγκόσμια βιομηχανία και οικονομία.

Τα χαρακτηριστικά κράματος του κράματος 7075-T6 είναι τα εξής (πίνακας 3.1):

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

Πίνακας 3.1: Τα χαρακτηριστικά κράματος του κράματος 7075-T6

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  $A_{50}$  [%] : 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/m×K] : 130
- Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kg×K] : 0,96
- Σημείο τήξης [°C] : 477 - 635

### 3.2.3 Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)

Τα χαρακτηριστικά κράματος του ανοξείδωτου χάλυβα SAE304 είναι τα εξής (πίνακας 3.2):

Σύσταση Αλουμίνιο (7075-T6) (% by weight)	
Συστατικό	Wt. %
<b>C</b>	Max. 0.08
<b>Cr</b>	18 - 20
<b>Fe</b>	66.345 - 74
<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 3.2: Τα χαρακτηριστικά κράματος 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  $A_{50}$  [%] : 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

### 3.2.4 Χάλυβας (P355GH)

Τα χαρακτηριστικά κράματος του κράματος P355GH είναι τα εξής (πίνακας 3.3):

Σύσταση Χάλυβας (P355GH) (% by weight)	
Συστατικό	Wt. %
<b>C</b>	0.1 - 0.22
<b>Si</b>	Max. 0.6
<b>Mn</b>	1.1 - 1.7
<b>Ni</b>	Max. 0.3
<b>P</b>	Max. 0.025
<b>S</b>	Max. 0.015
<b>Cr</b>	Max. 0.3
<b>Mo</b>	Max. 0.08
<b>V</b>	Max. 0.02
<b>N</b>	Max. 0.012
<b>Nb</b>	Max. 0.02
<b>Ti</b>	Max. 0.03
<b>Al</b>	Max. 0.02
<b>Cu</b>	Max. 0.3

Πίνακας 3.3: Τα χαρακτηριστικά κράματος του κράματος P355GH

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος P355GH σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

- Σκληρότητα, Brinell [500 g load, 10 mm ball] : 160
- Σκληρότητα, Knoop [μετατροπή από Brinell] : 174
- Σκληρότητα, Rockwell A [μετατροπή από Brinell] : 51
- Σκληρότητα, Rockwell B [μετατροπή από Brinell] : 83
- Σκληρότητα, Vickers [μετατροπή από Brinell] : 166
- Αντοχή στον εφελκυσμό [MPa] : 510 - 650
- Αντοχή διαρροής [MPa] : 355
- Επιμήκυνση A<sub>50</sub> [%] : 22
- Αναλογία Poisson : 0,29
- Αντοχή στην κόπωση [MPa] : 159
- Μέτρο διάτμησης [GPa] : 73

- Διατμητική αντοχή [MPa] : 360

Οι φυσικές ιδιότητες του κράματος P355GH σε θερμοκρασία δωματίου είναι οι εξής:

- Πυκνότητα [g/mm<sup>3</sup>] : 7,8
- Μέτρο Ελαστικότητας [GPa] : 71,7
- Θερμική αγωγιμότητα [W/mxK] : 52
- Ειδική θερμοχωρητικότητα [J/kgxK] : 470
- Σημείο τήξης [°C] : 1420 - 1460

### 3.2.5 Ορείχαλκος (EN CC755S)

Τα χαρακτηριστικά κράματος του κράματος EN CC755S είναι τα εξής (πίνακας 3.4):

Σύσταση Ορείχαλκου (EN CC755S) (% by weight)	
Συστατικό	Wt. %
<b>Cu</b>	59.5 - 61
<b>Zn</b>	35.8 - 38.9
<b>Pb</b>	1.2 - 1.7
<b>Al</b>	0.4 - 0.7
<b>Sn</b>	0 - 0.3
<b>Fe</b>	0.050 - 0.2
<b>Ni</b>	0 - 0.2
<b>Mn</b>	0 - 0.050
<b>Si</b>	0 - 0.050

Πίνακας 3.4: Τα χαρακτηριστικά κράματος του κράματος EN CC755S

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος EN CC755S 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 A<sub>50</sub> [%] : 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 CC755S 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

### 3.3 Συνθήκες Κατεργασίας

Στη διαδικασία χάραξης με λέιζερ μια εστιασμένη δέσμη λέιζερ σαρώνει την επιφάνεια πάνω στο τεμάχιο κατεργασίας. Η ενέργεια κάθε παλμού λέιζερ απορροφάτε από το τεμάχιο κατεργασίας και αυτό θερμαίνει το υλικό, προκαλώντας τήξη και τέλος εξάτμιση σε αέριο. Η μετάβαση φάσης από στερεό σε ατμό αναφέρεται ως διαδικασία εξάχνωσης. Καθώς εξατμίζεται το υλικό μέσω της διαδικασίας της εξάχνωσης υπάρχει μια απομάκρυνση υλικού η οποία τελικά δίνει το πάχος αφαίρεσης υλικού για μία ένα πέρασμα (layer). Με την αφαίρεση πολλαπλών στρώσεων υλικού καθώς και με διαφορετικό τρόπο σάρωσης για κάθε μία από αυτήν, μπορεί να παραχθεί μια δομή τρισδιάστατης επιφάνειας του κατεργαζόμενου υλικού.

Το σημείο στο οποίο η δέσμης λέιζερ έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού καθώς και ο συγκεκριμένος και προκαθορισμένος τρόπος σάρωσης ονομάζεται στρατηγική σάρωσης. Μέσο της περιοδικής παραγωγής παλμών δέσμης λέιζερ, δημιουργείται το φαινόμενο της εξάχνωσης που έχει σαν αποτέλεσμα την αφαίρεση του μετάλλου.

Η απομάκρυνση του υλικού επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της δέσμης λέιζερ, τις ιδιότητες του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τον τρόπο με τον οποίο και οι δύο αλληλοεπιδρούν. Οι ιδιότητες του τεμαχίου εξαρτώνται από το υλικό και τη γεωμετρία, με τις πιο σημαντικές συνθήκες πυκνότητας, θερμοκρασίας τήξης-εξάτμισης, ειδικής θερμικής ικανότητας, θερμικής αγωγιμότητας, λανθάνουσας θερμότητας από τήξη-εξάτμιση και απορροφητικότητα-ανακλαστικότητα σε καταστάσεις στερεής τήξης. Η δέσμη λέιζερ μπορεί να χαρακτηριστεί από τις παραμέτρους του μηχανήματος λέιζερ, όπως τύπος λέιζερ, μήκος κύματος, διάμετρος δέσμης λέιζερ, διάρκεια παλμού και παράμετροι διεργασίας, όπως η μέση ισχύς εξόδου  $P$  (Watt), ο ρυθμός επανάληψης  $F$  (Hz) και η ταχύτητα σάρωσης  $V$  (mm/sec).

#### 3.3.1 Παράμετροι διεργασίας

Στο κέντρο κατεργασίας Nd:YAG DMG MORI Lasertec 40, που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία 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      |

#### 3.3.2 Μέση ένταση Παλμών (Average Output Power)

Συχνά υπάρχει η σύγχυση ανάμεσα στις δύο διαφορετικές παραμέτρους των κατεργασιών με Laser, την μέση ισχύ εξόδου (Average Output Power) και την μέγιστη ισχύ εξόδου (Peak Power).

Ο ορισμός της ισχύς είναι πόση ενέργεια μεταφέρεται σε μια μονάδα του χρόνου, η τυπική μονάδα μέτρησης είναι 1 Joule/sec δηλαδή 1 Watt, και αυτή είναι η επικρατέστερη παράμετρος όταν αναφερόμαστε σε laser. Ωστόσο, εάν το laser είναι παλμικού τύπου τα πράγματα αλλάζουν και περιπλέκονται. Από εκεί που υπάρχει η ισχύ και ίσως και η πυκνότητα ισχύος (η ποσότητα ισχύς ανά μονάδα όγκου), τώρα αρχίζουν να μελετώνται πολύ περισσότερες λεπτομέρειες. Υπάρχει η ενέργεια των παλμών, την διάρκεια και την

συχνότητα των παλμών, όπως επίσης και δύο είδη ισχύς: την μέση (Average Output Power) και την μέγιστη (Peak Power). Σε αυτό το σημείο χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς για το ίδιο laser μπορεί να παρατηρηθεί Average Output Power 10mW, αλλά Peak Power στα 10 kW.

Αμα διαιρεθεί η ισχύς ανά παλμό με την διάρκεια του παλμού (σε χρόνο) θα δώσει την μέγιστη ισχύ εξόδου (Peak Power). Αυτή είναι η ισχύς του laser κατά την διάρκεια του παλμού και θα ήταν το μόνο είδος ισχύος εάν υπήρχε συνεχόμενη δέσμη laser (όπως τα CW Laser). Αλλά αφού στα παλμικά laser η δέσμη laser είναι φορές που είναι απενεργοποιημένη (συνήθως πολύ περισσότερο από τον χρόνο που είναι ενεργοποιημένη) η μέση ισχύς εξόδου (Average Output Power) θα είναι χαμηλότερη. Ένας απλός τρόπος για να σκεφτεί κανείς τη μέση ισχύς, είναι η μέγιστη ισχύς με συντελεστή καθυστέρησης. Με άλλα λόγια υπολογίζετε ο μέσος όρος της ισχύς κατά την διάρκεια ενός κύκλου ενεργοποίησης / απενεργοποίησης του laser.

Οπότε παραδείγματος χάρη, ένα laser με ισχύ 10kW, και εκπέμπει παλμούς για 1ns με συχνότητα στα 1kHz (δηλαδή ο κύκλος λειτουργίας είναι 1/1.000.000 ή 0,0001%). Επομένως εφόσον το laser είναι απενεργοποιημένο ένα εκατομμύριο φορές για κάθε μία φορά που είναι ενεργοποιημένο, η επίδραση της μέσης ισχύς είναι είναι το ένα εκατομμυριοστό της μέγιστης ισχύς, αλλιώς 10 mW.

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι όταν η δέσμη laser είναι μεγάλης διάρκειας η θερμότητα που παράγεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι μεγαλύτερης έκτασης και επομένως παίρνει περισσότερο χρόνο για να πραγματοποιηθεί η τήξη του μετάλλου.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι στην τελική τιμή της μέσης ισχύος, της παλμικής ενέργεια (Pe) και της παλμική ισχύς (Pp) παίζει πολύ μεγάλο ρόλο η συχνότητα των παλμών (θα γίνει ανάλυση του παράγοντα παρακάτω). Όπου η παλμική ενέργεια και η παλμική ισχύς υπολογίζονται με τη σχέση:

$$Pe = \frac{Pa}{F} \quad (\text{Εξίσωση 3.1})$$

$$Pp = \frac{P}{D} = \frac{Pa}{F \cdot D} \quad (\text{Εξίσωση 3.2})$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το Pa είναι η μέση ισχύς, η τιμή F είναι η παλμική συχνότητα και όπου D η διάρκεια παλμού (100 ns, στο κέντρο κατεργασίας Lasertec40). Η τιμή της παλμικής ενέργεια Pe και της παλμική ισχύς Pp μειώνεται όταν η συχνότητα F αυξάνεται. Η παλμική ενέργεια και η παλμική ισχύς διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη μηχανική κατεργασία με λέιζερ και το μετασχηματισμό με λέιζερ, δεδομένου ότι καθορίζουν την επίδραση (πυκνότητα ενέργειας) και την ακτινοβολία (πυκνότητα ισχύος) και στη συνέχεια τη λειτουργία αλληλεπίδρασης δέσμης λέιζερ και, συνεπώς το μέγεθος της επεξεργαζόμενου όγκου τεμαχίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παλμική ενέργεια και η παλμική ισχύ διαφέρουν μόνο από μια σταθερά (τη διάρκεια του παλμού), ενώ η συχνότητα και η ταχύτητα σάρωσης επηρεάζουν τον επονομαζόμενο παράγοντα αλληλοεπικάλυψης (Overlapping) που είναι μια άλλη παράμετρος στις εφαρμογές παλμικού λέιζερ.

### 3.3.3 Συχνότητα των παλμών

Το λέιζερ βγάζει παλμούς φωτός και όχι συνεχή δέσμη φωτός (εκτός εάν είναι CW Laser). Κάθε ένας από αυτούς τους παλμούς έχει μια πολύ σύντομη διάρκεια και μετράτε σαν ο

χρόνος του παλμού σε νανοδευτερόλεπτα. Τα σταθερά παλμικά λέιζερ οπτικών ινών είναι ικανά να παράγουν παλμούς λέιζερ με την ίδια χρονική διάρκεια (pulse width) για κάθε παλμό λέιζερ, αν και είναι σε θέση να μεταβάλλουν τον αριθμό των παλμών που παράγονται κάθε δευτερόλεπτο (pulse frequency). Αλλαγή της συχνότητας των παλμών επηρεάζει τον αριθμό παλμών λέιζερ που χτυπά το τεμάχιο σε οποιαδήποτε θέση και την ποσότητα ενέργειας λέιζερ σε κάθε έναν από αυτούς τους παλμούς. Οι χαμηλότερες συχνότητες παλμών τείνουν να εξατμίζουν το υλικό λόγω του υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου κάθε παλμού. Υψηλότερες συχνότητες παλμών τείνουν να θερμαίνουν την επιφάνεια του τεμαχίου αντί να εξατμίζει τοπικά υλικό από αυτό. Η θέρμανση της επιφάνειας ορισμένων υλικών όπως ο χάλυβας ή το τιτάνιο μπορεί να παράγει μερικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Αντί να εξατμίζεται το υλικό, η θερμότητα από υψηλότερες συχνότητες παλμών μπορεί να προκαλέσει μια επίστρωση (στρώματα οξειδίου) έτσι ώστε να σχηματίζεται μία πολύ ορατή μόνιμη σήμανση χωρίς να καταστραφεί η επιφάνεια του υλικού.

Η μεταβολή της χρονικής διάρκειας του παλμού του λέιζερ μπορεί να προκαλέσει την ενεργοποίηση κάθε παλμού λέιζερ για μεγαλύτερο ή μικρότερο χρονικό διάστημα, αποδίδοντας αποτελέσματα όπως στρώματα οξειδίου διαφόρων χρωμάτων. Πολύ σύντομες διάρκειες παλμών λέιζερ καθιστούν δυνατή την επισήμανση υλικών που διαφορετικά θα έλιωναν με μεγαλύτερη διάρκεια παλμού λέιζερ, όπως ορισμένοι τύποι πλαστικών.

Καθώς μειώνεται η συχνότητα παλμού εξόδου, αυξάνεται η ενέργεια σε κάθε παλμό λέιζερ. Το λέιζερ συνήθως έχει ένα κατώφλι ενεργειακής ζημιάς, και πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή από τον χειριστή καθώς πρέπει να είναι βέβαιος ότι η ενέργεια εξόδου δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το όριο ζημιάς του λέιζερ. Τα σταθερά λέιζερ ινών με πλάτος παλμού έχουν συνήθως ένα όριο ζημιάς περίπου στο 1 mJ ενέργειας. Ένα λέιζερ ινών σταθερού παλμικού πλάτους 20 watt θα προσεγγίσει 1 mJ ενέργειας ανά παλμό στη συχνότητα των περίπου 20 kHz και 20 watts ισχύς εξόδου. Εξαιτίας αυτού, ένα 20 watt σταθερό παλμικό λέιζερ ινών δεν επιτρέπεται να λειτουργεί σε συχνότητες παλμών χαμηλότερες από 20 kHz.

Ας θυμηθούμε ότι η ενέργεια εξόδου αυξάνεται καθώς η συχνότητα των παλμών μειώνεται. Επομένως, ένας σταθερός παλμός 20 watt λέιζερ πλάτους θα έχει τη μέγιστη δυνατή ενέργεια ανά παλμό με συχνότητα παλμών 20 kHz. Η ρύθμιση της συχνότητας παλμού χαμηλότερη από 20 kHz δεν θα έχει ως αποτέλεσμα περισσότερη ενέργεια ανά παλμό, επειδή το λέιζερ περιορίζεται εσωτερικά από παλμούς σε χαμηλότερες συχνότητες. Μια τυπική συχνότητα παλμών για ένα σταθερό εύρος παλμού 20 watt λέιζερ ινών είναι 20 έως 200 kHz. Η χρήσιμη συχνότητα παλμών έχει εύρος τιμών περίπου 20 έως 50 kHz. Σε συχνότητες παλμών υψηλότερες από 50 kHz, δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια που παράγεται σε κάθε παλμό για να κάνει πολλή δουλειά. Ένα τυπικό λέιζερ 50 watt προσεγγίζει 1 mJ ανά παλμό στη συχνότητα παλμών 50 kHz και 50 Watt ισχύ εξόδου, και έτσι περιορίζεται από το να λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες. Το ωφέλιμο εύρος συχνοτήτων παλμού ενός παλμικού λέιζερ 50 W είναι περίπου 50 έως 80kHz. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως παλμικά λέιζερ με σταθερή διάρκεια παλμού πάνω από 80 KHz δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια σε κάθε παλμό για να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα λέιζερ με μεταβλητό εύρος παλμού επιτρέπεται να λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες παλμών, αν και εξακολουθούν να έχουν το ίδιο 1 mJ ανά παλμό όριο βλάβης λέιζερ.

Εάν έχει χρησιμοποιηθεί χαμηλότερη συχνότητα παλμών σε ένα παλμικό λέιζερ με κυμαινόμενη διάρκεια παλμού, η ισχύς του λέιζερ εξόδου μειώνεται εσωτερικά έτσι ώστε η ενέργεια ανά παλμό να μην μπορεί να υπερβεί το όριο ζημίας.

Έτσι προκύπτει το ερώτημα, πώς τα σημάδια στο κατεργαζόμενο υλικό είναι συνάρτηση του πόσο γρήγορα μετακινείται η δέσμη λέιζερ πάνω στο τμήμα, πόση δύναμη διαθέτει το λέιζερ και τη συχνότητα παλμών που λειτουργεί το λέιζερ. Η χαμηλότερη ταχύτητα, η υψηλότερη ισχύς λέιζερ και οι χαμηλότερες συχνότητες παλμών οδηγούν σε μεγαλύτερη και βαθύτερη βαθμολόγηση. Αντίθετα, η υψηλότερη ταχύτητα, η χαμηλότερη ισχύς λέιζερ και οι υψηλότερες συχνότητες παλμών οδηγούν σε ασθενέστερη και πενιχρή σήμανση.

### 3.3.4 Ταχύτητα Σάρωσης (Scanning Speed)

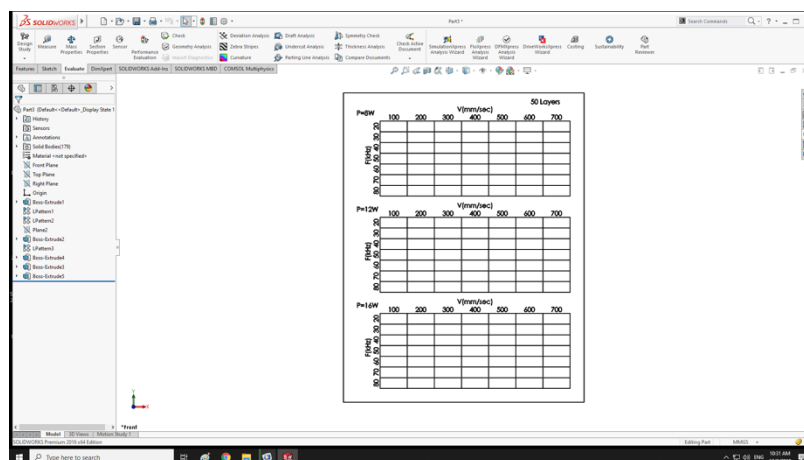
Η ταχύτητα σάρωσης είναι μια απλή στην κατανόηση παράμετρος αλλά εξίσου σημαντική ως προς τις επιπτώσεις που επιφέρει στην κατεργασία συνολικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Πρόκειται ουσιαστικά για την ταχύτητα με την οποία σαρώνει και κινείται η δέσμη του laser δηλαδή είναι το πόσο γρήγορα η δέσμη λέιζερ ταξιδεύει πάνω από το τμήμα του μετάλλου που υφίσταστε κατεργασία.

Σε υψηλότερη ταχύτητα σάρωσης, ο χρόνος αλληλεπίδρασης υλικού λέιζερ είναι χαμηλός και η δεξαμενή τήξης που δημιουργείται από τη δέσμη λέιζερ είναι μικρότερη από την συγκέντρωση τήγματος που δημιουργείται με χαμηλότερη ταχύτητα σάρωσης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία στερεοποίηση και ψύξη που είναι παρόμοια με ό,τι συνέβη στη χαμηλή ισχύ λέιζερ.

## 3.4 Πειραματική Διαδικασία

Η πρώτη φάση ήταν η δημιουργία σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD του πλαισίου στο οποίο θα γινόντουσαν τα πειράματα πάνω στις πλάκες, βλέπε [σχήμα 3.1](#). Για αυτή την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε τέσσερις φορές, μία για κάθε μεταλλική πλάκα. Επίσης μετά το πέρας των πειραμάτων στην πίσω πλευρά κάθε πλάκας χαράχθηκε το πλαίσιο με τα αποτελέσματα του βάθους εγχάραξης όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.2](#). Μέσο αυτών των εργασιών θα σας γίνει μια σύντομη παρουσίαση των προγραμμάτων και των δυνατοτήτων του κέντρου κατεργασίας DMG Lasertec 40.



Σχήμα 3.1: Δημιουργία πλαισίου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD Solidworks



		V(mm/sec)						Layer Thickness	
		100	200	300	400	500	600	700	
P=8W	20	19.346	4.666	2.261	1.348	0.907	0.666	0.480	
	30	18.837	6.573	3.202	1.929	1.254	0.896	0.693	
	40	15.393	7.838	3.720	2.262	1.479	0.985	0.615	
	50	10.648	6.680	3.365	1.987	1.250	0.889	0.572	
	60	8.145	5.005	2.704	1.627	1.043	0.707	0.493	
	70	8.224	3.109	1.241	0.880	0.589	0.441	0.330	
P=12W	20	11.180	2.967	1.316	0.745	0.468	0.333	0.272	
	30	31.101	7.364	3.302	1.903	1.243	0.910	0.709	
	40	31.434	10.913	4.914	2.919	1.928	1.384	1.050	
	50	24.909	12.858	6.319	3.768	2.504	1.755	1.379	
	60	17.154	12.489	7.578	4.315	2.950	2.107	1.568	
	70	11.364	11.137	8.042	4.751	3.185	2.374	1.684	
P=16W	20	18.749	10.026	6.526	4.641	3.080	2.165	1.529	
	30	24.759	9.138	5.881	4.114	2.761	1.969	1.403	
	40	41.622	13.046	4.412	2.427	1.552	1.072	0.710	
	50	41.132	17.847	6.864	3.833	2.516	1.575	1.058	
	60	32.239	19.392	9.130	5.144	3.151	2.077	1.377	
	70	16.862	18.608	10.856	6.301	4.127	2.677	1.745	
	20	22.806	16.743	11.132	7.162	4.422	2.911	2.010	
	30	37.742	14.133	10.452	8.083	5.167	3.224	2.375	
	40	43.769	12.133	9.712	7.851	4.917	3.062	2.112	

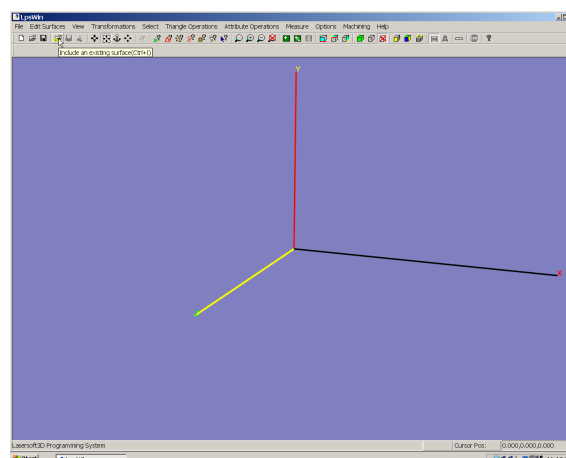
Σχήμα 3.2: Χάραξη των αποτελεσμάτων στο πίσω μέρος της εκάστοτε πλάκας

### 3.4.1 LpsWin

Στη συνέχεια το αρχείο του Solidwork μετατράπηκε σε STL αρχείο και καταχωρήθηκε στο πρόγραμμα LpsWin το οποίο είναι εγκατεστημένο στο κέντρο κατεργασίας Lasertec40 και χρησιμοποιείτε για τη δημιουργία στρωματοποίησης του αντικειμένου πριν δοθεί στην μηχανή για την τελική κατεργασία. Τα αρχεία STL (Stereo Lithography) αναπαριστούν το αντικείμενο σαν πλέγμα τριγώνων, δίνοντας έτσι μια τρισδιάστατη γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου χωρίς τα χαρακτηριστικά του χρώματος της υφής και των άλλων κοινών χαρακτηριστικών του αντικειμένου. Το πρόγραμμα LpsWin, με το άνοιγμα ενός STL αρχείου δημιουργεί αυτόματα ένα TPF αρχείο. Το είδος του αρχείου αυτού πέρα από την θέση των σημείων του τριγώνου, αποθηκεύει και πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που θα εκτελεστεί η κατεργασία καθώς και τις παραμέτρους που θα οριστούν απευθείας στο αρχείο της επιφάνειας.

