



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΧΑΡΑΞΗ ΜΙΚΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕ LASER



ΑΓΑΛΙΑΝΟΣ ΦΩΤΗΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΑΡ. ΔΙΑΤΡ. : 2

ΧΑΝΙΑ 2011

**στους γονείς μου
Ιωάννη και Μαρία**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υπεύθυνο για την εργασία και επιβλέποντα κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ σε ένα τόσο σύγχρονο και ενδιαφέρον αντικείμενο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους Διδάκτορες Νικόλαο Ταπόγλου και Ταξιάρχη Μπελή για την πολύτιμη βοήθειά τους στην εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους όλον αυτό τον καιρό.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ	5
2.1 Βασικά στοιχεία του Laser	5
2.2 Μαρκάρισμα και χάραξη με Laser	19
2.3 Μελέτες χάραξης σε διάφορα υλικά.....	29
3. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ (LPSWIN/LASERSOFT3D).....	43
3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	43
3.2 LpsWin.....	45
3.3 Lasersoft3D	54
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	60
4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Διαδικασία και αποτελέσματα.....	60
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72
7.1 Σύνοψη	72
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	74

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος κατασκευή αναφέρεται στη διαδικασία μετατροπής ενός ακατέργαστου υλικού σε χρήσιμο προϊόν. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός συμβατικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται και συνδυάζονται. Η διαμόρφωση (forming), η συγκόλληση (welding) και η ταχεία προτυποποίηση (rapid prototyping) αποτελούν ορισμένες από αυτές τις μεθόδους.

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια και η προσπάθεια των βιομηχανιών για αύξηση του κέρδους, έφερε αναπόφευκτα καινοτομίες και βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής ενός προϊόντος. Μια από τις μεγαλύτερες καινοτομίες αποτέλεσε η χρήση του Laser στις μεθόδους παραγωγής. Η οικονομία και η ποιότητα αποτελούν ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση του Laser έναντι των συμβατικών μεθόδων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κατεργασίες με Laser σε μικρο-κλίμακα, οι οποίες αποτελούν πλέον μια ώριμη τεχνολογία που εφαρμόζεται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες κατασκευής προϊόντων υψηλής τεχνολογίας, όπως τηλεπικοινωνίες, βιοτεχνολογία, ιατρικών εξαρτημάτων, ενώ συνεχώς βρίσκει εφαρμογή και σε νέους τομείς. Σημαντική περιοχή των κατεργασιών με Laser αποτελεί η διαδικασία χάραξης και το μαρκαρίσματος με χρήση Laser (Laser Engraving & Laser Marking), αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία.

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη της διαδικασίας χάραξης σε Al-7075 και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι παράμετροι της διαδικασίας την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η συχνότητα παλμού, η ταχύτητα χάραξης και το πάχος του υλικού που αφαιρεί το Laser ανά στρώμα. Ειδικότερα στο κεφάλαιο 2, θα παρουσιαστούν σχετικές ερευνητικές δραστηριότητες για χάραξη και μαρκάρισμα με Laser σε διάφορα υλικά, καθώς και τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από αυτές.

Στο κεφάλαιο 3, θα γίνει μία αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του Laser, τις ιδιότητές του, τα είδη Laser που υπάρχουν καθώς και τις εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς.

Στο κεφάλαιο 4 θα αναλυθούν οι τεχνικές της χάραξης με Laser (Laser Marking & Engraving) και θα αναφερθούν οι εφαρμογές τους στη βιομηχανία.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 5, γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής Laser που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση των πειραμάτων, καθώς και στα σχετικά λογισμικά μέσω των οποίων πραγματοποιείται ο χειρισμός της.

Τέλος, στα κεφάλαια 6 και 7 θα παρουσιαστεί η πειραματική διαδικασία, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, καθώς και τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την έρευνα αυτή.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Βασικά στοιχεία του Laser

2.1.1 Εισαγωγή

Ο όρος Laser προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation που αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη ακτινοβολία. Το πρώτο Laser παρουσιάστηκε παγκόσμια από τον Maiman το 1960, χρησιμοποιώντας ένα κρύσταλλο ρουμπινίου. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συναφή, συγκλίνουσα και μονοχρωματική ακτίνα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με μήκος κύματος που κυμαίνεται από τις υπεριώδεις μέχρι τις υπέρυθρες ακτίνες.

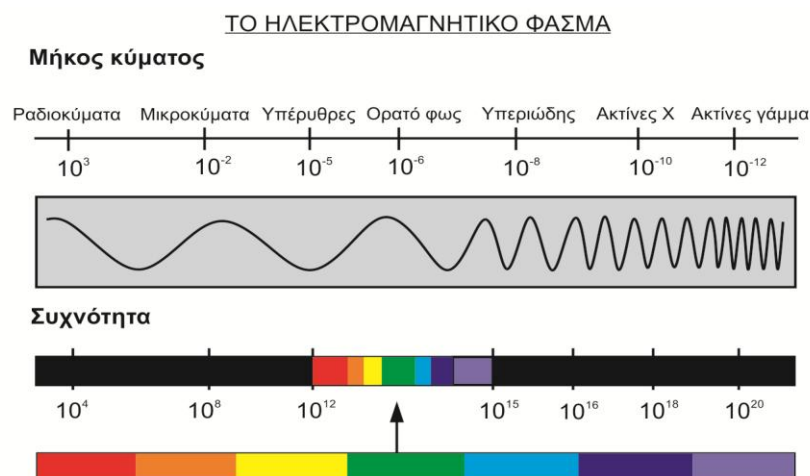
Τα Laser έχουν βρει εφαρμογή σχεδόν σε κάθε πεδίο της μηχανικής, ιατρικής, ηλεκτρονικής και άλλων τομέων, όπου μία ή περισσότερες ιδιότητες της ακτινοβολίας τους είναι σημαντικές. Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται, καθώς και την ικανότητα της ακτινοβολίας αυτών σε κάθε εφαρμογή, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς λειτουργίας και τις ιδιότητες τους. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα μελετηθούν οι πτυχές της ακτινοβολίας, οι σημαντικότεροι βιομηχανικοί τύποι Laser, όπως και διάφορες εφαρμογές στον τομέα των μικρο-κατεργασιών.

2.1.2 Φύση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η εκπομπή στο χώρο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός, αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη από αυτή.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργούνται επίσης όταν ένα ηλεκτρόνιο κάποιου ατόμου χάσει μέρος της ενέργειάς του και μεταπίπτει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη κοντά στον πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ταλάντωση, που διαδίδεται πλέον στο χώρο με τη μορφή ενός ταυτόχρονα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.

Ανάλογα με τη συχνότητα των κυμάτων και την ενέργεια που μεταφέρει, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χωρίζεται σε περιοχές. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, οι υπέρυθρες ακτίνες, το ορατό φως, οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Όλες αυτές ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, ενώ μπορούν ακόμη να διαπεράσουν και ορισμένα υλικά.



Σχήμα 2.1 : Περιοχές ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

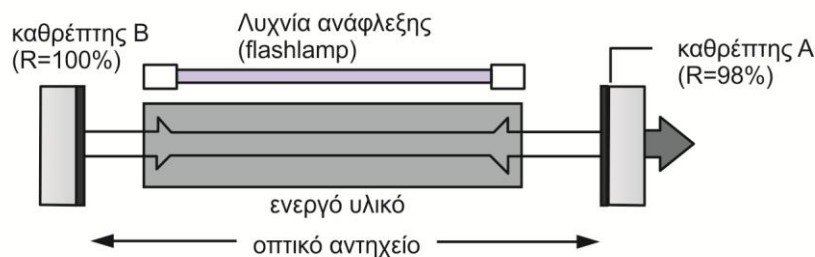
2.1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί τύποι Laser, καθένας εκ των οποίων έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και κατασκευαστικές λεπτομέρειες, εν τούτοις είναι δυνατόν να υποδειχθούν ορισμένες βασικές αρχές στη λειτουργία τους που είναι κοινές για όλους τους τύπους. Έτσι η μελέτη όλων των τύπων Laser δείχνει ότι σε κάθε ένα από αυτά μπορούμε, να διακρίνουμε, τα εξής τμήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 :

- Το ενεργό υλικό
- Το οπτικό αντηχείο (ή κοιλότητα συντονισμού)
- Λυχνία ανάφλεξης

Το σύνολο αυτών των τμημάτων αποτελεί το λεγόμενο συνηχητή Laser (Laser resonator).

Το ενεργό υλικό, είναι το υλικό που παρέχει τις στάθμες ενέργειας για μεταπτώσεις ηλεκτρονίων που οδηγούν σε δράση Laser. Το υλικό αυτό δρα σαν ένας ενισχυτής στην οπτική ακτινοβολία που περνά δια μέσω αυτού. Η ακτινοβολία εγκλωβίζεται στο λεγόμενο οπτικό αντηχείο, το οποίο αποτελείται από δύο καθρέπτες. Τέλος, με τη λεγόμενη διαδικασία άντλησης είναι δυνατόν να μεταφέρεται ενέργεια μέσα στα άτομα του ενεργού υλικού, διατηρώντας μία συντηρούμενη ταλάντωση μέσα στο οπτικό αντηχείο. Η λυχνία ανάφλεξης είναι το μέσο που δίνει την απαραίτητη ενέργεια για την εκκίνηση της διαδικασίας παραγωγής της δέσμης.



Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση Laser συνηχητή

2.1.4 Μηχανισμός λειτουργίας

Οι τρεις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο συνηχητή Laser και απαιτούνται για να παραχθεί δέσμη Laser υψηλής ενέργειας είναι:

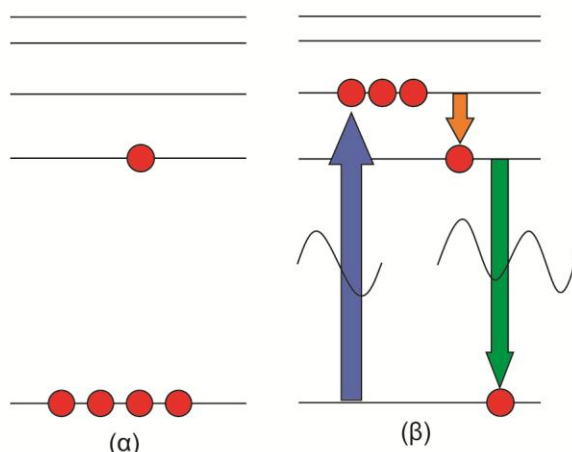
- Αντιστροφή πληθυσμού (population inversion)
- Εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulated emission)
- Ενίσχυση (amplification).

Αντιστροφή πληθυσμού

Η αντιστροφή πληθυσμού επιτυγχάνεται διεγείροντας τα άτομα είτε με κρούσεις με άλλα άτομα ή ιόντα (ηλεκτρονική άντληση), είτε με απορρόφηση ακτινοβολίας από εξωτερική πηγή. Η κατάσταση αυτή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, καθώς χωρίς αυτή θα πραγματοποιούνταν φυσική απορρόφηση της ακτινοβολίας και όχι εξαναγκασμένη.

Συνήθως οι στοιβάδες με τη χαμηλότερη ενέργεια περιέχουν περισσότερα ηλεκτρόνια από αυτές με τη μεγαλύτερη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3α. Με σκοπό να παραχθεί η δέσμη Laser, θα πρέπει να συμβεί η διαδικασία της αντιστροφής πληθυσμού. Αυτό σημαίνει ότι σε μια στοιβάδα υψηλής ενέργειας υπάρχουν περισσότερα από το κανονικό ηλεκτρόνια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3β. Τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να μείνουν σε αυτή τη διεγερμένη κατάσταση για κάποιο λογικό διάστημα του χρόνου. Εάν πέσουν πολύ σύντομα σε στοιβάδα

χαμηλότερης ενέργειας, τότε δεν θα υπάρχει αρκετός χρόνος για τα διεγερμένα φωτόνια ώστε προκαλέσουν εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.3 : α) κανονική κατανομή β) αντιστροφή πληθυσμού

Εξαναγκασμένη εκπομπή

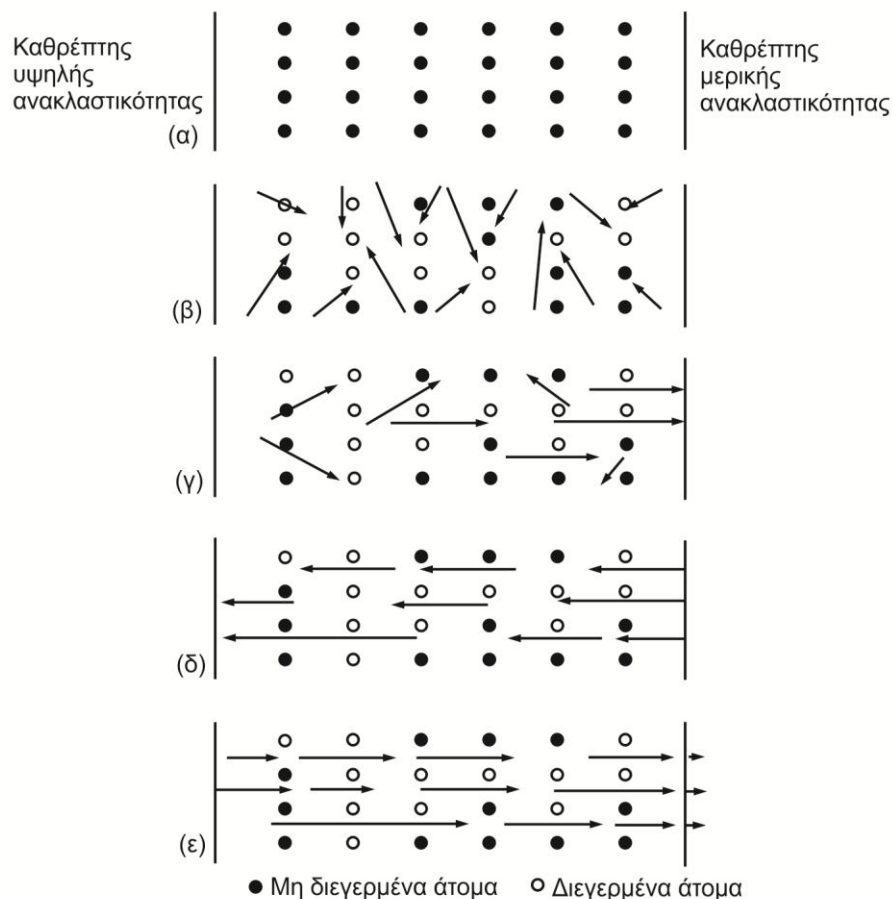
Υποθέτοντας ότι ένα ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε μια στοιβάδα υψηλής ενέργειας και ένα φωτόνιο έρχεται κατά μήκος με ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας του ηλεκτρονίου και μιας χαμηλότερης στοιβάδας, αυτό που θα συμβεί είναι ότι το φωτόνιο θα διεγείρει το ηλεκτρόνιο και θα πέσει σε χαμηλότερης ενέργειας στοιβάδα, εκπέμποντας έτσι ένα φωτόνιο.

Το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο θα έχει την ίδια ενέργεια με το αρχικό φωτόνιο και βλέποντάς το ως κύμα θα έχουμε στη συνέχεια δύο κύματα με την ίδια συχνότητα. Τέτοια κύματα αλληλεπιδρούν εποικοδομητικά, οδηγώντας σε ένα εντονότερο κύμα.

Ενίσχυση

Η ενίσχυση του φωτός του Laser, επιτυγχάνεται μέσα σε μία κοιλότητα (οπτικό αντηχείο) που στα άκρα αποτελείται από καλά ευθυγραμμισμένους καθρέφτες αντανάκλασης, κάθετους στον άξονα της κοιλότητας. Το ενεργό υλικό του Laser τοποθετείται μεταξύ των καθρεπτών αυτών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Συνήθως, ο ένας καθρέπτης έχει αντανάκλαστικότητα που πλησιάζει το 100% ενώ ο άλλος έχει μερική αντανάκλαστικότητα και δίνει τη δυνατότητα στη δέσμη Laser να εμφανιστεί.

Η διαδικασία της ενίσχυσης φαίνεται στο σχήμα 2.4. Όταν το Laser είναι ανενεργό, η οπτική κοιλότητα περιέχει όλο το υλικό του Laser στην αρχική μη διεγερμένη κατάσταση (σχήμα 2.4α). Στο σχήμα 2.4β συμβαίνει η διέγερση των ατόμων (αντιστροφή πληθυσμού), ακολουθούμενη από την έναρξη εξαναγκασμένης εκπομπής (σχήμα 2.4γ). Η ένταση της εξαναγκασμένης ακτινοβολίας αυξάνεται καθώς οδεύει προς το τέλος στους καθρέπτες. Περαιτέρω ενίσχυση επιτυγχάνεται από την αντανάκλαση των ατόμων (σχήμα 2.4δ). Τα άτομα πραγματοποιούν όλη τη διαδρομή και επιστρέφουν στην αρχική τους θέση, ενισχύοντας όλο και περισσότερες εκπομπές, με αποτέλεσμα να εξέρχεται υψηλής πυκνότητας ακτίνα Laser από έναν από τους καθρέπτες και συγκεκριμένα αυτόν με τη μικρότερη αντανάκλαστικότητα (σχήμα 2.4ε).



Σχήμα 2.4 : Σχηματική απεικόνιση των σταδίων ενίσχυσης

2.1.5 Ιδιότητες της ακτίνας Laser

Υπάρχει ένα σύνολο βασικών ιδιοτήτων των Laser, οι οποίες τα καθιστούν χρήσιμα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης και της κατεργασίας υλικών. Τέτοιες ιδιότητες είναι :

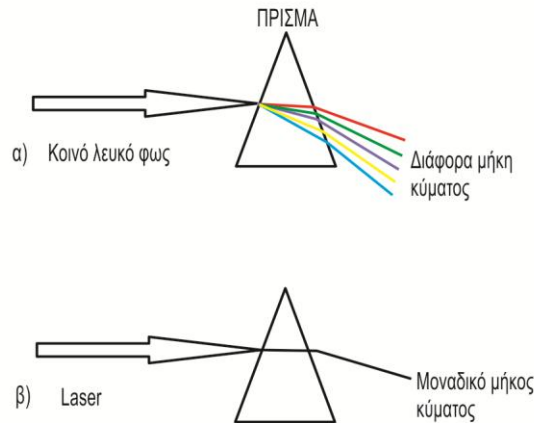
- Μονοχρωματικότητα (monochromaticity)
- Κατευθυντικότητα (directionality)
- Συνοχή (coherence)
- Πόλωση (polarization)

Οι μοναδικές αυτές ιδιότητες χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες υλικών, όπου η ποιότητα και η επαναληψιμότητα μιας διαδικασίας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της ακτίνας και τις ιδιότητες του υλικού στο οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία.

Μονοχρωματικότητα

Η μονοχρωματικότητα αποτελεί την πλέον σημαντική ιδιότητα της ακτίνας Laser και μετρείται σύμφωνα με το πλάτος της γραμμής φάσματος. Οι συμβατικές πηγές φωτός εκπέμπουν φως αποτελούμενο από ένα ευρύ φάσμα μήκων κύματος, ενώ το Laser εκπέμπει μόνο ένα πολύ στενό φάσμα μήκων κύματος, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.5](#).

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται είναι πολύ κοντά στο μονοχρωματικό. Η ιδιότητα αυτή, διασφαλίζει την ικανότητα του Laser να εστιάζει σε εξαιρετικά μικρά σημεία, έχοντας παράλληλα η ακτίνα το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής της ισχύος στα σημεία αυτά.

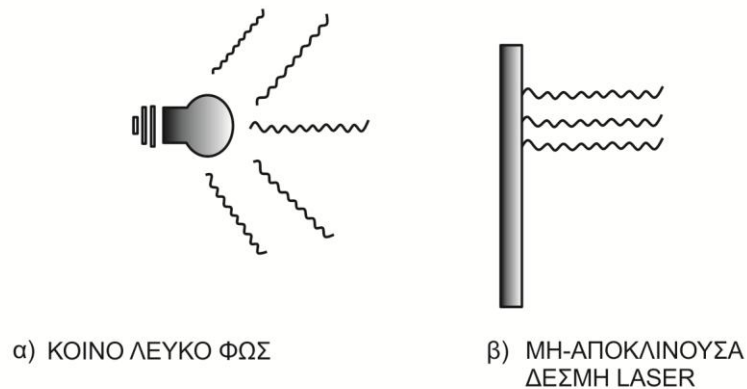


Σχήμα 2.5 : Μήκη κύματος σε α) κοινό φως και β) σε Laser

Κατευθυντικότητα

Σε μία συμβατική πηγή φωτός, το φως εξέρχεται από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα. Αυτός είναι και ο λόγος που μία συμβατική πηγή φωτός δεν μπορεί να εστιάσει σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση και ένα συγκεκριμένο σημείο. Οι ακτίνες Laser από την άλλη, έχουν την ικανότητα να εστιάζουν σε πολύ μικρές περιοχές ακόμα και από μεγάλες αποστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.

Η κατευθυντικότητα της ακτίνας σχετίζεται με την κατά διεύθυνση φύση της ακτίνας. Έτσι, η ενέργεια μπορεί να συλλέγεται αποτελεσματικά σε μια μικρή περιοχή, χωρίς μεγάλη απώλεια στην πυκνότητα της ακτίνας.



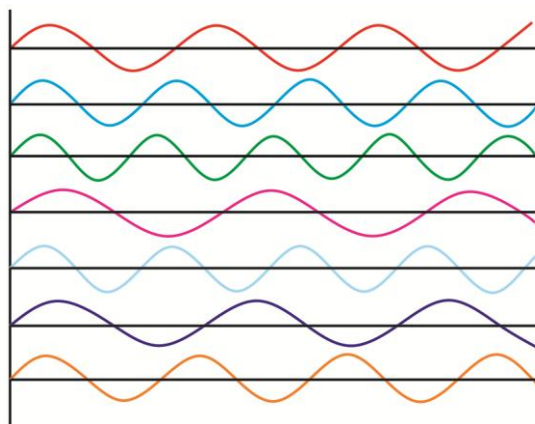
Σχήμα 2.6 : Κατεύθυνση ακτίνας σε α) κοινό φως β) σε Laser

Πόλωση

Μία ακτίνα φωτός λέγεται ότι είναι πολωμένη, όταν τα ηλεκτρικά διανύσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, είναι προσανατολισμένα προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση στο χώρο. Αποτέλεσμα της πόλωσης είναι να επηρεάζεται η απορροφητικότητα ενός υλικού, δηλαδή το ποσοστό απορρόφησης της ενέργειας του Laser από το υλικό.

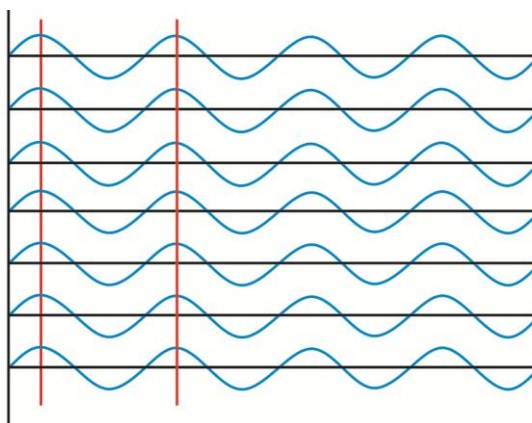
Συνοχή

Στο σχήμα 2.7, απεικονίζονται παράλληλες ακτίνες κυμάτων φωτός. Κανένα από αυτά τα κύματα δεν έχει σχέση με κάποιο από τα άλλα εντός της ακτίνας, με αποτέλεσμα να λέγεται πως η ακτίνα δεν έχει εσωτερική συνοχή.



Σχήμα 2.7 : Κύματα φωτός χωρίς συνοχή

Αντίθετα, στο σχήμα 2.8 παρατηρούμε τη συνοχή των κυμάτων που υπάρχει σε μία ακτίνα Laser. Αυτό σημαίνει ότι τα φωτεινά κύματα κινούνται μαζί σε φάσεις και στο χρόνο και στο χώρο.



Σχήμα 2.8 : Κύματα Laser με συνοχή

2.1.6 Τρόπος λειτουργίας

Ένα Laser μπορεί να ταξινομηθεί ανάλογα με το αν είναι συνεχής ή παλμικός ο τρόπος λειτουργίας του. Αυτό εξαρτάται από το αν η ισχύς εξόδου είναι συνεχής με την πάροδο του χρόνου ή παίρνει τη μορφή παλμών σε μία ή διαφορετική χρονική κλίμακα.

Στη διαδικασία συνεχούς τρόπου λειτουργίας, απελευθερώνεται αδιαλείπτως σταθερή ενέργεια για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.

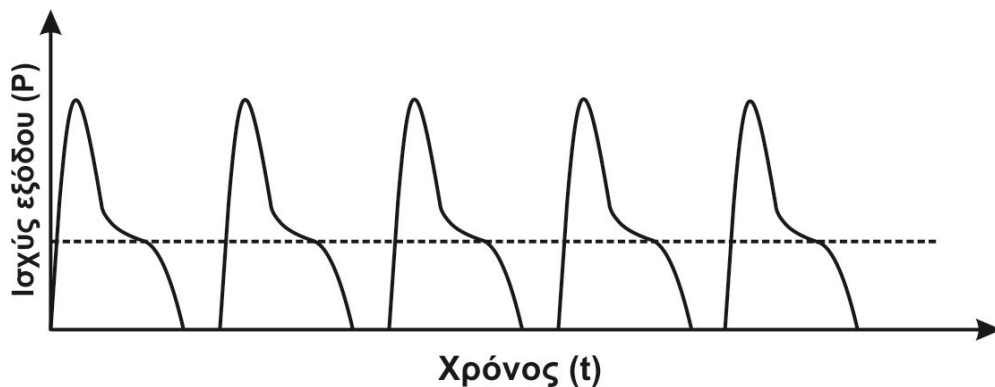


Σχήμα 2.9 : Συνεχής τρόπος λειτουργίας του Laser

Στον παλμικό τρόπο λειτουργίας, η ενέργεια αποθηκεύεται μέχρι να φτάσει ένα όριο. Μόλις το όριο αυτό επιτευχθεί, η αποθηκευμένη ενέργεια ελευθερώνεται ταχέως με τη μορφή μικρής διάρκειας παλμών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Ωστόσο, ο παλμός μπορεί να εξέρχεται με διάφορους τρόπους και γι' αυτό τα παλμικά Laser χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες : normal pulsing, Q-switching και mode locking.

Normal pulsing

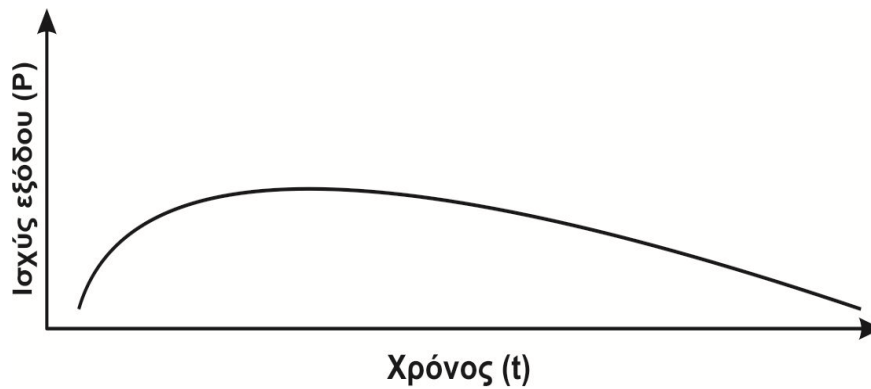
Στη μέθοδο αυτή, η διάρκεια του παλμού ελέγχεται αλλάζοντας τις παραμέτρους της λυχνίας ανάφλεξης. Αυτό γενικά επιτυγχάνεται αλλάζοντας την επαγωγή και τη χωρητικότητα του κυκλώματός της. Η διάρκεια των παλμών σε αυτή την περίπτωση κυμαίνεται από microseconds έως milliseconds. Το χαρακτηριστικό του normal pulsing φαίνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 : Μορφή παλμών στη μέθοδο normal pulsing

Q-switching

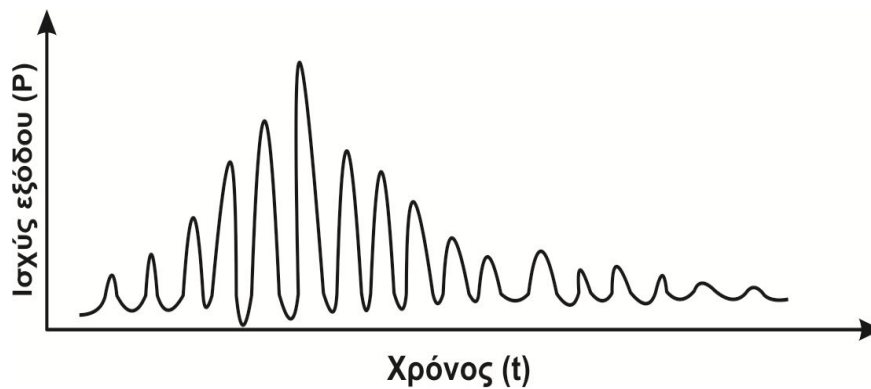
Στη μέθοδο αυτή, μικροί και δυνατοί παλμοί επιτυγχάνονται αλλάζοντας την τιμή Q της κοιλότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Η τιμή Q αποτελεί την ικανότητα της κοιλότητας να αποθηκεύει την ακτινοβολούμενη ενέργεια. Όταν η τιμή του Q είναι υψηλή, η ενέργεια αποθηκεύεται με αποτελεσματικότητα στην κοιλότητα. Μόλις η τιμή του χαμηλώσει, η αποθηκευμένη ενέργεια ελευθερώνεται με τη μορφή μικρών και δυνατών παλμών ακτίνας Laser. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών στη μέθοδο αυτή, μπορεί να φτάσει τις μερικές εκατοντάδες kHz.



Σχήμα 2.11 : Μορφή παλμών στη μέθοδο Q-Switching

Mode locking

Στη μέθοδο αυτή, παράγεται ένα σύνολο εξαιρετικά μικρών και ίσων διαστημάτων παλμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών στη μέθοδο αυτή, κυμαίνεται από MHz έως GHz.



Σχήμα 2.12 : Μορφή παλμών στη μέθοδο Mode locking

2.1.7 Τύποι βιομηχανικών Laser

Από την ανάπτυξη του πρώτου Laser ρουμπινίου το 1960, η δράση του έχει εφαρμοστεί σε εκατοντάδες άλλα υλικά. Τα Laser γενικά ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με το ενεργό υλικό:

- Laser στερεής κατάστασης (solid-state Lasers)
- Laser αερίου (gas Lasers)
- Laser ημιαγωγών (semiconductor Lasers)
- Laser χρωστικών ουσιών (dye Lasers)

Laser στερεής κατάστασης

Το ενεργό υλικό αυτών των τύπων Laser, βρίσκεται μέσα σε ένα μονωτικό διηλεκτρικό κρύσταλλο ή σε άμορφο γυαλί και είναι στερεό. Η δέσμη του Laser που παράγεται, προέρχεται από την ενέργεια που μεταπηδά μεταξύ των διακριτών ενεργειακών επιπέδων των υλικών προσμίξεων, όπως είναι το chromium και το neodymium, ενώ για να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής δέσμης στον συνηχητή, χρησιμοποιείται λυχνία ανάφλεξης.

Το neodymium αποτελεί το πιο κοινό υλικό πρόσμιξης σε διάφορους κρυστάλλους των Laser στερεής κατάστασης, συμπεριλαμβανομένου yttrium orthovanadate (Nd:YVO₄), yttrium lithium fluoride (Nd:YLF) και yttrium aluminium garnet (Nd:YAG). Όλα αυτά τα Laser

παράγουν υψηλή ισχύ στο φάσμα των υπέρυθρων (1064nm). Χρησιμοποιούνται για κοπή, συγκόλληση, μαρκάρισμα και χάραξη μετάλλων και άλλων υλικών.

Τα παραπάνω Laser, διπλασιάζοντας, τριπλασιάζοντας και τετραπλασιάζοντας τη συχνότητά τους, είναι γνωστά ως DPSS(diode pumped solid state). Διπλασιάζοντας τη συχνότητα δημιουργείται ακτίνα μήκους κύματος 532 nm (πράσινο, ορατό), τριπλασιάζοντας επιτυγχάνεται μήκος κύματος 355 nm και τετραπλασιάζοντας 266 nm (υπεριώδης).

Στην κατηγορία των Laser στερεής κατάστασης ανήκουν και τα fiber Laser δηλαδή Laser όπου το ενεργό υλικό αποτελείται από οπτικές ίνες. Το ενεργό υλικό σε αυτή την περίπτωση ενισχύεται με σπάνια γήινα στοιχεία όπως erbium, ytterbium, thulium, dysprosium, holmium και dysprosium. Σε όσα χρησιμοποιείται ytterbium έχουν μήκος κύματος από 1020-1070 nm, ενώ με holmium φτάνει τα 2097 nm.

Αρκετά είναι τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα fiber Laser σε σχέση με τα υπόλοιπα στερεής κατάστασης, τα κυριότερα από τα οποία είναι τα εξής :

- Υψηλής ποιότητας και σταθερότητας ακτίνα : Καθώς παράγεται στον πυρήνα της ίνας, πρακτικά σημαίνει ότι είναι ευθεία και μπορεί να εστιάζει σε πολύ μικρά σημεία αλλά και να μεταφέρεται εύκολα
- Υψηλές τιμές ισχύος : Μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 2000 Watt. Στα 700 Watt μπορούν να κόψουν ατσάλι πάχους 25,4 mm ενώ στα 2000 Watt κόβουν ατσάλι από μεγάλη απόσταση
- Ψύχονται εύκολα : Οι οπτικές μπορεί να έχουν μεγάλο μήκος με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να κατανέμεται σε όλο το μήκος τους και να προστατεύεται το Laser από υπερθέρμανση
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας
- Δεν επηρεάζονται από σκληρές αλλαγές περιβάλλοντος
- Έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής

Παρόλα αυτά, σημαντικά είναι και τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν αυτά τα Laser, ορισμένα από τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια :

- Μικρό εύρος μηκών κύματος είναι διαθέσιμα
- Τα στοιχεία με τα οποία ενισχύεται το ενεργό υλικό, όπως το ytterbium, δεν είναι ασφαλή για τα μάτια και χρειάζονται ειδικά γυαλιά
- Η ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο κάθε παλμός είναι περιορισμένη
- Δεν αποτελεί την πλέον αποτελεσματική λύση για τις περισσότερες εφαρμογές
- Είναι δύσκολο να επιδιορθωθούν και πρέπει να επιστραφούν στον κατασκευαστή σε κάθε τεχνικό πρόβλημα

Laser αερίου

Το Laser αερίου δημιουργείται από μία διαδικασία στην οποία ηλεκτρικό ρεύμα, ποικίλης ισχύος, εφαρμόζεται σε ένα σώμα αερίου το οποίο βρίσκεται σφραγισμένο σε μία κοιλότητα, ώστε να παραχθεί δέσμη φωτός. Τα Laser αερίου ήταν τα πρώτα συνεχούς φωτός, καθώς και τα πρώτα στα οποία εφαρμόστηκε η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε φως.

Σε αυτά τα Laser, το ενεργό υλικό είναι αέριο. Τα αέρια υλικά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των στερεών. Μερικά από αυτά είναι:

- Τα αέρια λειτουργούν ως ομογενή ενεργά υλικά.
- Μπορούν εύκολα να μεταφερθούν για ψύξη και ανατροφοδότηση
- Είναι σχετικά ανέξοδα

Τα Laser που χρησιμοποιούν αέριο ήλιο-νέον (HeNe) έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, ωστόσο η συντριπτική πλειοψηφία είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί στα 633 nm. Αυτό συνεπάγεται χαμηλό κόστος και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εκπαιδευτικά εργαστήρια.

Τα εμπορικά Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), μπορούν να παράγουν πολλές εκατοντάδες Watt και μπορούν να εστιάζουν σε ένα πολύ μικρό σημείο. Χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία για κοπή και συγκολλήσεις, ενώ το μήκος κύματός τους είναι 10,6 μm.

Τα excimer αποτελούν άλλη μία κατηγορία των Laser αερίων, ενώ οι τύποι και τα χαρακτηριστικά αυτών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.13.

Ιδιότητες	Τύποι των excimer λέιζερ			
	ArF	KrCl	KrF	XeCl
Μήκος κύματος	193	222	248	308
Ισχύς(W)	0.3-100	2-4	2-100	0.02-150
Ενέργεια παλμού (MJ/παλμό)	0.2-500	0.1-250	20-15000	1.2-5000
Ρυθμός επανάληψης(παλμοί/s)	1-250	10-500	1/60-1000	1-1000
Πλάτος παλμού(ns)	1.2-65	1.2-6	1.5-1200	1.2-80

Σχήμα 2.13 : Τύποι των excimer Laser

Laser ημιαγωγών

Τα Laser ημιαγωγών, χρησιμοποιούν σαν ενεργό, υλικό ημιαγωγούς. Λέγεται ότι αποτελούν τα Laser του μέλλοντος και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι συμπαγής, έχουν τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής, οι ιδιότητές τους είναι σε ταχεία ανάπτυξη και γίνονται όλο και περισσότερο ισχυρά και αποτελεσματικά.

Η διαδικασία παραγωγής της δέσμης στον συνηχητή Laser, επιτυγχάνεται με ηλεκτρικό ρεύμα και το μήκος κύματος κυμαίνεται από 375 nm έως 1800 nm.

Laser χρωστικών ουσιών

Τα Laser αυτά χρησιμοποιούν σαν ενεργό υλικό κάποια χρωστική ουσία διαλυμένη σε κάποιο διαλύτη. Για να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής δέσμης στον συνηχητή Laser, χρησιμοποιείται λυχνία ανάφλεξης ή κάποιο άλλο Laser. Το ευρύ φάσμα των χρωστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ενεργό υλικό, δίνουν τη δυνατότητα σε αυτά τα Laser να παράγουν παλμούς πολύ μικρής διάρκειας της τάξεως των μερικών femoseconds, όπως επίσης και να επιτύχουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος.

Τα Laser χρωστικών μπορούν να λειτουργούν είτε με παλμικό είτε με συνεχές τρόπο. Με παλμικό τρόπο, για να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής δέσμης στον συνηχητή, χρησιμοποιείται λυχνία ανάφλεξης ή κάποιο άλλο Laser. Με συνεχές τρόπο, χρησιμοποιείται Laser ιόντων αργού χρησιμοποιείται για να ξεκινήσει η διαδικασία.

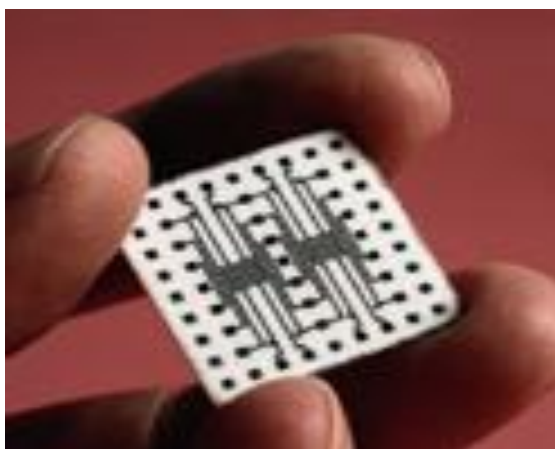
2.1.8 Εφαρμογές σε μικρο-κατεργασίες

Οι μικρο-κατεργασίες με Laser χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή αντικειμένων σε μικρο-κλίμακες, σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Επίσης, πλήθος υλικών όπως κεραμικά, μέταλλα, πολυμερή και άλλα, έχουν επιτυχώς υποστεί επεξεργασία σε τέτοιες κλίμακες.

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των κατεργασιών αυτών.

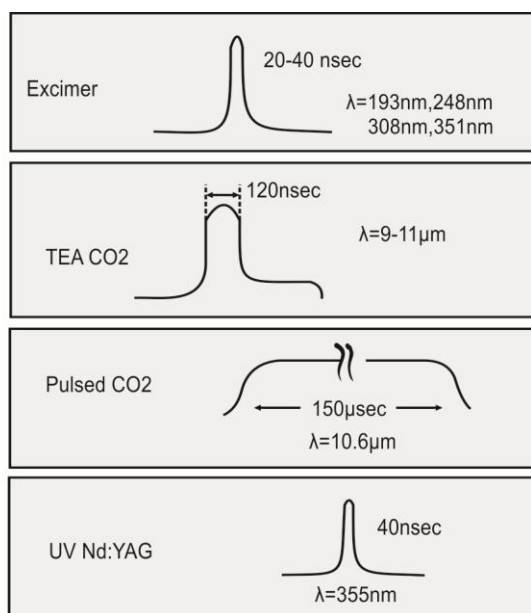
Διάτρηση οπών (Microvia drilling)

Η διάτρηση οπών σε μικρο-κλίμακα αποτελεί μία σημαντική τεχνολογία για πλήθος εφαρμογών, έχοντας σαν χαρακτηριστικά της την ευελιξία, την ακρίβεια και την ταχύτητα. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία οπών σε πολυστρωματικούς πίνακες κυκλωμάτων, γνωστούς ως PCBs (σχήμα 2.14), ώστε να επιτρέπεται η ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ των στρωμάτων του κυκλώματος.



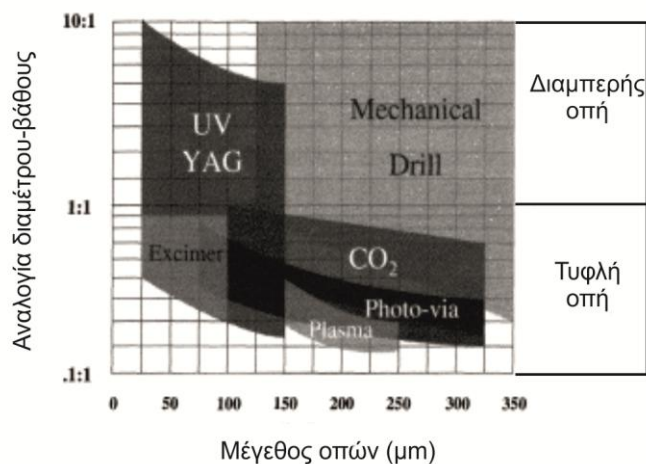
Σχήμα 2.14 : Διάτρηση οπών σε PCBs

Τέσσερεις διαφορετικοί τύποι Laser είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία οπών σε PCBs, με τα χαρακτηριστικά του καθενός να φαίνονται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 : Σχετικά σχήματα παλμών των εμπορικών Laser για διάτρηση οπών

Κάθε ένα από αυτά τα Laser μπορεί να δημιουργήσει οπές σε μη ενισχυμένα πολυμερή, ενώ το UV YAG μπορεί επιπλέον σε χαλκό, λόγω της διαθέσιμης υψηλής ακτινοβολίας και της απορροφητικότητας του υλικού σε αυτό το μήκος κύματος. Το μήκος και το βάθος της οπής που επιθυμείται να επιτευχθούν, αλλά και η κατασκευή του ελάσματος, αποτελούν τους παράγοντες για τους οποίους επιλέγεται κάθε φορά διαφορετική τεχνολογία. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και του Laser για την εκάστοτε διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16 : Βέλτιστη επιλογή τεχνολογίας και Laser

Διάτρηση οπών σε ακροφύσιο εκτυπωτή ψεκασμού μελάνης (Drilling of inkjet nozzle holes)

Την καρδιά στους εκτυπωτές ψεκασμού μελάνης αποτελεί η κεφαλή, ένας συνδυασμός από συστατικά και μικροσυσκευές που μετατρέπουν τις σταγόνες μελανιού και τις τοποθετούν στο χαρτί. Το σημαντικότερο τμήμα όμως της κεφαλής αποτελεί η πλακέτα ακροφυσίων, η οποία φέρει τις οπές από όπου εκτοξεύεται το μελάνι στο χαρτί. Για τη δημιουργία των οπών αυτών γίνεται κατεργασία με χρήση Laser (σχήμα 2.17).

Η ποιότητα του εκτυπωτή μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας διαδοχικά τη διάμετρο των ακροφυσίων, το βήμα των οπών και τέλος, αυξάνοντας το μήκος της κεφαλής.

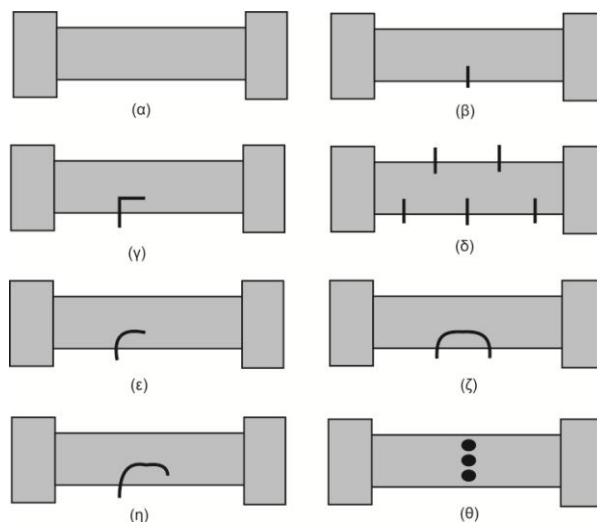


Σχήμα 2.17 : Πλακέτα ακροφυσίου

Ρύθμιση σε ηλεκτρικούς αντιστάτες (Resistor trimming)

Με τον όρο trimming εννοούμε μια διαδικασία όπου με τη χρήση Laser γίνεται ρύθμιση των λειτουργικών παραμέτρων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

Οι αντιστάτες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και συχνά χρειάζεται να ρυθμιστούν κατάλληλα οι τιμές αντοχής τους ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των κυκλωμάτων. Αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με τη διαδικασία του Laser trimming, αλλάζοντας το γεωμετρικό σχήμα της ταινίας των αντιστατών, είτε αφαιρώντας είτε αλλάζοντας το υλικό της ταινίας τους με συγκεκριμένο τρόπο και κατεύθυνση (σχήμα 2.18).



Σχήμα 2.18 : Απεικόνιση διάφορων γεωμετρικών κοπών κατά τη διάρκεια Laser trimming

Τεμαχισμός σε τετράγωνα με Laser (Laser scribing and dicing)

Η dicing αποτελεί μία μέθοδο που χρησιμοποιείται για κοπή, δημιουργία τετραγώνων και αυλάκωση πολλών υλικών όπως, γυαλί, πυρίτιο, κεραμικά, κρύσταλλο και πολλά άλλα. Για την επίτευξη των παραπάνω, χρησιμοποιείται ένας υψηλής ταχύτητας άξονας πάνω στον οποίο τοποθετείται μία εξαιρετικά λεπτή λεπίδα διαμαντιών ή καλώδια διαμαντιών. Η φθορά της λεπίδας, η εισαγωγή υψηλής πίεσης νερού ψύξης, η μόλυνση των ευαίσθητων συσκευών και οι υπόλοιπες πιέσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε ράγισμα, αποτελούν βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου.

Η Laser scribing αποτελεί μία εναλλακτική μέθοδο για τη dicing, η οποία είναι απαλλαγμένη από τα παραπάνω μειονεκτήματα και μπορεί να επιτύχει πλάτη εγκοπών μέχρι 30μm, σε αντίθεση με τα 250 μm της dicing.

Εφαρμογές στη βιοιατρική

Το Laser χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στην κατασκευή ιατρικών συσκευών όπως stents, καθετήρες και πολλές άλλες.

Το stent είναι ένα συμμάτινο πλέγμα το οποίο χρησιμοποιείται για να διατηρήσει μια αρτηρία ανοιχτή κατά τη διάρκεια μίας αγγειοπλαστικής εγχείρησης. Η κατασκευή του προέρχεται από την κοπή σωλήνα ανοξείδωτου χάλυβα με χρήση Laser (σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.19 : Stents

Δημιουργία οπών για εγχυτές καυσίμου (Fuel injector drilling)

Η διάτρηση των ακροφύσιων στους εγχυτήρες καυσίμων πραγματοποιούνταν με την κατεργασία της ηλεκτρικής απαλλαγής, επιτυγχάνοντας έτσι οπές της τάξεως των 150-200μm. Λόγω όμως των συνεχών αυξανόμενων περιβαλλοντολογικών θεμάτων για μείωση των ρύπων, έγινε επιτακτική η ανάγκη μείωσης του μεγέθους των οπών πέρα από τις δυνατότητες της ηλεκτρικής απαλλαγής. Η διαδικασία διάτρησης οπών με Laser έλυσε αυτό το πρόβλημα δίνοντας τη δυνατότητα διάτρησης οπών έως 20μm.

Αφαίρεση μόνωσης καλωδίων (Stripping of wire insulation)

Πολλές φορές για την ένωση ηλεκτρικών καλωδίων μεταξύ τους αλλά και με άλλους αγωγούς, είναι απαραίτητη η αφαίρεση της πλαστικής μόνωσης που τα περιβάλλει. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους, όπως χημικές, μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές, σε περιπτώσεις όμως όπου η καθαρότητα και η ακρίβεια της περιοχής αφαίρεσης του πλαστικού δεν παίζουν σημαντικό ρόλο. Ωστόσο, σε εφαρμογές όπως στη μικροηλεκτρονική και τη βιομηχανία των υπολογιστών, οι παράμετροι αυτοί παίζουν καθοριστικό ρόλο. Η τεχνική της αφαίρεσης μόνωσης με Laser, δίνει την ακρίβεια και την καθαρότητα που απαιτούνται σε τέτοιες εφαρμογές.

Μαρκάρισμα και χάραξη με Laser (Laser Marking και Laser Engraving)

Αποτελούν από τις σημαντικότερες κατηγορίες στον τομέα των κατεργασιών σε μικροκλίμακα και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς και κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας. Λεπτομερείς ανάλυσή τους θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Μαρκάρισμα και χάραξη με Laser

2.2.1 Μαρκάρισμα με Laser (Laser Marking)

2.2.1.1 Γενική περιγραφή

Το μαρκάρισμα με Laser των κομματιών που κατασκευάζονται, έχει καταστεί σύνηθες εφαρμογή στη βιομηχανία. Χρησιμοποιείται για την εγχάραξη λογοτύπων και πληροφοριών σε ένα προϊόν, με σκοπό την αναγνώριση και την πρόληψη κλοπής του. Συχνά παίρνει τη μορφή ενός αλφαριθμητικού κωδικού τυπωμένου σε ετικέτα ή στην επιφάνεια ενός προϊόντος, για να περιγράψει ημερομηνία κατασκευής, ημερομηνία λήξης, σειριακό αριθμό, αριθμό κομματιού, ή ακόμα και bar code, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20. Εκτός από την κωδικοποίηση, παίρνει και συναρτησιακή μορφή, όπως οι γραμμές διαβάθμισης σε μια σύριγγα, ή διακοσμητική μορφή, όπως λογότυπα ή εικόνες σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.20 : Δημιουργία bar code με Laser marking



Σχήμα 2.21 : Laser marking σε ηλεκτρονικό εξάρτημα

Τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει έναντι συμβατικών μεθόδων είναι :

- Μόνιμα και υψηλής ποιότητας μαρκάρια
- Υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος λειτουργίας
- Καλή προσβασιμότητα ακόμα και σε ανώμαλες επιφάνειες
- Μαρκάρισμα χωρίς επαφή και δεν απαιτείται κατάλληλος χώρος εργασίας
- Ακριβής τοποθέτηση της ακτίνας και μεταφορά της ενέργειας στο κατεργαζόμενο κομμάτι
- Υψηλή αναπαραγωγικότητα και υψηλές ταχύτητες

Ο μόνος περιορισμός σε αυτή τη μέθοδο, είναι πως όλα τα υλικά δε επεξεργάζονται σωστά με όλους τους τύπους Laser.

2.2.1.2 Μηχανισμοί που λειτουργούν στις κατεργασίες Laser

Δύο είναι οι σημαντικότεροι μηχανισμοί αφαίρεσης υλικού κατά τη διάρκεια των κατεργασιών Laser. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται σε αφαίρεση υλικού με τήξη (Laser Ablation) ενώ ο δεύτερος σε χημική χάραξη με τη βοήθεια Laser (Laser-Assisted Chemical Etching)

Μηχανισμός τήξης (Laser Ablation)

Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί μία διαδικασία αφαίρεσης υλικού από στερεή επιφάνεια ακτινοβολώντας την με Laser. Αν η ροή της ακτίνας είναι χαμηλή, τότε το υλικό ζεσταίνεται απορροφώντας την ενέργεια από το Laser και εξατμίζεται. Αν η ροή της ακτίνας είναι υψηλή τότε το υλικό μετατρέπεται σε πλάσμα (πλάσμα είναι αέριο του οποίου μια μερίδα μορίων ιονίζεται).

Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού αλλά και από διάφορες παραμέτρους του Laser όπως είναι το μήκος κύματος, η πυκνότητα ροής και οι παλμοί του.

Μηχανισμός χημικής χάραξης με χρήση Laser (Laser-Assisted Chemical Etching)

Η αφαίρεση υλικού κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας, μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους προδρόμους (etchants-precursors) σε συνδυασμό με την επιλογή κατάλληλης ακτίνας Laser. Όταν οι πρόδρομοι είναι αεριώδης όπως Cl_2 και Br_2 , τότε η διαδικασία ονομάζεται ξηρή χάραξη, ενώ με υγρούς πρόδρομους όπως HCl , HNO_3 , NaCl και K_2SO_4 θεωρείται υγρή.

Η διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει από την απορρόφηση της ακτινοβολίας του Laser από το στερεό υλικό που βρίσκεται σε επαφή με τον πρόδρομο ή από τον πρόδρομο που βρίσκεται σε επαφή με το στερεό υλικό, ή και από τα δύο μαζί ταυτόχρονα. Η ακτινοβολία επηρεάζει την αντίδραση μεταξύ υλικού και προδρόμου καθώς διεγείρει τα μόρια του και το υλικό της επιφάνειας.

Το σημαντικότερο μέτρο κατά την κατεργασία αποτελεί ο ρυθμός χάραξης, ο οποίος εκφράζει τον όγκο αφαίρεσης του υλικού σε σχέση μονάδα του χρόνου. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό αυτό, είναι ο χρόνος έκθεσης στην ακτινοβολία, η ισχύς του Laser, το μήκος κύματός του και οι συνθήκες εστίασης.

2.2.1.3 Τεχνικές μαρκάρισματος

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι για το μαρκάρισμα με Laser. Αυτές είναι :

- Απευθείας Γραφή (Direct Writing)
- Προβολή με Μάσκα (Mask Projection)
- Dot-matrix

Απευθείας Γραφή

Στην τεχνική με απευθείας γραφή, η ακτίνα Laser εστιάζει στο υπόστρωμα της επιφανείας του κομματιού προς επεξεργασία, ενώ περνάει μέσα από κατάλληλα διαμορφωμένα ανοίγματα και φακούς εστίασης. Για την δημιουργία του σχεδίου κινείται κατάλληλα το υπόστρωμα, καθώς η ακτίνα παραμένει σταθερή ή το αντίθετο. Το σχέδιο από CAD μετατρέπεται, μέσω ενός επεξεργαστή, σε κώδικα μηχανής κατάλληλο να οδηγήσει τον ελεγκτή κινήσεων του συστήματος Laser, όπως στο φαίνεται σχήμα 2.22.

Παράμετροι που επηρεάζουν, κατά τη διάρκεια της Direct Writing, είναι το βάθος εστίασης, το μέγεθος εστίασης και η απόσταση μεταξύ υποστρώματος-ακτίνας.

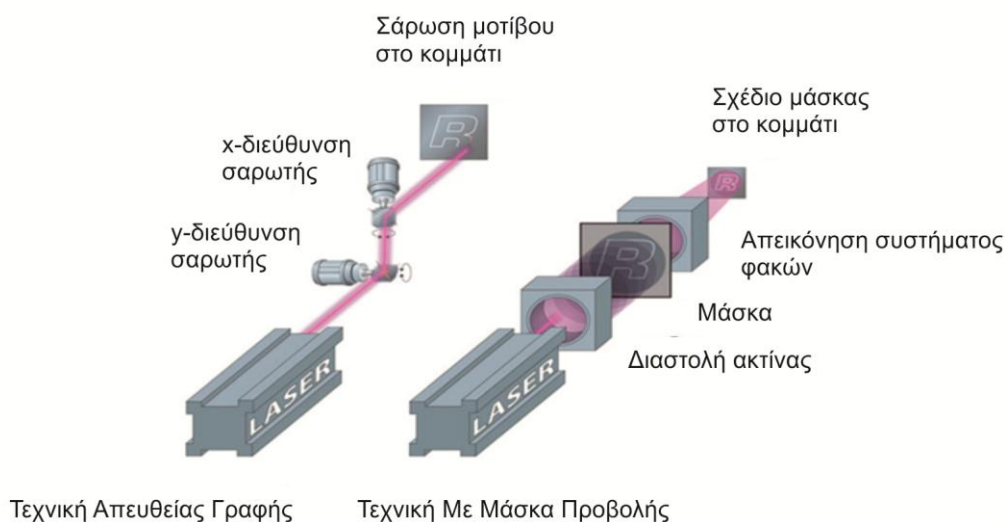
Προβολή με μάσκα

Σε αυτή την τεχνική, η ακτίνα Laser φωτίζει μία μάσκα η οποία φέρει το σχήμα του σχεδίου που θα παραχθεί στο υπόστρωμα. Στη συνέχεια, το σχέδιο προβάλλεται και συρρικνώνεται στο υπόστρωμα με τη χρήση ενός φακού προβολής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22.

Με την τεχνική αυτή δίδεται η δυνατότητα δημιουργίας οπών και καναλιών. Για τη δημιουργία οπών η διαδικασία ακολουθείται, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, έχοντας σταθερό υπόστρωμα και μάσκα, ενώ για τη δημιουργία καναλιών έχουμε σταθερή μάσκα αλλά κινούμενο υπόστρωμα.

Dot-matrix

Στην dot-matrix τεχνική, η ακτίνα 'κομματιάζεται' από έναν περιστρεφόμενο καθρέπτη. Κινώντας το κομμάτι, το σημάδι δημιουργείται από ένα σύνολο μεμονωμένων σημείων, με τον ίδιο τρόπο όπως συμβαίνει σε έναν εκτυπωτή μελάνης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για το μαρκάρισμα κωδικών σε διάφορα υλικά. Το μέγεθος μαρκαρίσματος είναι περιορισμένο και η διαδικασία πραγματοποιείται μόνο με κινούμενο αντικείμενο.



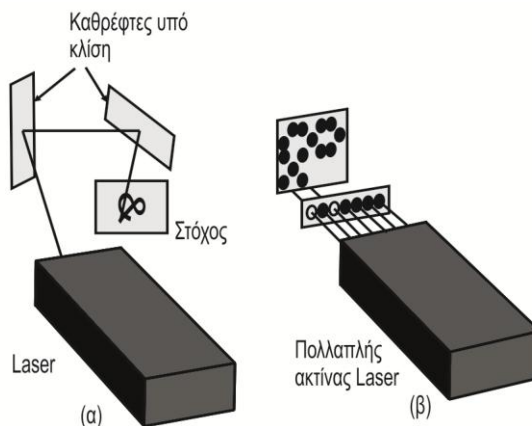
Σχήμα 2.22 : Απεικόνιση Direct-Write & Mask-Projection μεθόδων

2.2.1.4 Τύποι Laser

Ορισμένοι τύποι των Laser στερεάς κατάστασης (Nd:YAG) και αερίου (CO_2 , excimer) χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία. Η βασική διαφορά των δύο κατηγοριών βρίσκεται στο μήκος κύματος όπου εκπέμπεται η ακτινοβολία, με τα στερεάς κατάστασης να εκπέμπουν στην περιοχή των 1064 nm και τα αερίου στα 10μm. Τα υλικά δεν απορροφούν με τον ίδιο τρόπο όλα τα μήκη κύματος και αυτός είναι ο λόγος που επιλέγεται ανάλογα με το υλικό ο κατάλληλος τύπος Laser. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά από τα Laser των δύο κατηγοριών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία μαρκαρίσματος.

Παλμικά Laser CO₂

Δύο τύποι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται για αυτή την εφαρμογή. Τα TEA Laser, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλό ρυθμό επανάληψης, υψηλή ισχύ και χρησιμοποιούνται για μαρκάρισμα με μονή ακτίνα και τα RF Laser, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό ρυθμό επανάληψης, χαμηλή ισχύ και χρησιμοποιούνται για μαρκάρισμα με πολλαπλή ακτίνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23 : Δύο τεχνικές Laser marking α) μονή ακτίνα Laser β) πολλαπλή ακτίνα Laser

Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των δύο παραπάνω τύπων Laser αποδίδονται στο σχήμα 2.24 και 2.25 αντίστοιχα.

Παράμετροι	Χαμηλή ταχύτητα	Μέτρια ταχύτητα	Υψηλή ταχύτητα
Ρυθμός επαν.	15	30	150
Ενέργεια παλμού(J)	5	2.5	0.5
Μέγεθος ακτίνας(mm ²)	25 x 25	14 x 16	14 x 11
Ισχύς(W)		75	
Διάρκεια παλμού (μs)		3-8	
Μήκος κύματος(μm)		9.3 ή 10.6	

Σχήμα 2.24 : Χαρακτηριστικά απόδοσης για TEA CO₂ Laser

Παράμετροι	Χαρακτηριστικά
Ρυθμός επαν.	Πάνω από 16kHz
Ενέργεια παλμού	6mJ έως 1J
Ισχύς	100 W
Μέγεθος τελείας	0.1 έως 0.3 διάμετρο
Μέγεθος χαρακτήρα	2 έως 20 mm ύψος
Διάρκεια παλμού	30 μm έως 5 ms
Μήκος κύματος	10.2 έως 11.2 μm

Σχήμα 2.25 : Χαρακτηριστικά απόδοσης για RF Laser

Excimer Laser

Η βέλτιστη επιλογή γι' αυτά τα Laser εξαρτάται από το υλικό αλλά και από την τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί. Γενικά υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για μαρκάρισμα με excimer Laser και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 2.26.