Αναλυτικά η διαδικασία είναι ως εξής:

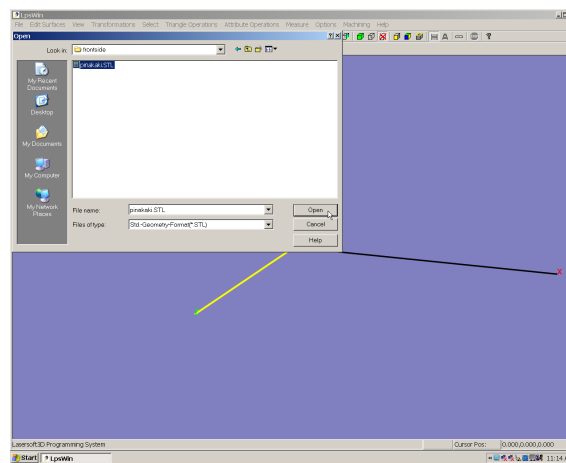
Ανοίγοντας το πρόγραμμα LpsWin, από το μενού με τα εργαλεία, επιλέγεται το Include an existing surface, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Εισαγωγή στο πρόγραμμα LpsWin του αρχείου STL

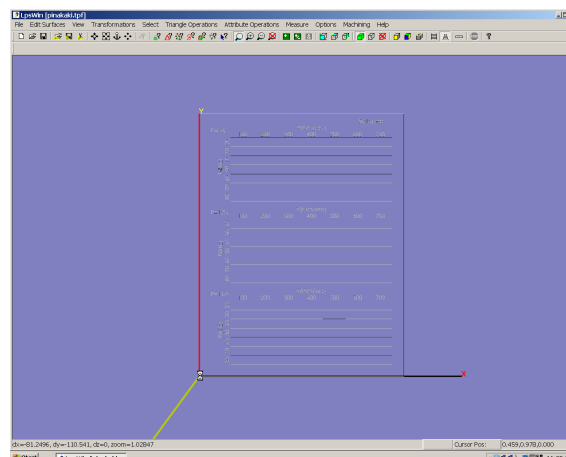


Επιλέγεται το αρχείο STL που έγινε export από το SolidWork και πατώντας Open όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.5.



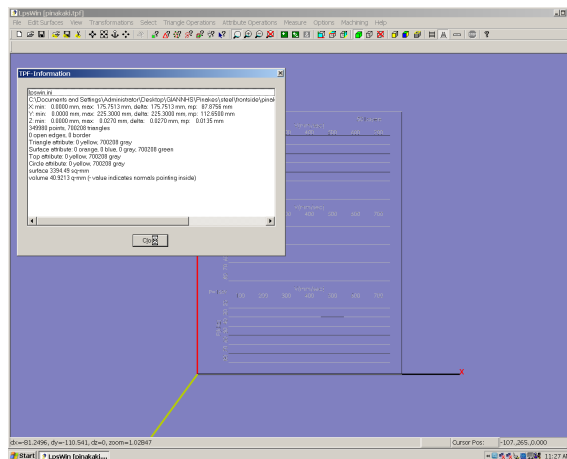
Σχήμα 3.5: Άνοιγμα του αρχείο STL που έχει γίνει export από το SolidWork

Το πρόγραμμα αυτομάτως δημιουργεί στον ίδιο φάκελο που υπάρχει το αρχείο STL το αρχείο TPF όπως αναφέρθηκε προηγουμένως πάνω στο οποίο θα γίνει όλη η διαδικασία. Η εικόνα που εμφανίζεται στην οθόνη μετά την φόρτωση του αρχείου φαίνεται στο σχήμα 3.6.



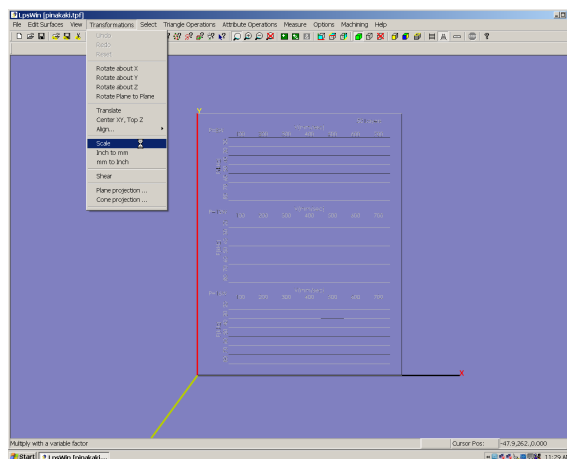
Σχήμα 3.6: Η οθόνη μετά την φόρτωση του αρχείου

Οι διαστάσεις του αρχείου STL, δηλαδή του περιγράμματος που θα χαραχθεί σε κάθε πλάκα είναι αρχικά καθορισμένες από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks. Σε πρώτη φάση το LpsWin σου δίνει την δυνατότητα να ελεγχθούν πατώντας στο πληκτρολόγιο Ctrl +F, όπου εμφανίζονται οι διαστάσεις του αντικειμένου σχήμα 3.7.

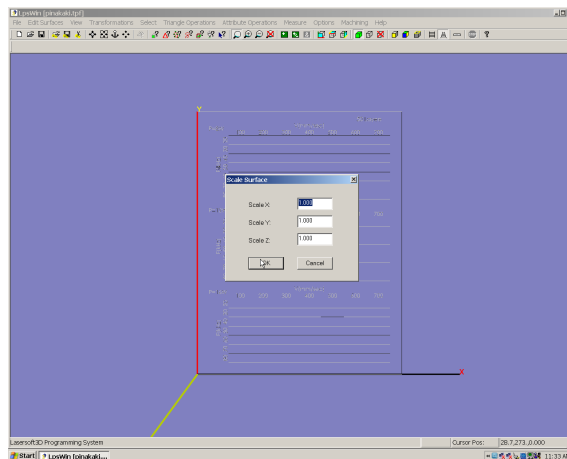


Σχήμα 3.7: Εμφάνιση των διαστάσεων του αντικειμένου

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα από το πρόγραμμα εάν επιθυμείς να προχωρήσεις στην αλλαγή των διαστάσεων του αντικειμένου, επιλέγοντας από το μενού Transformations και μετά την επιλογή Scale, εμφανίζεται ένας πίνακας που βάζεις την κατάλληλη τιμή για κάθε άξονα τροποποιώντας έτσι τις τελικές διαστάσεις του αντικειμένου. Βλέπε [σχήμα 3.8](#) & [σχήμα 3.9](#).

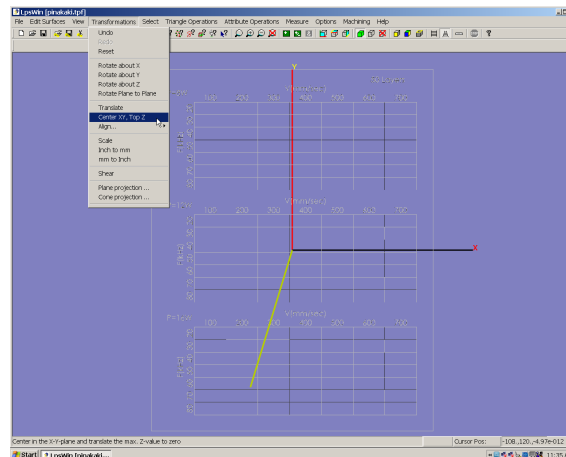


Σχήμα 3.8: Επιλέγοντας από το μενού Transformations την επιλογή Scale



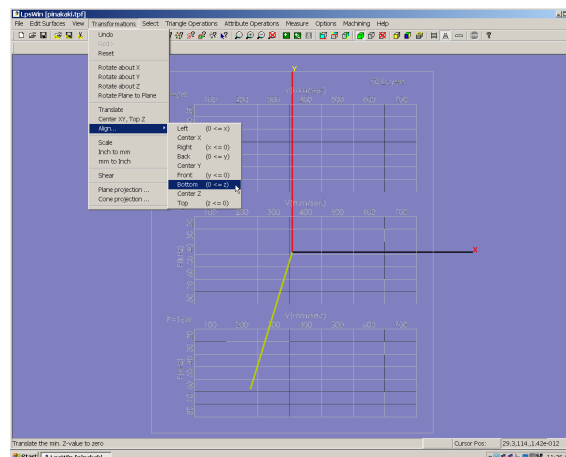
Σχήμα 3.9: Εισαγωγή της κατάλληλης τιμής για κάθε άξονα τροποποιώντας έτσι τις τελικές διαστάσεις του αντικειμένου

Ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα που πρέπει να κάνει ο χειριστής της εργαλειομηχανής σε αυτή τη φάση είναι να ορίσει σωστά το σημείο «μηδέν» πάνω στο αντικείμενο. Το πιο σύνηθες σημείο που επιλέγεται, είναι στο μέσο του άξονα X & Y και το μέγιστο σημείο του άξονα Z. Αυτό το σημείο «μηδέν» επιλέχθηκε και στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία καθώς βοηθάει στην ευθυγράμμιση του περιγράμματος που θα χαραχθεί στην εκάστοτε μεταλλική πλάκα. Αυτό ορίζεται πατώντας στο μενού Transformations και έπειτα Center XY, Top Z σχήμα 3.10.



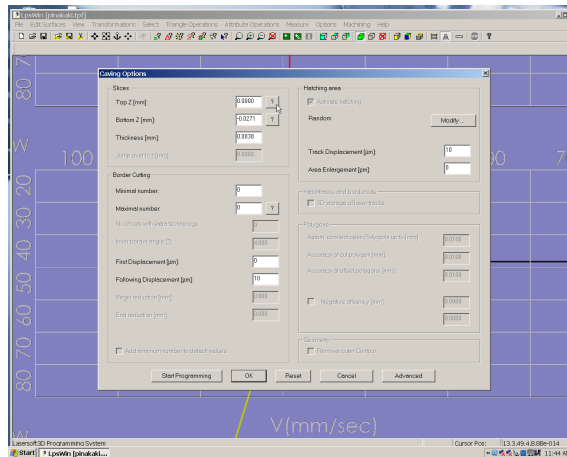
Σχήμα 3.10: Ορισμός του σημείο «μηδέν» στο μέσο του άξονα X & Y και στο μέγιστο σημείο του άξονα Z

Υπάρχει η δυνατότητα επίσης το σημείο «μηδέν» να οριστεί σε κάποιο άλλο σημείο του αντικείμενου. Οι επιλογές που υπάρχουν εμφανίζονται επιλέγοντας Transformations και έπειτα Align, βλέπε σχήμα 3.11.



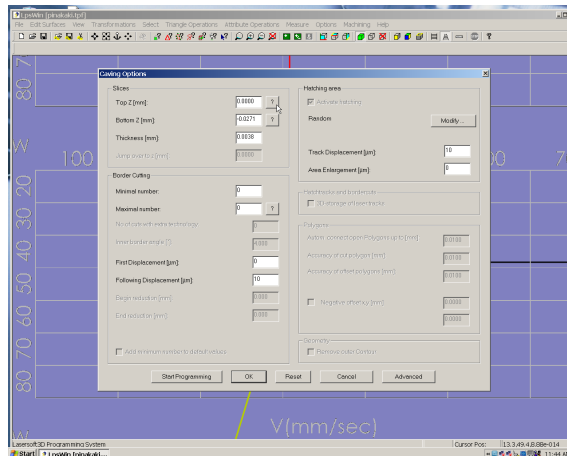
Σχήμα 3.11: Επιλογές για τον ορισμό του σημείου «μηδέν»

Ο επόμενος παράγοντας που έπρεπε να ρυθμιστεί είναι στις επιλογές Segmenting. Επιλέγοντας Options και έπειτα Segmenting and Collision Options, ανοίγει το παράθυρο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12 και επιλέγεται η επιλογή Active segmenting. Στο κουτάκι Min length of coherent Laser tracks (mm) πληκτρολογούμε την τιμή 0.01. Ουσιαστικά με αυτό εξασφαλίζεται πως τα Hatch tracks του Laser με τιμές μικρότερες από την παραπάνω θα διαγράφονται (δεν θα πραγματοποιούνται καθόλου). Βάζοντας την τιμή αυτή επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια σε αρκετά μικρές λεπτομέρειες.



Σχήμα 3.12: Ρύθμιση του παράγοντα Segmenting and Collision Options

Στη συνέχεια προχωρώντας στη ρύθμιση των Caving, επιλέγοντας Options και έπειτα Caving Options, όπου μας ανοίγει το παρακάτω παράθυρο σχήμα 3.13:



Σχήμα 3.13: Ρύθμιση των Caving

### Slices

- Top Z [mm] : Μας δίνει την θέση του πρώτου επιπέδου που προκύπτει από την τμηματοποίηση. Πατώντας το κουμπί με το ερωτηματικό «?» σαν τιμή εισάγεται η μέγιστη τιμή του άξονα Z με βάση το που έχει οριστεί το σημείο «μηδέν».
- Bottom Z [mm] : Μας δίνει την θέση του τελευταίου επιπέδου που προκύπτει από την τμηματοποίηση. Πατώντας το κουμπί με το ερωτηματικό «?» σαν τιμή εισάγεται η ελάχιστη τιμή του άξονα Z με βάση το που έχει οριστεί το σημείο «μηδέν».
- Thickness [mm] : Ορίζεται το πάχος του στρώματος.

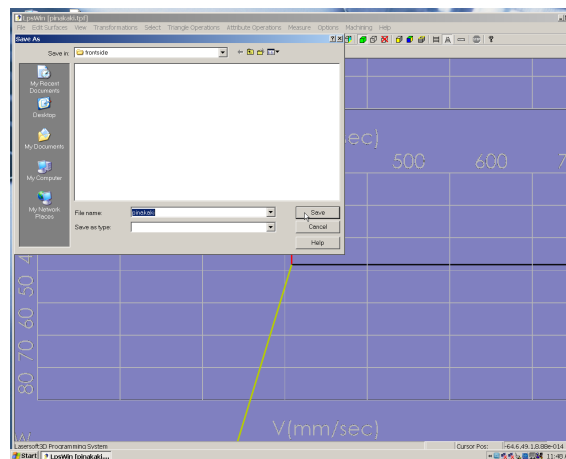
### Border Cut

- Min. number : Ορίζεται ο ελάχιστος αριθμός των border cuts, ίδιος με τον αριθμό του Max number.

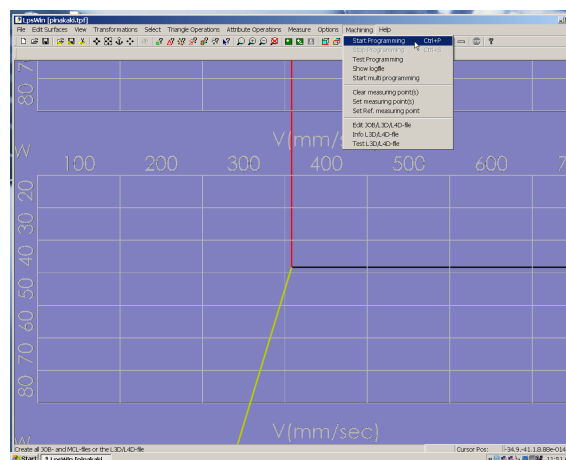
- Max. number : Ορίζεται ο μέγιστος αριθμός των border cuts. Πατώντας το κουμπί με το ερωτηματικό «?» η τιμή εισάγεται αυτόματα.
- First Displacement : Στην περίπτωση που το κομμάτι είναι μεγάλο, ορίζεται ένα offset. Έτσι το πρώτο border cut μπορεί να μετακινηθεί στο εσωτερικό του προγράμματος.
- Follow Displacement: Εδώ ορίζεται η απόσταση μεταξύ των border cuts.

Η δέσμη Laser έχει κωνική μορφή και για την αποφυγή των συγκρούσεων με τα κάθετα τοιχώματα, το κέντρο κατεργασίας προγραμματίζεται ώστε να ορίσει αυτόματα τον αριθμό των border cuts.

Προτού ολοκληρωθεί η διαδικασία και ξεκινήσει ο προγραμματισμός της κατεργασίας, πρέπει πρώτα να αποθηκευτεί το αρχείο και η επιφάνεια σε trf αρχείο. Αυτό πραγματοποιείται πατώντας File έπειτα Save surface και μετά File και έπειτα Save Project και τα αρχεία αποθηκεύονται στο φάκελο που ήταν και το αρχικό αρχείο. Βλέπε [σχήμα 3.14](#). Στη συνέχεια στο Machining και μετά Start Programming [σχήμα 3.15](#). Όπου ανοίγει ο φάκελος που αποθηκεύεται το αρχείο σε ως .l4d όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.16](#).

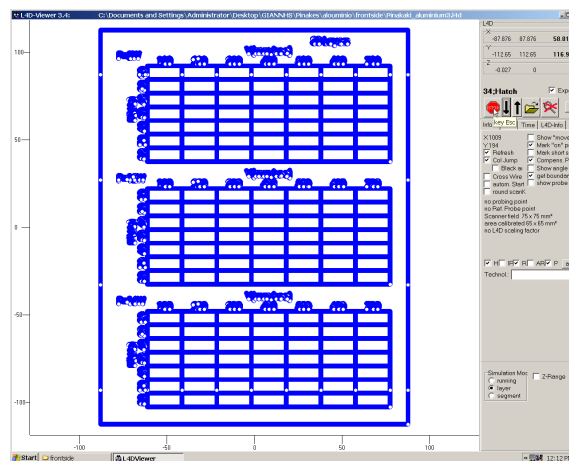


Σχήμα 3.14: Αποθήκευση αρχείου και της επιφάνειας σε trf αρχείο



Σχήμα 3.15: Start Programming

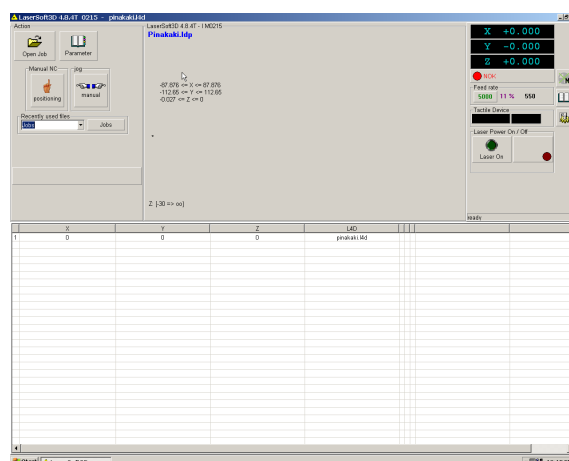




Σχήμα 3.18: Προσομοίωση της κατεργασίας στο πρόγραμμα L4D Viewer

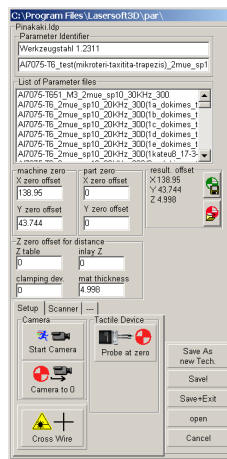
### 3.4.2 LaserSoft3D

Το πρόγραμμα LaserSoft3D είναι το τελικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιεί ο χειριστής της εργαλειομηχανής για να προχωρήσει την τελική κατεργασία του τεμαχίου. Τα βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες που δίνει είναι ο ορισμός της θέσης «μηδέν» πάνω στο κομμάτι με την βοήθεια της ψηφιακής κάμερας (κεφάλαιο 3.1.) που διαθέτει το κέντρο κατεργασίας. Καθώς και ρύθμιση της κατάλληλης ισχύος για συγκεκριμένες παραμέτρους, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί η αφαίρεση του επιθυμητού βάθους εγχάραξης ανά layer σε κάθε υλικό ξεχωριστά. Γενικά όλες οι λειτουργίες της εργαλειομηχανής (ενεργοποίηση Laser, μετακίνηση τράπεζας, ορισμός σημείου «μηδέν» στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και ορισμός παραμέτρων κατεργασίας) γίνονται μέσω του προγράμματος LaserSoft3D. Στο σχήμα 3.19 φαίνεται το αρχικό interface του προγράμματος LaserSoft3D.



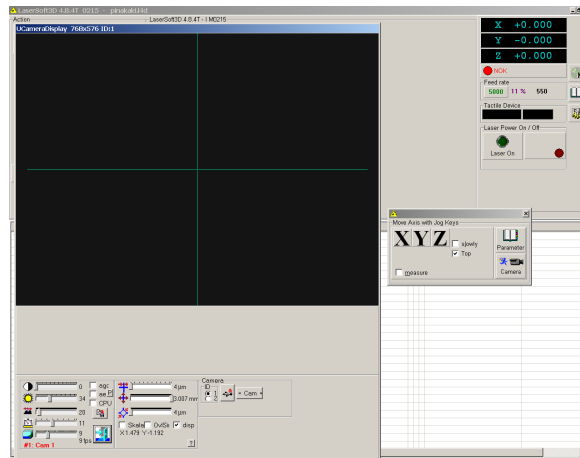
Σχήμα 3.19: Προσομοίωση της κατεργασίας στο πρόγραμμα L4D Viewer

Η μηχανή έχει περασμένο ένα δικό της μηδενικό σημείο, αλλά σε κάθε κατεργασία ο χειριστής πρέπει να προχωράει στον ορισμό του σημείου «μηδέν» πάνω στο τεμάχιο που είναι προς κατεργασία. Πατώντας το εικονίδιο Parameters ανοίγει το παρακάτω παράθυρο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Parameters

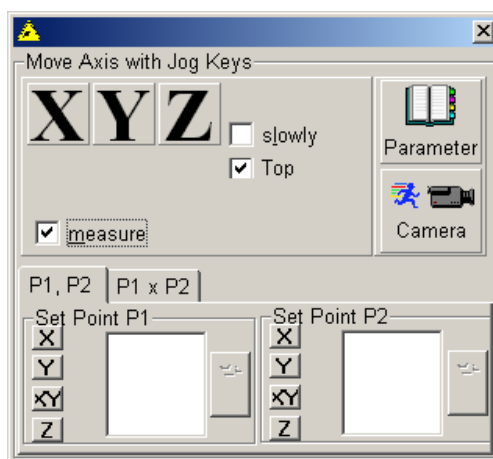
Στη συνέχεια πατώντας στο εικονίδιο Start Camera, ενεργοποιείται η κάμερα σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Ενεργοποίηση κάμερας

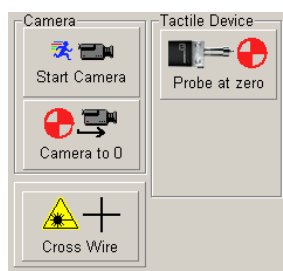
Μετακινώντας την τράπεζα στους τρεις άξονες X, Y, Z και με την χρήση της ψηφιακής κάμερας τοποθετείται ο σταυρός στο κέντρο της εκάστοτε μεταλλικής πλάκας, έτσι ώστε το περίγραμμα να είναι ευθυγραμμισμένο στο κέντρο της κάθε πλάκας. Στη συνέχεια στο παράθυρο που βρίσκεται δίπλα στην οθόνη της κάμερας σχήμα 3.22, πατώντας στην επιλογή measure και έπειτα πάνω από τα γράμματα X, Y, Z εμφανίζονται στην οθόνη οι συντεταγμένες του σημείου πάνω από το οποίο βρίσκεται η κάμερα. Πατώντας το εικονίδιο με την κάμερα και τα δύο κόκκινα βελάκια το σημείο αυτό αποθηκεύεται.





Σχήμα 3.22: Ενεργοποίηση κάμερας

Με το που γίνει αυτό το παράθυρο κλείνει και επιστρέφει το αρχικό παράθυρο σχήμα 3.23, όπου πατώντας πάνω στο εικονίδιο Probe at Zero, το probe κατεβαίνει ώστε να μετρήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια και να βελτιώσει την απόσταση από το σημείο «μηδέν». Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας ο χειριστής πατώντας το εικονίδιο Probing to Z αντικαθιστά την μέτρηση που έχει λάβει για τον άξονα Z με την κάμερα με την τιμή που επαληθεύει το probe με πολύ μεγάλη ακρίβεια.



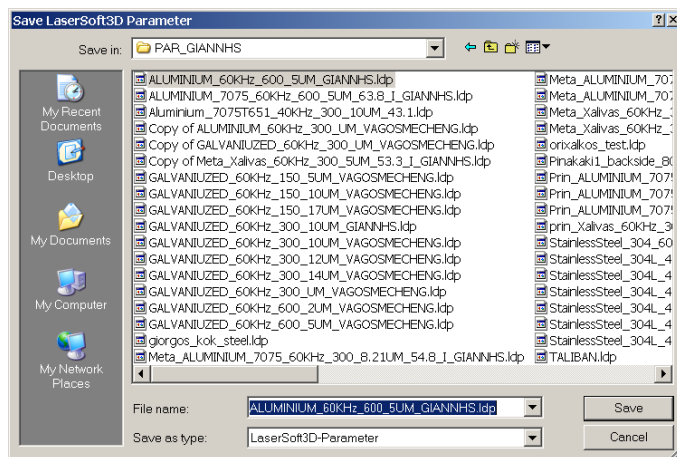
Σχήμα 3.23: Probe at Zero.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου 3.4.2, μέσω του πρόγραμμα LaserSoft3D μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί η ισχύς, δεδομένων άλλων δύο παραμέτρων, της συχνότητας των παλμών και της ταχύτητας σάρωσης. Μας δίνει την Μέση ένταση Παλμών (Average Output Power) που απαιτείται για την αφαίρεση συγκεκριμένου πάχους κατεργαζόμενου υλικού ανά πέρασμα (layer). Αυτή είναι μια διαδικασία που πρέπει να ακολουθεί ο χειριστής της εργαλειομηχανής σε κάθε κατεργασία και για κάθε υλικό που επεξεργάζεται έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται εξ' ολοκλήρου την διαστατική ακρίβεια που παρέχει το κέντρο κατεργασίας Lasertec40. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω του Technology ως εξής:

Από το αρχικό παράθυρο του λογισμικού, πατώντας στο εικονίδιο Parameters ανοίγει το παράθυρο του σχήματος 3.20, αλλά αυτή τη φορά θα χρησιμοποιηθεί η καρτέλα με την ένδειξη scanner.

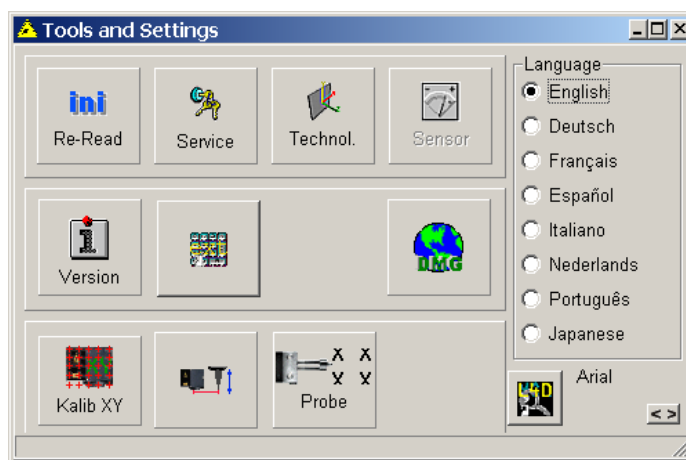
Η ισχύς  $I[\%]$  είναι αυτή που υπολογίζεται από τη διαδικασία του Technology, όμως ο χειριστής της εργαλειομηχανής σε αυτό το σημείο οφείλει να ορίσει μια τιμή η οποία θα έχει τον ρόλο της αρχικής τιμής στην διαδικασία του Technology. Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι βάση εμπειρίας πρέπει να είναι μια τιμή σχετικά κοντά στην πραγματικότητα καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν μας δίνει σωστό αποτέλεσμα το Technology για το

l[%]. Η ένδειξη t[us] είναι ο χρόνος του παλμού με πρότυπη τιμή 10, και στα κελιά με τις ενδείξεις f[kHz] και v[mm/s] ο χειριστής βάζει την επιθυμητή συχνότητα των παλμών και την ταχύτητα πρόωσης αντίστοιχα. Πατώντας πάνω στο εικονίδιο Save As new Tech., εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο σχήμα 3.24, ο χειριστής πληκτρολογεί το επιθυμητό όνομα για το νέο Technology, συνήθως καταχωρούνται οι απαραίτητες πληροφορίες για την ταχύτητα πρόωσης, την συχνότητα των παλμών και το επιθυμητό πάχος του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί ανά layer και στη συνέχεια αποθηκεύεται πατώντας Save.



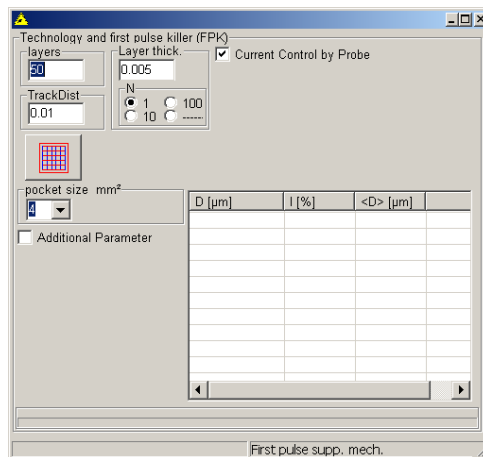
Σχήμα 3.24: Save As new Tech.

Μετάπειτα ο χρήστης κλείνει όλα τα παράθυρα και με την διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως σχετικά με το πως ορίζεται το σημείο «μηδέν», ορίζει το σημείο «μηδέν» στο οποίο θα τρέξει το Technology για τον υπολογισμό της ισχύος. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση μας στην κατεργασία των περιγραμμάτων πάνω στις πλάκες δεν έπαιξε σημαντικό ρόλο τόσο η διαστατική ακρίβεια ως προς το βάθος χάραξης όσο το να είναι εμφανές το περίγραμμα πάνω στην εκάστοτε πλάκα. Σχετικά με την διαδικασία, στο αρχικό interface του προγράμματος πατάμε στο εικονίδιο με το γρανάζι που βρίσκεται δεξιά της οθόνης, όπου μας ανοίγει το παράθυρο Tools and Settings του σχήματος 3.25.



Σχήμα 3.25: Tools and Settings

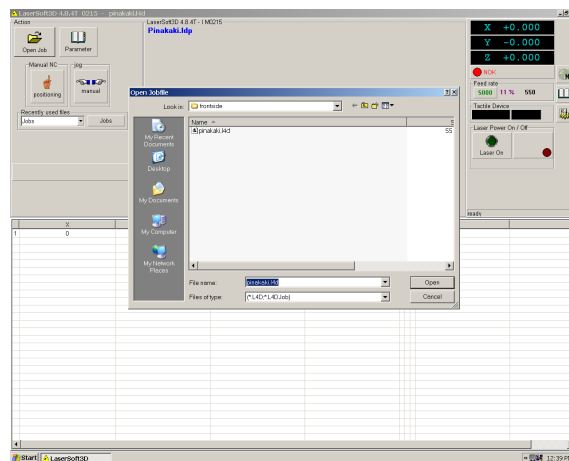
Στη συνέχεια πατάμε πάνω στο εικονίδιο Technol., όπου μας ανοίγει το παρακάτω παράθυρο σχήματος 3.26.



Σχήμα 3.26: Technol.

Στο πλαίσιο με την ένδειξη layers, ορίζεται η ανώτατη τιμή περασμάτων (layers), που με το πέρας αυτών θα σταματήσει η διαδικασία εύρεσης κατάλληλης ισχύος, ανεξαρτήτως εάν έχει βρεθεί η κατάλληλη τιμή. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η αρχική τιμή ισχύος πρέπει να είναι κοντά. Στο πλαίσιο TrackDist καταχωρείται η τιμή Td η οποία προκύπτει από την διαίρεση της ταχύτητας πρόωσης με την συχνότητα των παλμών, ξεχωριστά για κάθε κατεργασία που επρόκειτο να πραγματοποιηθεί. Στο κελί με την ένδειξη Layer thick. εισάγεται σε χιλιοστά η επιθυμητή τιμή πάχους που θέλει ο χειριστής. Δηλαδή το πόσο θα κόβει το Laser ανά layer. Στο πλαίσιο με την περιγραφή rocket size mm<sup>2</sup> ορίζεται μια τιμή που αναφέρεται στην πλευρά τετραγώνου που θα δημιουργήσει το Technology. Στη περίπτωση που είναι επιλεγμένη η επιλογή Current Control by Probe (συνεχής έλεγχος με το probe) η διαδικασία του Technology είναι απλή. Με το τέλος της δημιουργία του πρώτου στρώματος, το probe μετράει αν το πάχος του είναι όμοιο με αυτό που έχει οριστεί. Αν τα νούμερα δεν είναι κοντά τότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία, μέχρι να βρεθεί η τιμή της ισχύος που η μηχανή μπορεί να αφαιρεί το πάχος που έχει ορίσει ο χειριστής στο συγκεκριμένο Technology (ανάλογα με το υλικό, την ταχύτητα πρόωσης και την συχνότητα των παλμών). Με το πέρας της διαδικασίας εμφανίζεται ένα μήνυμα στην οθόνη που δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύσει ή να ακυρώσει το Technology. Εάν αποθηκευτεί από το χρήστη το αποτέλεσμα που δίνει για την ισχύς I[%], τότε εμφανίζεται ξανά το παράθυρο του σχήματος 3.24 και ο χρήστης επιλέγει το όνομα του Technology που αποθήκευσε προηγουμένως και το αντικαθιστά.

Τέλος έχοντας ολοκληρώσει τα παραπάνω βήματα, ολοκληρώνεται η διαδικασία με την χάραξη των περιγραμμάτων. Στο αρχικό μενού του προγράμματος πατάμε Open Job όπου μας ανοίγει το παρακάτω παράθυρο [σχήμα 3.27](#) και ο χρήστης επιλέγει το αρχείο .l4d και πατάει open.

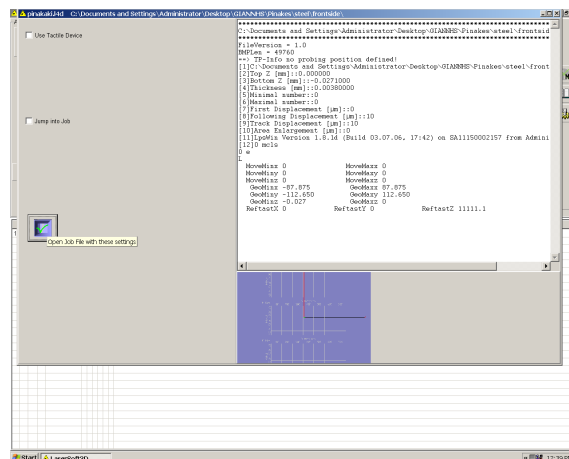


Σχήμα 3.27: Open Job





Σε αυτό το σημείο ανοίγει το παρακάτω παράθυρο με τις τελικές συνοπτικές πληροφορίες του προς κατεργασία αντικειμένου σχήμα 3.28. Σε αυτό το σημείο ο χειριστής της εργαλειομηχανής πρέπει να ελέγξει αν είναι όλα σωστά, εάν όχι πρέπει να επιστρέψει στα προηγούμενα βήματα και να διορθώσει το λάθος. Σε αυτό το παράθυρο υπάρχει η επιλογή Probe always after ... layers που εάν επιλεχτεί δίνεται η δυνατότητα να οριστεί από τον χειριστή της εργαλειομηχανής μετά από πόσα layers θα επαληθευτεί το probe το βάθος που έχει δημιουργηθεί μέχρι εκείνη την στιγμή. Στη δική μας περίπτωση με τα περιγράμματα δεν επιλέχτηκε καθώς δεν έπαιζε σημαντικό ρόλο η διαστατική ακρίβεια



στον Z άξονα. Επιλέγοντας το εικονίδιο , κλείνει το παράθυρο και η διαδικασία είναι έτοιμη να ξεκινήσει.



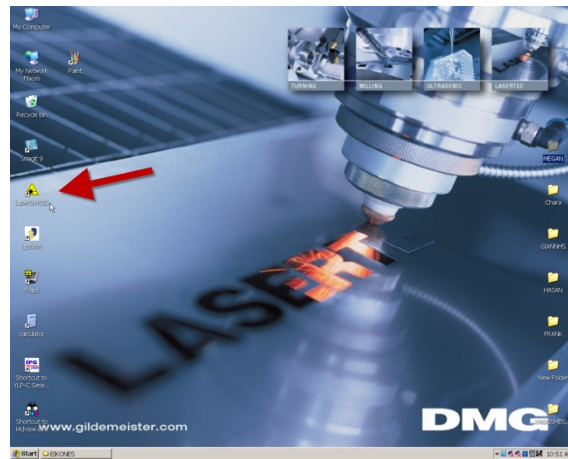
Σχήμα 3.28: Τελικές συνοπτικές πληροφορίες του προς κατεργασία αντικειμένου

Από αρχικό παράθυρο του LaserSoft3D (σχήμα 3.19), επιλέγοντας στο εικονίδιο , το laser ενεργοποιείται και επιλέγοντας το εικονίδιο  η κατεργασία ξεκινάει. Αφού η διαδικασία ολοκληρωθεί, το laser απενεργοποιείται επιλέγοντας το εικονίδιο . Η πόρτα της μηχανής ξεκλειδώνει γυρνώντας δεξιά σε οριζόντια θέση το κλειδί που βρίσκεται δεξιά στο πληκτρολόγιο και στη συνέχεια επιλέγοντας το κουμπί .

### 3.4.3 Technology

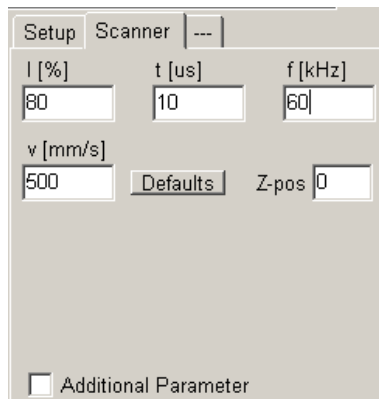
Σε αυτή τη φάση έχοντας ολοκληρωθεί η διαδικασία με την χάραξη των περιγραμμάτων και στα τέσσερα υλικά, γίνεται μια ενδελεχής ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων ήταν σχετικά απλός. Σε κάθε διαφορετικό υλικό πραγματοποιήθηκαν τρεις πίνακες πειραμάτων, όπου ο κάθε πίνακας είχε σταθερή την μέση ένταση των παλμών  $P$  (W) και αλάζοντας την ταχύτητα πρόωσης  $V$  (mm/s) και την συχνότητα  $F$  (kHz).

Αρχικά ο χειριστής ανοίγει το πρόγραμμα LaserSoft3D όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.29](#). Το LaserSoft3D όπως αναφέρθηκε είναι το τελικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται από τον χειριστή της εργαλειομηχανής για να προχωρήσει στην τελική φάση της κατεργασίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες που δίνει είναι ο ορισμός της θέσης «μηδέν» πάνω στο κομμάτι με την βοήθεια της ψηφιακής κάμερας (κεφάλαιο 3.1.) που διαθέτει το κέντρο κατεργασίας. Καθώς και ρύθμιση της κατάλληλης ισχύος για συγκεκριμένες παραμέτρους, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί η αφαίρεση του επιθυμητού βάθους εγχάραξης ανά layer σε κάθε υλικό ξεχωριστά.



Σχήμα 3.29: Άνοιγμα προγράμματος LaserSoft3D


Στη πειραματική διαδικασία αρχικά καταχωρούνται οι συνθήκες του εκάστοτε πειράματος: ισχύς  $I$ [%], συχνότητα  $f$ [kHz] και ταχύτητα  $V$ [mm/s] όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.30](#). Η ένδειξη  $t$ [ $\mu$ s] είναι ο χρόνος του παλμού με πρότυπη τιμή 10, είναι κάτι που παρέμεινε σταθερό σε όλα τα πειράματα. Πατώντας πάνω στο εικονίδιο Save As new Tech., εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο [σχήμα 3.24](#), ο χειριστής πληκτρολογεί το επιθυμητό όνομα για τις νέες συνθήκες, συνήθως εισαγάγει τις απαραίτητες πληροφορίες για την ταχύτητα πρόωσης, την συχνότητα των παλμών και το επιθυμητό πάχος υλικού που θέλει να αφαιρεθεί, αλλά σε αυτήν την περίπτωση για αποφυγή λαθών και διευκόλυνση του χειριστή αποθηκεύεται με τον αριθμό (α/α) του εκάστοτε πειράματος.

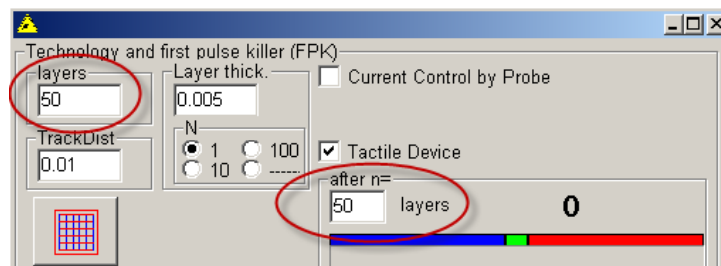


Σχήμα 3.30: Καταχώρηση συνθηκών για το εκάστοτε πείραμα

Στη συνέχεια έχοντας επιστρέψει στο αρχικό interface του προγράμματος επιλέγοντας στο

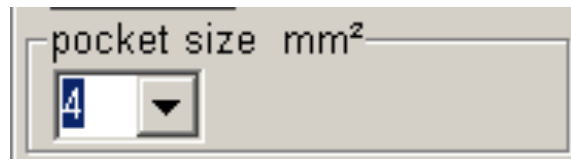
(Tools and Settings) . Όπου μας ανοίγει το παράθυρο Tools and Settings του

σχήματος 3.25. Στη συνέχεια επιλέγοντας το εικονίδιο Technol. , ανοίγει το παράθυρο του σχήματος 3.26. Σε αυτό το σημείο πρέπει να δοθεί η κατάλληλη προσοχή ότι σε αντίθεση με την διαδικασία που ακολουθήθηκε προηγουμένως για την χάραξη των περιγραμμάτων στα πειράματα **δεν** επιλέγετε η εντολή «Current Control by Probe» αλλά η εντολή «Tactile Device», όπου δίνει την δυνατότητα να καταχωρήσει ο χρήστης ένα συγκεκριμένο αριθμό layer (σχήμα 3.31). Στην επιλογή του «Tactile Device» ουσιαστικά πραγματοποιείται η μέτρηση του βάθους χάραξης με το probe περιοδικά ανάλογα με τον αριθμό των layer που θα του έχει οριστεί. Δηλαδή στην πειραματική διαδικασία καταχωρήθηκε ο ίδιος αριθμός με τον αριθμό των συνολικών layer που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε πείραμα, καθώς μόνο το τελικό βάθος εγχάραξη χρειάζεται. Δηλαδή στον ανοξείδωτο χάλυβα (SAE304) στον χάλυβα (P355GH) και στον ορείχαλκο το ορίστηκε στα 50 layers, ενώ στο αλουμίνιο (7075-T6) το ορίστηκε στα 30 layers, ο λόγος αυτής της διαφοροποίησης εξηγείται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.



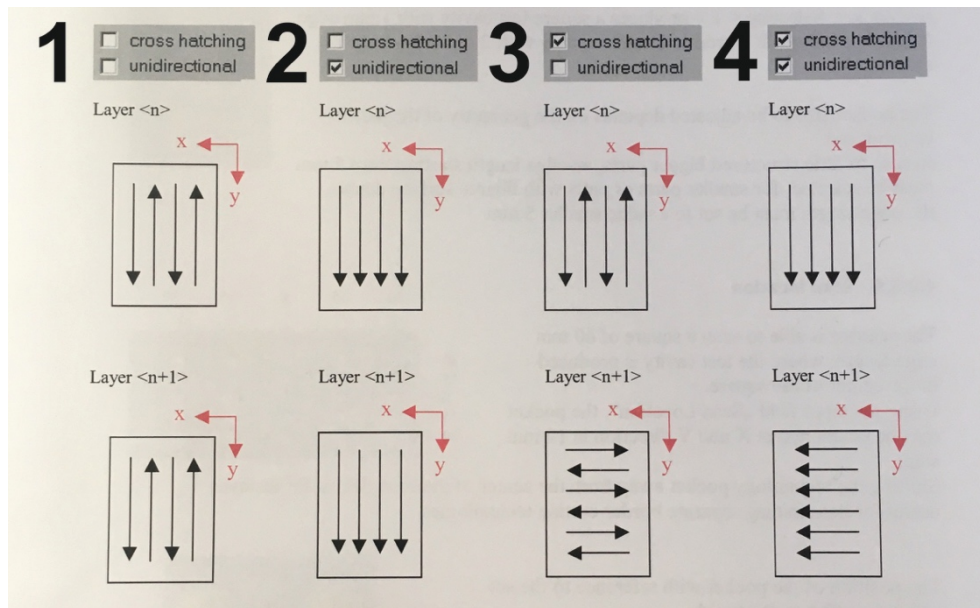
Σχήμα 3.31: Tactile Device

Στην συνέχεια επιλέγετε η επιθυμητή διάσταση που θα έχει το τετραγωνάκι του εκάστοτε πειράματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.32 ορίζετε σταθερά για όλα τα πειράματα να έχουν rocket size 4 mm<sup>2</sup>. Ένα μέγεθος το οποίο από την μια δεν είναι πολύ μικρό, έτσι ώστε να μην δημιουργήσει πρόβλημα με την μέτρηση του βάθους εγχάραξης το probe και από την άλλη όχι πολύ μεγάλο έτσι ώστε να περιοριστεί ο χρόνος του εκάστοτε πειράματος.




Σχήμα 3.32: Ορισμός διαστάσεων για το τετραγωνάκι του εκάστοτε πειράματος

Μια ακόμα ρύθμιση που πραγματοποιήθηκε πριν ξεκινήσει το κάθε πείραμα είναι η ρύθμιση στρατηγική σάρωσης της δέσμης laser στο τεμάχιο. Αυτό γίνεται από τον συνδυασμό των επιλογών cross hatching και unidirectional. Στο [σχήμα 3.33](#) φαίνονται οι τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί που μπορούν να επιλεγούν από το χειριστή. Στη πειραματική διαδικασία επιλέχτηκε η τρίτη επιλογή.



Σχήμα 3.33: Ρύθμιση στρατηγική σάρωσης

Τέλος για να αρχίσει το κέντρο κατεργασίας την πειραματική διαδικασία ο χειριστής επιλέγει το κουμπί . Σε αυτό το σημείο, με την προϋπόθεση ο χειριστής να έχει ενεργοποιήσει το laser, ξεκινάει η πειραματική διαδικασία.



## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πειραματική διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν σε τέσσερις μεταλλικές πλάκες οι αλλαγές στις παραμέτρους της διεργασίας laser engraving στο τελικό βάθος εγχάραξης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Αλουμίνιο (7075-T6)
- Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)
- Χάλυβας (P355GH)
- Ορείχαλκος (EN CC755S)

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι η ταχύτητα σάρωσης  $V$  [mm/sec], η συχνότητα των παλμών  $F$  [kHz] και η μέση ένταση των παλμών  $P$  [W]. Σε κάθε υλικό πραγματοποιήθηκαν τρεις πίνακες πειραμάτων. Ο κάθε πίνακας περιέχει δύο μεταβλητές, στον άξονα  $x$  την ταχύτητα πρόωσης  $V$  [mm/sec] των παλμών με εύρος [100 έως 700 mm/sec] και στον άξονα  $y$  την συχνότητα  $F$  [kHz] με εύρος τιμών [20 έως 80 kHz]. Ο κάθε πίνακας του εκάστοτε υλικού αντιπροσωπεύει μια διαφορετική μέση ένταση παλμών  $P$  [W] με ένταση 8, 12 και 16 W. Που αντιστοιχεί στο 40, 60 και 80% της ισχύς που μπορεί να δώσει το κέντρο κατεργασίας. Για όλα τα υλικά εκτός από το αλουμίνιο ορίστηκε στο Technology να γίνουν όλα τα πειράματα με 50 περάσματα (layers), στο αλουμίνιο δεν υπήρχε αυτή η δυνατότητα καθώς βάση του πάχους της πλάκας (5mm) πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα υπήρχε η πιθανότητα να κόψει το υλικό και επομένως να μην τα επιθυμητά αποτελέσματα. Βάση των αποτελεσμάτων το πάχος στρώματος του υλικού που μπορεί να αφαιρεθεί ανά πέρασμα (layer) κυμαίνεται από [0 έως 62,485  $\mu\text{m}$ ]. Φυσικά για κάθε υλικό οι τιμές αυτές διαφέρουν και προσαρμόστηκαν ανάλογα έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή πειραματική εικόνα για κάθε υλικό, καθώς οι ιδιότητές τους διαφέρουν με αποτέλεσμα να παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε υλικό. Η μηχανή laser Lasertec 40 στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είναι fiber Yb:YAG με σταθερό μήκος κύματος στα 1070 nm όπως έχει αναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια.

### 4.2 Αλουμίνιο (7075-T6)

Στο αλουμίνιο συγκεκριμένα το εύρος των τιμών που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη μηχανή είναι: Ταχύτητα 200 – 500 mm/sec, Συχνότητα 40 kHz με τελικό πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού 1 – 8  $\mu\text{m}$ . Ωστόσο στη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν κάποιες τιμές των παραμέτρων εκτός των ορίων που μας έδινε το εγχειρίδιο, συγκεκριμένα το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στο Αλουμίνιο ήταν:

Στο πρώτο πινακάκι πειραμάτων :

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

Στο δεύτερο πινακάκι πειραμάτων :

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

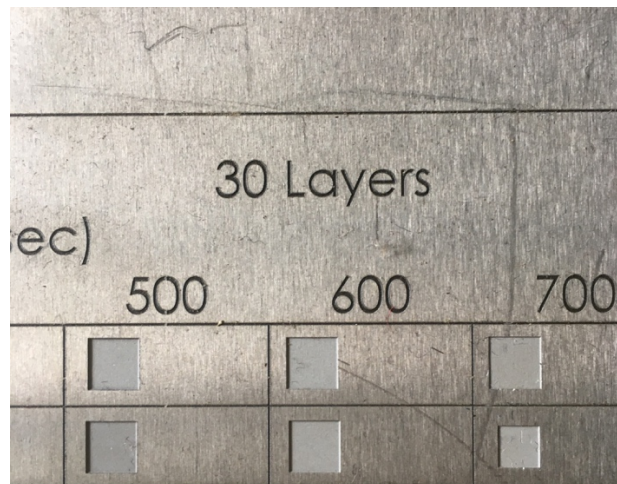
Στο τρίτο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [16 W, 80%]



- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] σε mm/sec

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υλικά στο αλουμίνιο πραγματοποιήθηκαν 30 περάσματα (Layers) ενώ σε όλα τα υπόλοιπα υλικά ορίστηκε το Technology έτσι ώστε να πραγματοποιήσει όλα τα πειράματα με 50 περάσματα (layers), στο αλουμίνιο δεν υπήρχε αυτή η δυνατότητα καθώς βάση του μικρού πάχους της πλάκας (5mm) πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα υπήρχε η πιθανότητα να κοπεί το υλικό και επομένως να μην εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.1: Σήμανση πάνω στην πλάκα το νούμερο των περασμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο αλουμίνιο

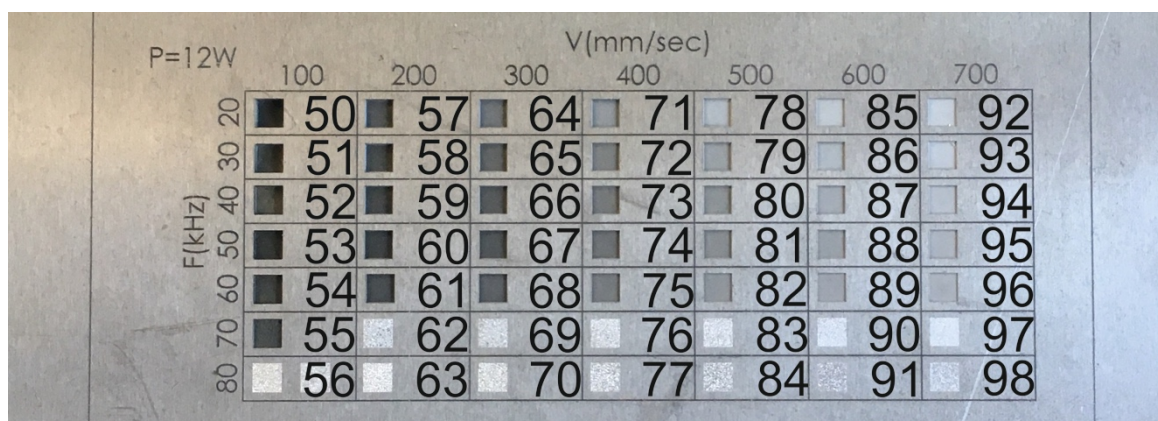
Στο σχήμα 4.2, σχήμα 4.3 και σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα πινακάκια έτσι όπως τα έχουν χαραχθεί στο δοκίμιο του αλουμινίου 7075-T6, όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια που σχηματίζει το κάθε πείραμα από την διαδικασία του Technology. Τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα και παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας στον οποίο αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι: ταχύτητα V (mm/sec), συχνότητα F (kHz), το βάθος χάραξης ανά layer και ο χρόνος κατεργασίας που χρειάστηκε για το κάθε πείραμα.

P=8W		V(mm/sec)						
		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

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/	V	F (kHz)	H/M/S	L.th.	A/	V	F (kHz)	H/M/S	L.th.

A	(mm/s ec)			(μm)	A	(mm/s ec)			(μm)
1	100	20	25/49	34,902	26	400	60	05/07	0,100
2	100	30	39/06	26,418	27	400	70	06/00	0,121
3	100	40	51/36	17,688	28	400	80	06/51	0,142
4	100	50	01/06/24	0,218	29	500	20	01/07	6,695
5	100	60	01/17/53	0,246	30	500	30	01/41	6,288
6	100	70	01/32/06	0,341	31	500	40	02/14	4,378
7	100	80	01/43/06	0,240	32	500	50	02/47	0,184
8	200	20	06/33	16,805	33	500	60	03/22	0,121
9	200	30	09/50	15,465	34	500	70	03/56	0,085
10	200	40	13/10	10,391	35	500	80	04/26	0,064
11	200	50	16/27	0,035	36	600	20	48	4,991
12	200	60	19/58	-0,019	37	600	30	01/11	5,272
13	200	70	22/41	0,113	38	600	40	01/35	3,756
14	200	80	26/19	0,077	39	600	50	01/58	0,136
15	300	20	02/59	11,677	40	600	60	02/22	0,134
16	300	30	04/29	10,087	41	600	70	02/45	0,071
17	300	40	05/58	6,748	42	600	80	03/10	0,067
18	300	50	07/27	0,086	43	700	20	36	3,792
19	300	60	08/57	0,141	44	700	30	47	4,305
20	300	70	10/24	0,001	45	700	40	01/10	3,479
21	300	80	11/46	-0,019	46	700	50	01/29	0,273
22	400	20	01/43	8,971	47	700	60	01/46	0,121
23	400	30	02/34	7,732	48	700	70	02/04	0,098
24	400	40	03/26	5,173	49	700	80	02/21	0,114
25	400	50	04/16	0,159					

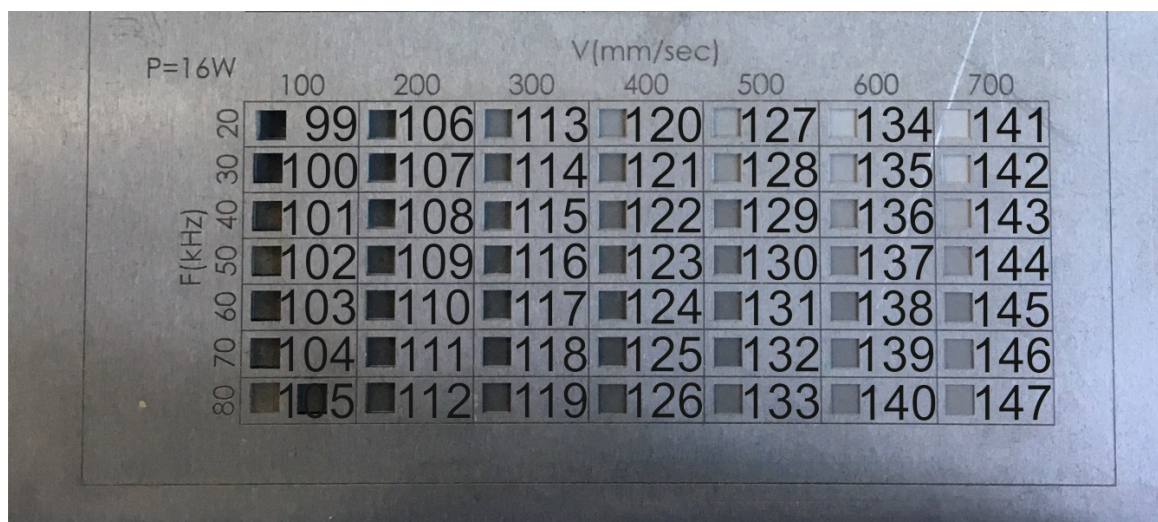
Σχήμα 4.2: Πινάκκι έντασης P=[8 W, 40%] και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα



	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
50	100	20	25/49	51,289	75	400	60	05/07	7,585
51	100	30	39/06	43,093	76	400	70	06/00	0,069

52	100	40	51/36	33,889	77	400	80	06/51	0,109
53	100	50	01/06/24	27,867	78	500	20	01/07	9,539
54	100	60	01/17/53	23,709	79	500	30	01/41	9,966
55	100	70	01/32/06	13,006	80	500	40	02/14	9,131
56	100	80	01/43/06	-0,405	81	500	50	02/47	7,915
57	200	20	06/33	25,134	82	500	60	03/22	5,534
58	200	30	09/50	26,614	83	500	70	03/56	-0,025
59	200	40	13/10	24,561	84	500	80	04/26	0,005
60	200	50	16/27	19,489	85	600	20	48	7,375
61	200	60	19/58	13,976	86	600	30	01/11	8,696
62	200	70	22/41	-0,249	87	600	40	01/35	8,099
63	200	80	26/19	0,125	88	600	50	01/58	6,875
64	300	20	02/59	16,688	89	600	60	02/22	4,785
65	300	30	04/29	16,702	90	600	70	02/45	0,048
66	300	40	05/58	16,348	91	600	80	03/10	0,066
67	300	50	07/27	14,441	92	700	20	36	6,660
68	300	60	08/57	10,146	93	700	30	47	7,196
69	300	70	10/24	-0,016	94	700	40	01/10	6,791
70	300	80	11/46	0,036	95	700	50	01/29	5,843
71	400	20	01/43	12,770	96	700	60	01/46	4,146
72	400	30	02/34	12,768	97	700	70	02/04	-0,024
73	400	40	03/26	11,781	98	700	80	02/21	0,045
74	400	50	04/16	10,494					

Σχήμα 4.3: Πινάκκι έντασης P=[12 W, 60%] και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα



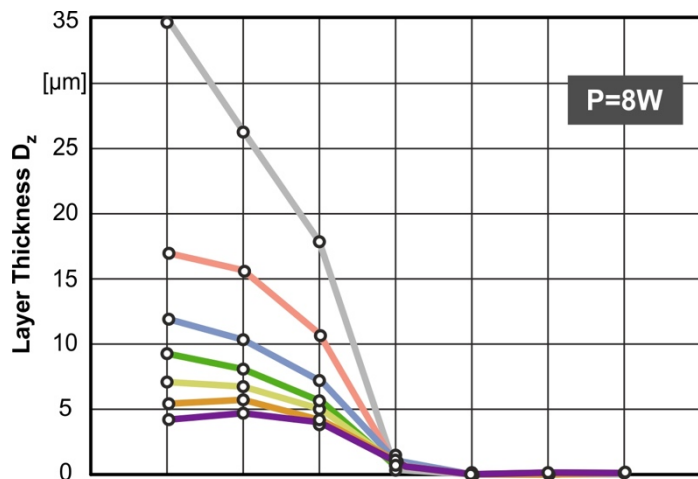
	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
99	100	20	25/49	62,458	124	400	60	05/07	16,206
100	100	30	39/06	55,278	125	400	70	06/00	13,867
101	100	40	51/36	41,195	126	400	80	06/51	11,114



102	100	50	01/06/24	35,493	127	500	20	01/07	11,559
103	100	60	01/17/53	36,135	128	500	30	01/41	13,136
104	100	70	01/32/06	32,531	129	500	40	02/14	13,463
105	100	80	01/43/06	27,808	130	500	50	02/47	13,201
106	200	20	06/33	31,816	131	500	60	03/22	12,465
107	200	30	09/50	37,374	132	500	70	03/56	11,018
108	200	40	13/10	35,699	133	500	80	04/26	8,511
109	200	50	16/27	30,235	134	600	20	48	9,215
110	200	60	19/58	23,973	135	600	30	01/11	11,240
111	200	70	22/41	20,965	136	600	40	01/35	11,330
112	200	80	26/19	19,759	137	600	50	01/58	10,873
113	300	20	02/59	20,343	138	600	60	02/22	9,911
114	300	30	04/29	22,833	139	600	70	02/45	8,642
115	300	40	05/58	24,275	140	600	80	03/10	6,645
116	300	50	07/27	23,538	141	700	20	36	7,091
117	300	60	08/57	20,244	142	700	30	47	9,461
118	300	70	10/24	16,752	143	700	40	01/10	9,728
119	300	80	11/46	14,083	144	700	50	01/29	9,288
120	400	20	01/43	15,300	145	700	60	01/46	8,545
121	400	30	02/34	16,752	146	700	70	02/04	7,177
122	400	40	03/26	17,269	147	700	80	02/21	5,502
123	400	50	04/16	17,330					

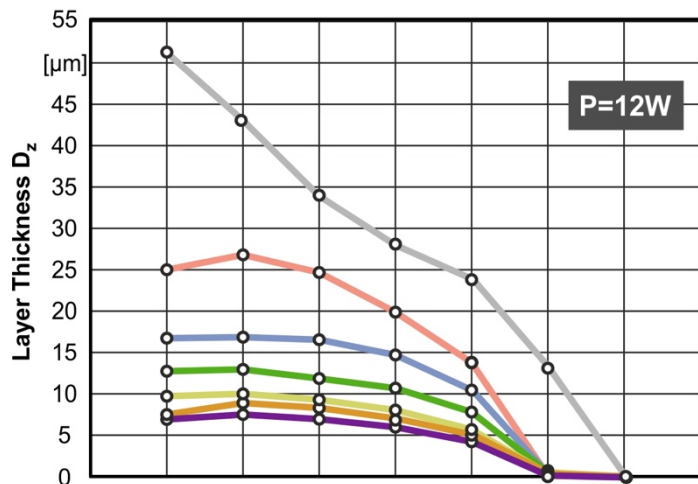
Σχήμα 4.4: Πινακάκι έντασης  $P=[16\text{ W}, 80\%]$  και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα

Στη συνέχεια στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για το κάθε πινακάκι του υλικού, δηλαδή ένα για κάθε ένταση [8, 12, 16 W]. Στον άξονα x έχει περαστεί η συχνότητα των παλμών και στον άξονα y το βάθος εγχάραξης του layer. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν επτά διαφορετικές καμπύλες, η κάθε μια με άλλο χρώμα. Που κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.



Scanning Speed [V]

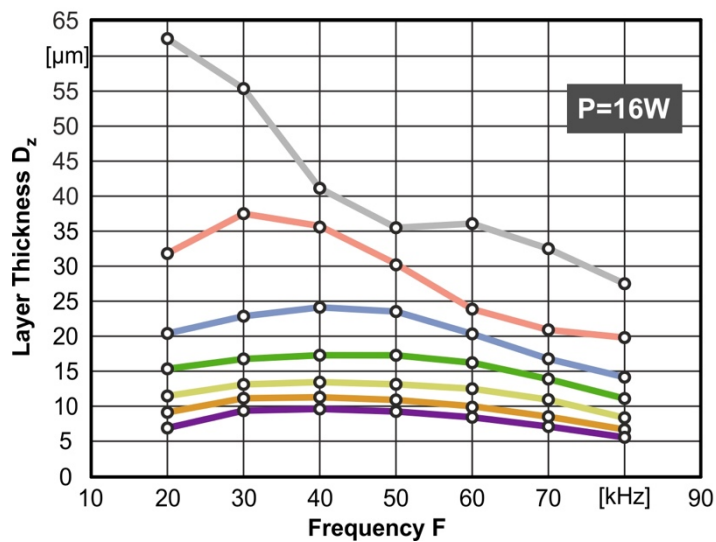
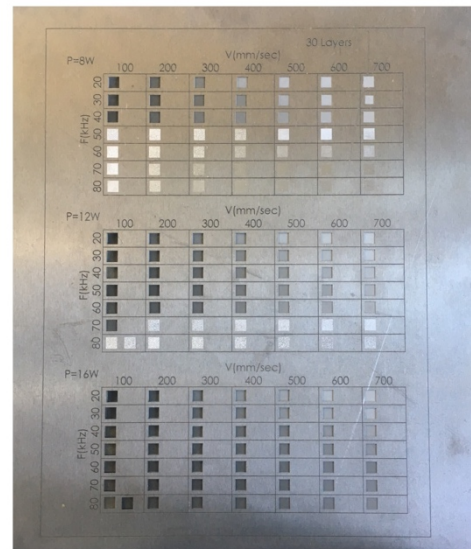
V=100 mm/s  
V=200  
V=300  
V=400  
V=500  
V=600  
V=700



Informations

Workpiece material	AA (7075-T6)
Machine	DMG Lasertec 40
Laser beam	Nd YAG
Pulse duration	100ns
Spot size	30μm
Pocket size	4x4 mm
Layers	30

Image



Σχήμα 4.5: Διαγράμματα πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα (Layer thickness) – Συχνότητας για τις ταχύτητες 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm/sec

Από τα παραπάνω διαγράμματα με την πρώτη ματιά παρατηρείται εύκολα ότι το layer thickness αυξάνεται καθώς αυξάνετε η ισχύς P. Αυτό διακρίνεται πολύ εύκολα βλέποντας απλά και μόνο το μέγιστο layer thickness στον άξονα y για κάθε ένα από τα τρία διαγράμματα. Στο διάγραμμα P=8W (40%) το μέγιστο y είναι στα 34,902 μm, στο

διάγραμμα  $P=12W$  (60%) το μέγιστο  $y$  είναι στα 51,289  $\mu m$  και στο διάγραμμα  $P=16W$  (80%) το μέγιστο  $y$  είναι στα 62,485  $\mu m$ .

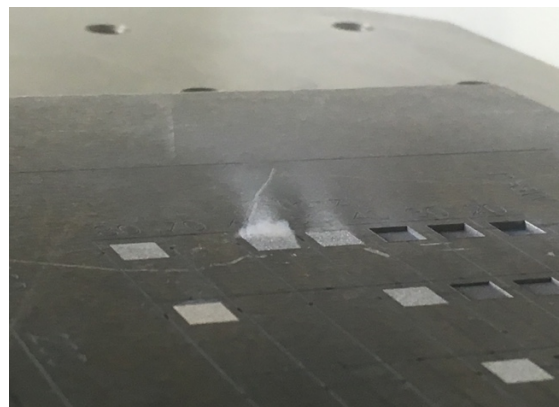
Επίσης ένα άμεσο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας και τα τρία διαγράμματα είναι ότι καθώς μειώνεται η ταχύτητα, ανεξαρτήτως της έντασης, παρατηρείται και αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Βλέποντας και τα τρία διαγράμματα παρατηρείται ότι οι γκρι καμπύλες με την μικρότερη ταχύτητα (100 mm/sec) έχουν πάντα μεγαλύτερη τιμή για το layer thickness από τις υπόλοιπες καμπύλες (με μεγαλύτερες ταχύτητες) σε αντίστοιχες συχνότητες.

Πιο αναλυτικά, στα διαγράμματα  $P=8W$  (40%) και  $P=12W$  (60%) μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι καμπύλες είναι φθίνουσες. Δηλαδή όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο παρατηρείται και μείωση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Κάτι λογικό δεδομένου ότι η αλλαγή της συχνότητας των παλμών επηρεάζει τον αριθμό παλμών λέιζερ που χτυπά την πλάκα καθώς και την ποσότητα ενέργειας λέιζερ σε κάθε έναν από αυτούς τους παλμούς. Οι χαμηλότερες συχνότητες παλμών τείνουν να εξατμίσουν το υλικό λόγω του υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου κάθε παλμού ενώ στις υψηλότερες συχνότητες παλμών τείνουν να θερμαίνουν την επιφάνεια του τεμαχίου αντί να εξατμίζει τοπικά υλικό από αυτό.

Κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την παραπάνω θεώρηση βάση των αποτελεσμάτων είναι ότι αρχικά στο διάγραμμα  $P=8W$  (40%) από την τιμή της συχνότητας 50 kHz και πάνω παρατηρείται αδυναμία εξάχνωσης και αφαίρεσης υλικού καθώς στο διάγραμμα  $P=12W$  (60%) παρατηρείται το φαινόμενο για τιμή της συχνότητας από 70 kHz και πάνω.

Επίσης στα δύο αυτά διαγράμματα παρατηρήθηκε στον άξονα των  $y$  που είναι το layer thickness ότι υπάρχει και αρνητική κλίμακα. Δηλαδή το probe έδωσε αρνητικές τιμές για τις συγκεκριμένες συχνότητες. Αυτό προφανώς δεν σημαίνει ότι υπάρχει προσθήκη υλικού, σίγουρα όμως δεν υπάρχει αφαίρεση. Αυτό ενδεχομένως συμβαίνει λόγω της θέρμανσης της επιφάνειας του υλικού η οποία με τη σειρά της επιφέρει τοπική διαστολή του. Με αποτέλεσμα στο τέλος του πειράματος που το probe κάνει την τελική μέτρηση του βάθους χάραξης να παίρνει αρνητικές τιμές λόγω της τοπικής διαστολής του υλικού.