Μέθοδος	Βέλτιστος τύπος Laser
Δημιουργία σχεδίου αμέσως	Υψηλός ρυθμός επαν./χαμηλή ενέργεια
Δημιουργία κάθε μέρους σχεδίου χωριστά	Χαμηλός ρυθμός επαν./υψηλή ενέργεια

Σχήμα 2.26 : Παράμετροι για κάθε τύπο κατάστασης μαρκαρίσματος

Τα είδη των excimer Laser που χρησιμοποιούνται για μαρκάρισμα αλλά και χαρακτηριστικά τους, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.27.

	ArF 193nm	KrF 248nm	XeCl 308nm	XeF 351nm
<u>Υψηλή ενέργεια/χαμηλός ρυθμός επαναλ.</u>				
Ενέργεια παλμού	400mJ	600mJ	400mJ	320mJ
Ρυθμός επαν.	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
Ισχύς	32W	56W	38W	28W
Διάρκεια παλμού	23ns	34ns	28ns	30ns
<u>Χαμηλή ενέργεια/Υψηλός ρυθμός επαναλ.</u>				
Ενέργεια παλμού	100mJ	300mJ	125mJ	100mJ
Ρυθμός επαν.	200Hz	200Hz	200Hz	200Hz
Ισχύς	20W	60W	25W	20W
Διάρκεια παλμού	17ns	17ns	20ns	14ns

Σχήμα 2.27 : Παράμετροι για κάθε τύπο excimer Laser

Nd:YAG

Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διαδικασίες μαρκαρίσματος και αποτελούν τα πιο διαδεδομένα Laser στερεής κατάστασης. Ο συνηχητής τους καθορίζει την ποιότητα της ακτίνας, καθώς και το πόσο στενή θα είναι η γραμμή κατά το μαρκάρισμα.

2.2.1.5 Υλικά που μπορούν να μαρκαριστούν

Πρακτικά όλα τα υλικά μπορούν να μαρκαριστούν χρησιμοποιώντας κάποιο από τα Laser που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Σε πολλές περιπτώσεις η κατάλληλη επιλογή του μήκους κύματος, διασφαλίζει την κατάλληλη απορρόφηση και εκτέλεση της κατεργασίας. Περιστασιακά, ωστόσο, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση επικάλυψης ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη απορρόφηση της ακτίνας από την επιφάνεια.

Πλαστικά

Το μαρκάρισμα πλαστικών όπως ABS, πολυκαρμπονικό, πολυολεφινών και πολυαμιδίων εξαρτάται από τον τύπο του Laser που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και τα πρόσθετα που παρουσιάζονται. Τα παραπάνω υλικά εκτός των πολυολεφινών, συνήθως μαρκάρονται σε ένα βαθμό με Nd:YAG Laser. Οι χρωστικές επηρεάζουν την απορροφητικότητα, καθώς το μήκος κύματος του Nd:YAG βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτό του ορατού φωτός. Κάποια αδρανή πρόσθετα που χρησιμοποιούνται ώστε να βελτιώσουν το μαρκάρισμα είναι ο μαύρος άνθρακας, μαρμαρυγιάς, καολίνη και διοξείδιο του τιτανίου.

Μέταλλα

Τα μέταλλα μαρκάρονται συνήθως χρησιμοποιώντας Nd:YAG Laser με 1.06μm μήκος κύματος. Γενικά, τα Laser με μήκος κύματος μικρότερο από 1.2 μm έχουν αντανakλαστικότητα μεταξύ 85% και 95% για γυαλιστερά μέταλλα, ενώ με μεγαλύτερο μήκος κύματος, όπως τα CO₂, φτάνουν το 99% και γι' αυτό το λόγω δεν χρησιμοποιούνται σε γυαλισμένα μέταλλα. Μέταλλα δι' ανοδικής επεξεργασίας και βαμμένα, μπορούν να υποστούν επεξεργασία και από τα δύο είδη.

Κεραμικά

Τα κεραμικά αποτελούν άλλη μία κατηγορία υλικών τα οποία σπάνια βρίσκουμε στην καθαρή μορφή τους. Στον τομέα των ηλεκτρονικών, τα κεραμικά χρησιμοποιούνται για να λειτουργούν ως πυκνωτές ή επαγωγής, καθώς δυναμώνονται προσθέτοντας ηλεκτρονικά ενεργές προσμίξεις. Τα περισσότερα κεραμικά μπορούν να μαρκαριστούν, αλλά είναι δύσκολο να καθοριστεί εκ των προτέρων ποιο από τα είδη Laser παρέχει το καλύτερο μήκος κύματος για κάθε δείγμα.

Γυαλί

Οι γυάλινοι σωλήνες των τηλεοράσεων και τα μπουκάλια γυαλιού, συχνά μαρκάρονται με τη χρήση Laser CO₂. Τα υπεριώδη ArF και KrF excimer Laser, χρησιμοποιούνται επίσης για να χαράξουν το γυαλί.

Χαρτί

Εμποτισμένες με μελάνι χάρτινες ετικέτες μαρκάρονται χρησιμοποιώντας Laser CO₂. Το εμποτισμένο στρώμα είναι τόσο λεπτό ώστε η ακτινοβολία περνάει διαμέσο αυτού, με ένα τμήμα αυτής να απορροφάται από το χαρτί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία να ανεβαίνει και να προκαλείται αφαίρεση του μελανιού από το επιφανειακό στρώμα του χαρτιού. Πολύ ελκυστικά σημάδια μπορούν να επιτευχθούν σε έγχρωμα μελάνια, καθώς το σημάδι είναι άσπρο απέναντι σε χρώμα.

Nd:YAG Laser μπορούν επίσης να μαρκάρουν εμποτισμένες χάρτινες ετικέτες, ωστόσο η επιλογή του μελανιού και του χρώματος γίνεται περισσότερο σημαντική. Μπλε και μαύρα μελάνια συνήθως δίνουν καλύτερα αποτελέσματα.

2.2.2 Χάραξη με Laser (Laser Engraving)

2.2.2.1 Βασικές μέθοδοι

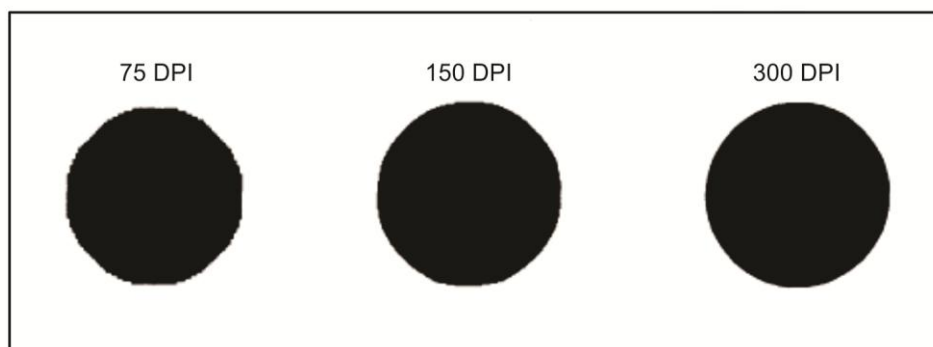
Το Laser Engraving αποτελεί μια διαδικασία χάραξης αναπαράστασης μιας ψηφιακής εικόνας, μιας φωτογραφίας ή ενός κειμένου πάνω σε ένα υλικό. Με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και υψηλής ενέργειας Laser, πραγματοποιείται εξαέρωση μικρού πάχους στρώματος από το αντικείμενο. Η ακτίνα ύστερα από έναν αριθμό περασμάτων, δημιουργεί το επιθυμητό πατρόν. Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας αυτής χρησιμοποιείται κατάλληλος εξοπλισμός και λογισμικό, ενώ η ακριβής λεπτομέρεια με την οποία χαράζει το Laser δίνει τη δυνατότητα για κομψά τελικά προϊόντα.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τη χάραξη σε ένα αντικείμενο. Αυτές είναι :

- Raster Engraving
- Vector Engraving

Raster Engraving

Στην περίπτωση αυτή, το Laser κινείται σαν εκτυπωτής και χαράζοντας αφαιρεί υλικό ώστε να σχηματιστεί η εικόνα ή το γράφημα που επιθυμείται. Τα raster αρχεία δημιουργούνται από μικρά τετράγωνα, γνωστά ως pixels. Εικόνες που βλέπουμε σε εφημερίδες ή στην τηλεόραση αποτελούν τέτοια παραδείγματα. Η ποιότητα των αρχείων αυτών μετριέται σε DPI (dots per inch) και όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο καλύτερης ποιότητας είναι η εικόνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28.



Σχήμα 2.28 : Ποιότητα εικόνας μεταβάλλοντας DPI

Για να δημιουργηθεί μία τέτοια εικόνα με χάραξη Laser, τα pixels τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση της εικόνας, χωρίζονται σε σειρές. Η κάθε σειρά αποτελεί μια λωρίδα δεδομένων που αντιστοιχούν στα pixels της εικόνας. Το σύνολο αυτό των σειρών στοιβάζεται από πάνω προς τα κάτω, δημιουργώντας την εικόνα. Το σύστημα του Laser χρησιμοποιεί τις αποχρώσεις του γκρι, ώστε να προσδιορίσει το πόση ενέργεια θα χρησιμοποιήσει για κάθε pixel και να καθορίσει την ποσότητα του υλικού που θα αφαιρέσει για κάθε ένα από αυτά κατά τη διαδικασία της χάραξης. Σε περίπτωση ασπρόμαυρης εικόνας, όπως στο σχήμα 2.29, δίνεται η τιμή 1 για μαύρο και το μηδέν για άσπρο. Έτσι, η αρχική πραγματική εικόνα, μετατρέπεται στη δυαδική μορφή του σχήματος 2.29 και τέλος, δημιουργείται από το Laser.

Δυαδική εικόνα	
Γραμμή 1	11111111111111111111111111111111
Γραμμή 2	100000000000000000000000000001
Γραμμή 3	100000000000000000000000000001
Γραμμή 4	1000000011111111100000000001
Γραμμή 5	1000000011111111100000000001
Γραμμή 6	1000000011111111100000000001
Γραμμή 7	1000000011111111100000000001
Γραμμή 8	100000000000000000000000000001
Γραμμή 9	100000000000000000000000000001
Γραμμή 10	11111111111111111111111111111111
Η πραγματική εικόνα	
	

Σχήμα 2.29 : Raster engraving

Μία εικόνα σε raster μορφή αντιμετωπίζει 2 σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, σε εικόνες με αρκετά υψηλή ανάλυση επειδή τα pixels είναι υπερβολικά πολλά, υπάρχει ένας μεγάλος όγκος πληροφορίας με αποτέλεσμα να αυξάνεται δραματικά ο χρόνος χάραξης της από τη μηχανή και δεύτερον, σε οποιαδήποτε προσπάθεια αλλαγής μεγέθους της εικόνας υπάρχει αλλοίωση της ποιότητάς της και ως εκ τούτου επηρεάζεται και το αποτέλεσμα της χάραξης.

Vector Engraving

Στη μέθοδο αυτή, σε αντίθεση με τη raster, οι πληροφορίες μιας εικόνας δεν αποθηκεύονται ως pixels αλλά σαν σειρά γραμμών και καμπυλών. Αυτό σημαίνει ότι το αρχείο δημιουργείται από ένα σύνολο καθορισμένων και με μεγάλη ακρίβεια αντικειμένων, κάθε ένα από τα οποία έχει αρχή και τέλος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα διαχείρισης και μετατροπής του μεγέθους τέτοιων αρχείων, χωρίς να μεταβάλλεται η ποιότητά της, όπως συμβαίνει με τα raster αρχεία (σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.30 : Διαφορά αναπαράστασης αρχείου σε vector και raster μορφή

2.2.2.2 Σύστημα κίνησης ακτίνας

Υπάρχουν 2 βασικές μέθοδοι για την καθοδήγηση της ακτίνας στο υπόστρωμα όπου θα γίνει η κατεργασία. Αυτές είναι :

- X-Y επίπεδο σύστημα
- Galvo περιστρεφόμενο σύστημα

Στη X-Y μέθοδο, η ακτίνα καθοδηγείται σε οριζόντιο επίπεδο μέσω καθρεπτών οι οποίοι μπορούν να κινούνται και στους δύο άξονες. Το κομμάτι επίσης, μπορεί να κινείται και στους δύο άξονες ή μπορεί να υπάρχει συνδυασμός των παραπάνω κινήσεων.

Το πλεονέκτημα κίνησης του κομματιού, έγκειται στο γεγονός ότι το μονοπάτι της ακτίνας και η μεταφορά της παραμένουν πάντα σταθερά και μπορούν να είναι άκαμπτα. Από την άλλη μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το κομμάτι πρέπει να δένεται και το σύστημα κίνησης είναι βαρύ και μεγάλο. Το πλεονέκτημα κίνησης της ακτίνας είναι ότι το κομμάτι παραμένει ακίνητο και δεν χρειάζεται να συγκρατηθεί, ενώ αντίθετα μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι προκαλούνται προβλήματα στην ευθυγράμμιση και στην αλλαγή του μεγέθους του σημείου εστίασης.

Στη galvo μέθοδο, η ακτίνα καθοδηγείται με σκοπό να τοποθετηθεί στην επιφάνεια του κομματιού, μόνο μέσω δύο περιστρεφόμενων καθρεπτών, ένας για κάθε άξονα. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ταχύτητα καθώς κινούνται μόνο οι καθρέπτες. Από την άλλη μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η ακτίνα χτυπάει την επιφάνεια υπό γωνία και αν η

χάραξη που πραγματοποιείται έχει μεγάλο βάθος, τότε η γωνία κοπής μπορεί να γίνει ιδιαίτερα παρατηρήσιμη.

2.2.2.3 Τύποι Laser

Ορισμένα είδη Laser από τους τύπους στερεής κατάστασης και αερίου χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία χάραξης, ανάλογα με το υλικό που θα πραγματοποιηθεί για κατεργασία και την ποιότητα που επιθυμείται να επιτευχθεί. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν αυτά τα Laser καθώς και η χρήση τους.

CO₂ Laser

Τα Laser CO₂ χρησιμοποιούνται για επιφανειακή και σε βάθος χάραξη. Μη μεταλλικά υλικά, όπως ξύλο, πλαστικό, δέρμα και καουτσούκ απορροφούν τα 10.6 μm μήκους κύματός του σε υψηλό βαθμό. Εύκολη θεωρείται η χάραξη εικόνων σε μεγάλο βάθος, αυτών των υλικών, καθώς η θερμοκρασία τήξης τους είναι αρκετά χαμηλή.

Η χάραξη σε μέταλλα δεν είναι το δυνατό σημείο αυτών των Laser, καθώς το μήκος κύματός τους δεν είναι αρκετό για την κατεργασία επιφανειών μετάλλων. Ωστόσο υπάρχουν ισχυρότερα Laser CO₂ τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

Nd:YAG Laser

Τα Laser αυτά είναι κατάλληλα για τη χάραξη επιφανειών διάφορων υλικών. Το μήκος κύματός τους που αγγίζει τα 1.06μm και είναι περισσότερο αποτελεσματικά στη χάραξη μετάλλων.

Αρκετά μη μεταλλικά υλικά, όπως ξύλο και πλαστικό, δεν μπορούν να κατεργαστούν με μεγάλη αποτελεσματικότητα εξαιτίας του μήκους κύματος, το οποίο δεν απορροφάται σε μεγάλο βαθμό από αυτά. Η επιφάνεια των υλικών αυτών μπορεί ελάχιστα να αλλάξει από την ακτίνα, χωρίς όμως ουσιαστικά να συμβαίνει αφαίρεση υλικού. Αυτό ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πλεονέκτημα καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί χάραξη στο εσωτερικό υλικών όπως σε πλαστικό ή γυαλί. Η δέσμη εστιάζεται στο εσωτερικό του υλικού και αυτό δεν επηρεάζεται μέχρι η πυκνότητα ενέργειας να γίνει αρκετά υψηλή στο συγκεκριμένο σημείο εστίασης, ώστε να προκληθεί θραύση του υλικού.

Fiber Laser

Χρησιμοποιούνται κυρίως για χάραξη μετάλλων. Μη μεταλλικά υλικά δεν μπορούν να υποστούν χάραξη με αυτά τα Laser.

2.2.2.4 Υλικά που μπορούν να χαραχθούν

Φυσικά υλικά

Η δημιουργία εικόνων σε ξύλο, αποτελούσε από τις πρώτες χρήσεις της χάραξης με Laser. Η ισχύς που απαιτείται σε αυτή την περίπτωση είναι συνήθως μικρότερη από 10 watt, ανάλογα με τον τύπο Laser που χρησιμοποιείται. Σκληρά ξύλα όπως καρυδιά, βελανιδιά, μαόνι και το σφένδαμνο, δίνουν καλά αποτελέσματα. Αντίθετα, στα μαλακά ξύλα υπάρχει δυνατότητα χάραξης, όμως η ταχύτητα κοπής θα πρέπει να είναι μεγάλη, η ισχύς μικρή και να υπάρχει αρκετή παροχή αέρα, ώστε να προλαμβάνονται οι αναφλέξεις. Δέρματα, συνθετικά καουτσούκ και σκληρά χαρτικά μπορούν επίσης να χαραχθούν.

Πλαστικά

Καλούπια ακρυλικού πλαστικού, ακρυλικά πλαστικά φύλλα και άλλα καλούπια ρητίνης, μπορούν γενικά να χαραχθούν με Laser. Το στυρόλιο και πολλά παρόμοια πλαστικά, τείνουν να λιώνουν στις άκρες γύρω από το σημείο χάραξης. Η επιφάνεια συνήθως παραμορφώνεται ή δημιουργεί κύματα στις άκρες της περιοχής. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, αυτό είναι αποδεκτό όπως για παράδειγμα τα σημάδια ημερομηνίας σε μπουκάλια 2 λίτρων όπου δεν χρειάζεται να είναι αιχμηρά.

Μέταλλα

Η χάραξη των μετάλλων αποτελούσε πρόβλημα καθώς χρησιμοποιούνταν Laser CO₂. Ωστόσο με την ανάπτυξη των Yb:Fiber, Nd:YAG και Nd:YVO₄ με μήκη κύματος στα 1,064nm, έχουν ξεπεραστεί τα προβλήματα αυτά και τα μέταλλα αποτελούν τα υλικά που παρέχουν τις μεγαλύτερες δυνατότητες χάραξης.

Γυαλί

Η χάραξη του γυαλιού εξαρτάται από τον κατασκευαστή και τον τύπο που χρησιμοποιείται. Η περιεκτικότητα σε μόλυβδο αποτελεί σημαντικό παράγοντα καθώς χαμηλής περιεκτικότητας προτιμώνται για χάραξη.

Είναι σημαντικό η χάραξη να πραγματοποιείται σε καθαρή επιφάνεια, καθώς ακαθαρσίες και λάδια επηρεάζουν την εμφάνιση της χάραξης. Το γυαλί πρέπει να καθαρίζεται μετά τη διαδικασία της χάραξης, ώστε να απομακρύνονται μικρά μόρια τα οποία έχουν προσκολληθεί σε αυτό. Το τρίψιμο του γυαλιού θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή ώστε να αποφευχθούν γρατζουνιές.

Επικαλυμμένα μέταλλα

Με την κατάλληλη επιλογή ισχύος, εξαιρετικής ποιότητας χαράξεις μπορεί να επιτευχθούν, καθώς το σμάλτο αφαιρείται με σχετική καθαρότητα.

2.2.2.5 Εφαρμογές

Η χάραξη με Laser, βρίσκει ευρεία εφαρμογή τόσο σε εμπορικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, ενώ η χρήση της αυξάνεται ολοένα και περισσότερο στους δύο τομείς.

Γνωστές εμπορικές χρήσεις αποτελούν η χάραξη σε μπρελόκ, σε τρόπαια και βραβεία. Τα Laser παρέχουν τη δυνατότητα χάραξης στο κρύσταλλο από ένα όνομα μέχρι ένα πρόσωπο. Η χάραξη σε ένα τρόπαιο ή βραβείο από κρύσταλλο, αποτελεί εναλλακτική στα παραδοσιακά μεταλλικά. Γνωστή εμπορική εφαρμογή, αποτελεί και η χάραξη σε κοσμήματα. Υπογραφές και μηνύματα στο πίσω μέρος ρολογιών, όπως και προσωπικά μηνύματα στο εσωτερικό δαχτυλιδιών, αποτελούν ορισμένες εφαρμογές.

Εκτός από τις εμπορικές, αναρίθμητες είναι και οι βιομηχανικές εφαρμογές στις οποίες εφαρμόζεται. Η χάραξη μίας εικόνας κάτω από την επιφάνεια ενός στερεού υλικού, συνήθως γυαλί, αποτελεί μία από αυτές. Επίσης, οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών υπολογιστών, συχνά χαράζουν στα τσιπ πυριτίου, πληροφορίες όπως ονόματα και σειριακούς αριθμούς. Μία άλλη εφαρμογή έχει να κάνει με την απευθείας χάραξη στα τρόφιμα, της ημερομηνίας λήξης τους. Σημαντική είναι και η δημιουργία καλουπιών και μητρών, τα οποία δημιουργούνται με τη διαδικασία χάραξης με Laser.

2.3 Μελέτες χάραξης σε διάφορα υλικά

2.3.1 Εισαγωγή

Η χάραξη και το μαρκάρισμα με Laser αποτελούν σύγχρονες μεθόδους κατεργασίας έχοντας βρει ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία και όχι μόνο. Η ποιότητα του αποτελέσματος που προκύπτει εφαρμόζοντας τις παραπάνω μεθόδους σε κάποιο υλικό, εξαρτάται από τον τύπο του Laser που θα χρησιμοποιηθεί, αλλά και από άλλες παραμέτρους του Laser όπως η ταχύτητα χάραξης, η συχνότητα του παλμού και η ισχύς.

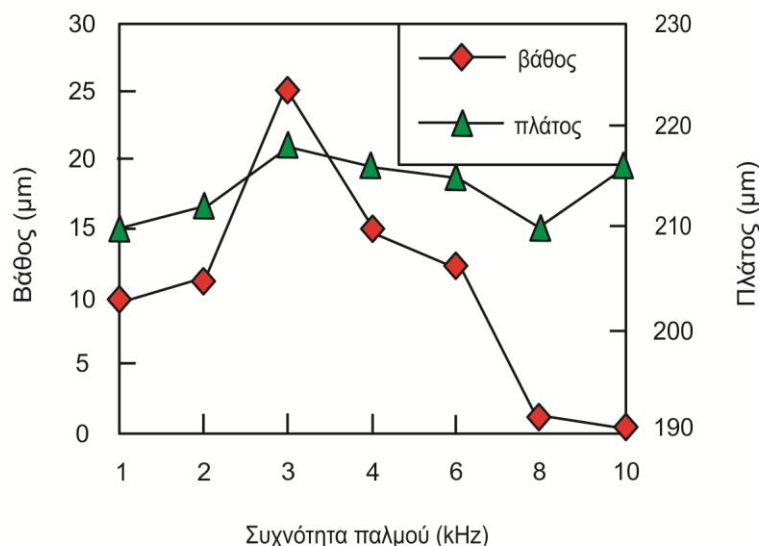
Κατά καιρούς έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες για τη διαδικασία χάραξης και μαρκαρίσματος με Laser σε διάφορα υλικά για διάφορες παραμέτρους και παράλληλα έχουν εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα. Μερικές από αυτές τις έρευνες, καθώς και τα αποτελέσματά τους παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο.

2.3.2 Μελέτη διαδικασίας μαρκαρίσματος με Laser σε ανοξείδωτο χάλυβα

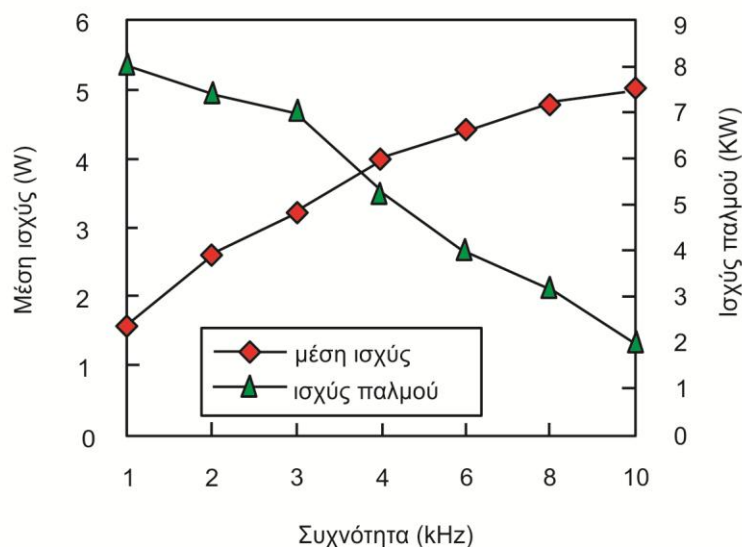
Σκοπός της μελέτης που πραγματοποιήθηκε από τους J. Ka, K.L. Wang και Y.M. Zhu, ήταν να βρεθεί η σχέση μεταξύ της συχνότητας των παλμών του Laser και των χαρακτηριστικών ποιότητας, έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα να επιτευχθεί μαρκάρισμα υψηλής ποιότητας στο συγκεκριμένο υλικό.

Το Laser που χρησιμοποιήθηκε ανήκε στην κατηγορία της στερεής κατάστασης και είναι το Nd:YAG, ενώ ο τρόπος λειτουργίας του είναι παλμικός Q-switched. Η ποιότητα στο μαρκάρισμα που θα δημιουργηθεί αξιολογείται από το βάθος, το πλάτος και τη χρωματική αντίθεση (contrast).

Για να επιτευχθεί αλλαγή στο βάθος και το πλάτος του μαρκαρίσματος, μεταβάλλεται η ισχύς ανά παλμό και η μέση ισχύς, με μεταβολή της συχνότητας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.31](#). Τα αποτελέσματα των μεταβολών αυτών παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.32](#).



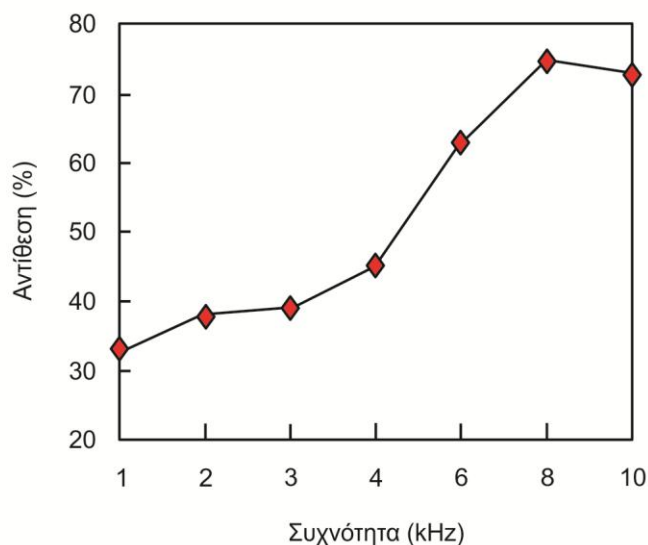
Σχήμα 2.31 : Μέση ισχύς και ισχύς παλμού συνάρτηση της συχνότητας



Σχήμα 2.32 : Βάθος χάραξης και πλάτος συνάρτηση της συχνότητας

Στο σχήμα 2.31, παρατηρείται ότι η ισχύς ανά παλμό μειώνεται και η μέση ισχύς αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Στο σχήμα 2.32, το βάθος αυξάνεται με αύξηση της συχνότητας όσο αυτή είναι κάτω των 3 kHz. Αντίθετα, το βάθος μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα πάνω από 3 kHz. Το πλάτος εξαρτάται ελάχιστα από τη συχνότητα, όπως παρατηρείται.

Στο σχήμα 2.33 παρατηρείται η χρωματική αντίθεση σε σχέση με τη συχνότητα και μάλιστα όσο αυξάνεται μέχρι τα 8 kHz, τόσο αυξάνεται και η αντίθεση. Με αύξηση της συχνότητας, μειώνεται η ποσότητα του υλικού που εξαερώνεται, ενώ την ίδια στιγμή το φαινόμενο της οξείδωσης είναι περισσότερο σημαντικό και οδηγεί σε αύξηση της αντίθεσης.



Σχήμα 2.33 : Αντίθεση (contrast) συνάρτηση της συχνότητας

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τις παραπάνω παρατηρήσεις, είναι πως μεταβάλλοντας τη συχνότητα του Q-switched Nd:YAG, υπάρχουν σημαντικές επιδράσεις στην ποιότητα μαρκαρίσματος, κάτι το οποίο είναι εμφανή παρατηρώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω διαγραμμάτων.

Επίσης, παρατηρώντας τα διαγράμματα εμφανίζεται μέγιστο βάθος χάραξης στη συχνότητα των 3 kHz, ενώ το πλάτος μαρκαρίσματος μένει σχεδόν σταθερό για διαφορετικές συχνότητες. Με αύξηση της συχνότητας, η εξαέρωση του υλικού μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα

το φαινόμενο της οξείδωσης είναι περισσότερο σημαντικό και οδηγεί σε βελτίωση της χρωματικής αντίθεσης του μαρκαρίσματος.

2.3.3 Επίδραση της ταχύτητας και της ισχύος του Laser στο βάθος χάραξης και στη διαφορά χρώματος (contrast) σε λεπτά φύλλα Moso Bamboo

Στη μελέτη που εκπονήθηκε, από τους Cheng-Jung Lin, Yi-Chung Wang, Lang-Dong Lin, Chyi-Rong Chiou, Ya-Nan Wang και Ming-Jer Tsai, η χάραξη πραγματοποιήθηκε σε λεπτά φύλλα Moso Bamboo. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές ισχύος του Laser σε συνδυασμό με διάφορες ταχύτητες κοπής, ώστε να γίνει κατανοητή η επίδραση αυτών των παραμέτρων στο βάθος χάραξης και στη διαφορά χρώματος.

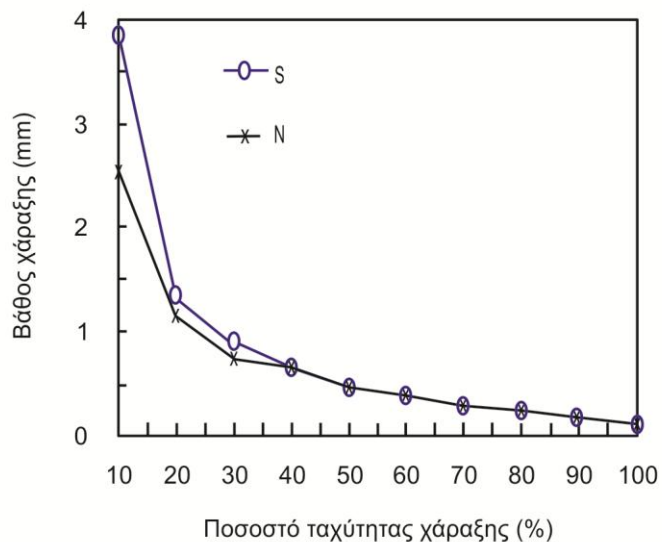
Τα bamboo κόπηκαν σε λωρίδες και επεξεργάστηκαν ώστε να σχηματίζουν λείες επιφάνειες. Οι διαστάσεις τους ήταν 200 mm (μήκος) x 25 mm (πλάτος) x 7.5 mm (ακτίνα) και ήταν δύο ειδών, αυτά που υπέστησαν επεξεργασία με ατμό (S) και αυτά χωρίς (N).