Ένα ακόμα φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε στο αλουμίνιο στις παραπάνω συνθήκες, συγκεκριμένα  $P=8W$  (40%),  $F=60$  kHz και  $V=100$  mm/sec, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6, είναι η δημιουργία ενός επιφανειακού στρώματος μετάλλου. Σε αυτές τις συνθήκες όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η κατεργασία βρίσκεται στα όρια του εάν το κατεργαζόμενο υλικό υφίσταται εξάχνωση ή απλά θερμαίνεται χωρίς να φτάνει σε σημείο τήξης. Βλέποντας το φαινόμενο αυτό γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει εξάχνωση του μετάλλου αλλά είναι τόσο οριακή με αποτέλεσμα να ξανά στερεοποιείται το υλικό και έτσι να δημιουργείται ένα επιφανειακό στρώμα μετάλλου στα πλαϊνά του πειράματος.



Σχήμα 4.6: Δημιουργία επιφανειακού στρώματος μετάλλου στις συνθήκες P=8W (40%), F= 60 kHz και V=100 mm/sec

Το διάγραμμα με ισχύς P=16W (80%) έχει διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα διαγράμματα με P=8W (40%) και P=12W (60%). Δηλαδή ενώ στα διαγράμματα με ισχύς 8 και 10 W οι καμπύλες ανεξαρτήτως της ταχύτητας είναι γνησίως φθίνουσες στο διάγραμμα με ισχύς 16 W, στις ταχύτητες σάρωσης: [300, 400, 500, 600, 700 mm/sec] παρατηρείται κοινή συμπεριφορά. Δηλαδή εμφανίζουν αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρείται σταδιακή μείωσή του. Δημιουργώντας έτσι καμπύλες με κωδωνοειδή μορφή. Στην καμπύλη με ταχύτητα σάρωσης V=200 mm/sec παρατηρείται παρόμοια μορφή καμπύλης απλά με τη διαφορά ότι το peak εμφανίζεται στη συχνότητα των 30 kHz καθώς και ότι είναι αισθητά μεγαλύτερα τα πάχη στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα σε σύγκριση με τις υψηλότερες ταχύτητες. Τέλος στην καμπύλη με ταχύτητα σάρωσης V=100 mm/sec παρατηρείται μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή εάν δεν παρουσίαζε στις συχνότητες 40 και 50 kHz μια απότομη μείωση του layer thickness τότε θα εμφανιζόταν μια σχεδόν γραμμική καμπύλη με αρνητική κλίση. Επομένως για αυτή τη ταχύτητα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα παρατηρείται παράλληλα σταδιακή μείωση του layer thickness.

#### 4.3 Ανοξείδωτος Χάλυβας (SAE304)

Στον ανοξείδωτο χάλυβα το εύρος των τιμών που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη μηχανή είναι: Ταχύτητα 200 mm/sec, Συχνότητα 40 kHz με τελικό πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού 1 – 5  $\mu\text{m}$ . Ωστόσο στη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν κάποιες τιμές των παραμέτρων εκτός των ορίων που μας έδινε το εγχειρίδιο, συγκεκριμένα το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στον ανοξείδωτο χάλυβα ήταν:

Στο πρώτο πινακάκι πειραμάτων :

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

Στο δεύτερο πινακάκι πειραμάτων :

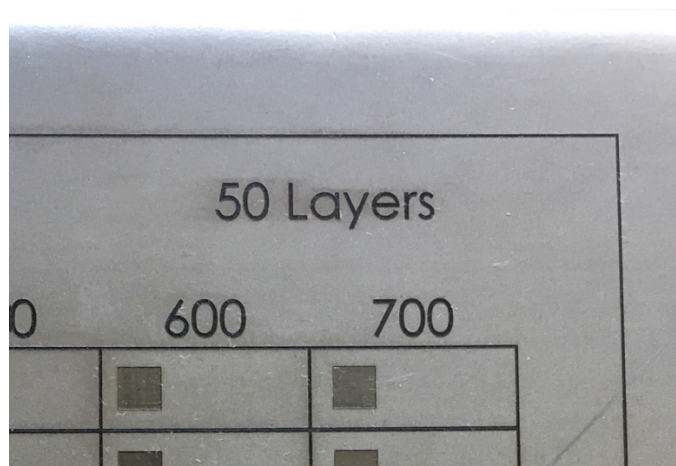
- Μέση ένταση παλμών: [12 W, 60%]
- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] σε mm/sec

Στο τρίτο πινακάκι πειραμάτων :

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

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7 και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ορίστηκε στο κέντρο κατεργασίας μέσω του Technology να πραγματοποιήσει στη πειραματική διαδικασία 50 περάσματα (Layers).





Σχήμα 4.7: Σήμανση πάνω στην πλάκα το νούμερο των περασμάτων που πραγματοποιήθηκαν στον ανοξείδωτο χάλυβα

Στο [σχήμα 4.8](#), [σχήμα 4.9](#) και [σχήμα 4.10](#) παρουσιάζονται τα πινακάκια έτσι όπως τα έχουν χαραχθεί στο δοκίμιο του ανοξείδωτος χάλυβας (SAE304), όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια που σχηματίζει το κάθε πείραμα από την διαδικασία του Technology. Τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα και παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας στον οποίο αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι: ταχύτητα  $V$  (mm/sec), συχνότητα  $F$  (kHz), το βάθος χάραξης ανά layer και ο χρόνος κατεργασίας που χρειάστηκε για το κάθε πείραμα.

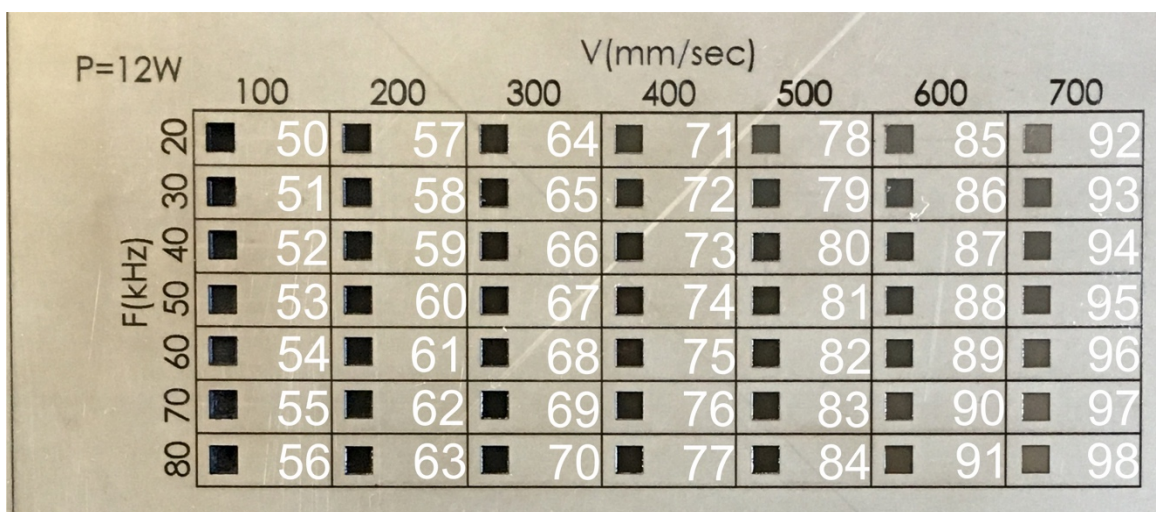
		50 Layers						
		V(mm/sec)						
P=8W		100	200	300	400	500	600	700
F(kHz)	20	1	8	15	22	29	36	43
	30	2	9	16	23	30	37	44
	40	3	10	17	24	31	38	45
	50	4	11	18	25	32	39	46
	60	5	12	19	26	33	40	47
	70	6	13	20	27	34	41	48
	80	7	14	21	28	35	42	49

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	$V$ (mm/sec)	$F$ (kHz)	H/M/S	L.th. ( $\mu m$ )	A/A	$V$ (mm/sec)	$F$ (kHz)	H/M/S	L.th. ( $\mu m$ )
1	100	20	27/45	19,346	26	400	60	05/23	1,627
2	100	30	42/02	18,837	27	400	70	06/20	0,880
3	100	40	55/26	15,393	28	400	80	07/13	0,745
4	100	50	01/09/15	10,648	29	500	20	01/13	0,909
5	100	60	01/21/27	8,145	30	500	30	01/46	1,254



6	100	70	01/38/56	8,224	31	500	40	02/22	1,479
7	100	80	01/46/30	11,180	32	500	50	02/56	1,250
8	200	20	07/02	4,666	33	500	60	03/32	1,043
9	200	30	10/23	6,573	34	500	70	04/07	0,589
10	200	40	14/05	7,838	35	500	80	04/38	0,468
11	200	50	17/32	6,680	36	600	20	51	0,654
12	200	60	21/17	5,005	37	600	30	01/15	0,896
13	200	70	24/12	3,109	38	600	40	01/41	0,985
14	200	80	28/08	2,967	39	600	50	02/04	0,859
15	300	20	03/10	2,251	40	600	60	02/29	0,770
16	300	30	04/45	3,202	41	600	70	02/53	0,441
17	300	40	06/20	3,720	42	600	80	03/18	0,333
18	300	50	07/54	3,365	43	700	20	45	0,480
19	300	60	09/29	2,704	44	700	30	55	0,683
20	300	70	11/02	1,241	45	700	40	01/15	0,695
21	300	80	12/28	1,316	46	700	50	01/33	0,572
22	400	20	01/50	1,348	47	700	60	01/50	0,493
23	400	30	02/43	1,929	48	700	70	02/09	0,330
24	400	40	03/41	2,262	49	700	80	02/26	0,272
25	400	50	04/31	1,987					

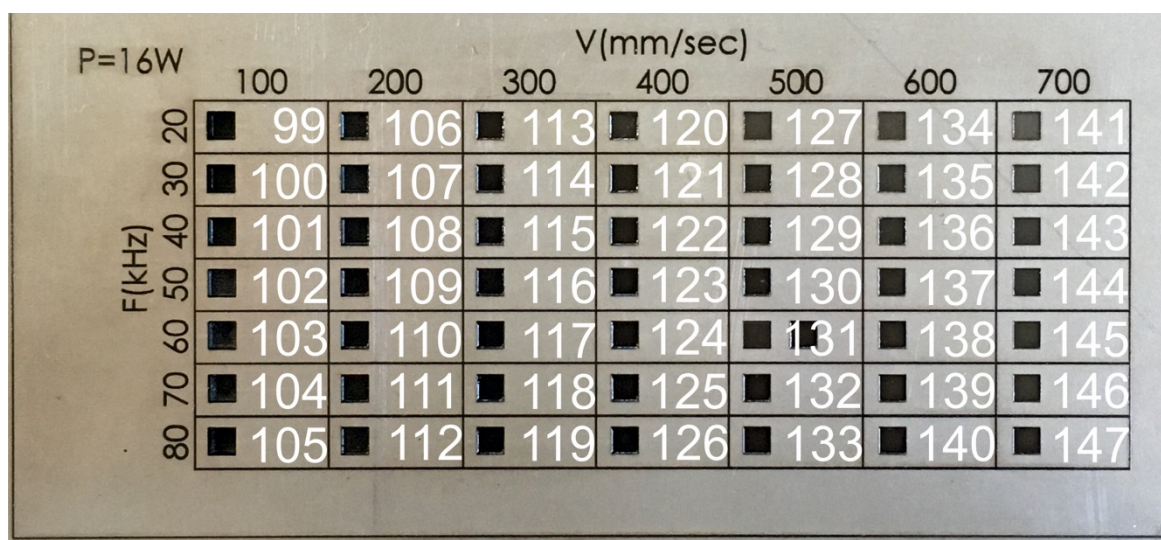
Σχήμα 4.8: Πινακάκι έντασης P=[8 W, 40%] και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα



	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
50	100	20	27/45	31,101	75	400	60	05/23	4,751
51	100	30	42/02	31,434	76	400	70	06/20	4,641
52	100	40	55/26	24,909	77	400	80	07/13	4,114
53	100	50	01/09/15	17,194	78	500	20	01/13	1,243
54	100	60	01/21/27	11,364	79	500	30	01/46	1,928
55	100	70	01/38/56	18,749	80	500	40	02/22	2,504
56	100	80	01/46/30	24,269	81	500	50	02/56	2,950

57	200	20	07/02	7,364	82	500	60	03/32	3,185
58	200	30	10/23	10,913	83	500	70	04/07	3,080
59	200	40	14/05	12,858	84	500	80	04/38	2,761
60	200	50	17/32	12,488	85	600	20	51	0,910
61	200	60	21/17	11,137	86	600	30	01/15	1,384
62	200	70	24/12	10,026	87	600	40	01/41	1,755
63	200	80	28/08	9,158	88	600	50	02/04	2,107
64	300	20	03/10	3,302	89	600	60	02/29	2,304
65	300	30	04/45	4,914	90	600	70	02/53	2,165
66	300	40	06/20	6,319	91	600	80	03/18	1,969
67	300	50	07/54	7,578	92	700	20	45	0,701
68	300	60	09/29	8,042	93	700	30	55	1,050
69	300	70	11/02	6,526	94	700	40	01/15	1,379
70	300	80	12/28	5,881	95	700	50	01/33	1,568
71	400	20	01/50	1,903	96	700	60	01/50	1,684
72	400	30	02/43	2,919	97	700	70	02/09	1,570
73	400	40	03/41	3,768	98	700	80	02/26	1,407
74	400	50	04/31	4,315					

Σχήμα 4.9: Πινάκκι έντασης P=[12 W, 60%] και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα

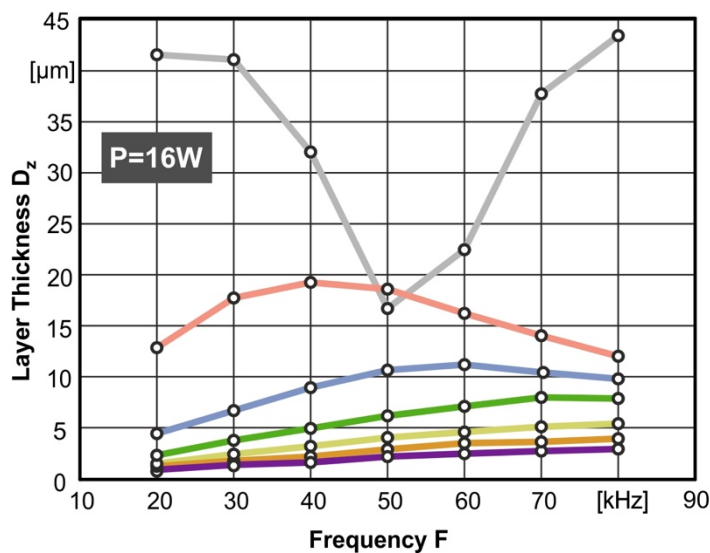
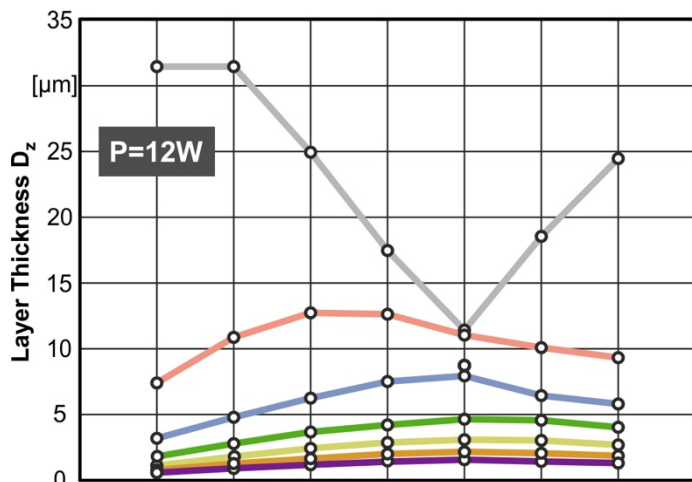
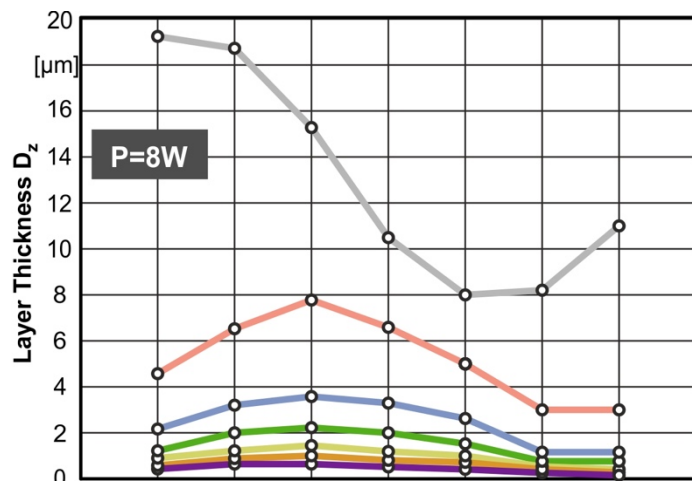


	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
99	100	20	27/45	41,622	124	400	60	05/23	7,162
100	100	30	42/02	41,132	125	400	70	06/20	8,082
101	100	40	55/26	32,239	126	400	80	07/13	7,869
102	100	50	01/09/15	16,862	127	500	20	01/13	1,552
103	100	60	01/21/27	22,806	128	500	30	01/46	2,516
104	100	70	01/38/56	37,742	129	500	40	02/22	3,347
105	100	80	01/46/30	43,769	130	500	50	02/56	4,129
106	200	20	07/02	13,046	131	500	60	03/32	4,650

107	200	30	10/23	17,847	132	500	70	04/07	5,141
108	200	40	14/05	19,392	133	500	80	04/38	5,517
109	200	50	17/32	18,608	134	600	20	51	1,115
110	200	60	21/17	16,263	135	600	30	01/15	1,757
111	200	70	24/12	14,133	136	600	40	01/41	2,402
112	200	80	28/08	12,133	137	600	50	02/04	2,977
113	300	20	03/10	4,412	138	600	60	02/29	3,601
114	300	30	04/45	6,864	139	600	70	02/53	3,724
115	300	40	06/20	9,130	140	600	80	03/18	3,967
116	300	50	07/54	10,856	141	700	20	45	0,814
117	300	60	09/29	11,132	142	700	30	55	1,286
118	300	70	11/02	10,492	143	700	40	01/15	1,773
119	300	80	12/28	9,907	144	700	50	01/33	2,235
120	400	20	01/50	2,427	145	700	60	01/50	2,598
121	400	30	02/43	3,833	146	700	70	02/09	2,875
122	400	40	03/41	5,144	147	700	80	02/26	3,012
123	400	50	04/31	6,301					

Σχήμα 4.10: Πινακάκι έντασης  $P=[16 \text{ W}, 80\%]$  και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα

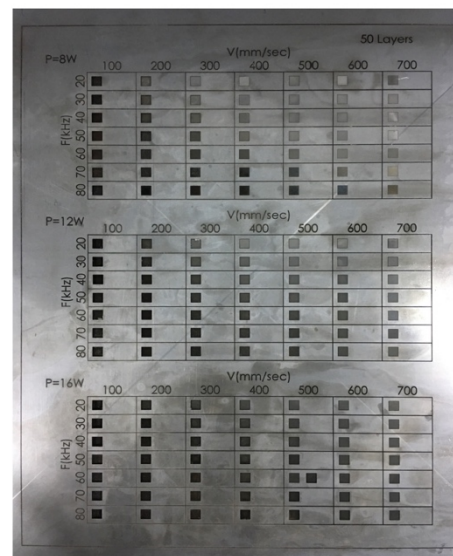
Στη συνέχεια στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για το κάθε πινακάκι του υλικού, δηλαδή ένα για κάθε ένταση [8, 12, 16 W]. Όπως και στα υπόλοιπα υλικά στον άξονα x είναι η συχνότητα των παλμών και στον άξονα y το βάθος εγχάραξης του layer. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν επτά διαφορετικές καμπύλες, η κάθε μια με άλλο χρώμα. Που κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.



#### Informations

Workpiece material	SAE304
Machine	DMG Lasertec 40
Laser beam	Nd YAG
Pulse duration	100ns
Spot size	30 $\mu\text{m}$
Pocket size	4x4 mm
Layers	50

#### Image



Σχήμα 4.10: Διαγράμματα πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα (Layer thickness) – Συχνότητας, για τις ταχύτητες 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm/sec

Από τα παραπάνω διαγράμματα με την πρώτη ματιά παρατηρείται εύκολα ότι το layer thickness αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς P. Αυτό διακρίνεται εύκολα βλέποντας απλά και μόνο το μέγιστο layer thickness στον άξονα y για κάθε ένα από τα τρία διαγράμματα. Στο διάγραμμα P=8W (40%) το μέγιστο y είναι στα 19,346  $\mu\text{m}$ , στο διάγραμμα P=12W

(60%) το μέγιστο  $y$  είναι στα 31,434  $\mu\text{m}$  και στο διάγραμμα  $P=16W$  (80%) το μέγιστο  $y$  είναι στα 41,622  $\mu\text{m}$ .

Επίσης ένα άμεσο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας και τα τρία διαγράμματα είναι ότι καθώς μειώνεται η ταχύτητα, ανεξαρτήτως της έντασης, υπάρχει και αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Βλέποντας και τα τρία διαγράμματα παρατηρείται ότι οι γκρι καμπύλες με την μικρότερη ταχύτητα (100 mm/sec) έχουν πάντα μεγαλύτερη τιμή για το layer thickness από τις υπόλοιπες καμπύλες (με μεγαλύτερες ταχύτητες) σε αντίστοιχες συχνότητες. Στον ανοξείδωτο χάλυβα σε ένα μεμονωμένο πείραμα στην ισχύς  $P=16W$  (80%) δεν συμβαίνει καθολικά η παραπάνω παρατήρηση. Αν παρατηρηθεί το διάγραμμα  $P=16W$  (80%) στη συχνότητα 50 kHz και τις καμπύλες με το γκρι και κόκκινο χρώμα, με ταχύτητες 100 και 200 mm/sec αντίστοιχα θα παρατηρηθεί ότι μόνο για αυτή τη συχνότητα η ταχύτητα  $V=200$  mm/sec αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο layer thickness σε σχέση με τη ταχύτητα  $V=100$  mm/sec.

Επιμέρους στο διάγραμμα  $P=8W$  (40%) παρατηρείται ότι για τις ταχύτητες σάρωσης: [300, 400, 500, 600, 700 mm/sec] εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή υπάρχει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρείται σταδιακή μείωσή του. Επίσης παρατηρείται ότι σε αυτές τις ταχύτητες τα πάχη στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα παραμένει σε χαμηλό επίπεδο, το μέγιστο layer thickness που προκύπτει για αυτές τις ταχύτητες είναι 3,365  $\mu\text{m}$ . Στη ταχύτητα  $V=200$  mm/sec η καμπύλη έχει κωδωνοειδή μορφή, η οποία εμφανίζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας, σταδιακή μείωση. Τέλος στη ταχύτητα  $V=100$  mm/sec η καμπύλη εμφανίζει τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Παρατηρείται συνεχή μείωση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 60 - 70 kHz, όπου και εμφανίζεται η ελάχιστη τιμή στα 8,145  $\mu\text{m}$ , και μετά στη συχνότητα των 80 kHz υπάρχει πάλι μια απότομη αύξηση.

Στο διάγραμμα  $P=12W$  (60%) παρατηρείτε ότι για τις ταχύτητες σάρωσης: [300, 400, 500, 600, 700 mm/sec] παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή εμφανίζουν αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 60 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας υπάρχει σταδιακή μείωσή του, χωρίς να υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις του layer thickness. Επίσης παρατηρείται ότι σε αυτές τις ταχύτητες δεν εμφανίζονται ιδιαίτερα μεγάλα νούμερα στα πάχη στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα, το μέγιστο layer thickness που προκύπτει για αυτές τις ταχύτητες είναι 8,042  $\mu\text{m}$ . Όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα τα συγκεκριμένα βάρη εγχάραξης, δεδομένου ότι κάποιοι από τους παράγοντες που παίρνει υπόψη ο χειριστής της εργαλειομηχανής πριν την κατεργασία είναι ο χρόνος και η ποιότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στη ταχύτητα  $V=200$  mm/sec η καμπύλη εμφανίζει ήπια κωδωνοειδή μορφή, η οποία παρουσιάζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και για τις υπόλοιπες τιμές της συχνότητας σταδιακή μείωση. Τέλος στη ταχύτητα  $V=100$  mm/sec παρατηρείται μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Εμφανίζει μια μικρή αύξηση του layer thickness από την συχνότητα 20 στα 30 kHz. Στη συνέχεια υπάρχει μια συνεχής μείωση του layer thickness μέχρι την συχνότητα 60 kHz, όπου και παρατηρείται η ελάχιστη τιμή στα 11,364  $\mu\text{m}$ , και μετά στη συχνότητα των 70 και 80 kHz εμφανίζεται πάλι μια απότομη αύξηση.

Τέλος στο διάγραμμα  $P=16W$  (80%) παρατηρείται ότι για τις ταχύτητες σάρωσης: [500, 600, 700 mm/sec] οι καμπύλες εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή εμφανίζεται μια συνεχή αύξηση του layer thickness καθώς αυξάνεται και η τιμή της συχνότητας. Στη



ταχύτητα  $V = 400 \text{ mm/sec}$  οι καμπύλες έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες στις μεγαλύτερες ταχύτητες με την μόνη διαφορά ότι εδώ εμφανίζεται ένα peak στην συχνότητα των 70 kHz και μετά στη συχνότητα των 80 kHz αρχίζει να φθίνει πάλι. Έτσι ακριβώς συμπεριφέρεται και η καμπύλη με ταχύτητα  $V = 300 \text{ mm/sec}$  με την μόνη διαφορά ότι το μέγιστό εμφανίζεται στη συχνότητα των 60 kHz. Στην ταχύτητα των  $V = 200 \text{ mm/sec}$  η καμπύλη εμφανίζει ήπια κωδωνοειδή μορφή, η οποία εμφανίζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας, σταδιακή μείωση. Παρατηρώντας την καμπύλη με ταχύτητα  $V = 100 \text{ mm/sec}$  παρατηρούμε μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Ξεκινάει από αρκετά υψηλό layer thickness στην συνέχεια εμφανίζει μια μικρή πτώση από την συχνότητα 20 στα 30 kHz. Στη συνέχεια υπάρχει έντονη και συνεχής μείωση του layer thickness μέχρι την συχνότητα 50 kHz, όπου και παρατηρείται η ελάχιστη τιμή στα 16,862  $\mu\text{m}$ , και μετά για τις υπόλοιπες συχνότητες εμφανίζει πάλι μια απότομη αύξηση του layer thickness, φτάνοντας στην συχνότητα 80 kHz να έχει μεγαλύτερο νούμερο στο πάχος στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα (layer thickness) σε σχέση με το αντίστοιχο layer thickness που παρουσιάζει στην αρχική συχνότητα  $F = 20 \text{ kHz}$ .

#### 4.4 Χάλυβας (P355GH)

Στο χάλυβα (P355GH) το προτεινόμενο εύρος των τιμών που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη μηχανή είναι: Ταχύτητα 400 – 700 mm/sec, Συχνότητα 80 kHz με τελικό πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού 1 – 5  $\mu\text{m}$ . Ωστόσο στη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν κάποιες τιμές των παραμέτρων εκτός των ορίων που μας έδινε το εγχειρίδιο, συγκεκριμένα το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στον χάλυβα (P355GH) ήταν:

Στο πρώτο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [**8 W**, 40%]
- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [200, 300, 400, 500, 600, 700, 800] σε mm/sec

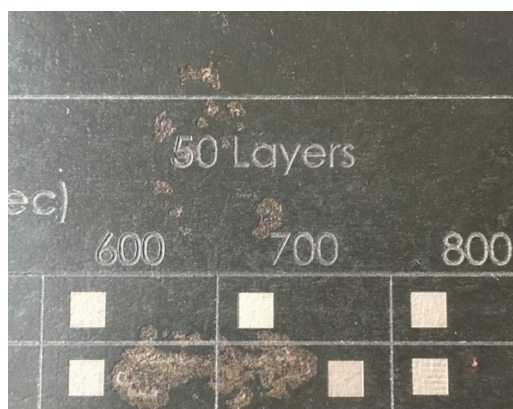
Στο δεύτερο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [**12 W**, 60%]
- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [200, 300, 400, 500, 600, 700, 800] σε mm/sec

Στο τρίτο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [**16 W**, 80%]
- Συχνότητα παλμών: [20, 30, 40, 50, 60, 70, 80] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [200, 300, 400, 500, 600, 700, 800] σε mm/sec

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11, ορίστηκε μέσω του κέντρου κατεργασίας το Technology να πραγματοποιήσει στο εκάστοτε πείραμα 50 περάσματα (Layers).



Σχήμα 4.11: Σήμανση πάνω στην πλάκα το νούμερο των layer που πραγματοποιήθηκαν στο χάλυβα (P355GH)

Στο σχήμα 4.12, σχήμα 4.13 και σχήμα 4.14 παρουσιάζονται τα πινακάκια έτσι όπως έχουν χαραχθεί στο δοκίμιο του χάλυβας (P355GH), όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια που σχηματίζει το κάθε πείραμα από την διαδικασία του Technology. Τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα και δίπλα τους παρουσιάζεται ένας πίνακας στον οποίο αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι, το βάθος χάραξης ανά πέρασμα και ο χρόνος κατεργασίας που χρειάστηκε για το κάθε πείραμα.

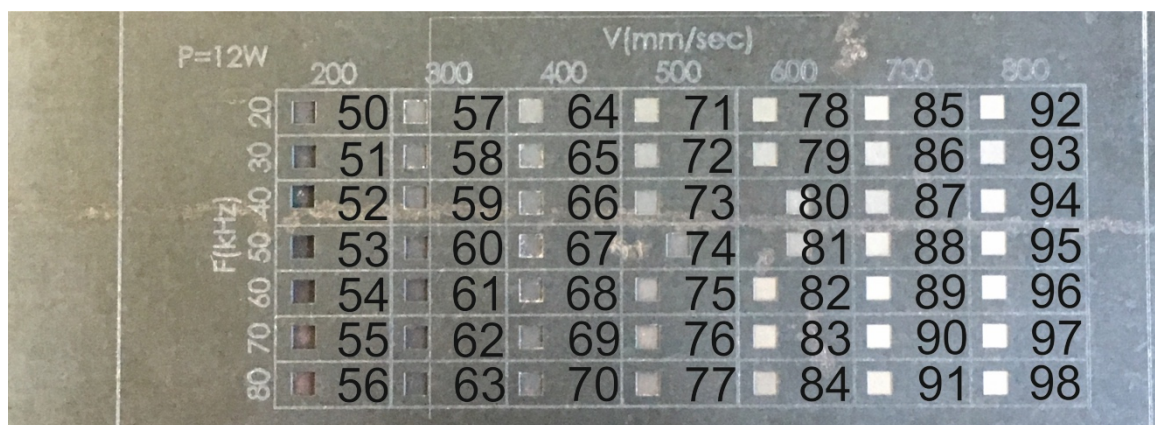
P=8W		V(mm/sec)							
		200	300	400	500	600	700	800	
F(kHz)	20	1	8	15	22	29	36	43	
	30	2	9	16	23	30	37	44	
	40	3	10	17	24	31	38	45	
	50	4	11	18	25	32	39	46	
	60	5	12	19	26	33	40	47	
	70	6	13	20	27	34	41	48	
	80	7	14	21	28	35	42	49	

	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
1	200	20	07/21	5,221	26	500	60	03/54	1,558
2	200	30	10/52	7,028	27	500	70	04/32	1,342
3	200	40	14/28	7,914	28	500	80	05/05	1,055
4	200	50	18/01	6,964	29	600	20	01/05	1,281
5	200	60	21/46	5,739	30	600	30	01/32	1,532
6	200	70	24/45	4,078	31	600	40	01/58	1,388
7	200	80	28/40	2,857	32	600	50	02/25	1,308
8	300	20	03/29	2,750	33	600	60	02/50	1,368
9	300	30	05/05	3,780	34	600	70	03/16	1,009
10	300	40	06/42	4,180	35	600	80	03/42	0,939
11	300	50	08/19	3,545	36	700	20	54	1,010



12	300	60	09/54	3,142	37	700	30	01/13	1,037
13	300	70	11/31	2,102	38	700	40	01/32	1,181
14	300	80	12/59	1,446	39	700	50	01/52	1,175
15	400	20	02/06	1,831	40	700	60	02/11	1,060
16	400	30	03/02	2,473	41	700	70	02/31	0,972
17	400	40	03/58	2,640	42	700	80	02/49	0,788
18	400	50	04/54	2,419	43	800	20	45	0,868
19	400	60	05/48	2,142	44	800	30	01/00	1,013
20	400	70	06/46	1,504	45	800	40	01/15	1,105
21	400	80	07/41	1,425	46	800	50	01/31	0,999
22	500	20	01/28	1,465	47	800	60	01/46	0,925
23	500	30	02/04	1,755	48	800	70	02/01	0,837
24	500	40	02/41	1,855	49	800	80	02/16	0,673
25	500	50	03/17	1,682					

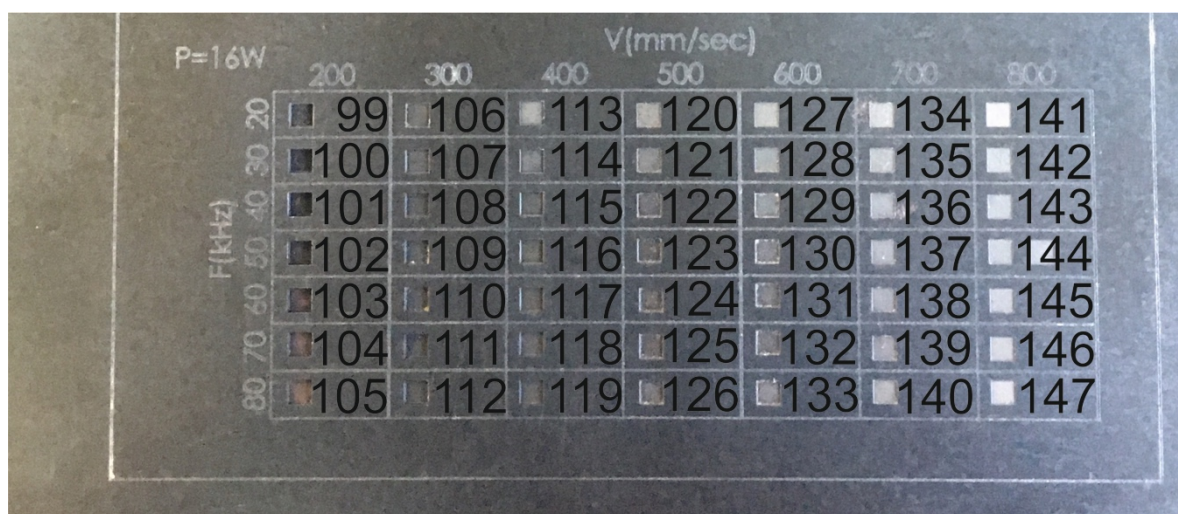
Σχήμα 4.12: Πινάκι έντασης  $P=[8\text{ W}, 40\%]$  και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα



	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
50	200	20	07/21	7,824	75	500	60	03/54	3,645
51	200	30	10/52	10,922	76	500	70	04/32	3,553
52	200	40	14/28	13,853	77	500	80	05/05	3,219
53	200	50	18/01	15,276	78	600	20	01/05	1,430
54	200	60	21/46	13,524	79	600	30	01/32	1,831
55	200	70	24/45	11,437	80	600	40	01/58	2,252
56	200	80	28/40	10,292	81	600	50	02/25	2,526
57	300	20	03/29	3,827	82	600	60	02/50	2,833
58	300	30	05/05	5,333	83	600	70	03/16	2,613
59	300	40	06/42	6,580	84	600	80	03/42	2,496
60	300	50	08/19	8,059	85	700	20	54	1,197
61	300	60	09/54	8,190	86	700	30	01/13	1,605
62	300	70	11/31	7,568	87	700	40	01/32	1,750
63	300	80	12/59	6,627	88	700	50	01/52	2,130
64	400	20	02/06	2,362	89	700	60	02/11	2,035

65	400	30	03/02	3,419	90	700	70	02/31	1,929
66	400	40	03/58	4,319	91	700	80	02/49	1,931
67	400	50	04/54	5,036	92	800	20	45	1,881
68	400	60	05/48	5,287	93	800	30	01/00	1,270
69	400	70	06/46	4,996	94	800	40	01/15	1,531
70	400	80	07/41	4,548	95	800	50	01/31	1,710
71	500	20	01/28	1,737	96	800	60	01/46	1,790
72	500	30	02/04	2,377	97	800	70	02/01	1,615
73	500	40	02/41	2,986	98	800	80	02/16	1,817
74	500	50	03/17	3,540					

Σχήμα 4.13: Πινακάκι έντασης P=[12 W, 60%] και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα

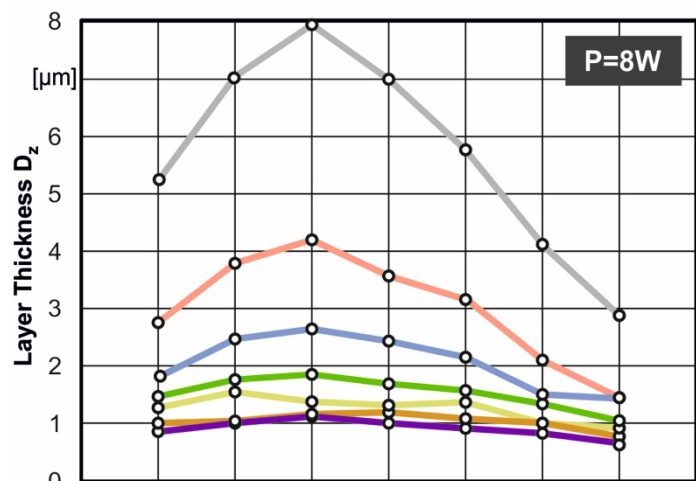


	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
99	200	20	07/21	12,449	124	500	60	03/54	5,356
100	200	30	10/52	15,636	125	500	70	04/32	5,928
101	200	40	14/28	18,254	126	500	80	05/05	6,038
102	200	50	18/01	18,921	127	600	20	01/05	1,672
103	200	60	21/46	17,901	128	600	30	01/32	2,268
104	200	70	24/45	15,740	129	600	40	01/58	2,981
105	200	80	28/40	13,580	130	600	50	02/25	3,538
106	300	20	03/29	5,012	131	600	60	02/50	3,641
107	300	30	05/05	7,083	132	600	70	03/16	4,524
108	300	40	06/42	9,185	133	600	80	03/42	4,680
109	300	50	08/19	10,973	134	700	20	54	1,407
110	300	60	09/54	12,398	135	700	30	01/13	1,900
111	300	70	11/31	12,729	136	700	40	01/32	2,530
112	300	80	12/59	11,616	137	700	50	01/52	2,780
113	400	20	02/06	3,026	138	700	60	02/11	3,162
114	400	30	03/02	4,404	139	700	70	02/31	3,615
115	400	40	03/58	5,676	140	700	80	02/49	3,670

116	400	50	04/54	6,552	141	800	20	45	1,433
117	400	60	05/48	7,647	142	800	30	01/00	1,617
118	400	70	06/46	8,419	143	800	40	01/15	1,972
119	400	80	07/41	8,326	144	800	50	01/31	2,263
120	500	20	01/28	2,133	145	800	60	01/46	2,566
121	500	30	02/04	3,062	146	800	70	02/01	2,944
122	500	40	02/41	3,916	147	800	80	02/16	2,883
123	500	50	03/17	4,751					

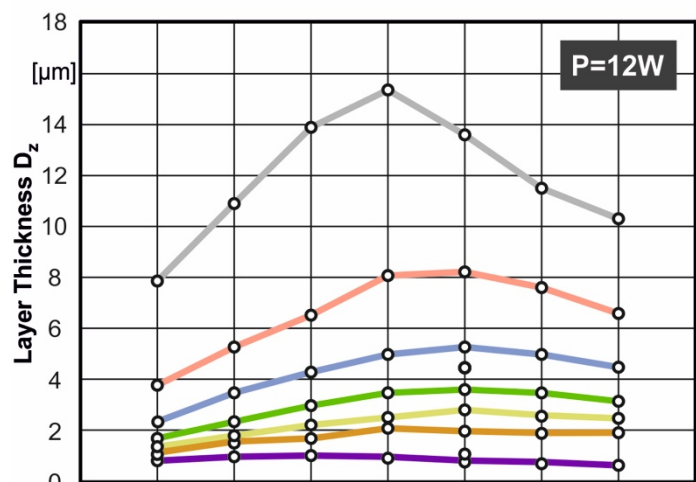
Σχήμα 4.14: Πινακάκι έντασης  $P=[16\text{ W}, 80\%]$  και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα

Στη συνέχεια στο σχήμα 4.15 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για το κάθε πινακάκι του υλικού, δηλαδή ένα για κάθε ένταση [8, 12, 16 W]. Στον άξονα x είναι η συχνότητα των παλμών και στον άξονα y το βάθος εγχάραξης του layer. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν επτά διαφορετικές καμπύλες, η κάθε μια με άλλο χρώμα. Που κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.



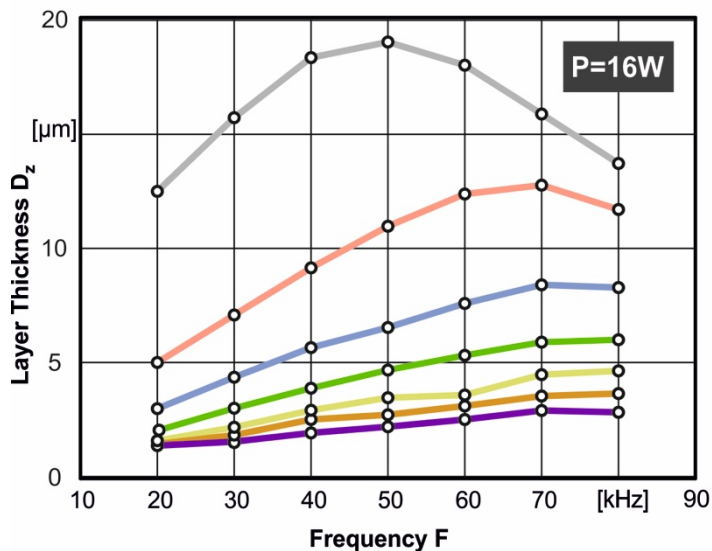
Scanning Speed [V]

V=200 mm/s  
V=300  
V=400  
V=500  
V=600  
V=700  
V=800

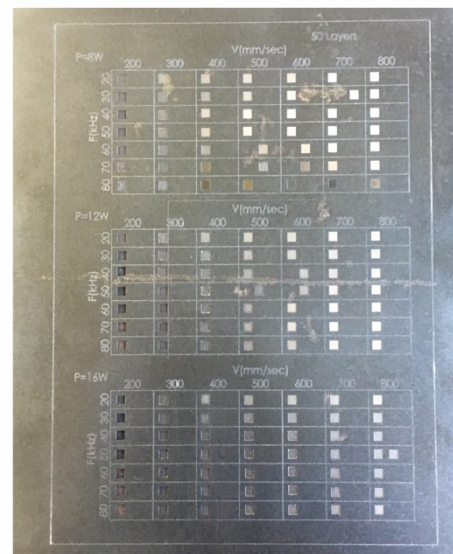


Informations

Workpiece material	Steel (P355GH)
Machine	DMG Lasertec 40
Laser beam	Nd YAG
Pulse duration	100ns
Spot size	30μm
Pocket size	4x4 mm
Layers	50



Image



Σχήμα 4.15: Διαγράμματα πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα (Layer thickness) – Συχνότητας, για τις ταχύτητες 200, 300, 400, 500, 600, 700 και 800 mm/sec

Από τα παραπάνω διαγράμματα με την πρώτη ματιά παρατηρείται εύκολα ότι το layer thickness αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς P. Αυτό παρατηρείται σχετικά εύκολα

βλέποντας το μέγιστο layer thickness στον άξονα y για κάθε ένα από τα τρία διαγράμματα. Στο διάγραμμα P=8W (40%) το μέγιστο y είναι στα 7,914  $\mu\text{m}$ , στο διάγραμμα P=12W (60%) το μέγιστο y είναι στα 15,276  $\mu\text{m}$  και στο διάγραμμα P=16W (80%) το μέγιστο y είναι στα 18,921  $\mu\text{m}$ .

Επίσης ένα άμεσο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας και τα τρία διαγράμματα είναι ότι καθώς μειώνεται η ταχύτητα, ανεξαρτήτως της έντασης, παρατηρείται και αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Βλέποντας και τα τρία διαγράμματα είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι οι γκρι καμπύλες με την μικρότερη ταχύτητα (100 mm/sec) έχουν πάντα μεγαλύτερη τιμή για το layer thickness από τις υπόλοιπες καμπύλες (με μεγαλύτερες ταχύτητες) σε αντίστοιχες συχνότητες.

Επιμέρους στο διάγραμμα P=8W (40%) παρατηρήθηκε ότι για τις ταχύτητες σάρωσης: [600, 700, 800 mm/sec] εμφανίζεται παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή εμφανίζουν μικρές εναλλαγές του layer thickness για όλες τις τιμές των συχνοτήτων. Με την τιμή του layer thickness να κυμαίνεται από 0,8 έως 1,5  $\mu\text{m}$ . Στις καμπύλες με ταχύτητες σάρωσης: [200, 300, 400, 500 mm/sec] παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή καθώς μειώνεται η ταχύτητα η κωδωνοειδή μορφή στις καμπύλες γίνεται ολοένα και πιο αισθητή. Δηλαδή εμφανίζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρείται σταδιακή μείωσή του.

Στο διάγραμμα P=12W (60%) παρατηρείται ότι για την ταχύτητα σάρωσης V= 800 mm/sec ανεξαρτήτως της συχνότητας το layer thickness κυμαίνεται στο 1  $\mu\text{m}$  χωρίς κάποια αισθητή διαφορά. Στις καμπύλες με ταχύτητες σάρωσης: [600, 700 mm/sec] δεν παρατηρείται κάποια σημαντική ιδιαιτερότητα. Στη μικρότερη συχνότητα των 20 kHz εμφανίζεται η ελάχιστη τιμή του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα, που είναι στα 1,43 και 1,197  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα ενώ το μέγιστο layer thickness προκύπτει στη συχνότητα των 60 και 50 kHz για την ταχύτητα των 600 και 700 mm/sec αντίστοιχα. Στις καμπύλες με ταχύτητες σάρωσης: [300, 400 mm/sec] παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά. Αρχίζει να γίνεται ολοένα και πιο αισθητή η κωδωνοειδή μορφή στις καμπύλες. Δηλαδή εμφανίζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 60 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρείται σταδιακή μείωσή του. Τέλος στην κωδωνοειδή καμπύλη με ταχύτητα σάρωσης V=200 mm/sec, εμφανίζεται αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 50 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας εμφανίζεται σταδιακή μείωσή του.

Τέλος στο διάγραμμα P=16W (80%) παρατηρήθηκε ότι για την ταχύτητα σάρωσης 800 mm/sec η καμπύλη είναι σχεδόν γραμμική. Παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση του layer thickness μέχρι την συχνότητα F= 70 kHz και έπειτα στην συχνότητα F= 80 kHz μια πολύ μικρή μείωση. Για ταχύτητα σάρωσης 700 mm/sec παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με την μόνη διαφορά ότι εδώ δεν παρουσιάζετε μείωση του layer thickness στη συχνότητα των 80 kHz και προφανώς έχει μεγαλύτερα layer thickness. Για ταχύτητα σάρωσης 600 mm/sec εμφανίζεται πάλι παρόμοια συμπεριφορά με την μόνη διαφορά ότι εδώ παρουσιάζει μια τοπική μείωση του layer thickness στη συχνότητα των 60 kHz. Στην καμπύλη με το πράσινο χρώμα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα V= 500 mm/sec υπάρχει μια σταδιακή αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα για όλες τις τιμές των συχνοτήτων. Στην καμπύλη με το μπλε χρώμα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα V= 400 mm/sec παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα μέχρι την συχνότητα F= 70 kHz και έπειτα στην



συχνότητα  $F = 80$  kHz μια μικρή μείωση. Στην καμπύλη με το κόκκινο χρώμα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα  $V = 300$  mm/sec εμφανίζεται μια σταδιακή αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα μέχρι την συχνότητα  $F = 70$  kHz και έπειτα στην συχνότητα  $F = 80$  kHz παρατηρείται μια αισθητή μείωσή του. Τέλος η τελευταία καμπύλη με  $V = 200$  mm/sec είναι κωδωνοειδούς μορφής. Δηλαδή εμφανίζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 50 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak στα 18,921  $\mu\text{m}$ , και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρούμε μια έντονη μείωσή του με αποτέλεσμα να καταλήγει το layer thickness στα 13,58  $\mu\text{m}$ .