Οι τιμές των ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν και οι συχνότητες, φαίνονται στο σχήμα 2.34. Κάθε ταχύτητα συνδυάστηκε με κάθε συχνότητα και κάθε πείραμα επαναλήφθηκε 20 φορές. Μετά τη χάραξη πραγματοποιήθηκε μέτρηση του βάθους και της διαφοράς χρώματος (διαφορές στην ένταση της κλίμακας του γκρι). Η διαφορά χρώματος ορίστηκε ως (pixels πριν τη χάραξη) – (pixels μετά τη χάραξη) και η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με ειδικό σαρωτή και πρόγραμμα.

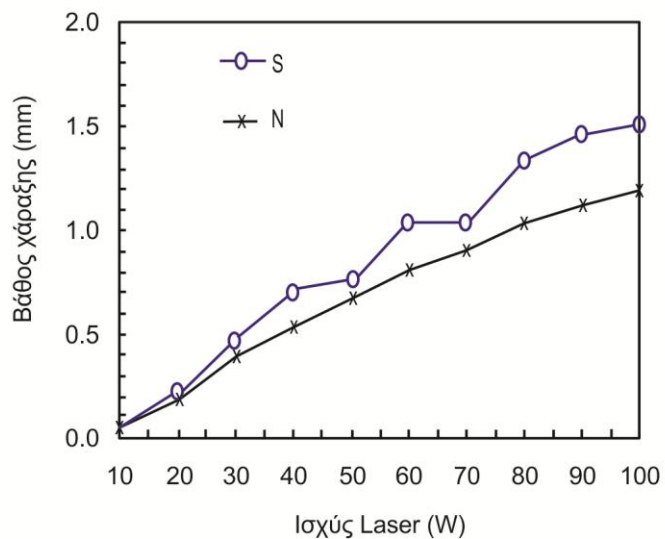
Ρυθμός χάραξης (S)	Ισχύς Laser (P)
10% [780 mm/min]	10 (W)
20% [1560 mm/min]	20 (W)
30% [2340 mm/min]	30 (W)
40% [3120 mm/min]	40 (W)
50% [3900 mm/min]	50 (W)
60% [4680 mm/min]	60 (W)
70% [5460 mm/min]	70 (W)
80% [6240 mm/min]	80 (W)
90% [7020 mm/min]	90 (W)
100% [7800 mm/min]	100 (W)

Σχήμα 2.34 : Τιμές ρυθμού χάραξης και ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν

Η σύγκριση, για κάθε δείγμα, μεταξύ βάθους κοπής και αναλογίας ταχύτητας χάραξης, αλλά και ισχύος του Laser, παρουσιάζονται στα σχήματα 2.35 και 2.36. Από το σχήμα 2.35, παρατηρείται η μείωση του βάθους κοπής με αύξηση της αναλογίας της ταχύτητας. Στο σχήμα 2.36, το βάθος αυξάνεται με αύξηση της ισχύος.

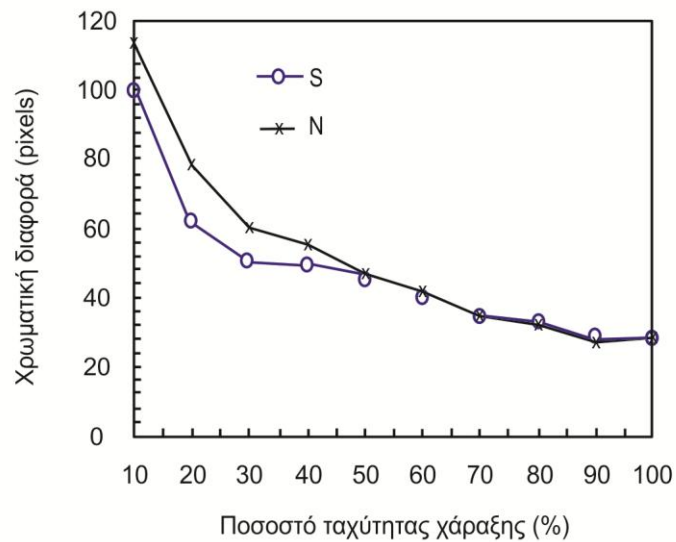


Σχήμα 2.35 : Μέσο βάθος χάραξης συνάρτηση διαφόρων ποσοστών ταχύτητας

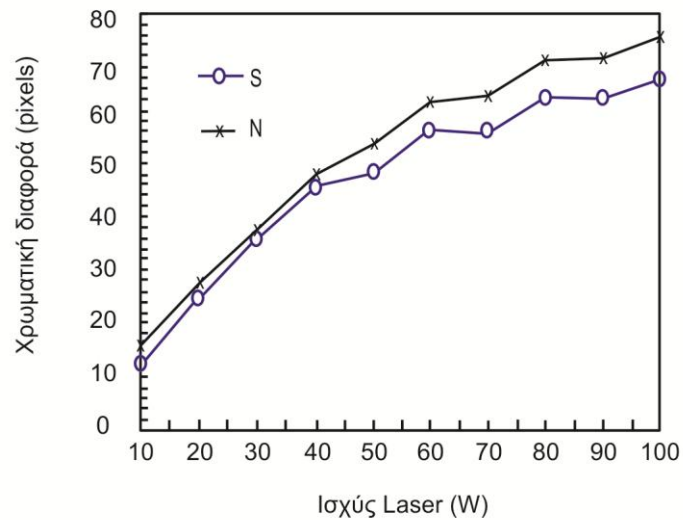


Σχήμα 2.36 : Μέσο βάθος χάραξης συνάρτηση διαφόρων τιμών ισχύος

Η σύγκριση της διαφοράς χρώματος σε σχέση με την αναλογία της ταχύτητας και της ισχύος, παρουσιάζονται στα σχήματα 2.37 και 2.38. Η διαφορά χρώματος μειώνεται με αύξηση της αναλογίας ταχύτητας, ενώ αυξάνεται με αύξηση της ισχύος.



Σχήμα 2.37 : Χρωματική διαφορά (contrast) συνάρτηση διαφόρων ποσοστών ταχύτητας



Σχήμα 2.38 : Χρωματική διαφορά (contrast) συνάρτηση διαφόρων τιμών ισχύος

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα έχουν ως εξής :

- Το βάθος χάραξης γίνεται μεγαλύτερο είτε αυξάνοντας την ισχύ, είτε μειώνοντας το ποσοστό της ταχύτητας χάραξης
- Οι τιμές της διαφοράς χρώματος αυξάνονται όσο υψηλότερη είναι η ισχύς και μειώνονται όσο μικρότερο είναι το ποσοστό της ταχύτητας χάραξης, ενώ παράλληλα έχουν καφετί χρώμα στη ζώνη χάραξης

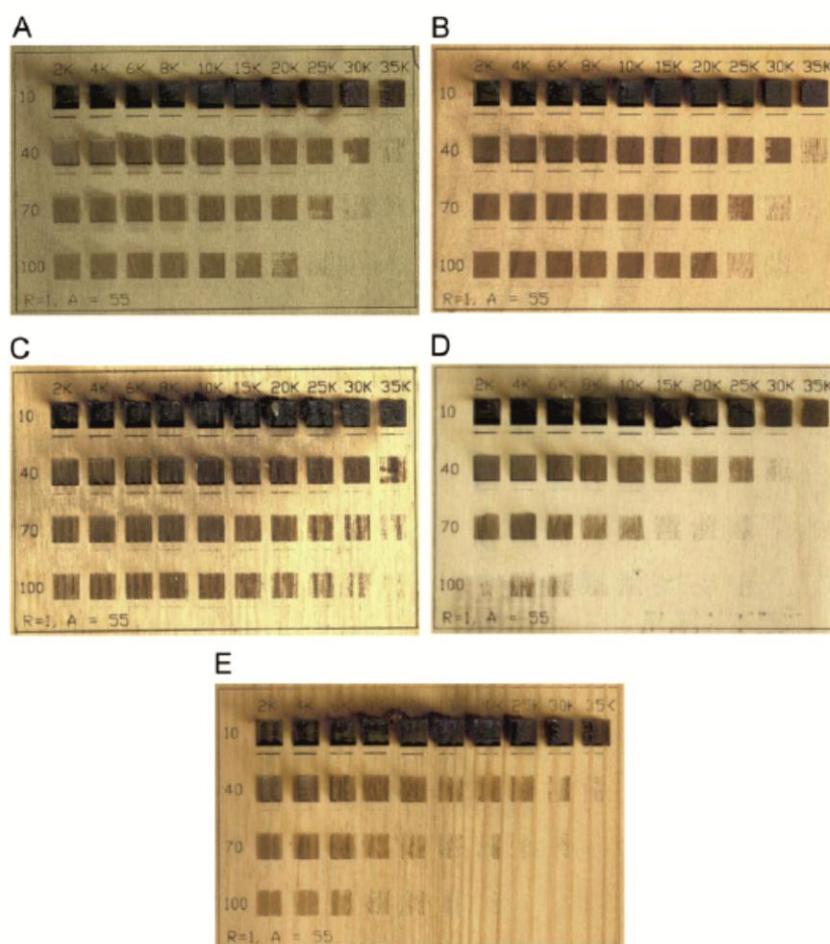
2.3.4 Χάραξη με Laser σε ξύλο

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, των C. Leone, V. Lopresto και I. De Iorio, ήταν να ερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι παράμετροι της διαδικασίας το ρυθμό αφαίρεσης υλικού σε διάφορους τύπους ξύλου. Οι παράμετροι οι οποίες εξετάστηκαν ήταν η ισχύς, εξαρτώμενη από την τιμή της συχνότητας, η ταχύτητα χάραξης και η επαναληψιμότητα του Laser, δηλαδή ο αριθμός των παλμών ανά δευτερόλεπτο.

Το Laser που χρησιμοποιήθηκε ανήκε στην κατηγορία diode-pumped Nd:YAG στερεής κατάστασης με διπλασιασμένη συχνότητα. Το μήκος κύματος είναι 532 nm, η διάρκεια παλμού 150 ns και η ενέργεια ανά παλμό 1,4 mJ. Ο τρόπος λειτουργίας παλμικό Q-switched.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας, η χάραξη πραγματοποιήθηκε σε ελάσματα πάχους 10 mm από διαφορετικά είδη ξύλου. Οι τύποι που επιλέχθηκαν ήταν καρυδιά, μαόνι, λεύκα, πεύκο και καστανιά.

Τετράγωνες κοιλότητες διαστάσεων 5 x 5 mm² δημιουργήθηκαν σαν παραδείγματα χάραξης, με συχνότητες παλμών από 2500-35000 Hz, ταχύτητα χάραξης 10,40,70,100, 200 mm/s και οι επαναλήψεις από 1-10, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.39.



Σχήμα 2.39 : Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε Α) καρυδιά Β) μαόνι C) καστανιά D) λεύκα Ε) πεύκο. Τα τετράγωνα δημιουργήθηκαν με διαφορετικές συνθήκες συχνότητας (στήλες) και ταχύτητας (γραμμές)

Σε χαμηλές ταχύτητες (10 mm/s), η χάραξη σε βάθος ήταν εύκολο να επιτευχθεί σε όλους τους τύπους ξύλου και για όλες τις συχνότητες που δοκιμάστηκαν, μαζί με φαινόμενα ανθρακοποίησης. Από την άλλη, σε υψηλές ταχύτητες (200 mm/s), η ακτίνα αλληλεπιδρούσε με το υλικό προκαλώντας μόνο μαύρισμα της επιφάνειας. Για ταχύτητες από 40-100 mm/s, τα φαινόμενα καψίματος απουσίαζαν και εμφανίζονταν μόνο φαινόμενα χάραξης με

μαύρισμα του υλικού. Το βάθος χάραξης που επιτυγχάνεται σε αυτό το εύρος ταχυτήτων (40-100 mm/s), σε αντίθεση με τα 10 mm/s, είναι πολύ μικρότερο και εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη συχνότητα των παλμών.

Για το ξύλο καρυδιάς, παρατηρήθηκε πως το βάθος χάραξης αυξάνεται με την άνοδο της συχνότητας μέχρι τα 4 kHz, ενώ από εκεί και πέρα μειώνεται. Επίσης, σημαντική μείωση του βάθους συμβαίνει όταν αυξάνεται η ταχύτητα. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρήθηκαν στο μαόνι και στη λεύκα.

Για το ξύλο πεύκου και καστανιάς, η μέτρηση του βάθους ήταν δύσκολο να προσδιοριστεί εξαιτίας της ανομοιογενούς επιφάνειας. Σε αντίθεση με τη σχεδόν επίπεδη επιφάνεια που εμφανίζεται στους προηγούμενους τρεις τύπους ξύλων, σε αυτούς τους δύο η επιφάνεια είναι αρκετά τραχεία και οφείλεται στις μεγάλες ασυνέχειες που υπάρχουν στις επιφανείές τους.

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν μετά την ολοκλήρωση και τη μελέτη των πειραμάτων είναι τα εξής :

- Q-switched Laser diode-pumped Nd:YAG, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί χάραξη σε διαφορετικά είδη ξύλου χωρίς να συμβεί ανθρακοποίηση της επιφάνειας
- Δεν είναι όλα τα είδη ξύλου κατάλληλα για χάραξη, καθώς η δομή και η ποιότητα της επιφάνειάς τους παίζουν σημαντικό ρόλο
- Η ανθρακοποίηση της επιφάνειας οφείλεται σε λάθος επιλογή παραμέτρων χάραξης και για τη συγκεκριμένη περίπτωση συμβαίνει για ταχύτητα ακτίνας κάτω από 10 mm/s
- Για ταχύτητα μεγαλύτερη από 40 mm/s, το βάθος χάραξης είναι αρκετά χαμηλό και χρειάζονται αρκετά περάσματα από το Laser για να αυξηθεί
- Το βάθος κοπής επηρεάζεται σημαντικά από την ισχύ, τη συχνότητα, την ταχύτητα της ακτίνας και τον αριθμό των επαναλήψεων

2.3.5 Χάραξη με Laser σε C45 χάλυβα

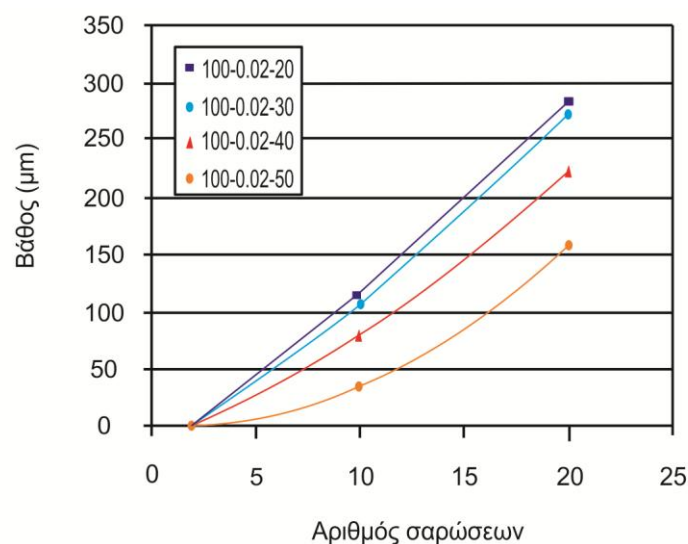
Η εργασία που πραγματοποιήθηκε, από τους S. Genna, C. Leone, V. Lopresto, L.Santo, F. Trovalusci, είχε σαν σκοπό τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν οι παράμετροι της διαδικασίας το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και την τραχύτητα της επιφάνειας στο συγκεκριμένο υλικό. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η συχνότητα παλμού, η ταχύτητα της ακτίνας, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σαρώσεων, ο αριθμός επαναλήψεων του γεωμετρικού σχεδίου και η στρατηγική σάρωσης (μόνο οριζόντιες γραμμές ή οριζόντιες και κάθετες μαζί).

Διαδικασία, αποτελέσματα

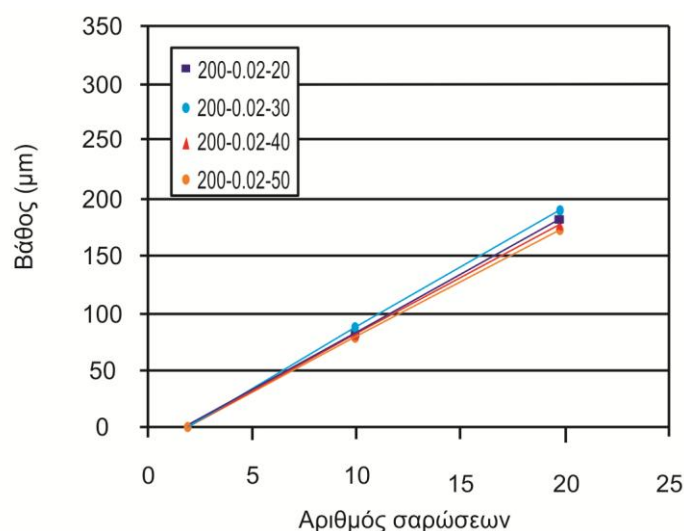
Οι δοκιμές σάρωσης πραγματοποιήθηκαν με fibre Laser Yb:YAG με μήκος κύματος 1070 nm, διάρκεια παλμού 100 ns, συχνότητα παλμού από 20-100 kHz και ενέργεια παλμού έως 1 mJ. Ο τρόπος λειτουργίας ήταν παλμικός Q-switched. Η διάμετρος της ακτίνας ήταν περίπου 80 μm.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε C45 χάλυβα διαστάσεων 150x150x25 mm³ και χαράχτηκαν τετράγωνα 5x5 mm², με ταχύτητα 100 και 200 mm/s και συχνότητα σε ένα εύρος από 20-50 kHz. Ο αριθμός των σαρώσεων καθορίστηκε σε 2, 10 και 20. Ο αριθμός μεταξύ των γραμμών σάρωσης ορίστηκε 20 και 40 μm. Στη συνέχεια μετρήθηκε το βάθος και η τραχύτητα επιφανείας για κάθε περίπτωση.

Στο σχήμα 2.40 και 2.41, παρατηρείται το βάθος χάραξης σαν συνάρτηση του αριθμού σαρώσεων για διαφορετικές συχνότητες, απόσταση γραμμών σάρωσης 0,02 mm και ταχύτητες 100 και 200 mm/s αντίστοιχα.



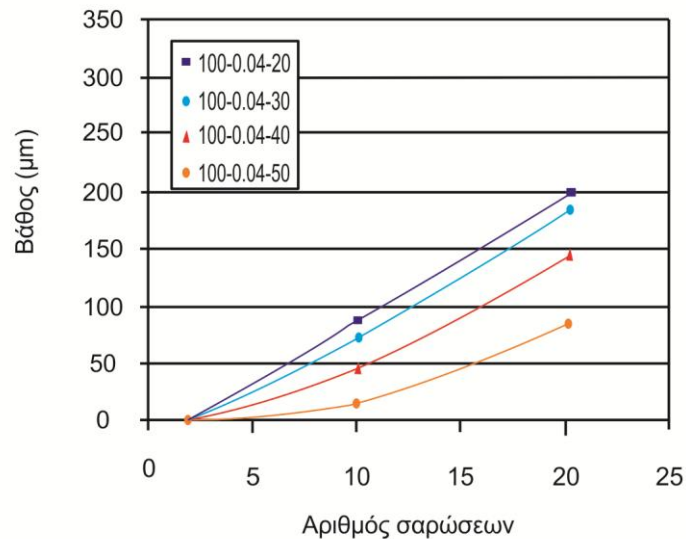
Σχήμα 2.40 : Βάθος χάραξης συναρτήσει αριθμού σαρώσεων για ταχύτητα 100 mm/s, συχνότητες 20-30-40-50 kHz και διάστημα μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,02 mm



Σχήμα 2.41 : Βάθος χάραξης συναρτήσει αριθμού σαρώσεων για ταχύτητα 200 mm/s, συχνότητες 20-30-40-50 kHz και διάστημα μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,02 mm

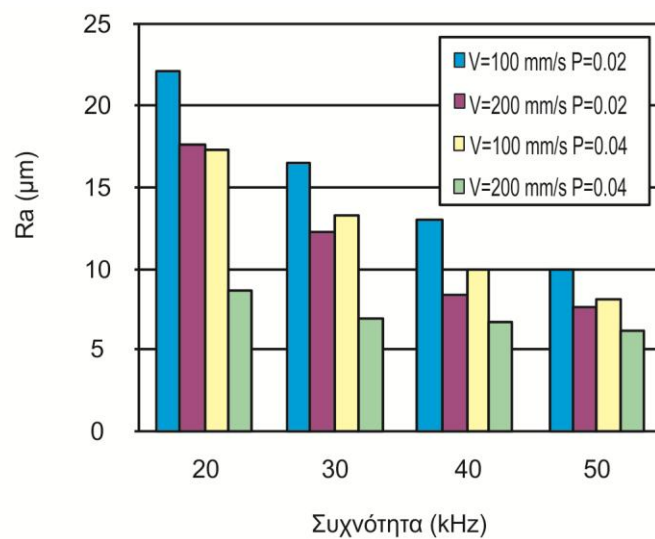
Από τα σχήματα αυτά, παρατηρείται ότι το βάθος χάραξης αυξάνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σαρώσεων, ενώ με αύξηση της ταχύτητας και της συχνότητας μειώνεται.

Στη συνέχεια στο σχήμα 2.42, παρουσιάζεται το βάθος χάραξης σε συνάρτηση με τον αριθμό σαρώσεων με τις ίδιες συνθήκες του σχήματος 2.40, αλλά με απόσταση μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,04 mm. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.42, το αποτέλεσμα είναι μείωση του βάθους κοπής.



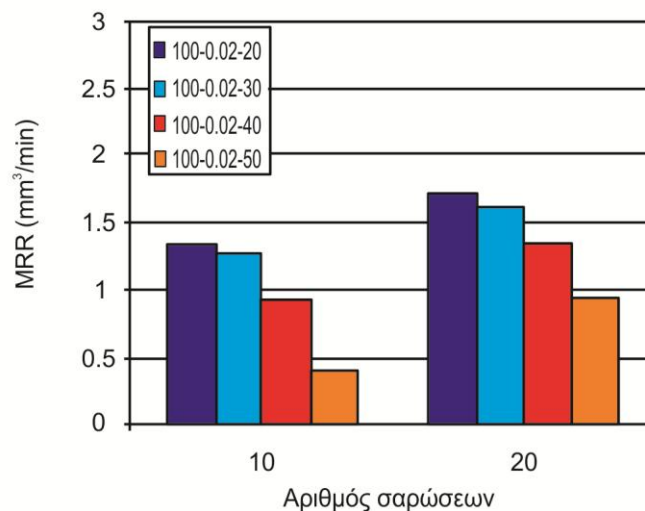
Σχήμα 2.42 : Βάθος χάραξης συναρτήσει αριθμού σαρώσεων για ταχύτητα 100 mm/s, συχνότητες 20-30-40-50 kHz και διάστημα μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,04 mm

Συγκρίνοντας τις τραχύτητες, οι καλύτερες συνθήκες φαίνεται να είναι για ταχύτητα 200 mm/s και απόσταση μεταξύ γραμμών σάρωσης 0,04 mm. Στο [σχήμα 2.13](#), παρουσιάζονται οι τιμές των συχνοτήτων των δύο ταχυτήτων χάραξης και της απόστασης μεταξύ των γραμμών σάρωσης.

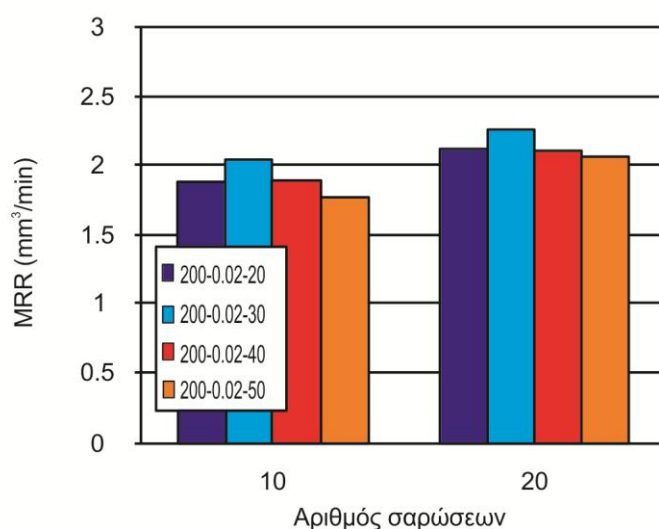


Σχήμα 2.43 : Τραχύτητα σε συνάρτηση με τη συχνότητα για όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν

Στο [σχήμα 2.44](#) και [2.45](#), παρουσιάζεται ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού συναρτήσει του αριθμού σαρώσεων για ταχύτητα 100 και 200 mm/s, συχνότητα 20-50 kHz και απόσταση μεταξύ σαρώσεων 0,02 mm. Για τις ίδιες παραμέτρους με απόσταση μεταξύ σαρώσεων 0,04 mm, τα αποτελέσματα βρέθηκαν πως είναι παρόμοια.



Σχήμα 2.44 : Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR) συναρτήσει του αριθμού σαρώσεων για ταχύτητα 100 mm/s, συχνότητες 20-30-40-50 kHz και διάστημα μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,02 mm



Σχήμα 2.45 : Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR) συναρτήσει αριθμού σαρώσεων για ταχύτητα 200 mm/s, συχνότητες 20-30-40-50 kHz και διάστημα μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,02 mm

Χρησιμοποιώντας Q-switched fibre Laser Yb:YAG για χάραξη σε C45 χάλυβα προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα :

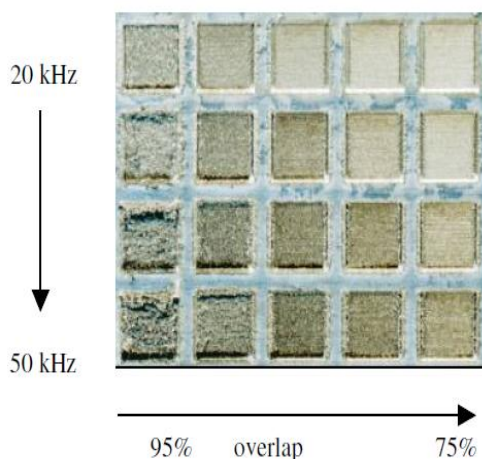
- Το βάθος χάραξης εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα, τον αριθμό σαρώσεων και την ταχύτητα σάρωσης, ενώ πρακτικά παραμένει ανεξάρτητο από τη στρατηγική σάρωσης που επιλέγεται.
- Η τραχύτητα εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των γραμμών σάρωσης, την ταχύτητα και τη συχνότητα, ενώ παραμένει αναλλοίωτη μετά το πέρασμα 10 σαρώσεων
- Με την κατάλληλη επιλογή παραμέτρων, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές τιμές ρυθμού αφαίρεσης υλικού όπως και καλή ποιότητα επιφάνειας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για ταχύτητα 200 mm/s, συχνότητα 30-40 kHz και απόσταση μεταξύ των γραμμών σάρωσης 0,04 mm επιτυγχάνεται καλή ποιότητα επιφάνειας και υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού.

2.3.7 Χάραξη με Laser σε μέταλλα με αντανakλαστικότητα ώστε να δημιουργηθούν αναγνωρίσιμα από σαρωτή barcodes

Η λογική του barcode είναι πως η περιοχή που έχει μαρκαριστεί απορροφά περισσότερο φως και διαβάζεται ως μαύρο, ενώ η περιοχή που δεν έχει υποστεί κατεργασία αντανακλά περισσότερο φως και διαβάζεται ως άσπρο. Μία μέθοδος λοιπόν για τη χάραξη με Laser αποτελεί η τροποποίησης της τραχύτητας επιφανείας, ώστε να μεταβληθεί η αντανakλαστικότητα. Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων, σε αλουμίνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και γαλβανιζέ χάλυβα, ώστε να μεταβληθεί η αντανakλαστικότητα και να επιτευχθεί δημιουργία barcode. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η διαδικασία και τα αποτελέσματα της μελέτης των P.M. Harrison, J. Wendland και M. Henry.

Το Laser που χρησιμοποιήθηκε ήταν diode pumped στερεής κατάστασης με τρόπο λειτουργίας παλμικό Q-switched.

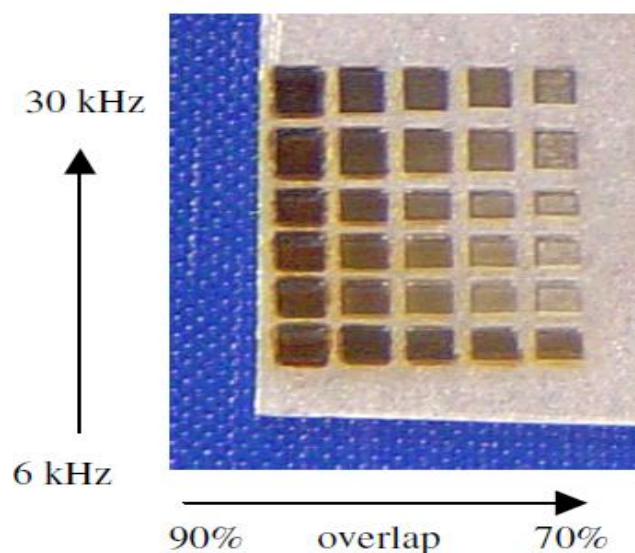
Για το αλουμίνιο δημιουργήθηκε ένα πλέγμα με τετράγωνα διαστάσεων $2 \times 2 \text{ mm}^2$, ενώ οι παράμετροι που μεταβάλλονταν ήταν η συχνότητα (20-50 kHz) και το overlap παλμού (75-95%). Από τα αποτελέσματα στο [σχήμα 2.46](#), το συμπέρασμα είναι πως με αύξηση και των δύο παραμέτρων, αυξάνεται και η τραχύτητα.



Σχήμα 2.46 : Χάραξη με Laser σε αλουμίνιο

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με το κομμάτι υπό γωνία 15° και 30° και μετρήθηκε η αντανakλαστικότητα σε όλες τις περιπτώσεις. Υπό γωνία 30° και συχνότητα 20 kHz, βρέθηκε να έχει σημαντικότερο ρυθμό αντίθεσης.

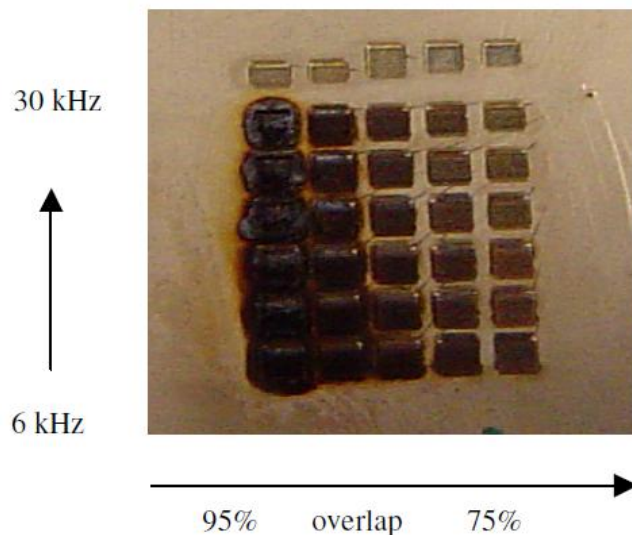
Σε γαλβανιζέ χάλυβα, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν όπως και στο αλουμίνιο με τις ίδιες συνθήκες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο [σχήμα 2.47](#). Η οξειδωση εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό, πράγμα που δείχνει πως έχει λιγότερη αντανakλαστικότητα από το αλουμίνιο.



Σχήμα 2.47 : Χάραξη με Laser σε γαλβανιζέ χάλυβα

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με το κομμάτι υπό γωνία 5° , 15° , 30° και μετρήθηκε η αντανakλαστικότητα σε όλες τις περιπτώσεις. Το ακατέργαστο κομμάτι αντανakλούσε περισσότερο το φως από ότι το χαραγμένο, μία παρατήρηση αντίθετη με αυτό που συνέβαινε στο αλουμίνιο. Σε γωνία 5° ο ρυθμός αντίθεσης είναι 10:1, σε 15° 2:1 και σε 30° <2:1.

Σε ανοξειδωτο χάλυβα, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν όπως και στον γαλβανιζέ χάλυβα με τις ίδιες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.48. Για υψηλές τιμές overlap, υπάρχει λιώσιμο, σκουριά και οξείδωση.



Σχήμα 2.48 : Χάραξη με Laser σε ανοξειδωτο χάλυβα

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με το κομμάτι υπό γωνία 5° , 15° , 30° και μετρήθηκε η αντανakλαστικότητα σε όλες τις περιπτώσεις. Το ακατέργαστο κομμάτι αντανakλούσε περισσότερο το φως από ότι το χαραγμένο, ενώ η μεγαλύτερη αντίθεση επιτεύχθηκε σε γωνία 5° .

Με τη μελέτη των παραπάνω πειραμάτων, το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν πως και τα τρία υλικά με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων χάραξης, μπορούν να χαραχθούν να δημιουργηθεί barcode με επιτυχία. Ωστόσο, σε κάποια υλικά η ποιότητα ανάγνωσης είναι καλύτερη.

Για το αλουμίνιο οι βέλτιστες παράμετροι βρέθηκαν να είναι για 20 kHz συχνότητα, 75% overlap, υπό γωνία 30°. Για το γαλβανιζέ και ανοξείδωτο χάλυβα, οι βέλτιστες συνθήκες βρέθηκαν να είναι για 30 kHz συχνότητα, 75% overlap, υπό γωνία 5°. Επίσης, βρέθηκε πως η αντίθεση (contrast), στα δύο αυτά υλικά, είναι μεγαλύτερη σε μικρότερη γωνία, σε αντίθεση με το αλουμίνιο. Αυτός είναι και ο λόγος που στα δύο αυτά υλικά δημιουργούνται υψηλής ποιότητας αναγνώσιμα barcode.

2.3.8 Μαρκάρισμα με Laser σε ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304

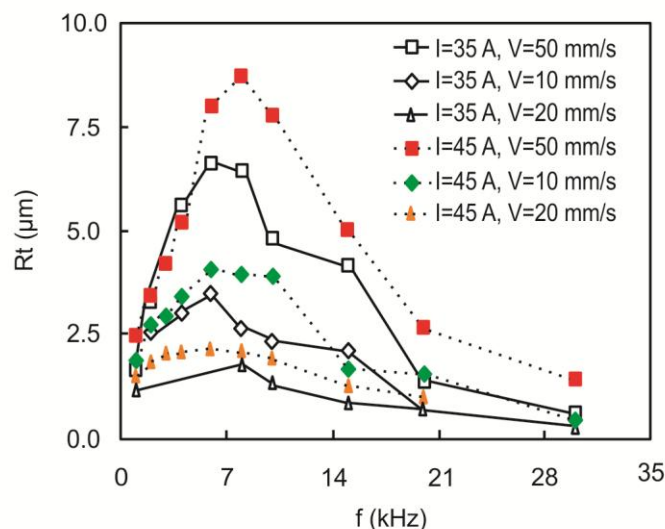
Η μελέτη, που εκπονήθηκε, από τους C. Leone, S. Genna, G. Caprino και I. De Iorio, είχε ως στόχο τον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων κατεργασίας (συχνότητα παλμού, ταχύτητα χάραξης, έντασης) και του οπτικού αποτελέσματος αυτών στην κατεργασία.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304 πάχους 2 mm. Ο τύπος του Laser που χρησιμοποιήθηκε ήταν diode-pumped Nd:YAG, με τρόπο λειτουργίας παλμικό Q-switched και μήκος κύματος στα 1064 nm.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν για την ταχύτητα χάραξης 50, 100, 200 mm/s, το εύρος της συχνότητας 1-30 kHz και η ένταση 35 και 45 A. Για κάθε πείραμα χαράχθηκε με ένα πέρασμα γραμμή μήκους 50 mm, ενώ για κάθε πειραματική συνθήκη, πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές.

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, αρχικά μετρήθηκε η τραχύτητα της επιφάνειας σε συνάρτηση με τη συχνότητα, για κάθε ταχύτητα και ένταση που χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.49.

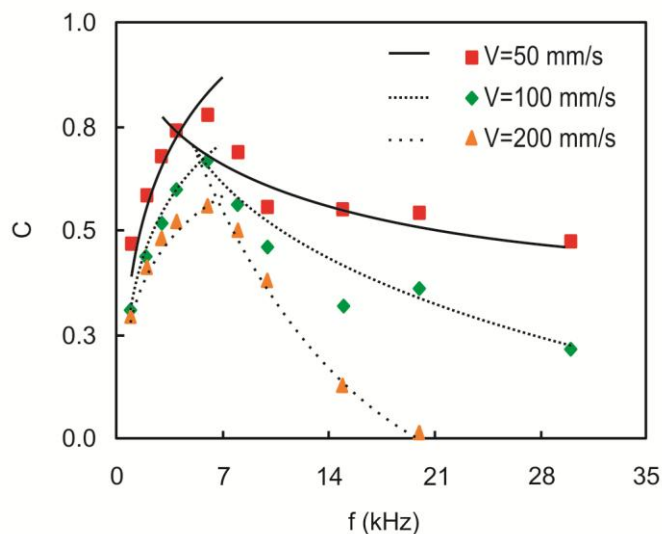
Όπως παρατηρείται, η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται με αύξηση της συχνότητας μέχρι μία δεδομένη τιμή, ενώ από αυτήν και μετά υφίσταται μείωση. Για δεδομένη συχνότητα, μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας επιτυγχάνονται επιλέγοντας χαμηλότερες τιμές ταχύτητας χάραξης και υψηλότερες τιμές έντασης.



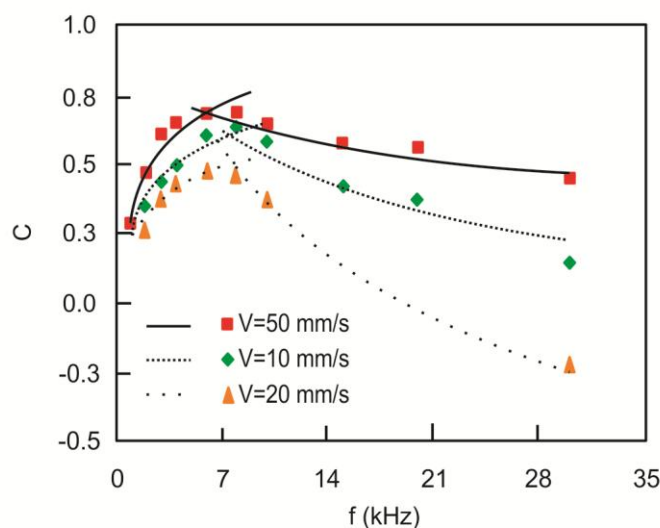
Σχήμα 2.49 : Τραχύτητα σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τις παραμέτρους ταχύτητας και έντασης που χρησιμοποιήθηκαν

Το οπτικό αποτέλεσμα μελετήθηκε με βάση το συντελεστή C, όπου $C=1-G_m/G_v$, με G_m ο μέσος όρος τιμών της κλίμακας του γκρι στην κατεργασμένη επιφάνεια και G_v στην επιφάνεια πριν την κατεργασία.

Στο σχήμα 2.50 και 2.51, παρουσιάζεται ο συντελεστής C συναρτήσει της συχνότητας, για τις τιμές ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν και για τιμή έντασης 35 και 45 A, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.50 : Συντελεστής C σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τις παραμέτρους ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν και έντασης 35 A



Σχήμα 2.51 : Συντελεστής C σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τις παραμέτρους ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν και έντασης 45 A

Και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρήθηκε πως ο συντελεστής C αυξάνεται μέχρι μία δεδομένη τιμή συχνότητας, ενώ από κει και πέρα μειώνεται.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, ήταν τα εξής :

- Το οπτικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται εξαρτάται σε υψηλό βαθμό από τις παραμέτρους τις διαδικασίας που χρησιμοποιούνται
- Για την επίτευξη καλού οπτικού αποτελέσματος, πρέπει να χρησιμοποιούνται χαμηλές τιμές συχνότητας και ισχύος

3. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ (LPSWIN/LASERSOFT3D)

3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

3.1.1 Μοντέλο και διαστάσεις

Οι διαστάσεις της LASERTEC 40, όπως φαίνεται και στην εικόνα του σχήματος 3.1 είναι :

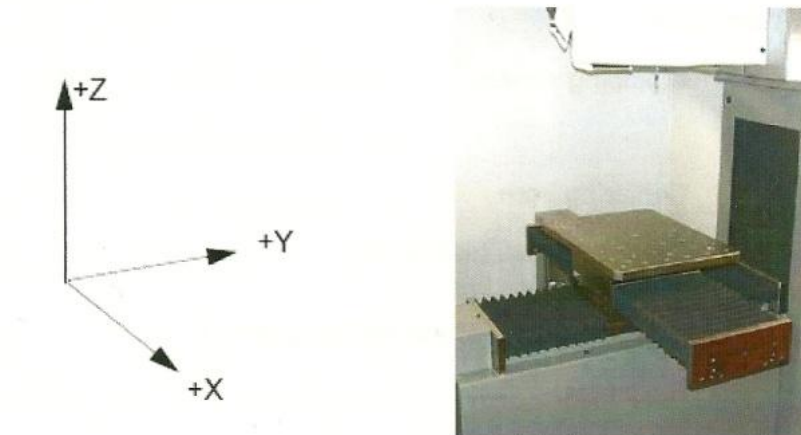
- Ύψος (H) : 2370mm
- Μήκος (B) : 2850mm
- Πλάτος (L) : 2476mm
- Βάρος (W) : 2200kg



Σχήμα 3.1 : Διαστάσεις μηχανής

3.1.2 Διεύθυνση κίνησης

Η μηχανή Laser αποτελεί ένα κέντρο κατεργασίας 3 γραμμικών και 2 οπτικών αξόνων με αυτοματοποιημένη καθοδήγηση CNC, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 : Κίνηση τράπεζας

Το εύρος κίνησης της τράπεζας σε κάθε άξονα είναι :

- X-άξονας : 400mm
- Y-άξονας ; 300mm
- Z-άξονας : 500mm

Οι διαστάσεις της τράπεζας είναι 400x300mm ενώ το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει είναι 50kg. Η ταχύτητα πρόωσης φτάνει μέχρι 20000mm/min.

3.1.3 Άλλα χαρακτηριστικά

- Τύπος Laser : παλμικό fibre με ισχύ 20Watt.
- Πλήρης προστασία καμπίνας και παράθυρο ασφαλείας Laser safety glass 1
- Σύστημα ελέγχου CNC με λογισμικό προγραμματισμού με δυνατότητα εισαγωγής stl και dxf αρχείων.
- TFT οθόνη 15"
- Κλιματιζόμενη καμπίνα ηλεκτρικών
- Control με 32-bit επεξεργαστή
- Μνήμη με σκληρό δίσκο 40Gb
- Internet interface

3.2 LpsWin

3.2.1 Εισαγωγή

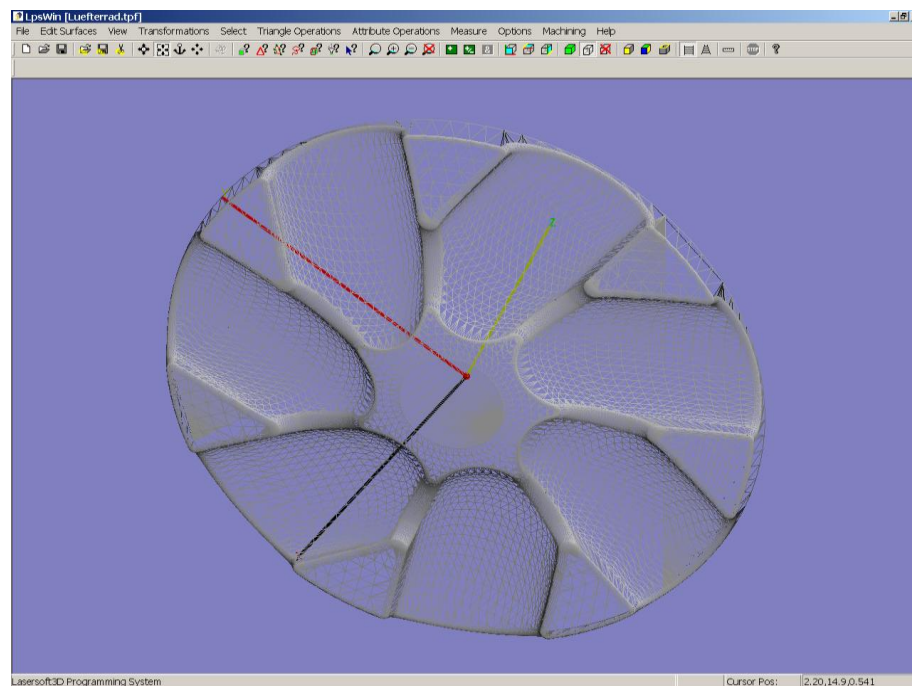
Σκοπός του Lpswin, είναι ο τεμαχισμός του αντικειμένου σε στρώματα, το πάχος των οποίων ορίζεται από το χρήστη. Ο λόγος που γίνεται αυτή η διαδικασία, είναι γιατί το Laser χτίζει το μοντέλο, δημιουργώντας ένα στρώμα τη φορά και έτσι το αναγνωρίζει. Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση ενός προγράμματος που θα κάνει αυτή τη δουλειά και στη συνέχεια θα δίνει το αρχείο στρωματοποιημένο στη μηχανή.

Ωστόσο, πριν να φτάσουμε στο στάδιο της στρωματοποίησης, θα πρέπει να καθοριστούν κάποιες παράμετροι και αυτή η διαδικασία θα αναλυθεί στη συνέχεια.

3.2.2 Τύποι αρχείων

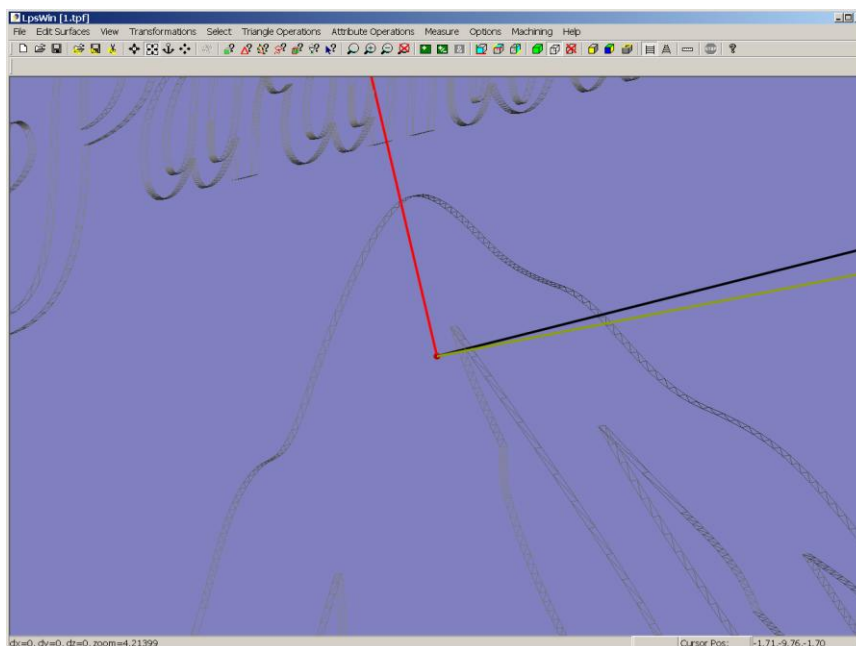
Το Lpswin αναγνωρίζει συγκεκριμένους τύπους αρχείων οι οποίοι είναι STL και DXF.

Ένα αρχείο STL (STereoLithography) αναπαριστά το αντικείμενο ως πλέγμα συνδεδεμένων τριγώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, αποδίδοντας έτσι τη γεωμετρία της επιφάνειας του τρισδιάστατου αντικειμένου χωρίς καμία εκπροσώπηση του χρώματος, της υφής αλλά και άλλων κοινών χαρακτηριστικών του αντικειμένου.



Σχήμα 3.3 : Αναπαράσταση αντικειμένου ως πλέγμα συνδεδεμένων τριγώνων

Τα DXF αρχεία αναπαριστούν δισδιάστατα ή τρισδιάστατα σχέδια καθώς και εικόνες, τα οποία όμως αποδίδονται και αυτά με τη μορφή πλέγματος συνδεδεμένων τριγώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.



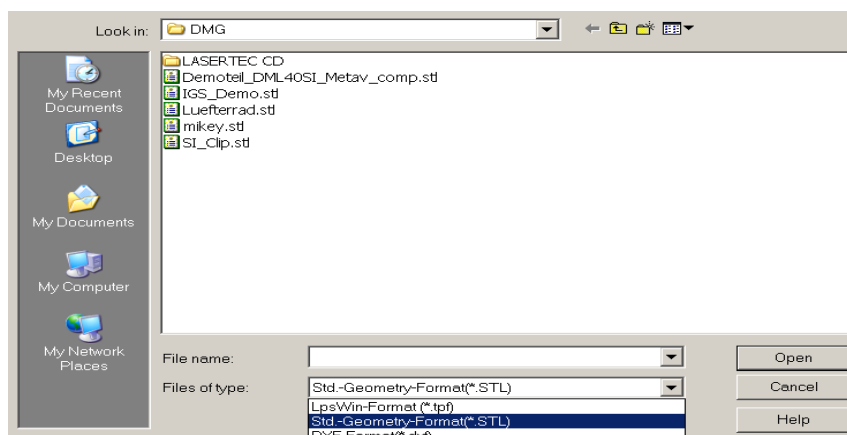
Σχήμα 3.4 : Αναπαράσταση σήματος paramount ως DXF αρχείο

Το πρόγραμμα Lpswin, με το άνοιγμα ενός STL ή DXF αρχείου, αυτόματα δημιουργεί ένα TPF αρχείο. Το είδος του αρχείου αυτού σε αντίθεση με τα παραπάνω, εκτός από τη θέση των σημείων των τριγώνων, δίνει τη δυνατότητα να αποθηκευτούν πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που θα εκτελεστεί η κατεργασία, καθώς και τις παραμέτρους που θα οριστούν απευθείας στο αρχείο της επιφάνειας.

3.2.3 Διαδικασία στρωματοποίησης

Άνοιγμα αρχείου

Από την επιλογή *File* του προγράμματος, επιλέγεται το *include surface* και στη συνέχεια από τον πίνακα που εμφανίζεται στο σχήμα 3.5 επιλέγεται ο τύπος αρχείου που θα φορτωθεί στο πρόγραμμα.

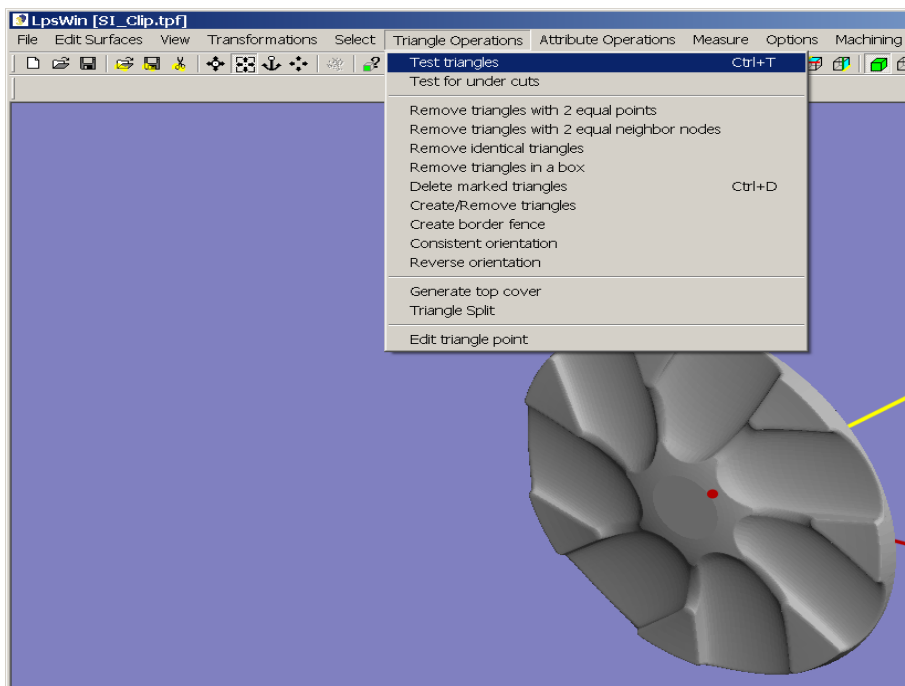


Σχήμα 3.5 : Επιλογή φόρτωσης αρχείου

Έλεγχος τριγώνων

Έχοντας φορτώσει το κατάλληλο αρχείο, στη συνέχεια από την επιλογή του κυρίως μενού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, *Triangle Operations* πατάμε διαδοχικά τις εντολές *Test triangles-Remove triangles with 2 equal points-Remove triangles with 2 equal neighbor nodes-Remove identical triangles*.

Με τη χρήση των εντολών αυτών γίνεται έλεγχος των τριγώνων και στη συνέχεια αφαιρούνται αυτά που φέρουν δύο ίδια σημεία, δύο ίδιους γειτονικούς κόμβους και αυτά που είναι όμοια.



Σχήμα 3.6 : Έλεγχος τριγώνων

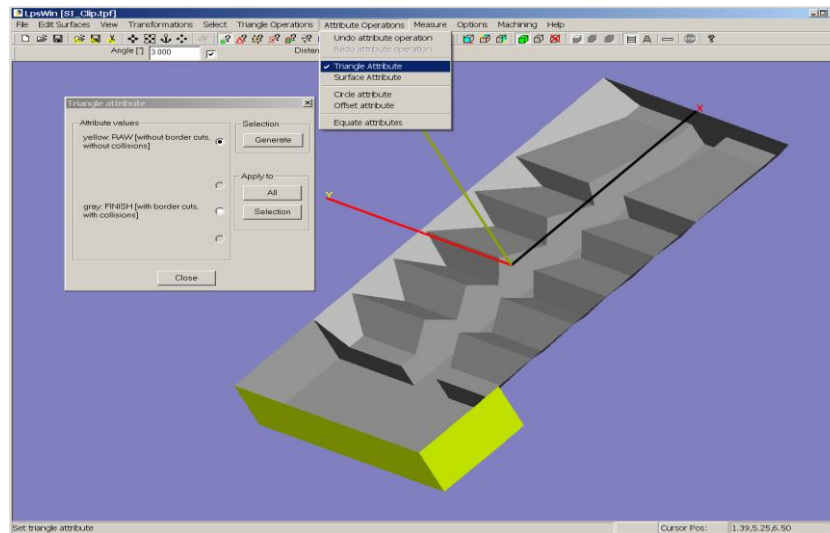
Γνωρίσματα των τριγώνων (Triangle Attributes)

Έχοντας πραγματοποιήσει έλεγχο των τριγώνων, εν συνεχεία πρέπει να δοθούν τα γνωρίσματα τους. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την επιλογή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, *Attribute Operations-Triangle Attributes*.

Δύο είναι τα γνωρίσματα με τα οποία χαρακτηρίζονται τα τρίγωνα. Το πρώτο είναι RAW και απεικονίζεται με κίτρινο, ενώ το δεύτερο είναι FINISH και απεικονίζεται με γκρι.

Κοιτάζοντας το σχήμα, με κίτρινο απεικονίζονται τα τρίγωνα που συνορεύουν μεταξύ κοιλότητας και αέρα, ενώ με γκρι απεικονίζονται τα τρίγωνα που συνορεύουν μεταξύ κοιλότητας και εναπομείναντος υλικού.

Ο σκοπός για τον οποίο προσδίδουμε στα τρίγωνα τα γνωρίσματα αυτά, είναι να γίνει κατανοητό από το πρόγραμμα το ποια επιφάνεια θα δημιουργηθεί από το Laser και ποιο το υλικό που πρέπει να αφαιρεθεί.

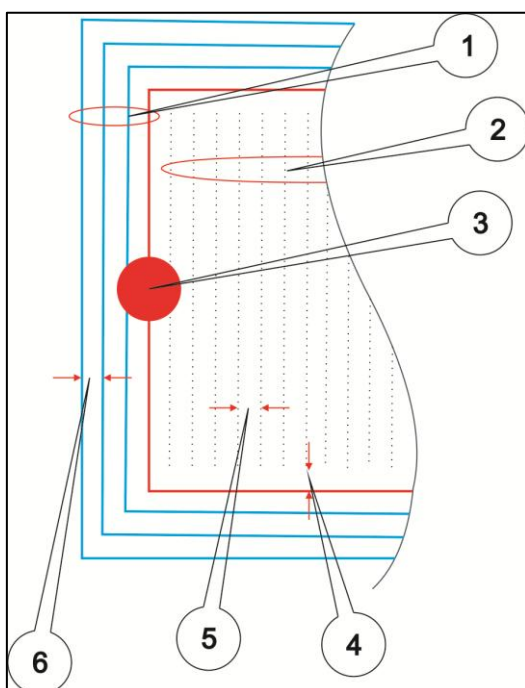


Σχήμα 3.7 : Επιλογή των γνωρισμάτων των τριγώνων

Γνωρίσματα επιφάνειας (Surface Attributes)

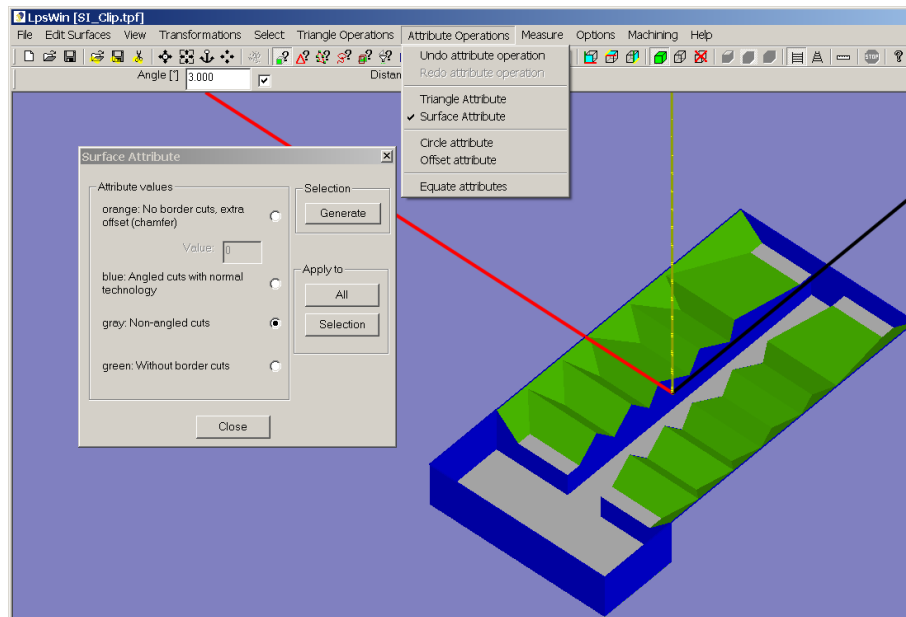
Σε όλα τα αντικείμενα εφαρμόζεται κατάλληλη στρατηγική, καθώς φέρουν διαφορετικές μορφολογίες επιφανειών, ώστε το Laser να δημιουργήσει αυτό που επιθυμούμε με την καλύτερη δυνατή ποιότητα. Οι στρατηγικές που εφαρμόζονται είναι:

- Angled border cuts (απεικονίζεται με μπλε). Χρησιμοποιείται για τοιχώματα με γωνία από 80° έως 90° και ύψος πάνω από 0,1mm, όπως στο [σχήμα 3.8](#)
- Non angled border cuts (απεικονίζεται με γκρι). Χρησιμοποιείται για επίπεδα με ύψος λιγότερο από 0,1mm. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται σε γωνίες είναι καλύτερη απ' ότι χωρίς border cuts, όπως στο σχήμα 3.8
- Without border cuts, only hatch tracks (απεικονίζεται με πράσινο). Χρησιμοποιείται για όλες τις επιφάνειες μεταξύ 0° και 80° , όπως στο σχήμα 3.8



1. Border cuts: 4 υπάρχουν στο σχήμα
2. Hatch Tracks
3. Εστίαση δέσμης Laser
4. Απόσταση μεταξύ περιοχής hatch και εσωτερικού border cut
5. Απόσταση μεταξύ των hatch tracks
6. Απόσταση μεταξύ των border cuts

Σχήμα 3.8 : Border cuts και hatch tracks

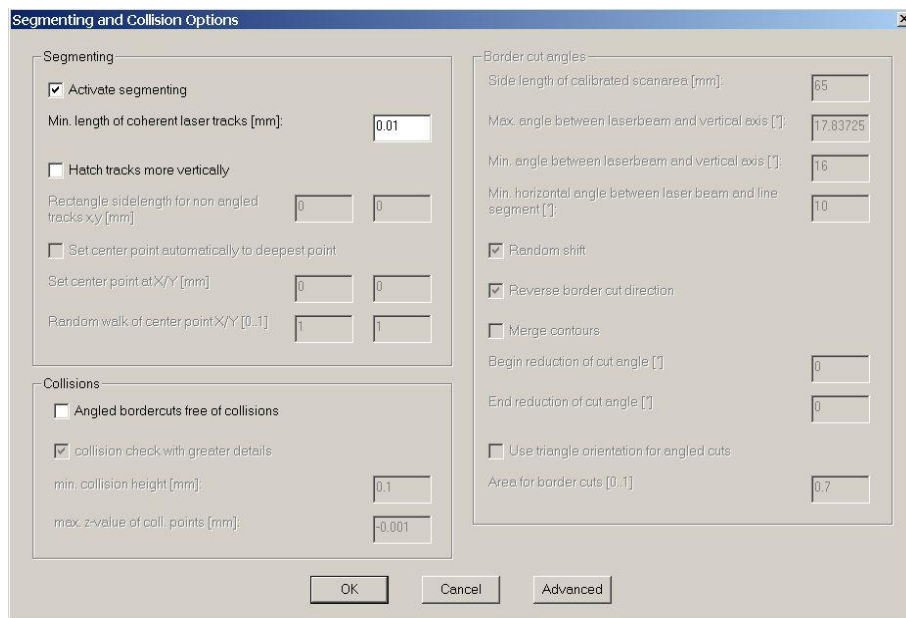


Σχήμα 3.9 : Επιλογή γνωρισμάτων επιφανείας

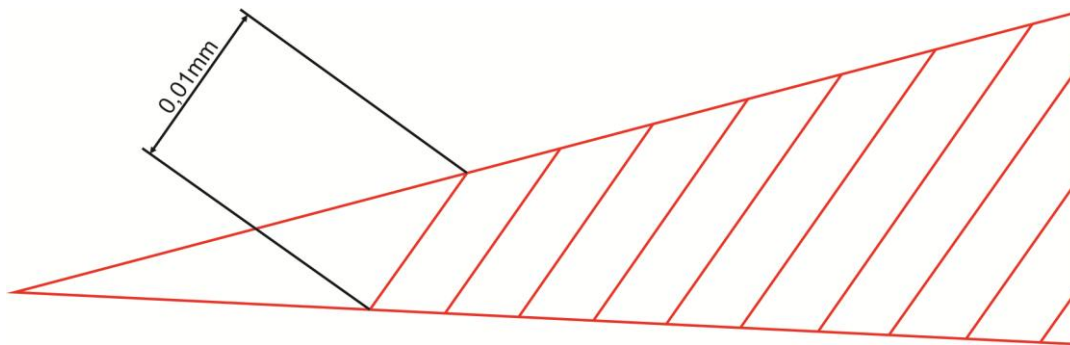
Segmenting

Έχοντας ορίσει και τα γνωρίσματα των επιφανειών, στη συνέχεια από την επιλογή *Option-Segmenting* και εμφανιζόμενη η καρτέλα του σχήματος 3.10, επιλέγουμε το *activate segmenting* και ορίζουμε το *min. length of coherent Laser tracks(mm)* ως 0,01 (σχήμα 3.11).

Τα hatch tracks του Laser με τιμές μικρότερες από την παραπάνω θα διαγράφονται. Θέτοντας την τιμή αυτή επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια σε αρκετά μικρές λεπτομέρειες.



Σχήμα 3.10 : Ρύθμιση των Segmenting παραμέτρων

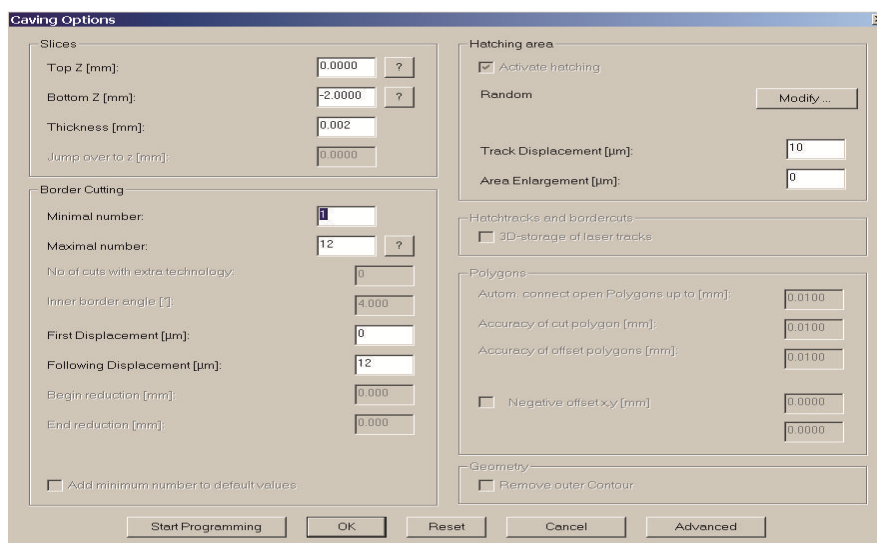


Σχήμα 3.11 : Ελάχιστο μήκος των hatch tracks

Caving

Επόμενο βήμα είναι η επιλογή από το κυρίως μενού *Options* και εν συνεχεία *Caving*. Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιούνται είναι οι εξής :

- *Top Z [mm]* : Ορίζεται η θέση του πρώτου επιπέδου που προκύπτει από τη στρωματοποίηση. Πατώντας το κουμπί δίπλα από το κελί, όπου εισάγεται η τιμή, ορίζεται αυτόματα, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.12](#)
- *Bottom Z [mm]* : Ορίζεται η θέση του τελευταίου επιπέδου που προκύπτει από τη στρωματοποίηση. Πατώντας το κουμπί δίπλα από το κελί, όπου εισάγεται η τιμή, ορίζεται αυτόματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12
- *Thickness [mm]* : Ορίζεται το πάχος του στρώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12
- *Max. number* : Ορίζεται ο μέγιστος αριθμός των border cuts. Πατώντας το κουμπί δίπλα από το κελί όπου εισάγεται η τιμή, ορίζεται αυτόματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12
- *Min. number* : Ορίζεται ο ελάχιστος αριθμός των border cuts ίδιος με του *Max. Number*, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12

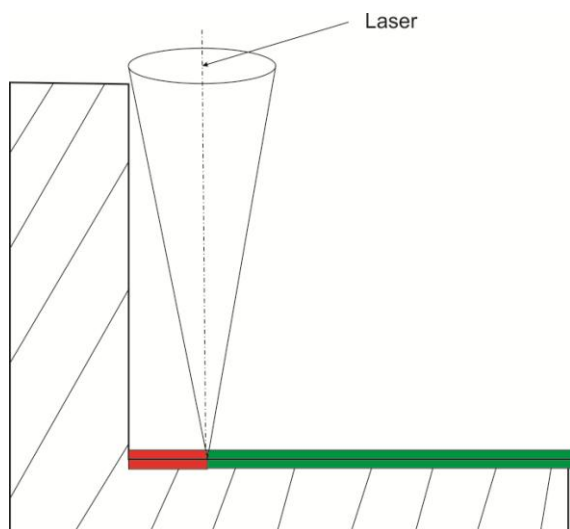


Σχήμα 3.12 : Ρύθμιση των Caving παραμέτρων

Καθώς η ακτίνα Laser έχει κωνική μορφή, προς αποφυγή συγκρούσεων με τα κάθετα τοιχώματα, δίνουμε την εντολή στο πρόγραμμα να ορίσει μόνο του τον απαιτούμενο αριθμό των border cuts, ώστε να υπάρχει ασφάλεια. Με κόκκινο, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.13](#),

ορίζεται η περιοχή η οποία θα καλυφθεί με border cuts, ενώ με πράσινο ορίζεται η περιοχή με τα hatch tracks του Laser.

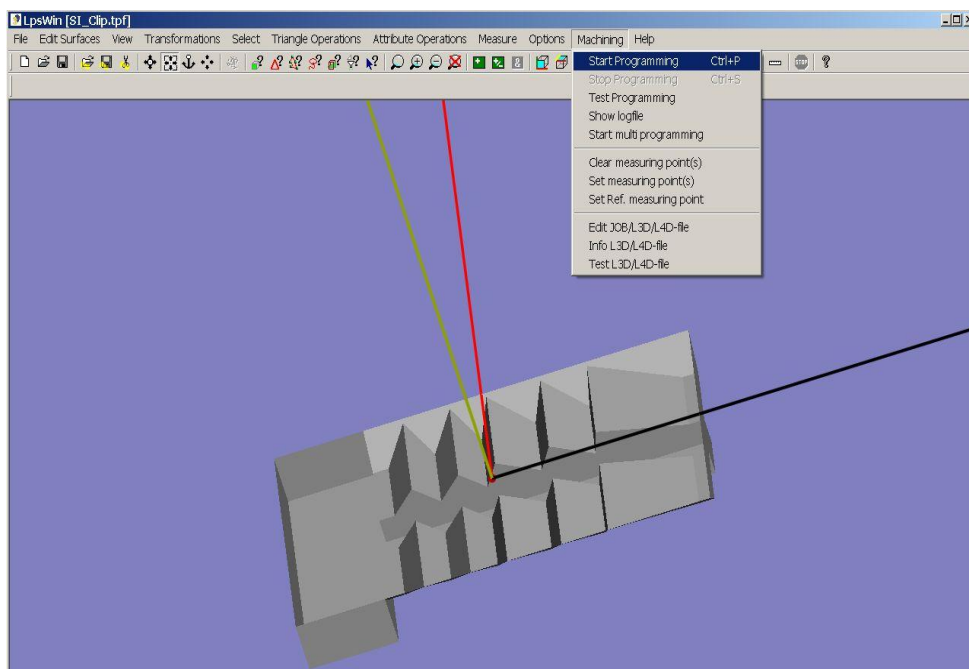
Ο λόγος για τον οποίο επιθυμούμε τη χρήση του μέγιστου αριθμού των border cuts και τα οποία ζητάμε να ορίσει αυτόματα το πρόγραμμα, φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 : Περιοχή εισαγωγής Border cuts

Start Programming

Έχοντας πραγματοποιήσει όλες τις παραπάνω ενέργειες και ρυθμίσει σωστά όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους, το μοντέλο είναι έτοιμο για τη διαδικασία της στρωματοποίησης. Από το κυρίως μενού, με την επιλογή *Machining* και εν συνεχεία επιλέγοντας *Start Programming* (σχήμα 3.14), η διαδικασία ξεκινάει.



Σχήμα 3.14 : Επιλογή Start Programming

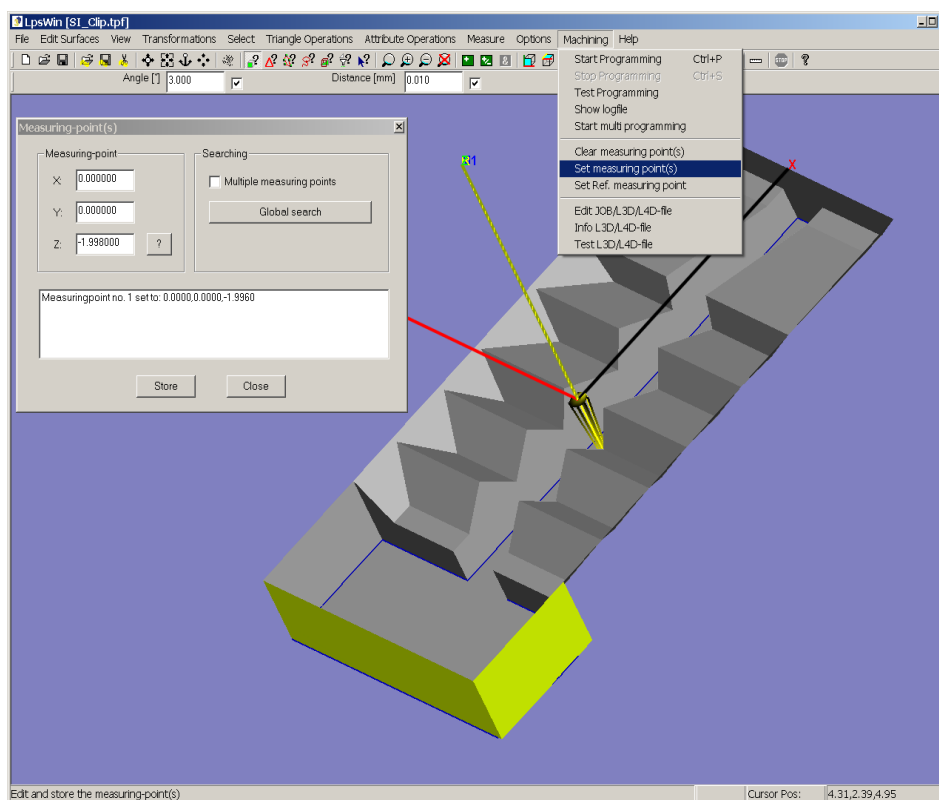
Ο αριθμός των στρωμάτων, στα οποία θα χωριστεί το μοντέλο, εξαρτάται από το βάθος της κοιλότητας, αλλά και από τον αριθμό του πάχους ανά στρώμα που έχει ορίσει ο χρήστης. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στρωμάτων, τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζεται

το πρόγραμμα για να πραγματοποιήσει τη στρωματοποίηση, αλλά και η μηχανή για να δημιουργήσει το μοντέλο.

Set measuring point(s)

Για καλή ποιότητα επιφανείας, είναι απαραίτητο το πάχος κάθε στρώματος που αφαιρείται από το Laser, να συμφωνεί με την τιμή η οποία έχει οριστεί από το *Cavity* στην επιλογή *Thickness* (σχήμα 3.10). Γι' αυτό το λόγο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, το βάθος ελέγχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα σε μία δεδομένη θέση.

Η θέση αυτή ορίζεται μετά τη διαδικασία της στρωματοποίησης, από την επιλογή του κυρίως μενού *Machining-Set measuring point(s)*. Στη συνέχεια εμφανίζεται το παρακάτω σχήμα 3.15 και με την εντολή *Global search* ορίζεται αυτή η θέση, η οποία έχει ταυτόχρονα και το μέγιστο βάθος.

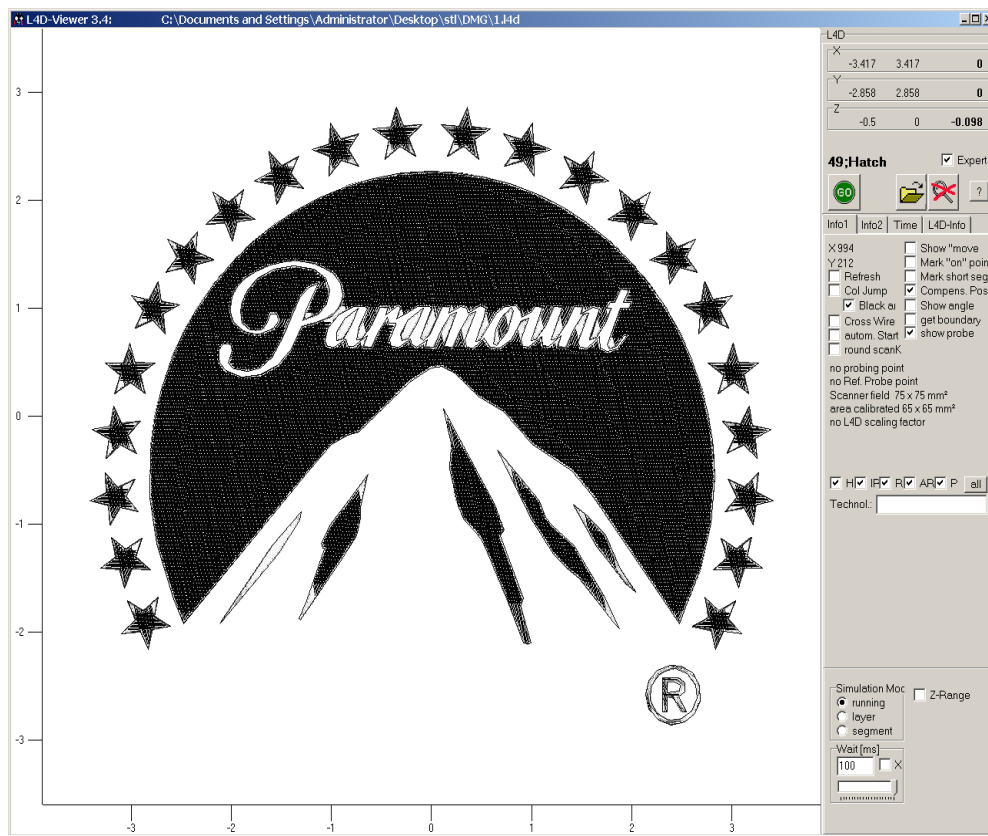


Σχήμα 3.15 : Επιλογή Measuring point

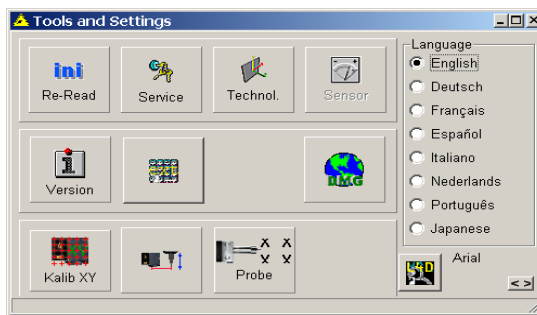
3.2.4 Το πρόγραμμα L4D viewer

Με το πέρας των παραπάνω ενεργειών και ρυθμίσεων, το πρόγραμμα δημιουργεί και αποθηκεύει ένα αρχείο l4d. Στο αρχείο αυτό είναι αποθηκευμένο το στρωματοποιημένο μοντέλο που έχει δημιουργήσει η μηχανή, καθώς και όλες οι παράμετροι οι οποίες έχουν οριστεί με τις παραπάνω διαδικασίες.

Το αρχείο αυτό ανοίγει με το ομώνυμο πρόγραμμα και αποτελεί μία προσομοίωση του αποτελέσματος που θα δημιουργηθεί από τη μηχανή Laser. Πατώντας το πλήκτρο με την ένδειξη Go, ξεκινάει η προσομοίωση και βλέπουμε τη χάραξη που πραγματοποιεί το Laser σε κάθε στρώμα, μέχρι να φτάσει στο τελικό αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16.

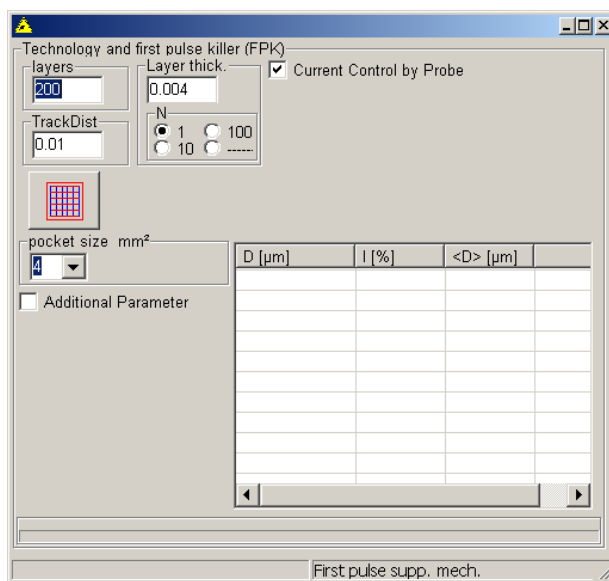


Σχήμα 3.16 : Πρόγραμμα προσομοίωσης κατεργασίας



Σχήμα 3.18 : Tools and settings

Επιλέγοντας *technol* εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 3.19 και πατώντας , αρχίζει η διαδικασία προσδιορισμού της ισχύος.



Σχήμα 3.19 : Παράμετροι Technology

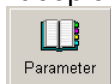
Με τον τρόπο αυτό, το Laser έχοντας σαν τιμή εκκίνησης μία τιμή ισχύος που είναι αποθηκευμένη από προηγούμενη εργασία ή μια τιμή η οποία μπορεί να δοθεί από το χρήστη, δημιουργεί τετράγωνα, το εμβαδόν των οποίων ορίζεται από το χρήστη από την επιλογή *pocket size* και το πάχος από την επιλογή *Layer thick*, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.19.

Η επιλογή του *pocket size* γίνεται ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου που θα δημιουργηθεί. Σε περίπτωση μικρών αντικειμένων με λεπτεπίλεπτες λεπτομέρειες επιφάνειας, χρησιμοποιείται μέγεθος μικρότερο από 5mm μήκος πλευράς, ενώ σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιείται μεγαλύτερο.

Για την επιλογή *thickness*, επιλέγεται το πάχος που επιθυμεί ο χρήστης, ίδιο όμως με το πάχος στρωματοποίησης που έχει επιλεγεί για το αντικείμενο από το πρόγραμμα LpsWin. Το πάχος επιλέγεται σύμφωνα με τα επιτρεπόμενα πλαίσια που είναι αποδεκτά για κάθε υλικό, με το μέγιστο επιτρεπόμενο πάχος ανά στρώμα να είναι 0,015mm.

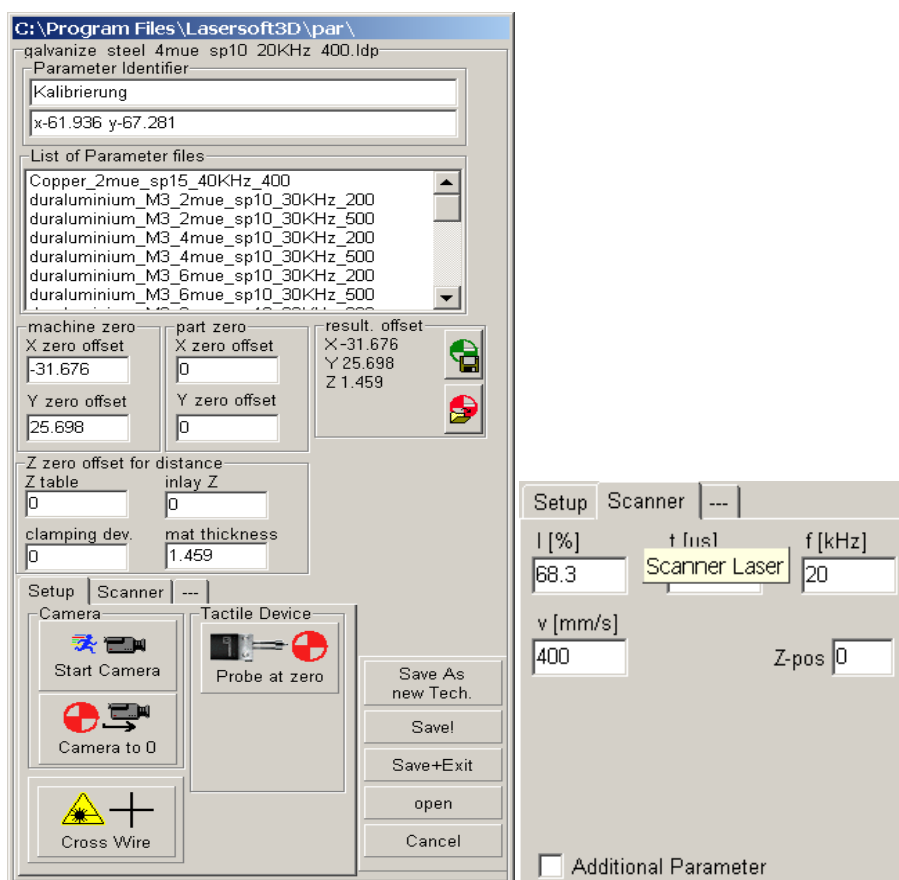
Μόλις δημιουργηθεί το πρώτο στρώμα, το Laser μετράει αν το πάχος του είναι όμοιο με αυτό που έχει οριστεί. Αν όχι, τότε επαναλαμβάνει τη διαδικασία με άλλη τιμή ισχύος και συγκεκριμένα αν είναι μικρότερο τότε αυξάνει την ισχύ και αν είναι μεγαλύτερο τότε τη μειώνει. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η τιμή της ισχύος που να αφαιρεί το συγκεκριμένο πάχος που έχει ορίσει ο χρήστης στο συγκεκριμένο υλικό.

Ωστόσο, πριν από την έναρξη της διαδικασίας υπολογισμού της ισχύος, θα πρέπει να καθοριστεί η ταχύτητα χάραξης αλλά και η συχνότητα. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται το



από το σχήμα 3.17 και εν συνεχεία από το παράθυρο που εμφανίζεται στο σχήμα 3.20, επιλέγεται *scanner*. Η ταχύτητα χάραξης αλλά και η συχνότητα ορίζονται από το χρήστη, με τις μέγιστες τιμές να αγγίζουν τα 1000mm/sec και τα 80kHz αντίστοιχα. Τα όρια αυτών των τιμών εξαρτώνται από το υλικό, ενώ η επιλογή τους ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα των επιφανειών αλλά και το χρόνο που επιθυμείται να επιτευχθούν.

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία και υπολογιστεί με επιτυχία η τιμή της ισχύος, ανοίγει αυτόματα ένα παράθυρο όπου μας ζητάει να γίνει αποθήκευση αυτής. Γράφοντας λοιπόν το όνομα του υλικού αλλά και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε (ταχύτητα χάραξης, συχνότητα, πάχος στρώματος) αποθηκεύεται στο *List of Parameter files*, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20, για μελλοντική χρήση ίδιου υλικού με ίδιες παραμέτρους.



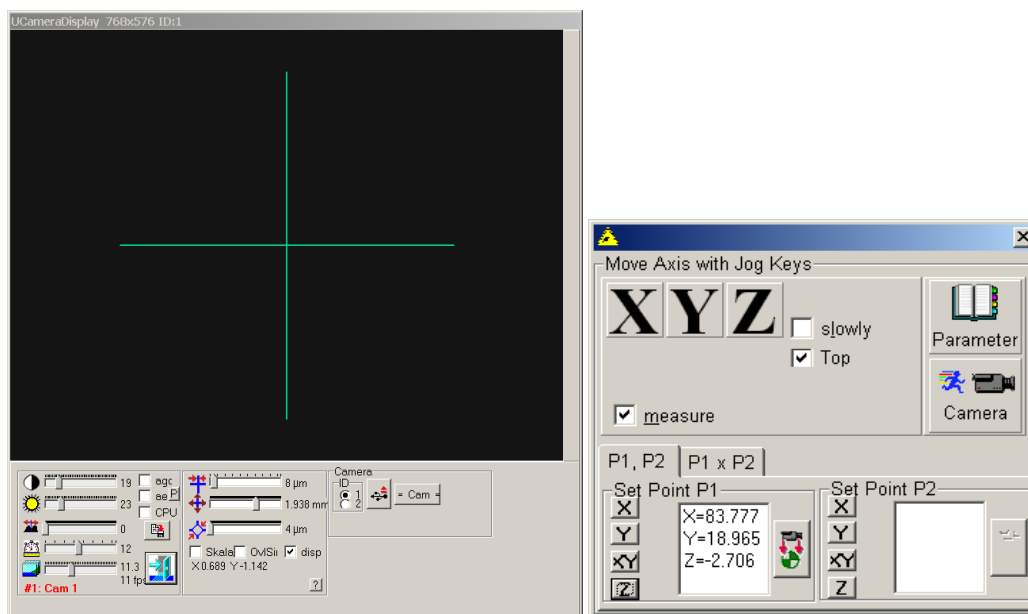
Σχήμα 3.20 : Επιλογή ταχύτητας χάραξης και συχνότητας

3.3.3 Ορισμός θέσης

Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η ρύθμιση της ισχύος, το επόμενο βήμα, είναι η εύρεση του σημείου πάνω στο προς κατεργασία κομμάτι όπου θα δημιουργηθεί το αντικείμενο, αλλά και ο ορισμός του επιπέδου το οποίο θα αποθηκεύσει η μηχανή ως σημείο αναφοράς για τη μέτρηση του βάθους.

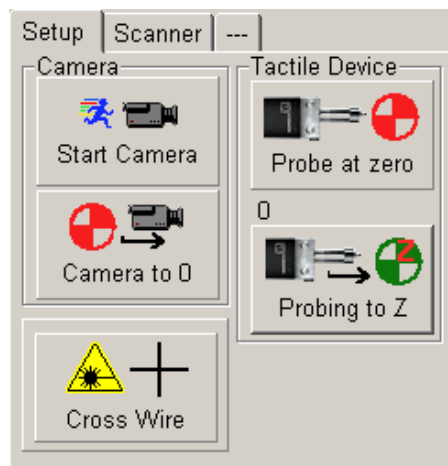
Από το σχήμα 3.20, επιλέγεται *start camera* και στη συνέχεια με κατάλληλη μετακίνηση της τράπεζας, βρίσκεται το σημείο που επιθυμείται. Η τράπεζα κινείται στους άξονες x,y,z, ενώ παράλληλα υπάρχει και μία κάμερα η οποία δείχνει το σε ποιο σημείο βρισκόμαστε πάνω

από το κομμάτι κατεργασίας. Για την αποθήκευση των συντεταγμένων του σημείου που επιλέγονται, πατάμε x,y,z, όπως στο σχήμα 3.21 και στη συνέχεια .



Σχήμα 3.21 : Οθόνη κάμερας και αποθήκευση συντεταγμένων

Εφόσον έχουν οριστεί οι συντεταγμένες του σημείου, επόμενο βήμα αποτελεί ο ορισμός του επιπέδου. Από το σχήμα 3.20, με την εντολή *Probe at zero*, ένα μετρητικό θα κατέβει μέχρι την επιφάνεια του δοκιμίου και στη συνέχεια εμφανίζεται η εντολή *Probing to Z*, όπως στο σχήμα 3.22, ώστε να γίνει καταχώρηση αυτού ως το επίπεδο αναφοράς.

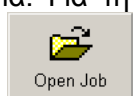


Σχήμα 3.22 : Ορισμός επιπέδου

3.3.4 Φόρτωση αρχείου

Πραγματοποιώντας όλες τις παραπάνω ρυθμίσεις, τελευταίο βήμα αποτελεί η φόρτωση του αρχείου προς επεξεργασία. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, από το περιβάλλον του

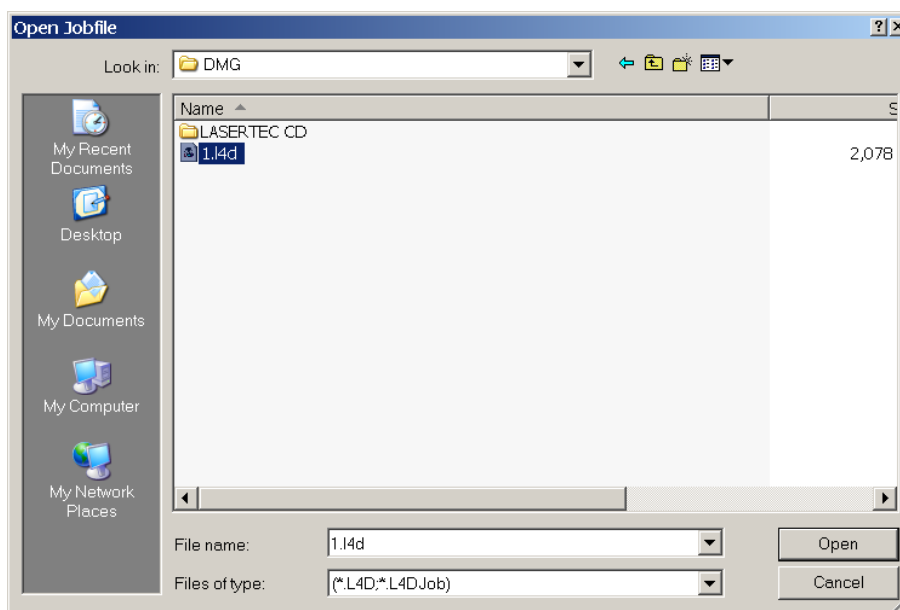
σχήματος 3.17 επιλέγεται



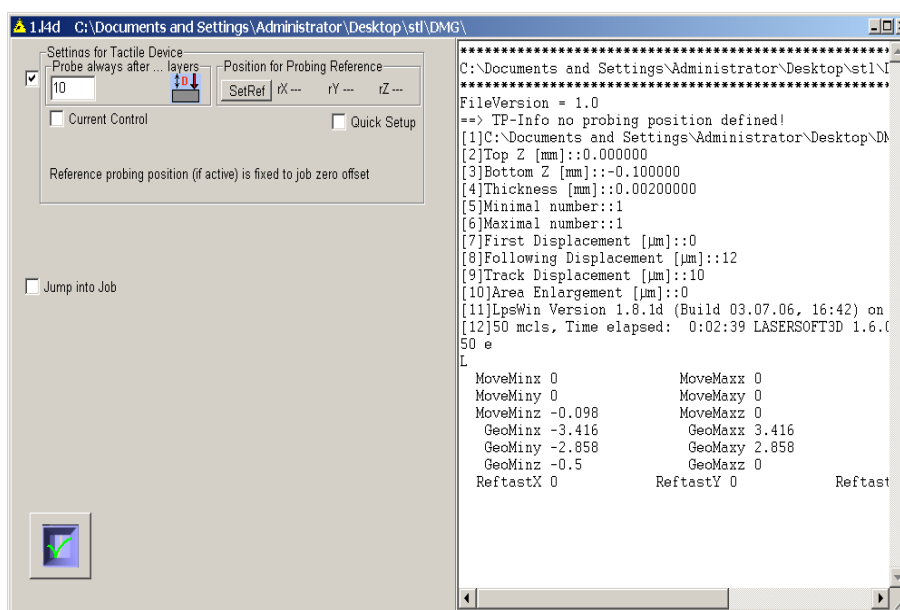
Από το παράθυρο που εμφανίζεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.23, επιλέγεται το αρχείο που επιθυμούμε προς επεξεργασία και εν συνεχεία ένα νέο παράθυρο εμφανίζεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24.

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, το βάθος της κοιλότητας μετρίεται ύστερα από έναν προκαθορισμένο αριθμό στρωμάτων, ο οποίος έχει δοθεί από το χρήστη. Ανάλογα με την απόκλιση του από το ονομαστικό βάθος, το σύνολο των εναπομεινάντων στρωμάτων αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα.

Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία αυτή, γίνεται ενεργοποίηση της εντολής *settings for Tactile Device*, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24, ενώ ο αριθμός των προκαθορισμένων στρωμάτων ορίζεται από το κελί με την ένδειξη *Probe always after...layers*.



Σχήμα 3.23 : Άνοιγμα αρχείου



Σχήμα 3.24 : Ρυθμίσεις Tactile Device



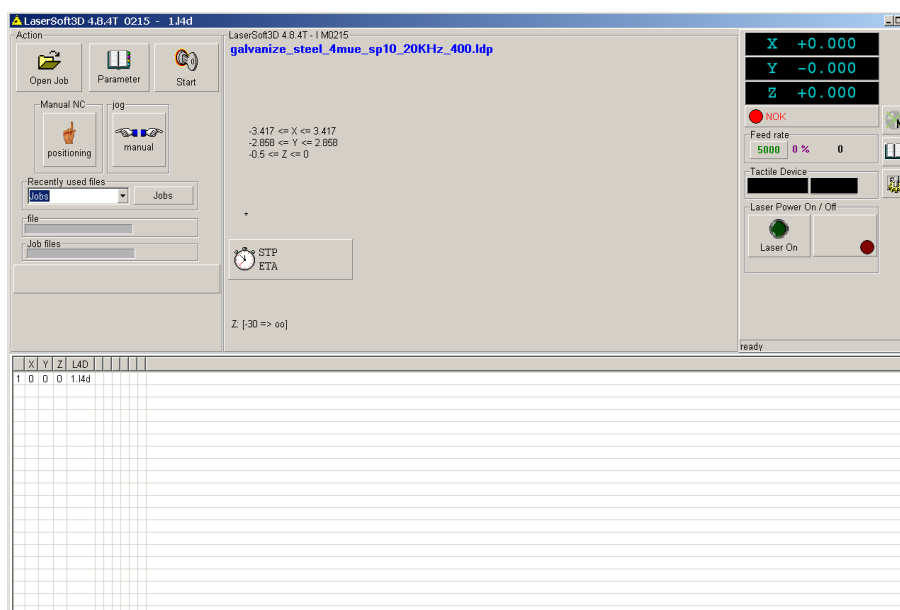
Τέλος, πατώντας , έχει φορτωθεί η κατεργασία στη μηχανή και απομένει η έναρξη λειτουργίας της.

3.3.4 Έναρξη λειτουργίας μηχανής

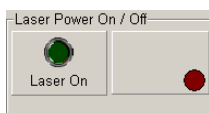
Έχοντας πραγματοποιήσει τη διαδικασία προσδιορισμού της κατάλληλης ισχύος, καθώς και τον ορισμό της θέσης αλλά και του επιπέδου, στο κυρίως περιβάλλον εργασίας εμφανίζεται

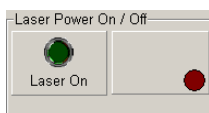


, όπως στο σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.25 : Έναρξη λειτουργίας



Πατώντας  ώστε να ενεργοποιηθεί το Laser και εν συνεχεία ,

στο κέντρο του σχήματος 3.25, βλέπουμε ένα ρολόι με τις ενδείξεις STP όπου αναφέρεται ο χρόνος κατεργασίας που έχει πραγματοποιηθεί και ETA όπου αναφέρεται ο χρόνος που απομένει για την ολοκλήρωση.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στόχο των πειραμάτων, αποτέλεσε η μελέτη του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν οι παράμετροι τις διαδικασίες χάραξης με Laser την τραχύτητα της επιφάνειας και κατ' επέκταση την ποιότητά της, στο υλικό Al-7075.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η συχνότητα παλμού, η ταχύτητα χάραξης και το πάχος που αφαιρεί το Laser ανά στρώμα. Το Laser της μηχανής με το οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, είναι fiber Yb:YAG με μήκος κύματος στα 1070 nm και ισχύς 20 W. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι παλμικό Q-switched.

Το Al-7075, αποτελεί κράμα αλουμινίου με βασικό στοιχείο τον ψευδάργυρο. Συγκεκριμένα, η σύνθεσή του, περιλαμβάνει 5.1-6.1% ψευδάργυρο, 2.1-2.9% μαγνήσιο, 1.2-2.0% χαλκό και σε ποσοστό λιγότερο από 0.5%, περιέχει πυρίτιο, σίδηρο, μαγγάνιο, τιτάνιο, χρώμιο και άλλα μέταλλα.

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

Η ναυτιλία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορία και η αεροδιαστημική, αποτελούν ορισμένα πεδία των εφαρμογών του. Εξοπλισμοί αναρρίχησης και τμήματα ποδηλάτων φτιάχνονται από αυτό το υλικό. Επίσης, ενδιαφέρουσα εφαρμογή αποτελεί και η χρησιμοποίηση για την κατασκευή των όπλων M16 από τον αμερικανικό στρατό. Εξαιτίας των ιδιοτήτων του, σημαντική είναι και η ευρέως χρήση του για τη κατασκευή καλουπιών εργαλείων και όχι μόνο.

4.2 Διαδικασία και αποτελέσματα

Με σκοπό να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές χάραξης, χρησιμοποιήθηκε μια πλάκα από Al-7075 με διαστάσεις 125 x 110 x 20 mm³. Κυκλικές διατομές, διαμέτρου 12 mm και βάθους 0,2 mm, χαράχτηκαν σε αυτήν την πλάκα με διάφορες παραμέτρους και στη συνέχεια μελετήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Η Lasertec 40, δίνει τη δυνατότητα για ταχύτητα χάραξης από 50-1000 mm/s, συχνότητα από 20-80 kHz και πάχος στρώματος από 1-15 μm. Ωστόσο, στο κάθε υλικό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν όλες οι τιμές του εύρους για κάθε παράμετρο. Με βάση το εγχειρίδιο της μηχανής, για κάθε υλικό υπάρχει ένα εύρος τιμών σε κάθε παράμετρο, από όπου επιλέγεται καταλλήλως ανάλογα με το τι επιδιώκει ο χρήστης.

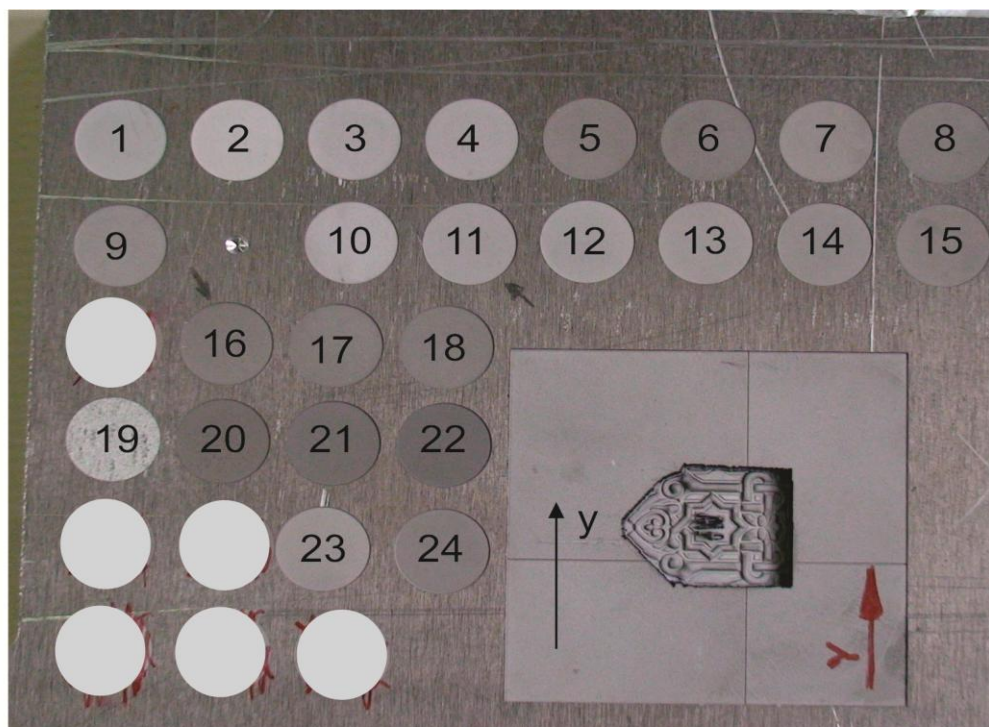
Το εύρος των τιμών για το Al-7075, ήταν οι εξής :

- Συχνότητα 20-50 kHz
- Ταχύτητα χάραξης 200-600 mm/s
- Πάχος στρώματος 2-8 μm

Έτσι, για τη συχνότητα, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 20, 30, 40 και 50 kHz. Για την ταχύτητα χάραξης 200, 400, 500 και 600 mm/s, ενώ το πάχος του υλικού που αφαιρεί το Laser ανά στρώμα, ήταν 2, 4, 6, 8 μm.

Στο σχήμα 4.1, παρουσιάζεται το κομμάτι Al-7075 που χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα, καθώς και οι κυκλικές διατομές που δημιουργήθηκαν ώστε να μετρηθεί η τραχύτητά τους και να

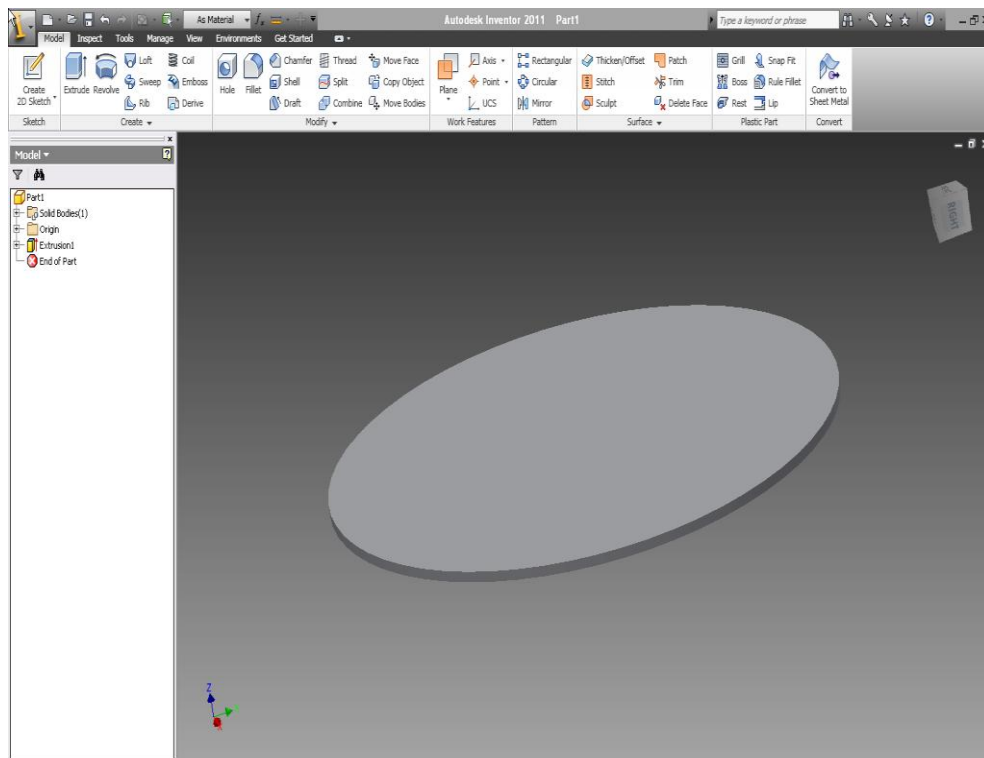
εξαχθούν τα αποτελέσματα για την ποιότητα επιφανείας τους. Σε κάθε κύκλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, έχει δοθεί ένας αριθμός ο οποίος περιλαμβάνει την τριάδα συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του



Θέση μέτρησης	Layer thick(μm)	Συχνότητα(kHz)	Ταχύτητα(mm/s)
1	2	20	500
2	4	20	500
3	6	20	500
4	6	30	600
5	6	40	400
6	6	50	400
7	6	40	500
8	6	50	500
9	2	30	500
10	8	20	500
11	2	40	500
12	2	30	400
13	4	30	400
14	6	30	400
15	8	30	400
16	4	30	500
17	6	30	500
18	8	30	500
19	2	30	200
20	4	30	200
21	6	30	200
22	8	30	200
23	4	40	500
24	8	40	500

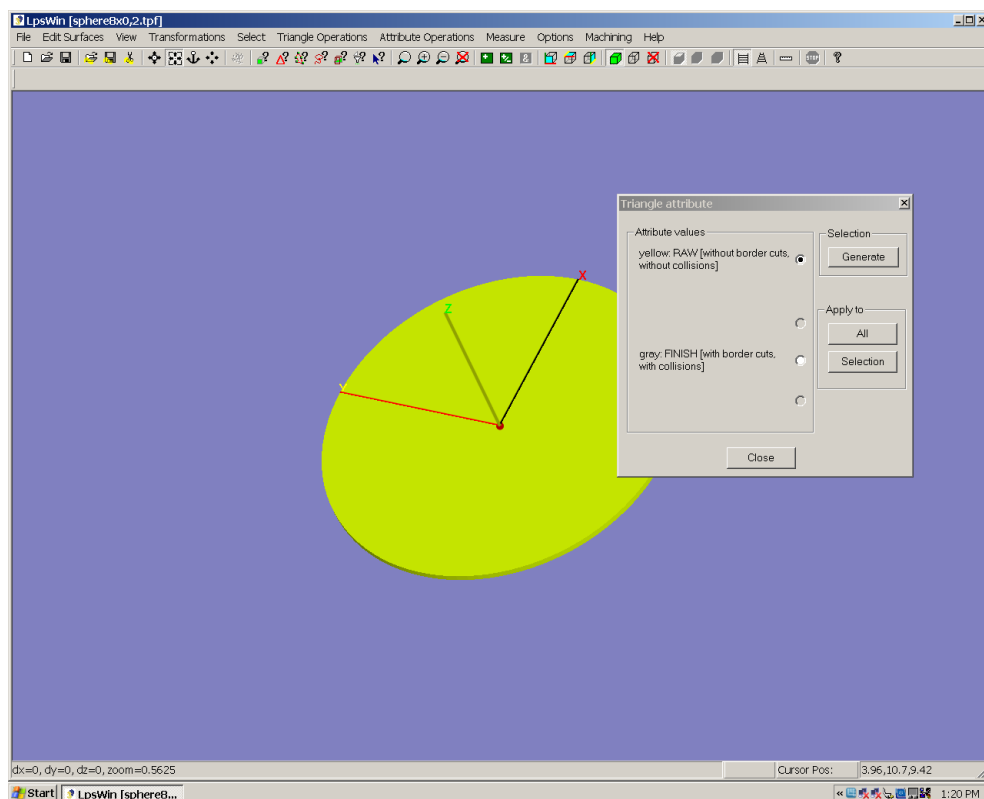
Σχήμα 4.1 : Δημιουργία δειγμάτων κυκλικών διατομών σε Al-7075

Για τη χάραξη των κυκλικών διατομών του σχήματος 4.1, αρχικά, δημιουργήθηκε ένα stl αρχείο με τον όγκο του υλικού που επρόκειτο να αφαιρεθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, με διάμετρο κύκλου 12 mm και βάθος 0,2 mm.

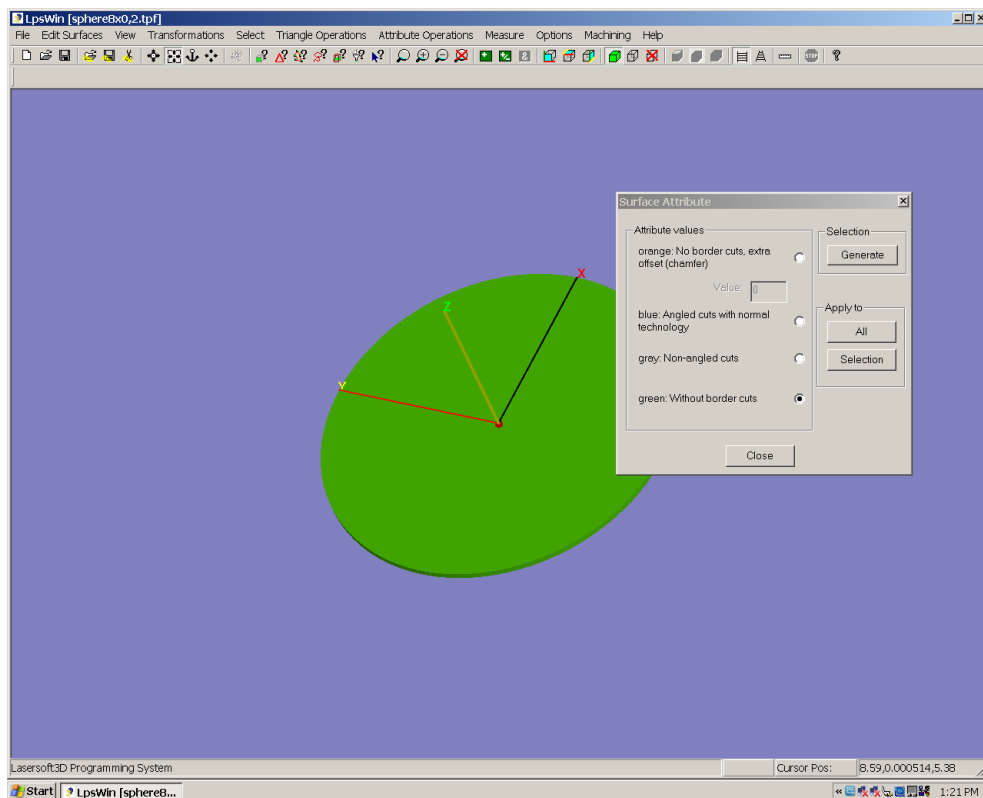


Σχήμα 4.2 : Δημιουργία αρχείου stl

Στη συνέχεια, το αρχείο αυτό φορτώθηκε στον υπολογιστή της Lasertec 40 και συγκεκριμένα στο πρόγραμμα Lrswin. Αρχικά, δόθηκαν τα γνωρίσματα των τριγώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 και εν συνεχεία προσδιορίστηκαν τα γνωρίσματα της επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.

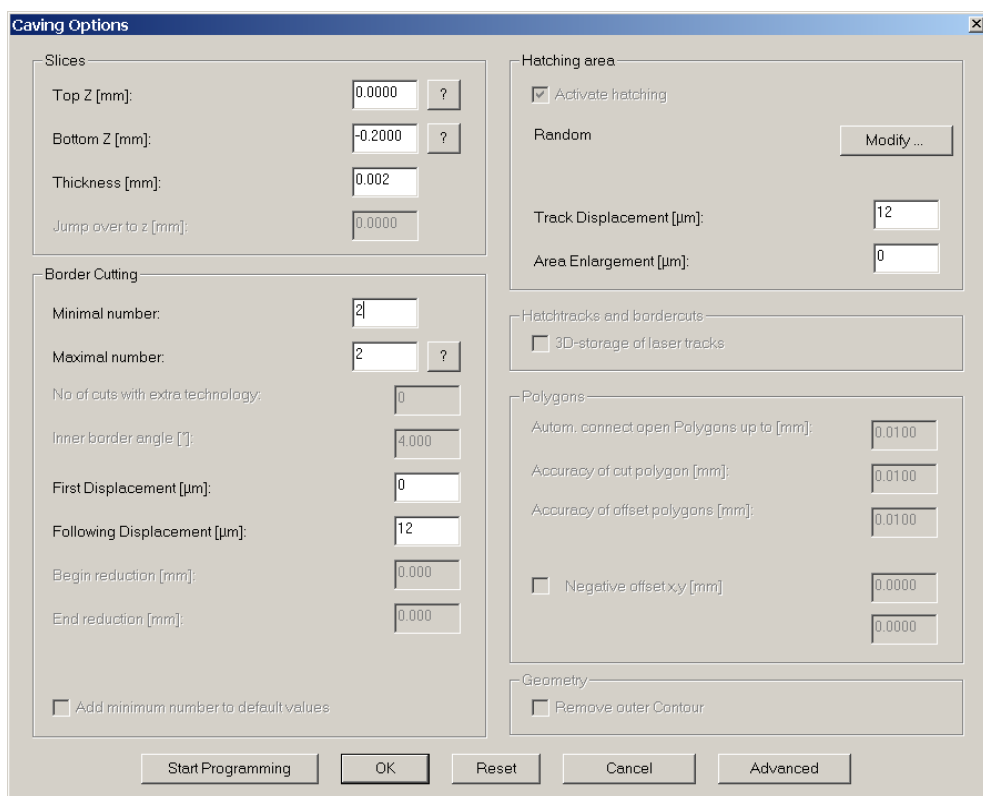


Σχήμα 4.3 : Γνωρίσματα των τριγώνων

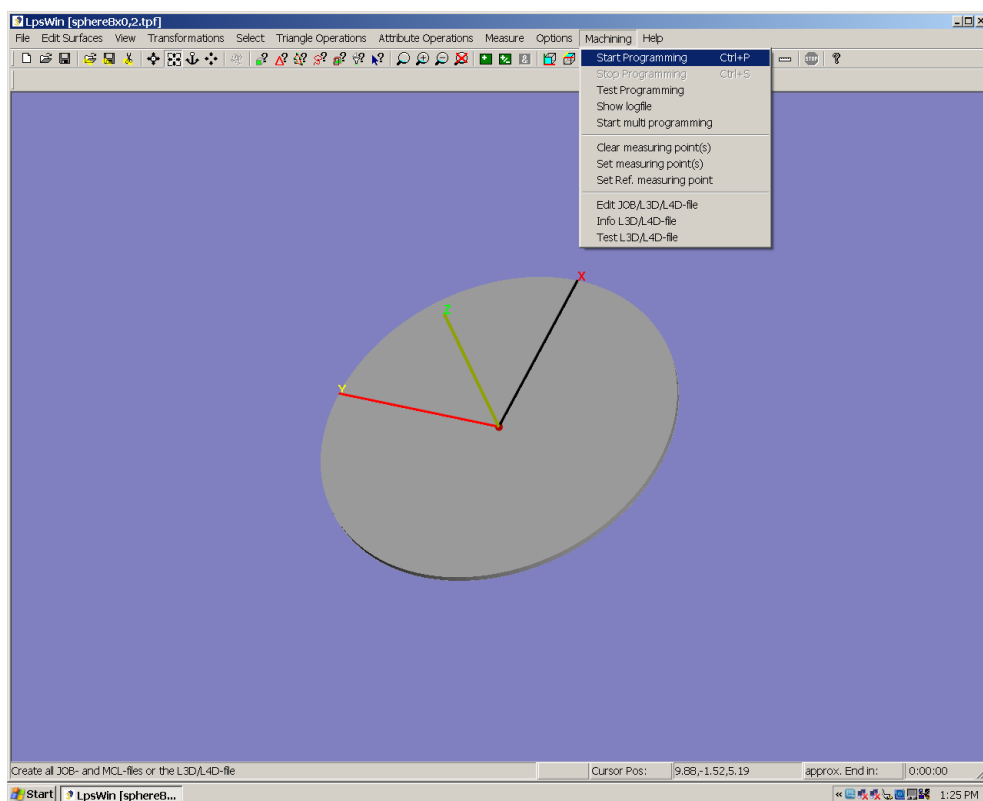


Σχήμα 4.4 : Γνωρίσματα επιφάνειας

Από την επιλογή *caving* και στο κελί *Thickness (mm)*, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, επιλέχθηκε το πάχος που θα αφαιρεί το Laser ανά στρώμα και στη συνέχεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6, ξεκίνησε η διαδικασία της στρωματοποίησης με την επιλογή *start programming*.



Σχήμα 4.5 : Επιλογή πάχους στρώματος



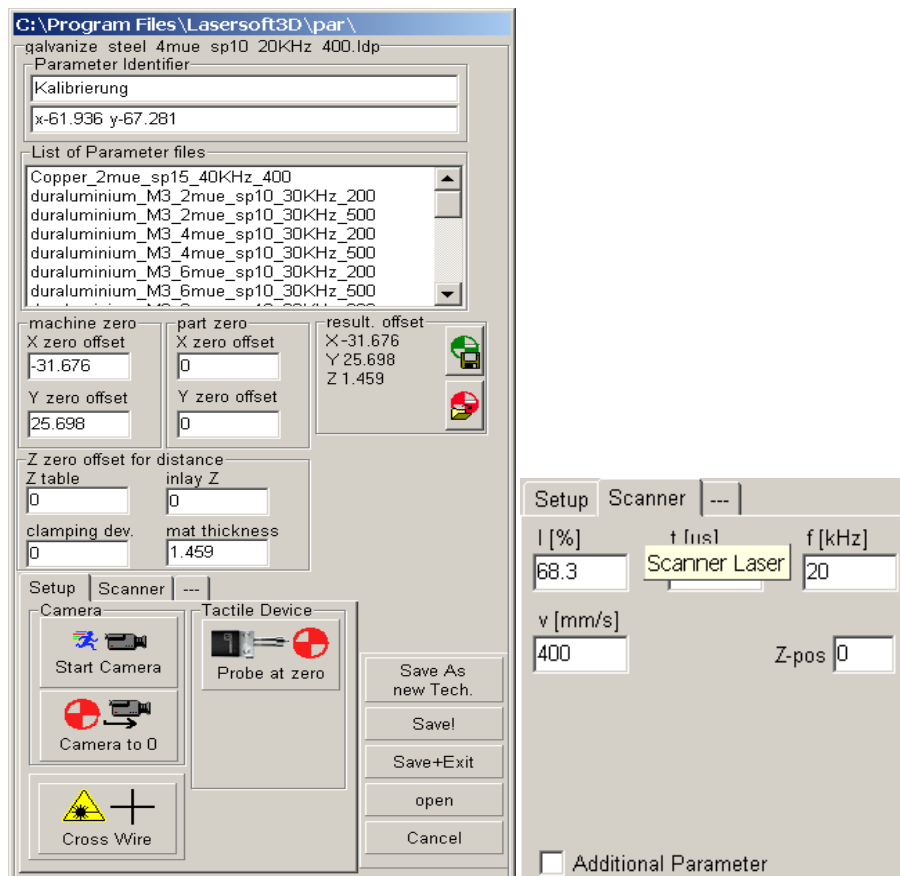
Σχήμα 4.6 : Διαδικασία στρωματοποίησης

Η διαδικασία στρωματοποίησης πραγματοποιήθηκε τέσσερις φορές, διατηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους που ρυθμίστηκαν την πρώτη φορά στο Lpswin και αλλάζοντας μόνο το πάχος που θα αφαιρούσε το Laser ανά στρώμα. Τα πάχη που χρησιμοποιήθηκαν, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.1, ήταν 2, 4, 6 και 8 μm .

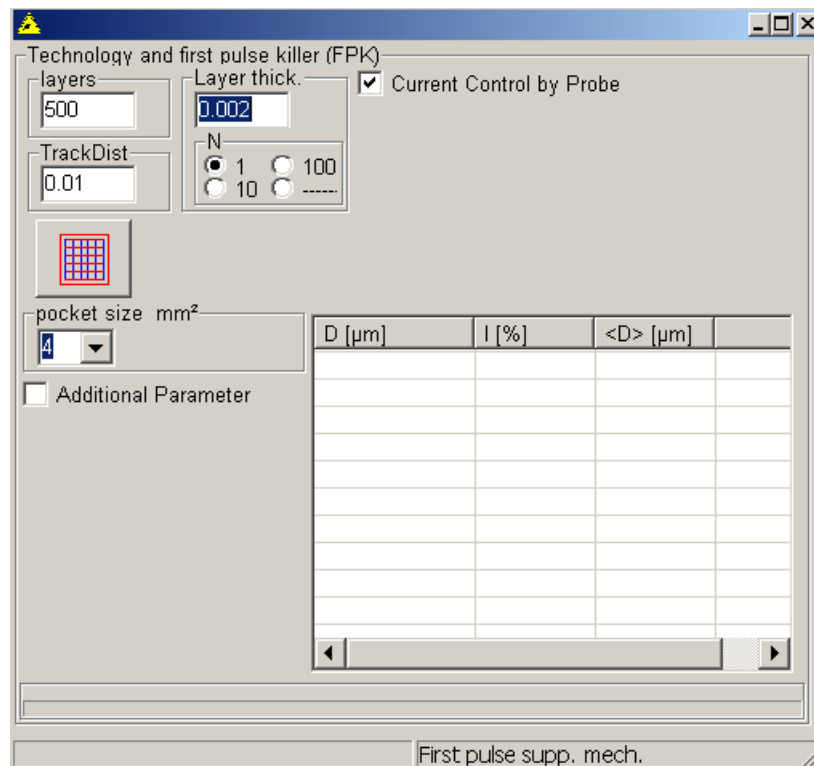
Το Laser αφαιρώντας 2 μm ανά στρώμα, το σύνολο των στρωμάτων που έπρεπε να αφαιρέσει για να επιτευχθεί βάθος 200 μm , ήταν 100 στρώματα, για 4 μm 50, για 6 μm 32 και για 8 μm 25. Όπως ήταν φυσικό, στην περίπτωση των 2 μm ανά στρώμα, ο χρόνος που απαιτούνταν από την μηχανή για τη δημιουργία της κυκλικής διατομής, ήταν ο πιο μεγάλος από τους υπόλοιπους, ενώ για 8 μm ο μικρότερος.

Έχοντας ετοιμάσει τα αρχεία προς επεξεργασία, το επόμενο βήμα ήταν ο προσδιορισμός της ισχύος που με την οποία θα πραγματοποιούνταν η χάραξη για κάθε περίπτωση, καθώς και ο προσδιορισμός της θέσης όπου θα πραγματοποιούνταν η χάραξη. Επόμενο βήμα λοιπόν, αποτέλεσε η χρήση του προγράμματος Lasersoft3D για την επίτευξη των δύο παραπάνω ενεργειών.

Για κάθε συνδυασμό των τιμών της συχνότητας, της ταχύτητας χάραξης και του πάχους στρώματος που χρησιμοποιούνταν, απαιτούνταν υπολογισμός της ισχύος που θα χρησιμοποιούσε η μηχανή. Αρχικά, ορίζονταν οι τιμές για τη συχνότητα και την ταχύτητα χάραξης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.7](#), ενώ στη συνέχεια από το παράθυρο του [σχήματος 4.8](#), επιλέγονταν το πάχος στρώματος και ξεκινούσε η διαδικασία σύμφωνα με την οποία η μηχανή υπολόγιζε αυτόματα την ισχύ και γινόνταν αποθήκευση αυτής, για τις τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων που ορίστηκαν. Η διαδικασία επαναλήφθηκε 24 φορές, όσοι και οι συνδυασμοί των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.



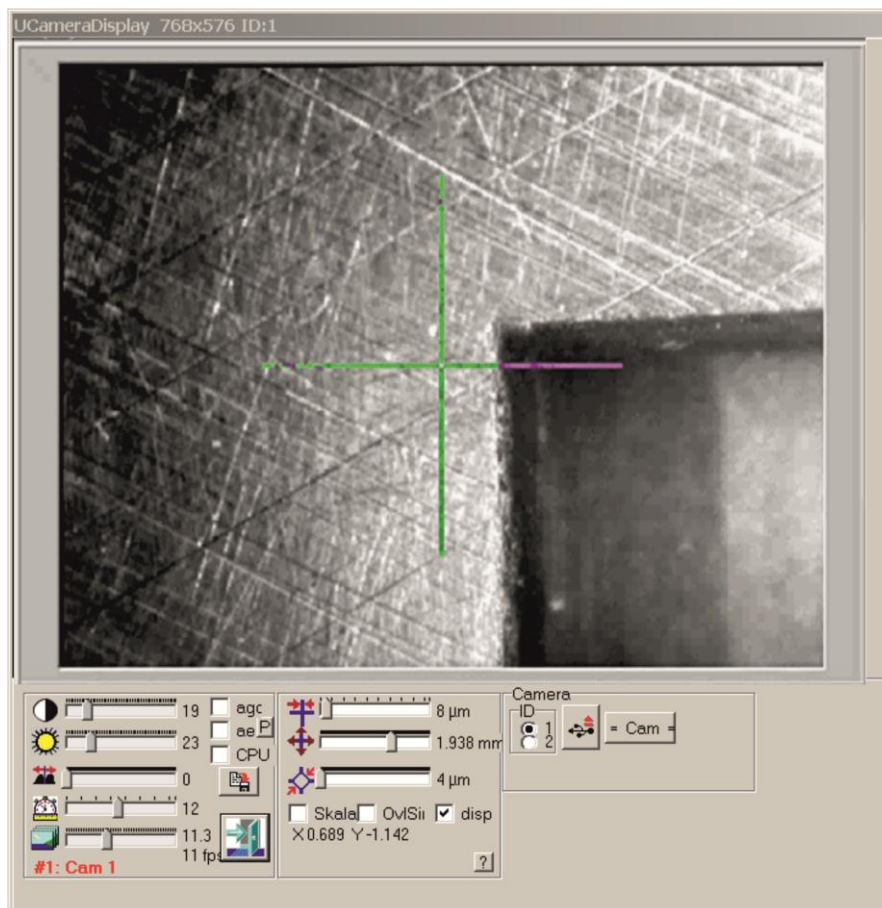
Σχήμα 4.7 : Επιλογή παραμέτρων συχνότητας και ταχύτητας χάραξης



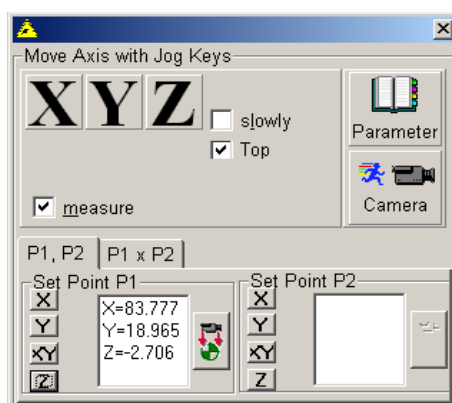
Σχήμα 4.8 : Επιλογή πάχους στρώματος και εκκίνηση διαδικασίας υπολογισμού ισχύος

Μετά το τέλος της διαδικασίας υπολογισμού της ισχύος για όλες τους συνδυασμούς των παραμέτρων, η διαδικασία είχε ολοκληρωθεί και η χάραξη των διατομών μπορούσε να ξεκινήσει.

Σε κάθε περίπτωση χάραξης, από το σχήμα 4.7, με την εντολή *start camera* εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 4.9, από όπου επιλέγονταν η θέση χάραξης της κυκλικής διατομής και αποθηκεύονταν οι συντεταγμένες αυτής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10.

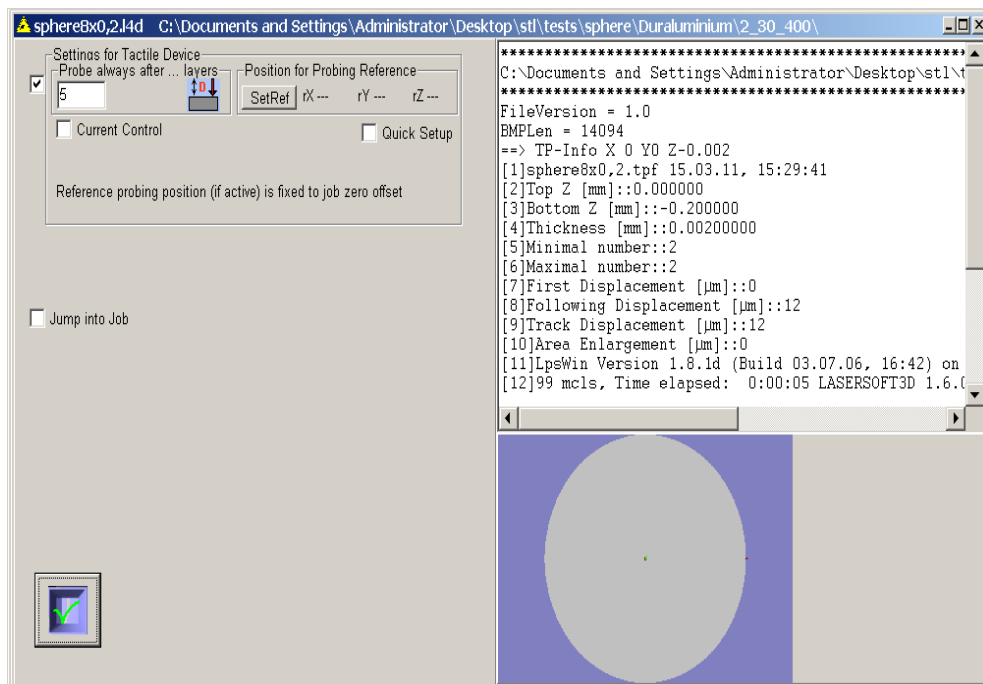


Σχήμα 4.9 : Επιλογή του σημείου για την πραγματοποίηση της χάραξης



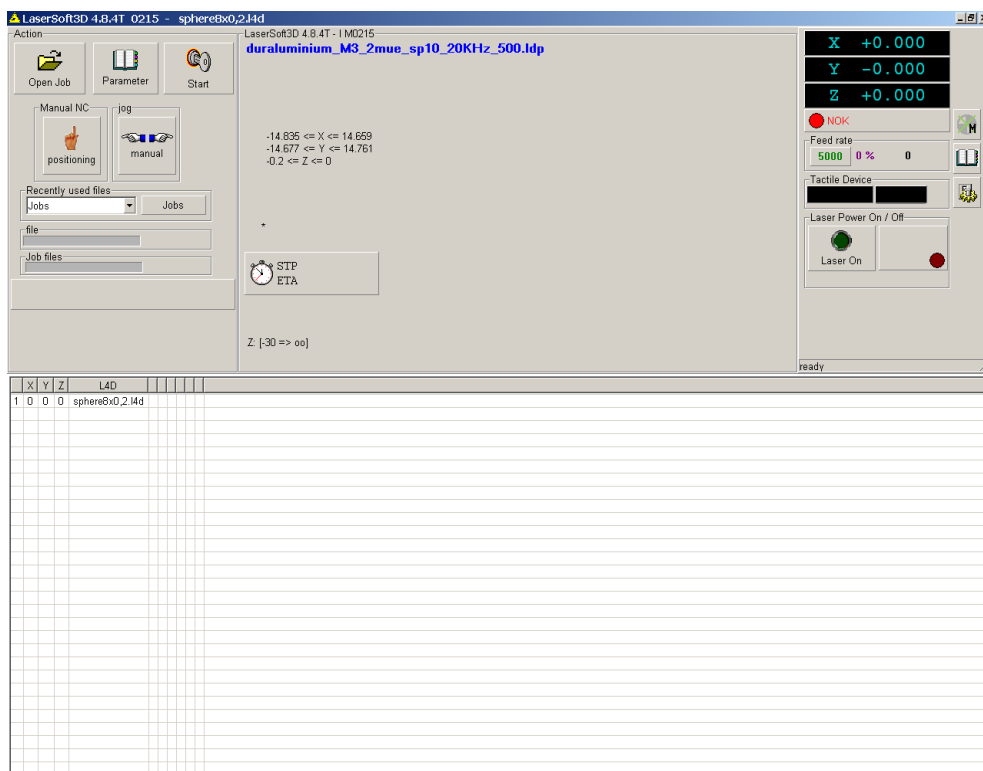
Σχήμα 4.10 : Αποθήκευση συντεταγμένων σημείου

Μετά και την επιλογή της θέσης χάραξης, από το σχήμα 4.7 και το *List of Parameter files*, επιλέγεται το αρχείο με τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν και την ισχύ που αντιστοιχεί σε αυτές, όπως υπολογίστηκε από προηγούμενη διαδικασία και εν συνεχεία φορτώνεται το αρχείο χάραξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 : Φόρτωση αρχείου

Με τη φόρτωση του αρχείου, εμφανίζεται η εικόνα του σχήματος 4.12 και με την επιλογή *Laser on* και εν συνεχεία *start*, ξεκινάει η διαδικασία χάραξης από τη μηχανή.



Σχήμα 4.13 : Εκκίνηση διαδικασίας

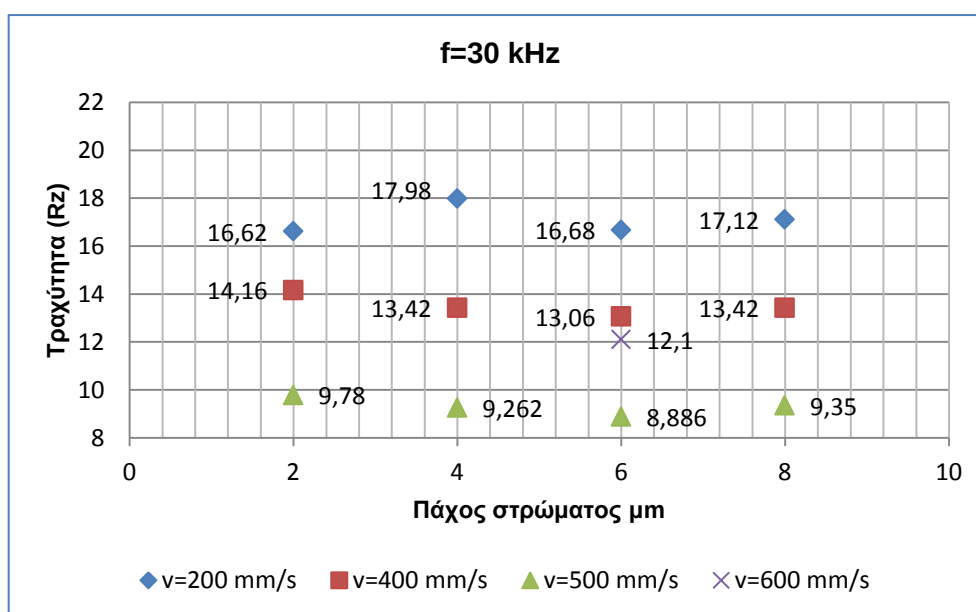
Ξεκινώντας την πειραματική διαδικασία, επιλέχθηκε η συχνότητα να διατηρηθεί σταθερή στα 30 kHz και να μεταβάλλεται η ταχύτητα και το πάχος στρώματος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14.

Ταχύτητα (mm/s)	Συχνότητα (kHz)	Πάχος στρώματος (μm)	Μέση τραχύτητα (Rz)
200	30	2	16,62
200	30	4	17,98
200	30	6	16,68
200	30	8	17,12
400	30	2	14,16
400	30	4	13,42
400	30	6	13,06
400	30	8	13,42
500	30	2	9,78
500	30	4	9,262
500	30	6	8,886
500	30	8	9,35
600	30	6	12,1

Σχήμα 4.14 : Πίνακας παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και μέσης τραχύτητας που βρέθηκε

Αρχικά, χαράχθηκαν κυκλικές διατομές για ταχύτητα 200 mm/s και για πάχος στρώματος 2,4,6,8 μm. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για 400 και 500 mm/s, με τα ίδια πάχη στρώματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας κάθε κυκλικής διατομής. Για κάθε περίπτωση, πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις και στη συνέχεια εξήχθη ο μέσος όρος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14.

Στο σχήμα 4.15, για τις παραμέτρους σχήματος 4.14, παρουσιάζεται το πάχος στρώματος σε συνάρτηση με το μέσο όρο τραχύτητας.



Σχήμα 4.15 : Πάχος στρώματος συνάρτηση της τραχύτητας για f=30 kHz

Για ταχύτητα 200 mm/s, παρουσιάζεται αύξηση της τραχύτητας, καθώς το πάχος στρώματος αυξάνει από 2 σε 4 μm , στη συνέχεια μείωση μέχρι τα 6 μm , για να αυξηθεί πάλι μέχρι τα 8 μm . Η μέγιστη τιμή της τραχύτητας, σε αυτή την ταχύτητα, παρουσιάζεται σε πάχος στρώματος 4 μm .

Στην καμπύλη για ταχύτητα 400 mm/s, η μέγιστη τιμή της τραχύτητας παρουσιάζεται για πάχος στρώματος 2 μm . Από εκεί και μέχρι τα 6 μm , η τιμή της τραχύτητας μειώνεται, ενώ στη συνέχεια και μέχρι τα 8 μm αυξάνεται.

Για ταχύτητα 500 mm/s, η τιμή της τραχύτητας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.3, παρουσιάζει μείωση από τα 2 μm , όπου έχουμε και τη μέγιστη τραχύτητα για αυτή την περίπτωση, μέχρι τα 6 μm . Στη συνέχεια, αυξάνεται μέχρι τα 8 μm .

Συγκρίνοντας κάθε πάχος στρώματος με το αντίστοιχό του, σε κάθε ταχύτητα του σχήματος 6.3, παρατηρείται ότι η καμπύλη για ταχύτητα 500 mm/s, εμφανίζει μικρότερες τιμές τραχύτητας, για όλα τα πάχη στρώματος, από καμπύλες των άλλων δύο ταχυτήτων. Από αυτό συμπεραίνεται πως για συχνότητα 30 kHz, η βέλτιστη επιλογή ταχύτητας φαίνεται να είναι 500 mm/s. Επίσης, στη συγκεκριμένη ταχύτητα, παρατηρείται πως για πάχος στρώματος 6 μm , έχουμε τη μικρότερη τιμή της τραχύτητας από τα υπόλοιπα πάχη στην ίδια ταχύτητα.

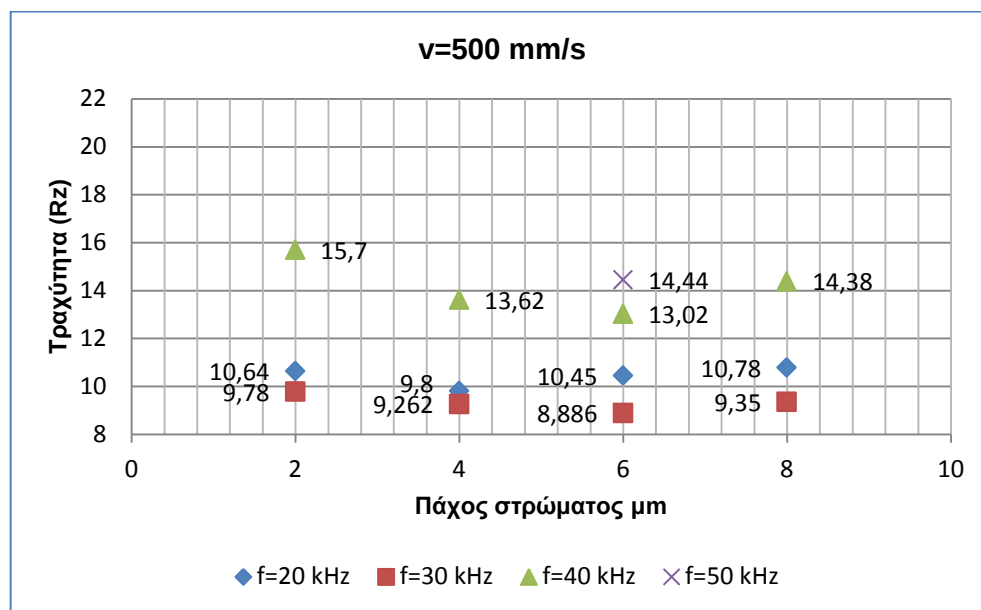
Για να αποδειχθεί πως η τραχύτητα δεν αλλάζει αυξάνοντας την ταχύτητα στα 600 mm/s, κρατώντας σταθερή στην ίδια τιμή τη συχνότητα, δηλαδή στα 30 kHz και το πάχος στρώματος στα 6 μm , όπου βρέθηκε η ελάχιστη τιμή τραχύτητας, αυξάνουμε την ταχύτητα σε 600 mm/s και μετράμε την τραχύτητα της επιφάνειας που χαράχθηκε. Ο μέσος όρος τραχύτητας που βρέθηκε ύστερα από πέντε μετρήσεις ήταν 12,1, τιμή μεγαλύτερη από το 8,886. Επομένως, για $V=500$ mm/s και πάχος στρώματος 6 μm σε συχνότητα 30 kHz, έχουμε τη βέλτιστη επιλογή παραμέτρων, καθώς με αυτό το συνδυασμό εμφανίζεται η μικρότερη τραχύτητα επιφανείας και επομένως έχουμε βέλτιστη ποιότητα αυτής.

Ωστόσο, η παραπάνω βέλτιστη επιλογή ταχύτητας και πάχους στρώματος, βρέθηκε κρατώντας σταθερή τη συχνότητα. Θα πρέπει λοιπόν να εξεταστεί, τι συμβαίνει με την τραχύτητα μεταβάλλοντας και τη συχνότητα. Για το λόγο αυτό, παραμένει η βέλτιστη ταχύτητα που βρέθηκε σταθερή, δηλαδή 500 mm/s και μεταβάλλονται οι τιμές τις συχνότητας και του πάχους στρώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16.

Ταχύτητα (mm/s)	Συχνότητα (kHz)	Πάχος στρώματος (μm)	Μέση τραχύτητα (Rz)
500	20	2	10,64
500	20	4	9,8
500	20	6	10,45
500	20	8	10,78
500	30	2	9,78
500	30	4	9,262
500	30	6	8,886
500	30	8	9,35
500	40	2	15,7
500	40	4	13,62
500	40	6	13,02
500	40	8	14,38
500	50	6	14,44

Σχήμα 4.16 : Πίνακας παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν και μέσης τραχύτητας

Στο σχήμα 4.17, για τις παραμέτρους του σχήματος 4.16, παρουσιάζεται το πάχος στρώματος συνάρτηση της τραχύτητας.



Σχήμα 4.17 : Πάχος στρώματος συνάρτηση της τραχύτητας για $V=500 \text{ mm/s}$

Με αύξηση της συχνότητας από 30 σε 40 kHz, η τραχύτητα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.5 για όλα τα πάχη στρώματος, αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό. Αύξηση παρατηρείται και με μείωση της συχνότητας από 30 σε 20 kHz.

Για την καμπύλη των 40 kHz, η τραχύτητα έχει την υψηλότερη τιμή της για πάχος στρώματος 2 μm , ενώ μειώνεται για 4 και 6 μm , για να ανέβει ξανά όταν το πάχος γίνει 8 μm .

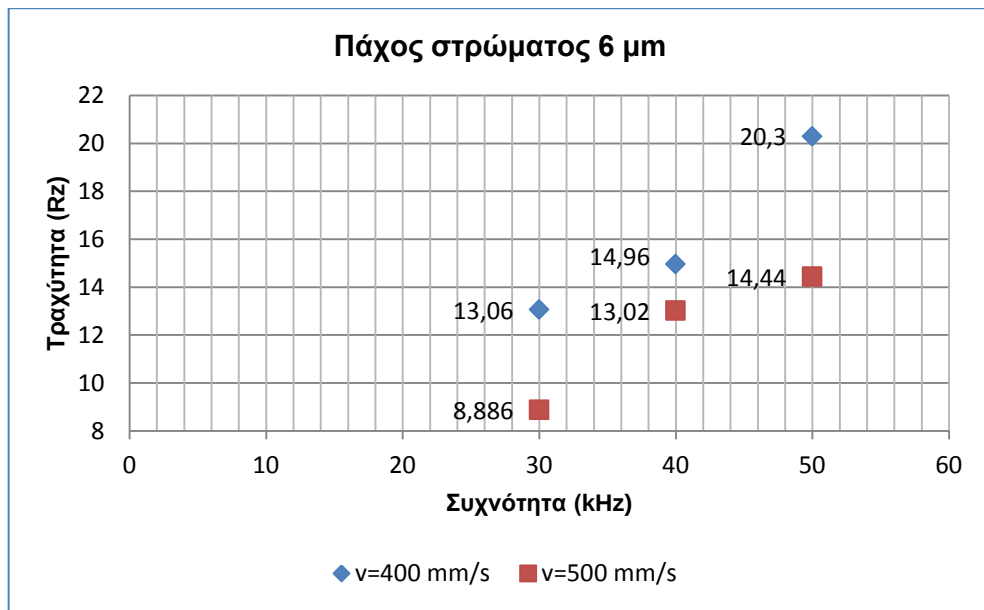
Στην καμπύλη των 20 kHz, η μέγιστη τιμή της τραχύτητας βρίσκεται για πάχος στρώματος 8 μm . Ξεκινώντας από τα 2 μm και φτάνοντας στα 4 μm , η τραχύτητα μειώνεται. Από και πέρα μέχρι τα 8 μm , όπου έχουμε και τη μέγιστη τιμή της, η τραχύτητα αυξάνεται.

Στην καμπύλη των 30 kHz, η τραχύτητα παρουσιάζεται όπως και στο σχήμα 6.3. Μείωση από τα 2 μm , όπου υπάρχει και η μέγιστη τιμή της, ως τα 6 μm και στη συνέχεια άνοδο μέχρι τα 8 μm .

Όπως και στο σχήμα 6.3, έτσι και εδώ, η καμπύλη για τη συχνότητα των 30 kHz συνεχίζει να παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές τραχύτητας για όλα τα πάχη στρώματος, ενώ παράλληλα το σημείο με $v=500 \text{ mm/s}$, $f=30 \text{ kHz}$ και 6 μm πάχος στρώματος, εξακολουθεί να είναι το βέλτιστο.

Για να επιβεβαιωθεί πως η τραχύτητα στο σημείο αυτό δεν αλλάζει και για τη συχνότητα των 50 kHz, πραγματοποιήθηκε χάραξη κυκλικής διατομής για τις συνθήκες των 500 mm/s, 50 kHz και 6 μm . Στη συνέχεια, μετρήθηκε η τραχύτητα και από των μέσο όρο των 5 μετρήσεων, προέκυψε η τιμή 14,44, η οποία είναι μεγαλύτερη από το 8,886 και άρα το σημείο επιβεβαιώνεται.

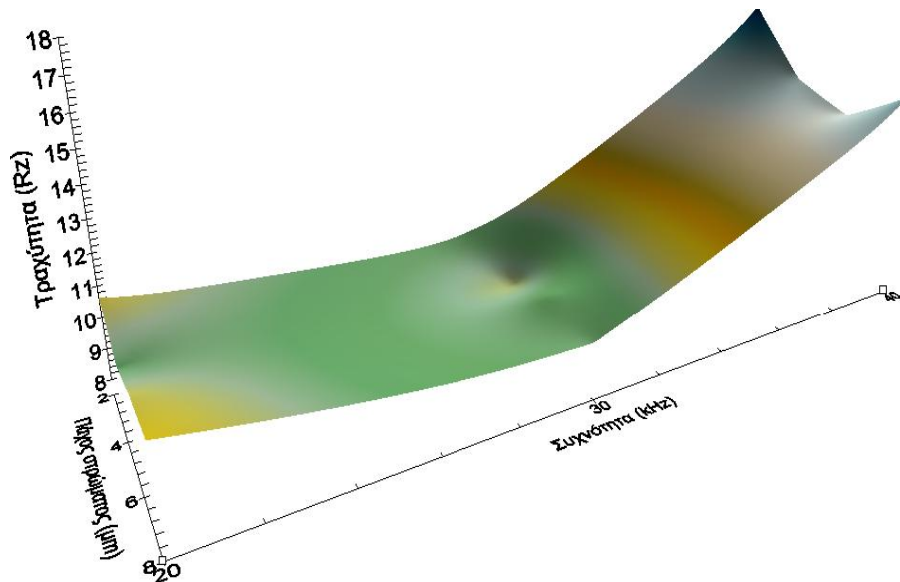
Στο σχήμα 4.18, παρατηρείται η μεταβολή της τραχύτητας για πάχος στρώματος 6 μm , για ταχύτητα χάραξης 400 και 500 mm/s και για συχνότητα 30-40-50 kHz.



Σχήμα 4.18 : Συχνότητα συνάρτηση τραχύτητας για ταχύτητες 400 και 500 mm/s

Και στις δύο περιπτώσεις των ταχυτήτων, παρατηρείται άνοδος της τραχύτητας με αύξηση της συχνότητας. Ωστόσο, για ταχύτητα 400 mm/s, μικρή άνοδος παρατηρείται αυξάνοντας τη συχνότητα από 30 σε 40 kHz και αρκετά μεγαλύτερη από 40 σε 50 kHz. Το αντίθετο συμβαίνει για ταχύτητα 500 mm/s. Μεγάλη άνοδος παρουσιάζεται αυξάνοντας τη συχνότητα από 30 σε 40 kHz και αρκετά μικρή από 40 σε 50 kHz.

Στο σχήμα 4.19, παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της τραχύτητας σε συνάρτηση με τη συχνότητα και το πάχος στρώματος, για ταχύτητα 500 mm/s.



Σχήμα 4.19 : Τρισδιάστατη απεικόνιση τραχύτητας συναρτήσει της συχνότητας και του πάχους στρώματος για $v=500 \text{ mm/s}$

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία, φάνηκε πως η τραχύτητα επιφάνειας, ύστερα από χάραξη με Laser σε Al-7075, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις εκάστοτε συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν.

Κρατώντας σταθερή τη συχνότητα στα 30 kHz και μεταβάλλοντας τις ταχύτητες και τα πάχη στρώματος, βρέθηκε πως αύξηση αυτής προκαλεί μείωση της τραχύτητας σε όλα τα πάχη. Συγκεκριμένα, βρέθηκε πως για ταχύτητα 500 mm/s, υπάρχουν οι μικρότερες τραχύτητες σε όλα τα πάχη, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες για κάθε στρώμα, ενώ παράλληλα για πάχος στρώματος 6 μm , βρίσκεται η ελάχιστη τραχύτητα επιφανείας.

Έχοντας βρει τη βέλτιστη ταχύτητα, στη συνέχεια μελετάται η τραχύτητα μεταβάλλοντας τη συχνότητα και κρατώντας σταθερή την ταχύτητα που βρέθηκε ως βέλτιστη. Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως η καμπύλη με συχνότητα 30 kHz, συνεχίζει να έχει μικρότερες τραχύτητες σε όλα τα πάχη, ακόμα και με αλλαγή των συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια με παραμέτρους $v=500\text{ mm/s}$, $f=30\text{ kHz}$ και 6 μm πάχος συνεχίζει να αποτελεί την επιφάνεια με τη βέλτιστη ποιότητα.

Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι πως η βέλτιστη ποιότητα επιφανείας για χάραξη με Yb:YAG Laser μήκους κύματος 1070 nm, σε Al-7075, επιτυγχάνεται με τον εξής συνδυασμό τιμών των παραμέτρων :

- Ταχύτητα χάραξης : $v=500\text{ mm/s}$
- Συχνότητα : $f=30\text{ kHz}$
- Πάχος στρώματος : 6 μm

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. B. Narendra, Dahotre, Sandip P Harimkar. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. Springer, 2008.
2. Hiroaki Misawa, Saulius Juodkazis. *3D Laser Microfabrication*. WILEY_VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
3. John F. Ready, Dave F. Farson. *LIA HANDBOOK OF LASER MATERIALS PROCESSING*. 1st ed. Laser Institute of America Magnolia Publishing, 2001.
4. J. Qi, K.L.Wang, Y.N. Zhu. *A study on the Laser marking process of stainless steel*. Journal of Materials Technology 139 (2003), 273-276.
5. Cheng-Jung Lin, Yi-Chung Wang, Lang-Dong Lin, Chyi-Rong Chiou, Ya-Nan Wang και Ming-Jer Tsai. *Effects of feed ratio and Laser power on engraved depth and color differences of Moso bamboo lamina*. Journal of Materials Processing Technology 198 (2008), 419-425.
6. C. Leone, V. Lopresto και I. De Iorio. *Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd:YAG green Laser*. Optics and Laser in Engineering 47 (2009), 161-168.
7. S. Genna, C. Leone, V. Lopresto, L.Santo, F. Trovalusci. *STUDY OF FIBRE LASER MACHINING OF C45 STEEL : INFLUENCES OF PROCESS PARAMETERS ON MATERIAL REMOVAL RATE AND ROUGHNESS*. Int J Mater Form (2010) Vol 3, 1115-1118.
8. P.M. Harrison, J. Wendland και M. Henry. *LASER ENGRAVING REFLECTIVE METALS TO CREATE SCANNER READABLE BARCODES*. Paper P515.
9. C. Leone, S. Genna, G. Caprino, I. De Iorio. *AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG Laser*. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010), 1297-1303.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