#### 4.5 Ορείχαλκος (EN CC755S)

Στον ορείχαλκο το εύρος των τιμών που σύμφωνα με το εγχειρίδιο της μηχανής μπορεί ο χειριστής να την χρησιμοποιήσει είναι: Ταχύτητα 200 – 500 mm/sec, Συχνότητα 40 kHz με τελικό πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού 1 – 10  $\mu\text{m}$ . Ωστόσο στη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν κάποιες τιμές των παραμέτρων εκτός των ορίων που πρότεινε το εγχειρίδιο, συγκεκριμένα το εύρος των τιμών των παραμέτρων στα πειράματα στον ανοξείδωτο χάλυβα ήταν:

Στο πρώτο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [8 W, 40%]
- Συχνότητα παλμών: [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] σε mm/sec

Στο δεύτερο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [12 W, 60%]
- Συχνότητα παλμών: [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] σε mm/sec

Στο τρίτο πινακάκι πειραμάτων :

- Μέση ένταση παλμών: [16 W, 80%]
- Συχνότητα παλμών: [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70] σε kHz
- Ταχύτητα σάρωσης: [100, 200, 300, 400, 500, 600, 700] σε mm/sec

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16 και όπως έχει αναφερθεί, ορίστηκε στο κέντρο κατεργασίας μέσω του Technology να πραγματοποιήσει στη πειραματική διαδικασία 50 περάσματα (Layers).



Σχήμα 4.16: Σήμανση πάνω στην πλάκα το νούμερο των περασμάτων που πραγματοποιήθηκαν στον ορείχαλκο

Στο σχήμα 4.17, σχήμα 4.18 και σχήμα 4.19 παρουσιάζονται τα πινακάκια έτσι όπως έχουν χαραχθεί στο δοκίμιο του ορείχαλκου, όπου σε κάθε σημείο του εκάστοτε πίνακα διακρίνονται τα τετραγωνάκια που σχηματίζει το κάθε πείραμα από την διαδικασία του Technology. Τα τετραγωνάκια είναι αριθμημένα και δίπλα τους παρουσιάζεται ένας πίνακας στον οποίο αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι, το βάθος χάραξης ανά πέρασμα και ο χρόνος κατεργασίας που χρειάστηκε για το κάθε πείραμα.



	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
1	200	10	03/47	3,255	20	500	50	03/17	0,059
2	200	20	07/21	8,312	-	500	60	-	0,000
3	200	30	10/52	7,492	-	500	70	-	0,000
4	200	40	14/28	3,174	21	600	10	40	0,520
5	200	50	18/00	0,048	22	600	20	01/06	1,915
-	200	60	-	0,000	23	600	30	01/32	1,441
-	200	70	-	0,000	24	600	40	01/58	0,371
6	300	10	01/52	2,049	25	600	50	02/24	0,026
7	300	20	03/29	4,512	-	600	60	-	0,000
8	300	30	05/05	3,354	-	600	70	-	0,000
9	300	40	06/42	0,143	26	700	10	34	0,001
10	300	50	08/19	0,054	27	700	20	54	1,498
-	300	60	-	0,000	28	700	30	01/13	1,283
-	300	70	-	0,000	29	700	40	01/33	0,284
11	400	10	01/10	1,202	30	700	50	01/52	0,086
12	400	20	02/06	3,150	-	700	60	-	0,000
13	400	30	03/02	1,983	-	700	70	-	0,000
14	400	40	03/58	0,667	31	800	10	30	0,003
15	400	50	04/54	0,049	32	800	20	45	1,175
-	400	60	-	0,000	33	800	30	01/00	1,109
-	400	70	-	0,000	34	800	40	01/15	0,332
16	500	10	51	0,463	35	800	50	01/31	0,040
17	500	20	01/28	2,472	36	800	60	01/46	0,038
18	500	30	02/04	1,527	37	800	70	02/01	0,063
19	500	40	02/41	0,384					

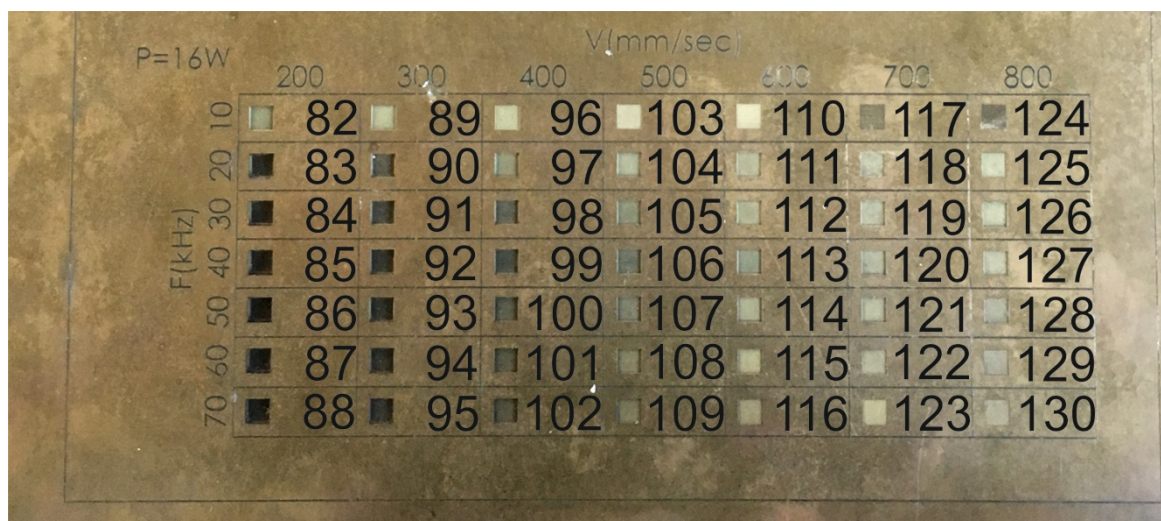


Σχήμα 4.17: Πινακάκι έντασης  $P=[8 \text{ W}, 40\%]$  και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα



	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
38	200	10	03/47	5,100	61	500	50	03/17	2,290
39	200	20	07/21	14,765	62	500	60	03/54	1,250
40	200	30	10/52	17,368	-	500	70	-	0,000
41	200	40	14/28	17,955	63	600	10	40	0,763
42	200	50	18/00	14,629	64	600	20	01/06	2,875
43	200	60	21/47	9,385	65	600	30	01/32	3,101
-	200	70	-	0,000	66	600	40	01/58	2,742
44	300	10	01/52	3,007	67	600	50	02/24	1,624
45	300	20	03/29	7,613	68	600	60	02/50	0,766
46	300	30	05/05	8,431	-	600	70	-	0,000
47	300	40	06/42	8,967	69	700	10	34	0,112
48	300	50	08/19	7,293	70	700	20	54	2,244
49	300	60	09/57	4,570	71	700	30	01/13	2,635
50	300	70	-	0,001	72	700	40	01/33	2,278
51	400	10	01/10	1,802	73	700	50	01/52	1,113
52	400	20	02/06	5,087	74	700	60	02/11	0,450
53	400	30	03/02	5,281	-	700	70	-	0,000
54	400	40	03/58	4,876	75	800	10	30	-0,052
55	400	50	04/54	4,141	76	800	20	45	1,754
56	400	60	05/48	2,175	77	800	30	01/00	2,268
-	400	70	-	0,000	78	800	40	01/15	1,961
57	500	10	51	1,096	79	800	50	01/31	0,873
58	500	20	01/28	3,767	80	800	60	01/46	0,442
59	500	30	02/04	3,896	81	800	70	02/01	0,071
60	500	40	02/41	3,461					

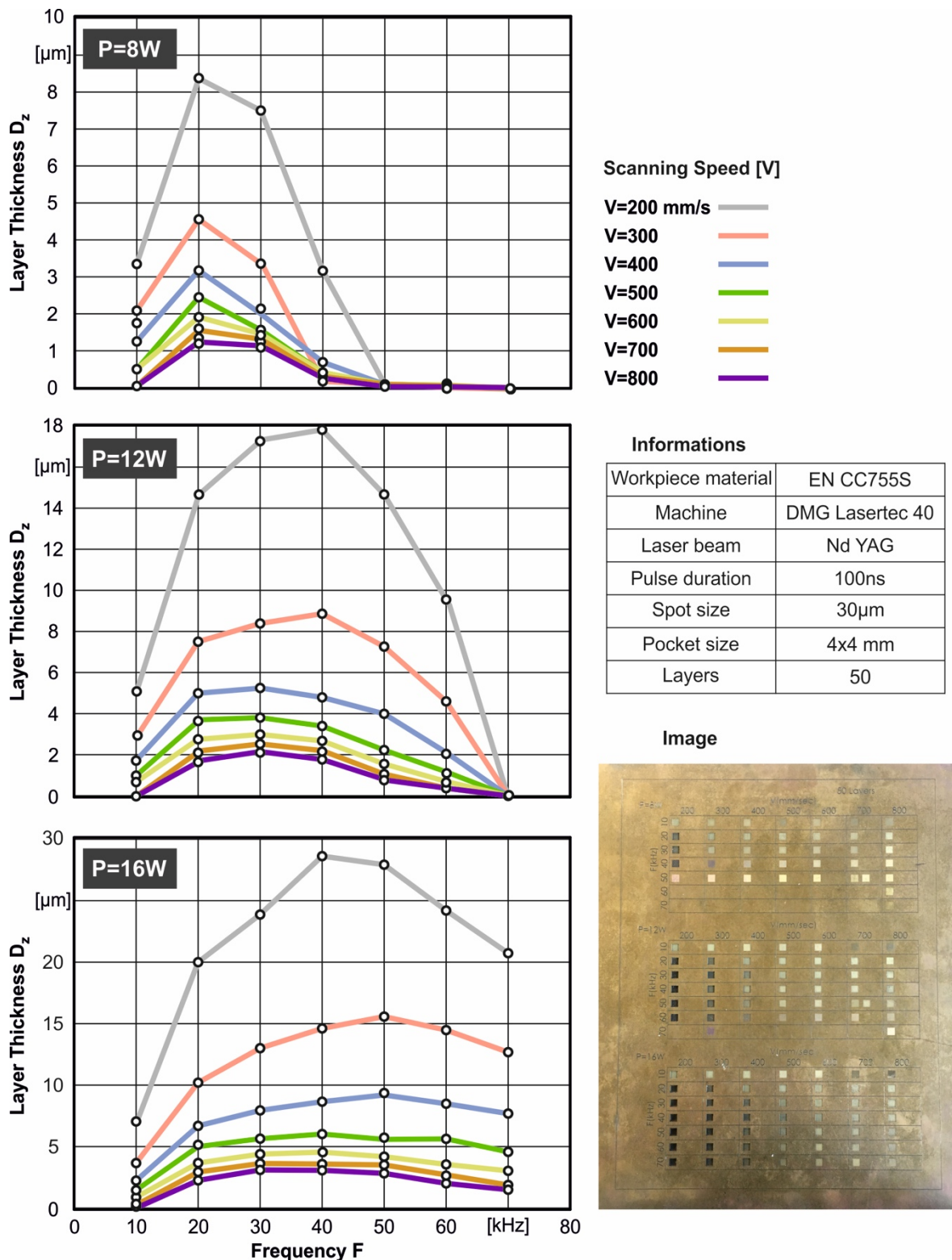
Σχήμα 4.18: Πινακάκι έντασης  $P=[12 \text{ W}, 60\%]$  και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα



	Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος		Ταχύτητα	Συχνότητα	Χρόνος κατεργασίας	Πάχος στρώματος
A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)	A/A	V (mm/sec)	F (kHz)	H/M/S	L.th. (μm)
82	200	10	03/47	6,778	107	500	50	03/17	5,606
83	200	20	07/21	19,665	108	500	60	03/54	5,651
84	200	30	10/52	23,741	109	500	70	04/32	4,603
85	200	40	14/28	28,630	110	600	10	40	0,996
86	200	50	18/00	27,966	111	600	20	01/06	3,737
87	200	60	21/47	24,139	112	600	30	01/32	4,396
88	200	70	24/45	20,663	113	600	40	01/58	4,568
89	300	10	01/52	3,840	114	600	50	02/24	4,173
90	300	20	03/29	10,303	115	600	60	02/50	3,522
91	300	30	05/05	12,940	116	600	70	03/16	3,031
92	300	40	06/42	14,555	117	700	10	34	0,354
93	300	50	08/19	15,499	118	700	20	54	2,941
94	300	60	09/57	14,477	119	700	30	01/13	3,642
95	300	70	11/31	12,659	120	700	40	01/33	3,646
96	400	10	01/10	2,301	121	700	50	01/52	3,448
97	400	20	02/06	6,680	122	700	60	02/11	2,677
98	400	30	03/02	8,040	123	700	70	02/31	1,900
99	400	40	03/58	8,636	124	800	10	30	0,047
100	400	50	04/54	9,168	125	800	20	45	2,263
101	400	60	05/48	8,458	126	800	30	01/00	3,130
102	400	70	06/46	7,633	127	800	40	01/15	3,090
103	500	10	51	1,480	128	800	50	01/31	2,842
104	500	20	01/28	4,977	129	800	60	01/46	1,998
105	500	30	02/04	5,640	130	800	70	02/01	1,472
106	500	40	02/41	5,943					

Σχήμα 4.19: Πινακάκι έντασης P=[16 W, 80%] και πίνακας παραμέτρων για κάθε πείραμα

Στη συνέχεια στο σχήμα 4.20 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα, ένα για το κάθε πινακάκι του υλικού, δηλαδή ένα για κάθε ένταση [8, 12, 16 W]. Όπως και στα υπόλοιπα υλικά ο άξονας x αντιστοιχεί στην συχνότητα των παλμών και στον άξονα y το βάθος εγχάραξης του layer. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν επτά διαφορετικές καμπύλες, η κάθε μια με άλλο χρώμα όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μια από ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.20: Διαγράμματα πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα (Layer thickness) – Συχνότητας, για τις ταχύτητες 200, 300, 400, 500, 600, 700 και 800 mm/sec

Από τα παραπάνω διαγράμματα με την πρώτη ματιά παρατηρείται εύκολα ότι το layer thickness αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς P. Αυτό διακρίνεται πολύ εύκολα βλέποντας απλά και μόνο το μέγιστο layer thickness στον άξονα y για κάθε ένα από τα τρία διαγράμματα. Στο διάγραμμα P=8W (40%) το μέγιστο y είναι στα 8,312  $\mu\text{m}$ , στο διάγραμμα P=12W (60%) το μέγιστο y είναι στα 17,955  $\mu\text{m}$  και στο διάγραμμα P=16W (80%) το μέγιστο y είναι στα 28,63  $\mu\text{m}$ .

Επίσης ένα άμεσο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας και τα τρία διαγράμματα είναι ότι καθώς μειώνεται η ταχύτητα, ανεξαρτήτως της έντασης, εμφανίζεται και αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Βλέποντας και τα τρία διαγράμματα παρατηρείται ότι οι γκρι καμπύλες με την μικρότερη ταχύτητα (200 mm/sec) έχουν πάντα μεγαλύτερη τιμή για το layer thickness από τις υπόλοιπες καμπύλες (με μεγαλύτερες ταχύτητες) σε αντίστοιχες συχνότητες. Στον ορείχαλκο υπάρχει ένα μόνο πείραμα, στην ισχύς P=8W (40%) στο οποίο δεν συμβαίνει καθολικά η παραπάνω παρατήρηση. Βλέποντας το διάγραμμα P=8W (40%) στη συχνότητα 40 kHz και την καμπύλη με κόκκινο χρώμα, με ταχύτητα 300 mm/sec αντίστοιχα θα παρατηρηθεί ότι μόνο για αυτή τη συχνότητα η ταχύτητα V=300 mm/sec αντιστοιχεί στο μικρότερο layer thickness σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ταχύτητες.

Επιμέρους στο διάγραμμα P=8W (40%), αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκαν καθόλου πειράματα στις συχνότητες 60 και 70 kHz και ο λόγος είναι ότι παρατηρήθηκε ότι το πάχος στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα ήταν αμελητέο σε αυτές τις ταχύτητες. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι οι καμπύλες ανεξαρτήτως της ταχύτητας συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο, με αποτέλεσμα να μοιάζουν μορφολογικά μεταξύ τους. Δηλαδή στη συχνότητα F=10 kHz ξεκινάει με μια χαμηλή τιμή στο layer thickness και στη συνέχεια στη συχνότητα F=20 kHz κάνει μια απότομη αύξηση το layer thickness όπου εμφανίζει και τη μέγιστη τιμή για κάθε καμπύλη (δηλαδή για όλες τις ταχύτητες). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στις μικρές ταχύτητες σάρωσης: [200, 300, 400, 500 mm/sec] εμφανίζεται πιο έντονα η αύξηση του layer thickness σε αντίθεση με τις ταχύτητες σάρωσης: [600, 700, 800 mm/sec]. Μετά την συχνότητα F=20 kHz παρατηρείται μια απότομη μείωση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα μέχρι που όταν φτάνει στη συχνότητα των 50 kHz οι τιμές του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα τείνουν στο μηδέν. Μία ακόμα παρατήρηση είναι ότι για τα ζεύγη ταχυτήτων 500 – 600 mm/sec και 700 – 800 mm/sec στη συχνότητα F=10 kHz εμφανίζουν σχεδόν το ίδιο layer thickness. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στη συχνότητα 40 kHz και την καμπύλη με το κόκκινο χρώμα, με ταχύτητα 300 mm/sec αντιστοιχεί στο μικρότερο layer thickness σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ταχύτητες.

Στο διάγραμμα P=12W (60%) για τις ταχύτητες σάρωσης: [400, 500, 600, 700, 800 mm/sec] εμφανίζεται παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή παρατηρείται αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 30 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας εμφανίζεται σταδιακή μείωσή του, χωρίς να υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις του layer thickness. Σε αυτές τις ταχύτητες δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλα νούμερα στα πάχη στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα, το μέγιστο layer thickness που προκύπτει για αυτές τις ταχύτητες είναι 5,281  $\mu\text{m}$ . Όμως σε καμία περίπτωση όπως αναφέρθηκε προηγουμένως δεν μπορεί να θεωρηθούν αμελητέα τα συγκεκριμένα βάθη εγχάραξης, δεδομένου ότι κάποιοι από τους παράγοντες που παίρνει υπόψη ο χειριστής της εργαλειομηχανής πριν την κατεργασία είναι ο χρόνος και η ποιότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στις ταχύτητες σάρωσης: [200, 300 mm/sec] οι

καμπύλες που εμφανίζουν κωδωνοειδή μορφή, δηλαδή παρατηρείται αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας εμφανίζεται σταδιακή μείωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκαν καθόλου πειράματα στην συχνότητα των 70 kHz και ο λόγος είναι ότι παρατηρήθηκε ότι το πάχος στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα ήταν αμελητέο σε αυτούς τους συνδυασμούς ταχύτητας – συχνότητας.

Σχετικά με το διάγραμμα με ισχύς  $P=16W$  (80%), εμφανίζει όμοια συμπεριφορά με το διάγραμμα  $P=12W$  (60%). Όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν μια σταδιακή αύξηση του layer thickness μέχρι κάποια συχνότητα και στη συνέχεια, σταδιακή μείωση. Σε γενικές γραμμές οι καμπύλες έχουν κωδωνοειδή μορφή, που είναι πιο αισθητή στις χαμηλές ταχύτητες. Επιμέρους παρατηρείτε ότι για τις ταχύτητες σάρωσης: [500, 600, 700, 800 mm/sec] εμφανίζεται παρόμοια συμπεριφορά δηλαδή υπάρχει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας, σταδιακή μείωση, χωρίς να υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις του layer thickness. Την ίδια συμπεριφορά έχουν και οι καμπύλες με ταχύτητα σάρωσης [300, 400 mm/sec] με τη μόνη διαφορά ότι το peak το εμφανίζουν στη συχνότητα  $F= 50$  kHz σε αντίθεση με τις προηγούμενες ταχύτητες που είχαν μέγιστο στα 40 kHz. Τέλος στην μικρότερη ταχύτητα  $V= 200$  mm/sec γίνεται πλέον μια ξεκάθαρη κωδωνοειδή μορφή με αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 40 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak στα 28,63  $\mu m$ , και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας εμφανίζεται μια έντονη μείωσή του με αποτέλεσμα να καταλήγει το layer thickness στα 20,663  $\mu m$ .



## 5. ΣΥΝΟΨΗ

### 5.1 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Με την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τέσσερα διαφορετικά υλικά. Είναι εφικτό πλέον να εξαχθούν συνολικά κάποια συμπεράσματα και να γίνει ένας συνοπτικός σχολιασμός επί αυτών.

Αναλυτικότερα βλέποντας τα διαγράμματα πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα (Layer thickness) – Συχνότητας, παρατηρείται σχεδόν καθολικά ότι το layer thickness αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς  $P$ . Αυτό γίνεται εύκολα διακριτό παρατηρώντας απλά και μόνο το μέγιστο layer thickness στον άξονα  $y$  για κάθε ένα από τα διαγράμματα. Δηλαδή στα διαγράμματα με ισχύς  $P=8W$  (40%) το μέγιστο  $y$  (layer thickness) ήταν σχεδόν πάντα μικρότερο από τα αντίστοιχα μέγιστα  $y$  για μεγαλύτερες ισχύς [ $P=12W$  (60%) &  $P=16W$  (80%)]. Αυτή η σύγκριση γίνεται πάντα μεταξύ διαγραμμάτων όμοιων υλικών και αυτό γιατί κάθε ένα υλικό έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και εντελώς διαφορετική συμπεριφορά το ένα από το άλλο. Επομένως, η μεταξύ τους σύγκριση δεν δίνει κάποια πληροφορία.

Επίσης ένα άλλο συμπέρασμα που εξάχθηκε παρατηρώντας τα διαγράμματα είναι ότι καθώς μειώνεται η ταχύτητα, ανεξαρτήτως της έντασης, υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Αυτό συμβαίνει σχεδόν καθολικά. Βλέποντας τα διαγράμματα και για τα τρία υλικά παρατηρείται ότι οι γκρι καμπύλες με την μικρότερη ταχύτητα (100 – 200 mm/sec) έχουν σχεδόν πάντα μεγαλύτερη τιμή για το layer thickness από τις υπόλοιπες καμπύλες (με μεγαλύτερες ταχύτητες) σε αντίστοιχες συχνότητες. Στον ανοξείδωτο χάλυβα (SAE304) σε ένα μόνο πείραμα, στην ισχύς  $P=16W$  (80%) υπάρχει μια εξαίρεση στην οποία δεν συμβαίνει εξ ολοκλήρου η παραπάνω παρατήρηση. Δηλαδή παρατηρώντας το διάγραμμα  $P=16W$  (80%) του ανοξείδωτου χάλυβα (SAE304) στη συχνότητα 50 kHz και τις καμπύλες με το γκρι και κόκκινο χρώμα, με ταχύτητες 100 και 200 mm/sec αντίστοιχα θα ήταν εύκολο να παρατηρηθεί ότι μόνο για αυτή τη συχνότητα η ταχύτητα  $V=200$  mm/sec αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο layer thickness σε σχέση με τη ταχύτητα  $V=100$  mm/sec. Επίσης στον ορείχαλκο παρατηρείται μια μοναδική περίπτωση, όπου στο πείραμα με ισχύς  $P=8W$  (40%), υπάρχει επίσης εξαίρεση από το γενικευμένη παρατήρηση που έγινε προηγουμένως. Αν παρατηρηθεί το διάγραμμα  $P=8W$  (40%) στη συχνότητα  $F=40$  kHz και την καμπύλη με κόκκινο χρώμα, με ταχύτητα  $V=300$  mm/sec αντίστοιχα θα γίνει αμέσως αντιληπτό ότι μόνο για αυτή τη συχνότητα η ταχύτητα  $V=300$  mm/sec αντιστοιχεί στο μικρότερο layer thickness σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ταχύτητες. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μεμονωμένο φαινόμενο καθώς εμφανίστηκε μόνο σε δύο πειράματα.

Στο αλουμίνιο (7075-T6) οι γενικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι ότι στις εντάσεις  $P=8W$  (40%) και  $P=12W$  (60%) ότι οι καμπύλες είναι φθίνουσες. Δηλαδή όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο παρατηρούμε και μείωση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα. Κάτι λογικό δεδομένου ότι η αλλαγή της συχνότητας των παλμών επηρεάζει τον αριθμό παλμών λέιζερ που χτυπά την πλάκα καθώς και την ποσότητα ενέργειας λέιζερ σε κάθε έναν από αυτούς τους παλμούς. Οι χαμηλότερες συχνότητες παλμών τείνουν να εξατμίσουν το υλικό λόγω του υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου κάθε παλμού ενώ στις υψηλότερες συχνότητες παλμών τείνουν απλά να θερμαίνουν την επιφάνεια του τεμαχίου. Κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα  $P=8W$  (40%) που από την τιμή της συχνότητας 50 kHz και πάνω παρατηρείται αδυναμία εξάχνωσης και αφαίρεσης υλικού καθώς και στο διάγραμμα  $P=12W$  (60%) παρατηρείται η

αδυναμία αυτή για τιμή της συχνότητας από 70 kHz και πάνω. Επίσης φαινόμενο το οποίο επιβεβαιώνει τα παραπάνω είναι η δημιουργία επιφανειακού στρώματος μετάλλου. Σε αυτές τις συνθήκες όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η κατεργασία επιφέρει μια οριακή κατάσταση ανάμεσα στο εάν το κατεργαζόμενο υλικό υφίσταται εξάχνωση ή απλά θερμαίνεται χωρίς να φτάνει σε σημείο τήξης. Βλέποντας το φαινόμενο αυτό γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει εξάχνωση του μετάλλου αλλά είναι τόσο οριακή με αποτέλεσμα την στερεοποίηση του υλικού και έτσι την δημιουργία επιφανειακού στρώματος μετάλλου στα πλαϊνά του πειράματος. Στην ένταση  $P=16W$  (80%) παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα διαγράμματα με τις μικρότερες ισχύς. Δηλαδή ενώ στα διαγράμματα με ισχύς 8 και 10 W οι καμπύλες ανεξαρτήτως της ταχύτητας είναι γνησίως φθίνουσες στο διάγραμμα με ισχύς 16 W εμφανίζεται σχεδόν σε όλες τις καμπύλες κωδωνοειδή μορφή. Στην καμπύλη με ταχύτητα σάρωσης  $V=200$  mm/sec εμφανίζεται παρόμοια μορφή καμπύλης απλά με τη διαφορά ότι εδώ το peak υφίσταται στη συχνότητα των 30 kHz καθώς και ότι είναι αισθητά μεγαλύτερα τα πάχη στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα σε σύγκριση με τις υψηλότερες ταχύτητες. Τέλος στην καμπύλη με ταχύτητα σάρωσης  $V=100$  mm/sec παρατηρήθηκε μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή εάν δεν παρουσίαζε στις συχνότητες 40 και 50 kHz μια απότομη μείωση του layer thickness τότε θα εμφανιζόταν μια σχεδόν γραμμική καμπύλη με αρνητική κλίση. Επομένως για αυτή τη ταχύτητα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα πραγματοποιείται παράλληλα σταδιακή μείωση του layer thickness.

Στον ανοξείδωτο χάλυβα (SAE304) οι γενικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι ότι ανεξαρτήτως της ισχύς παρατηρήθηκε ότι για τις ταχύτητες σάρωσης: [200, 300, 400, 500, 600, 700 mm/sec] υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή εμφανίζουν αύξηση του layer thickness μέχρι κάποια τιμή συχνότητας, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρείται σταδιακή μείωσή του. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι σε αυτές τις ταχύτητες δεν προκύπτουν ιδιαίτερα μεγάλα νούμερα στα πάχη στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα, ιδικά άμα συγκριθούν με τα βάθη χάραξης σε αντιστοιχία με την ταχύτητα 100 mm/sec. Στη ταχύτητα  $V=100$  mm/sec παρατηρείται μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Εμφανίζει συνεχή μείωση του layer thickness για τιμές συχνότητας 50 - 70 kHz (ανάλογα την ισχύς), όπου και παρατηρείται η ελάχιστη τιμή του layer thickness, στη συνέχεια εμφανίζεται πάλι μια απότομη αύξηση.

Στο χάλυβα (P355GH) αρχικά παρατηρήθηκε ότι στις εντάσεις  $P=8W$  (40%) και  $P=12W$  (60%) ότι οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τις ταχύτητες σάρωσης: [500, 600, 700, 800 mm/sec] έχουν παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή εμφανίζουν μικρές εναλλαγές του layer thickness για όλες τις τιμές των συχνοτήτων σχηματίζοντας έτσι μια κυματοειδής μορφή. Με την τιμή του layer thickness να κυμαίνεται από 0,8 έως 3,8  $\mu m$ . Οι αντίστοιχες καμπύλες στην ισχύ  $P=16W$  (80%) εμφανίζουν μια ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση σε αντίθεση με τις μικρότερες εντάσεις. Όσο αναφορά τις καμπύλες με ταχύτητες σάρωσης: [200, 300, 400 mm/sec] έχουν σε γενικές γραμμές κοινή συμπεριφορά, ανάλογα πάντα στην ισχύ την οποία βρίσκεται το πείραμα. Στις καμπύλες με ταχύτητα σάρωσης  $V=200$  mm/sec παρατηρείται κωδωνοειδή μορφή, δηλαδή εμφανίζει αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας 40 - 50 kHz (ανάλογα την ένταση), όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας παρατηρείται μια σταδιακή και έντονη μείωσή του. Στις καμπύλες με ταχύτητα σάρωσης: [300, 400 mm/sec] παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τις διαφορές ότι η εμφάνιση του peak πραγματοποιείται σε διαφορετικές συχνότητες καθώς και ότι υπάρχουν μικρότερα βάθη εγχάραξης ανά πέρασμα.

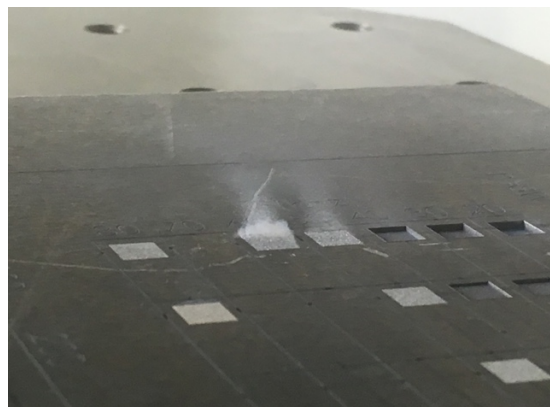


Στον ορείχαλκο οι γενικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι ότι στις εντάσεις  $P=12W$  (60%) και  $P=16W$  (80%) παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά για τις καμπύλες ανεξάρτητα από την ταχύτητα σάρωσης. Δηλαδή παρατηρείται ότι εμφανίζουν αύξηση του layer thickness για τιμές συχνότητας έως 50 kHz, όπου και παρατηρείται ένα peak, και μετά για υπόλοιπες τιμές της συχνότητας υπάρχει σταδιακή μείωσή του, χωρίς να υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις του layer thickness. Παρατηρείται ότι εμφανίζουν κωδωνοειδή μορφή. Στην ένταση  $P=8W$  (40%) αξίζει να αναφερθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκαν καθόλου πειράματα στις συχνότητες 60 και 70 kHz λόγω της αμελητέας ποσότητας υλικού που αφαιρούντο ανά πέρασμα. Σχετικά με τις καμπύλες παρατηρείται ότι ανεξαρτήτως της ταχύτητας συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο, με αποτέλεσμα να μοιάζουν μορφολογικά μεταξύ τους. Δηλαδή στη συχνότητα  $F=10$  kHz ξεκινάει με μια χαμηλή τιμή στο layer thickness και στη συνέχεια στη συχνότητα  $F=20$  kHz κάνει μια απότομη αύξηση το layer thickness όπου εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή για κάθε μία από τις καμπύλες (δηλαδή για όλες τις ταχύτητες). Μετά την συχνότητα  $F=20$  kHz παρατηρείται μια απότομη μείωση του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα μέχρι που όταν φτάνει στη συχνότητα των 50 kHz οι τιμές του του πάχους στρώματος του υλικού που αφαιρείται ανά πέρασμα τείνουν στο μηδέν. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στις μικρές ταχύτητες σάρωσης: [200, 300, 400, 500 mm/sec] είναι πιο έντονα αισθητή η αύξηση και η μείωση του layer thickness σε αντίθεση με τις ταχύτητες σάρωσης: [600, 700, 800 mm/sec].

## 5.2 Αξιοσημείωτες παρατηρήσεις

### Δημιουργία επιφανειακού στρώματος μετάλλου.

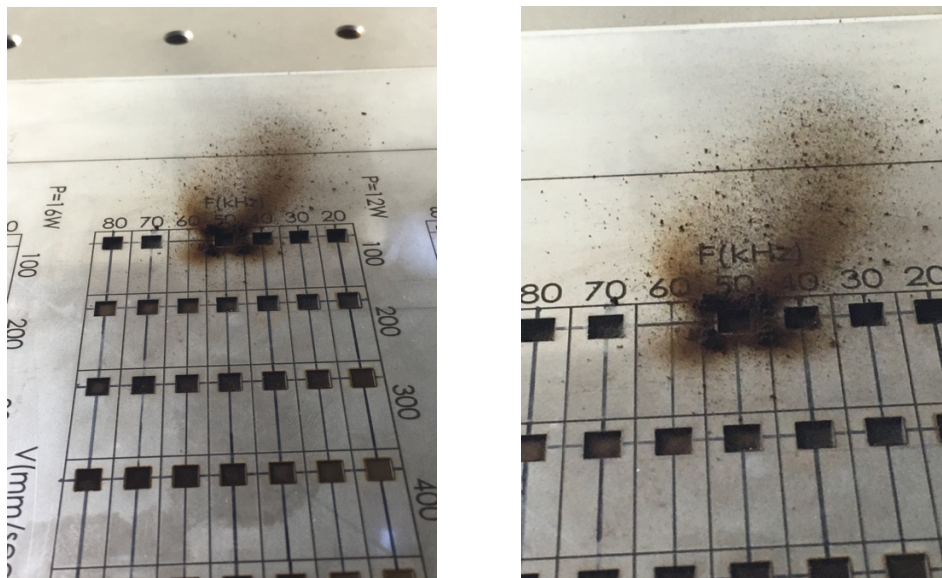
Το φαινόμενο αυτό όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρήθηκε μόνο στο αλουμίνιο και συγκεκριμένα στις συνθήκες:  $P=8W$  (40%),  $F=60$  kHz και  $V=100$  mm/sec, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Στις συνθήκες αυτές η κατεργασία βρίσκεται στα όρια του εάν η πλάκα αλουμινίου υφίσταται εξάχνωση ή απλά θερμαίνεται χωρίς να φτάνει σε σημείο τήξης. Παρατηρώντας το φαινόμενο αυτό εξάγετε το συμπέρασμα ότι υπάρχει εξάχνωση του μετάλλου αλλά είναι τόσο οριακή με αποτέλεσμα την στερεοποίηση του υλικού και έτσι την δημιουργία αυτού του επιφανειακού στρώματος μετάλλου στα πλαίσια του πειράματος. Το γεγονός ότι εμφανίζεται στη μια πλευρά του πειράματος έχει να κάνει με το που βρίσκεται το ακροφύσιο της σκούπας, το οποίο κατά την διάρκεια των πειραμάτων προσπαθεί να ρουφήξει τα μικρορινίσματα τα οποία δημιουργούνται από την εξάχνωση του υλικού στο σημείο που επικεντρώνεται η δέσμη laser. Κάτι το οποίο δεν το καταφέρνει πάντα, όπως θα εξεταστεί πιο αναλυτικά στην επόμενη παρατήρηση.



Σχήμα 5.1: Δημιουργία επιφανειακού στρώματος μετάλλου στις συνθήκες  $P=8W$  (40%),  $F=60$  kHz και  $V=100$  mm/sec

### **Συσσώρευση μικρορινισμάτων στη περιοχή του πειράματος.**

Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κυρίως στον ανοξείδωτο χάλυβα (SAE304) και συγκεκριμένα στις συνθήκες με ισχύ  $P=8W$  (40%) και  $P=12W$  (60%), κυρίως στις συχνότητες: [40, 50, 60, 70 kHz] και ταχύτητα  $V=100$  mm/sec, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Στον συνδυασμό αυτών των συνθηκών αυτές οι κατεργασίες αποφέρουν μεγάλα πάχη αφαίρεσης στρώματος ανά πέρασμα (layer). Με αποτέλεσμα μετά από 50 layer που είχε οριστεί στο technology να κάνει στα πειράματα, να εμφανίζεται ένα σημαντικό συνολικό βάθος εγχάραξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ακροφύσιο της σκούπας, το οποίο κατά την διάρκεια των πειραμάτων προσπαθεί να ρουφήξει τα μικρορινίσματα τα οποία δημιουργούνται από την εξάχνωση του υλικού στο σημείο που επικεντρώνεται η δέσμη laser, να μην το καταφέρνει στον επιθυμητό βαθμό και έτσι να παρατηρείται σημαντική συσσώρευση μικρορινισμάτων στη περιοχή του πειράματος. Αυτό το φαινόμενο ίσως να συνδέεται με το γεγονός ότι σε αυτές τις συχνότητες τα πάχη αφαίρεσης στρώματος του υλικού ανά πέρασμα (layer thickness) μειώνονται αισθητά. Δηλαδή ενώ στις μεγαλύτερες ταχύτητες το μέγιστο layer thickness εμφανιζόταν κοντά στις συχνότητες: [40, 50, 60kHz] στην περίπτωση της ταχύτητας  $V=100$  mm/sec ανεξαρτήτως της ισχύς εμφανίζει μείωση του layer thickness στις αντίστοιχες συχνότητες ή ακόμα και την ελάχιστη τιμή. Δηλαδή δεδομένου της αδυναμίας το ακροφύσιο της σκούπας να ρουφήξει τα μικρορινίσματα τα οποία δημιουργούνται από την εξάχνωση του υλικού, παρατηρείται συσσώρευσή τους ακόμα και μέσα στο «τετραγωνάκι» που πραγματοποιείται το πείραμα. Το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα στο επόμενο πέρασμα (layer) του πειράματος να υπάρχει επαφή της δέσμης του laser με τα συσσωρευμένα μικρορινίσματα που δημιουργήθηκαν από τα προηγούμενα layers και έτσι η επεξεργασία πραγματοποιείται πάνω στα ρινίσματα.

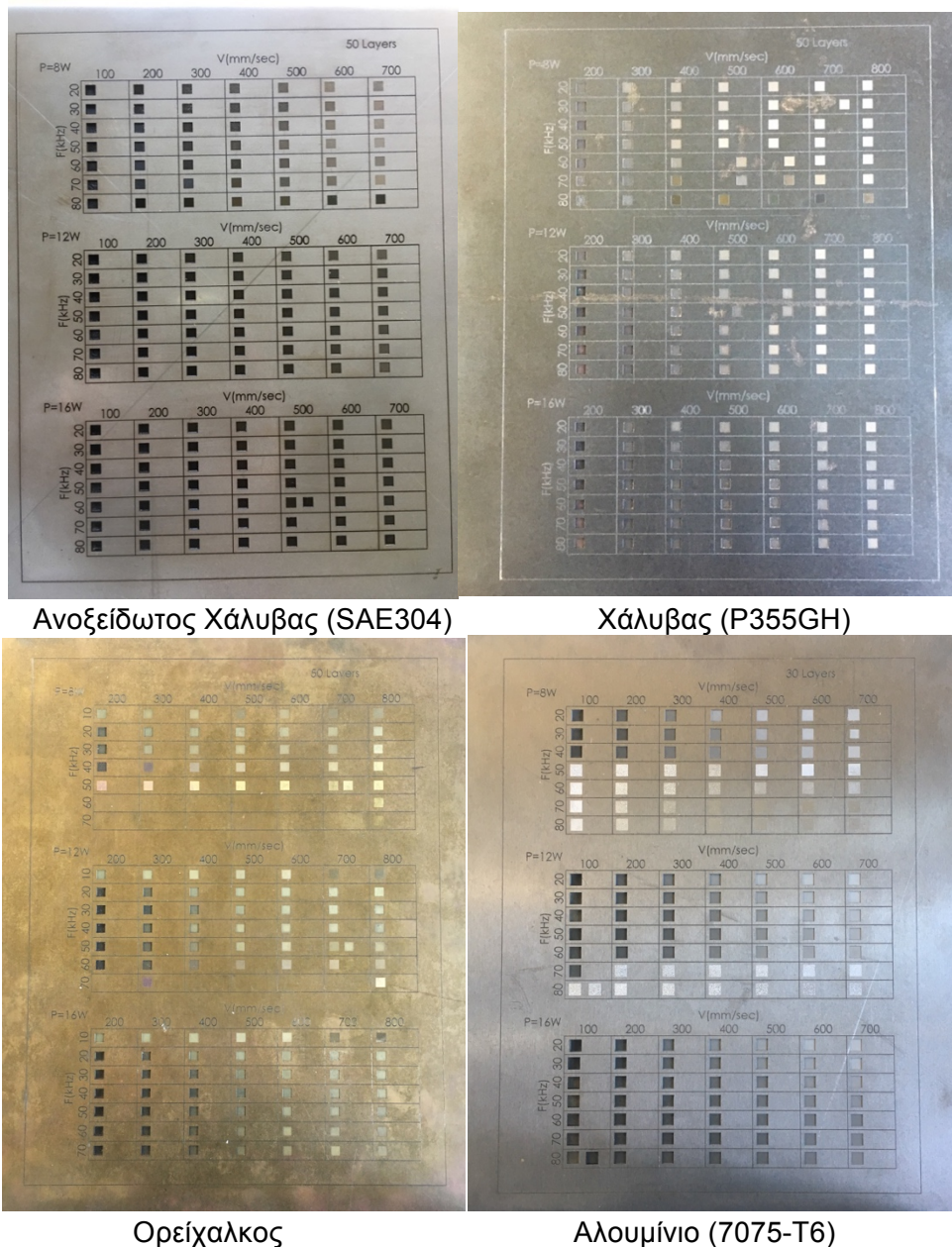


Σχήμα 5.2: Συσσώρευση μικρορινισμάτων στη περιοχή του πειράματος

### **Δημιουργία διαφόρων χρωμάτων με το πέρας της κατεργασίας.**

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3 σε όλα τα υλικά παρατηρήθηκε η δημιουργία διαφόρων χρωματικών αποχρώσεων. Αναλόγως πάντα το κάθε υλικό καθώς και τις συνθήκες που υπάρχουν σε κάθε ένα πείραμα ξεχωριστά. Αρχικά μπορεί να παρατηρηθεί ότι όταν υπάρχουν μεγάλα βάθη εγχάραξης παρατηρείται ένα έντονο σκούρο συνήθως μαύρο

χρώμα. Ενώ όσο αυξάνονται οι ταχύτητες σάρωσης και μειώνονται τα βάθη εγχάραξης παρατηρείται η δημιουργία διαφορετικών χρωμάτων. Η βάση του χρώματος εξαρτάτε από το υλικό, δηλαδή στον ορείχαλκο είναι κίτρινο, στο αλουμίνιο είναι γκρι κ.λπ., ενώ η απόχρωση του αλλάζει ανάλογα με το που κυμαίνεται η συχνότητα.



Σχήμα 5.3: Δημιουργία διαφόρων χρωμάτων στην εκάστοτε κατεργαζόμενη πλάκα

### 5.3 Προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης

Θα είχε ενδιαφέρον να γίνει μια παρόμοια μελέτη και να εξεταστεί η κατεργασία της χάραξης για μια ευρεία γκάμα υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται στις μηχανικές κατεργασίες και να μπορεί να κατεργαστεί η εργαλειομηχανή Lasertec 40. Τέτοια υλικά θα μπορούσαν να είναι ο χαλκός αλλά και διαφορετικά κράματα των υλικών που ήδη χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική όπως επίσης διάφορα κεραμικά και σύνθετα υλικά. Επίσης προτείνεται μια σειρά πειραμάτων στο προφیلόμετρο Contour GT-K 3D, ώστε να εξεταστεί η συσχέτιση των συνθηκών (ταχύτητα σάρωσης, συχνότητα παλμών, κατεργαζόμενο υλικό και μέση ισχύς) με την τραχύτητα των κατεργαζόμενων

επιφανειών. Επιπρόσθετα θα μπορούσε να γίνει μια περεταίρω έρευνα για βρεθεί μια συσχέτιση μεταξύ των συνθηκών κατεργασίας, υλικού και τελικού χρώματος που αποτυπώνεται στο τεμάχιο. Έτσι θα υπήρχε η δυνατότητα μετά το πέρας πολλών πειραμάτων σε διαφορετικά υλικά να αναπτυχθεί ένα λογισμικό που να δίνει στον χειριστή της εργαλειομηχανής την δυνατότητα να βάζει κάποια δεδομένα για την κατεργασία (υλικό, επιθυμητό βάθος χάραξης, χρόνος κατεργασίας, επιθυμητή τραχύτητα, χρώμα τελικής επιφάνειας) και το πρόγραμμα να του δίνει απευθείας τις βέλτιστες συνθήκες στις οποίες πρέπει να προγραμματιστεί το κέντρο κατεργασίας Lasertec 40 έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα με μεγάλη διαστατική ακρίβεια.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] V. Kovalenko, J. Yao, Q.Zhang, M. Nayebi, M. Anyakin, R. Zhuk, O.Stepura, P. Kondrashev, Laser milling of the intractable materials, *Procedia CIRP*, Volume 6, 2013, Pages 504-509.
- [2] S. Kasman, Impact of parameters on the process response:A Taguchi orthogonal analysis for laser engraving, *Measurement*, Volume 46, Issue 8, October 2013, Pages 2577-2584.
- [3] M. Manninen, M. Hirvimäki, I. Poutiainen, A. Salminen, Effect of Pulse Length on Engraving Efficiency in Nanosecond Pulsed Laser Engraving of Stainless Steel, *Metallurgical and Materials Transactions B*, October 2015, Volume 46, Issue 5, Pages 2129–2136.
- [4] S.L. Campanelli, G. Casalino, N. Contuzzi, Multi-objective optimization of laser milling of 5754 aluminum alloy, *Optics & Laser Technology*, Volume 52, November 2013, Pages 48-56.
- [5] D. Teixidor, I. Ferrer, J. Ciurana, T. Ozel, Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 29, Issue 1, February 2013, Pages 209-218.
- [6] S.L. Campanelli, A.D. Ludovico, C. Bonserio, P. Cavalluzzi, M. Cinquepalmi, Experimental analysis of the laser milling process parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 191, Issues 1–3, 1 August 2007, Pages 220-223.
- [7] Στέλιος Κουρής, Φυσική των Λέιζερ, Σελίδες 191-219.
- [8] Γ. Μήτσου, Γενικές ιδιότητες των Laser – Σύγκριση με συμβατικές πηγές φωτός.
- [9] Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, Μηχανουργική Τεχνολογία, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Σελίδες 1-15.

