

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΜΕ LASER ΤΟΥ AL7075-T651



**Καθ. Αριστομένης Αντωνιάδης**  
**Διπλ. Μηχ. (Msc) Αντώνης Λυρώνης**

**Κωνσταντίνος**  
**Χριστοδουλόπουλος**

Πολυτεχνείο Κρήτης – Χανιά 2016

2016

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΣΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΜΕ LASER ΤΟΥ AL7075-T651



<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΣΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΜΕ LASER ΤΟΥ AL7075-T651

- Φυσική και ιδιότητες laser
- Χάραξη με laser
- Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής Lasertec40
- Στόχος της εργασίας και Kerf
- Πειραματική Διαδικασία
- Αποτελέσματα
- Συμπεράσματα



2016



Δομή παρουσίασης

<http://www.m3.tuc.gr>



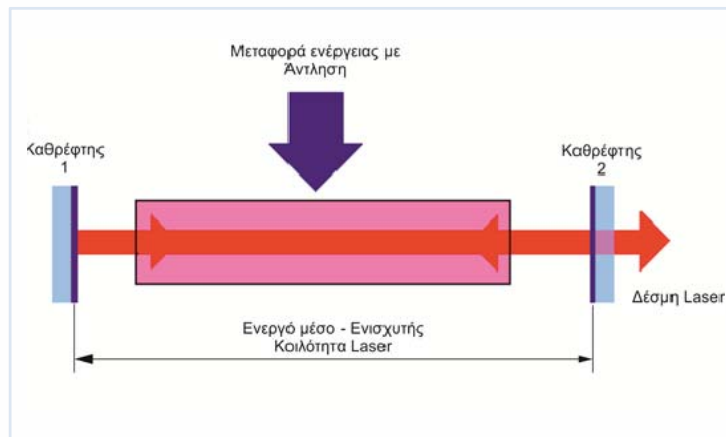
School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



#### Τα κύρια μέρη του laser:

1. Λυχνία ανάφλεξης
2. Ενισχυτής
3. Καθρέφτες αντανάκλασης



- Το ενεργό υλικό αντλεί ενέργεια από μία εξωτερική πηγή, ηλεκτρική ή φωτεινή, όπως λυχνία έκλαμψης ή άλλη πηγή laser.
- Η εξερχόμενη και κατά πολύ ενισχυμένη ακτινοβολία από τον ενισχυτή δέσμης προσκρούει πάνω στον καθρέφτη 2 και το 2% περνά διαμέσου αυτού (Δέσμη του laser).
- Η ακτινοβολία που δε διαπερνά, επιστρέφει και ενισχύεται εκ νέου από το ενεργό μέσο.
- Έπειτα ανακλάται στον καθρέφτη 1 ολικά και ακολουθεί την ίδια διαδρομή.

2016



#### Φυσική του laser

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Οι **ιδιότητες του laser** είναι:

- **Μονοχρωματικότητα:** ένα χρώμα, ένα μόνο μήκος κύματος.
- **Κατευθυντικότητα:** η εξερχόμενη δέσμη από τη συσκευή Laser έχει μια πορεία συγκεκριμένης κατεύθυνσης.
- **Συμφασικότητα:** κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να περιγραφεί ως το άθροισμα – συνισταμένη ημιτονοειδών κυμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο:  $y = A \cos(\omega t + \phi)$ .

Τα **είδη των laser** χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες με βάση το ενεργό υλικό:

- **Αέρια laser:**
  1. Ατομικά (He-Ne και He-Cd)
  2. Ατόμων μετάλλου (Cu, Au)
  3. Μοριακά (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)
  4. Ιοντικά (Ar<sup>+</sup>, Kr<sup>+</sup>)
- **Υγρά laser,** όπου το ενεργό υλικό είναι διάλυμα μεγάλων οργανικών μορίων χρωστικών διαλυμένων σε υγρούς διαλύτες (μεθανόλη, αιθελνογλυκόλη, διοξάνη, κ.λπ.)
- **Στερεά laser:**
  1. Μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη, σαπφείρου)
  2. Ημιαγωγών (διόδων)
- **Ειδικά laser** (Ακτίνες X και ελεύθερου ηλεκτρονίου)

2016



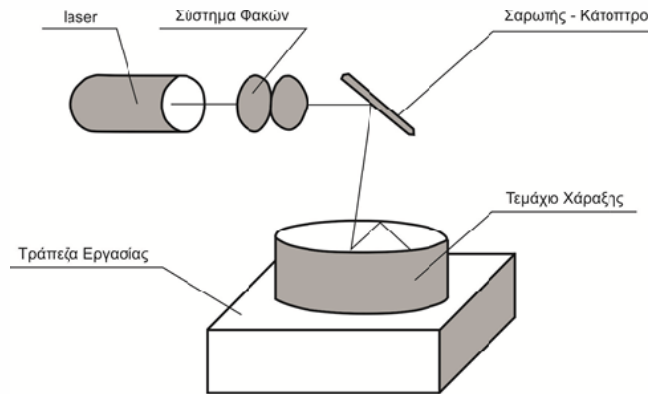
#### Ιδιότητες και είδη του Laser

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Η **χάραξη επιφάνειας με laser** είναι τεχνική χάραξης στην επιφάνεια αντικειμένου με μηχανήμα laser. Η μηχανή laser παράγει μία δέσμη φωτός, η οποία με συγκεκριμένη τάση καταφέρνει να χαράζει με τεράστια ακρίβεια την επιφάνεια του αντικειμένου χωρίς να υπάρχει φόβος να καταστρέψει το εσωτερικό του. Το σημαντικότερο από όλα είναι ότι δεν υπάρχουν τοξικά που να είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο ή το περιβάλλον.



#### Πλεονεκτήματα χάραξης με laser

- Επεξεργασία χωρίς επαφή με το υλικό, ελάχιστη παραμόρφωση του υλικού.
- Χάραξη σε διαφορετικού τύπου υλικών.
- Υψηλή ακρίβεια προσδιορισμού θέσης και ακρίβεια επανάληψης διαστάσεων και σχεδίων.
- Υπάρχει ευελιξία στην αλλαγή διαστάσεων.
- Ελάχιστη θερμική καταπόνηση στα σημεία κοπής.
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος συντήρησης.
- Σαφής, μόνιμη και όμορφη χάραξη.
- Μακράς διάρκειας απόδοση χωρίς τοξικά επιβλαβή για την υγεία ή το περιβάλλον.
- Φιλικό περιβάλλον διεπαφής.



#### Χάραξη με laser

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Τα **είδη χάραξης** διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Διανυσματική χάραξη (Vector Engraving)**  
Το laser ακολουθεί τις γραμμές του σχεδίου και χαράσσει το υλικό. Το πάχος της χάραξης είναι περίπου 0.2mm, με δυνατότητα αύξησης.
- **Χάραξη τύπου Raster (Raster engraving)**  
Κατά τη χάραξη, η κεφαλή του laser κινείται αριστερά – δεξιά, προχωρώντας από πάνω προς τα κάτω στο υλικό.

#### Υλικά που μπορούν να χαραχθούν με laser:

- Κεραμικά και πορσελάνες
- Ξύλο
- Δέρμα
- Καουτσούκ
- Υάλους και κρύσταλλα
- Μέταλλα και κράματα μετάλλου
- Χαρτί – Χαρτόνι
- Πλεξιγκλάς

#### Εφαρμογές χάραξης με laser

- **Εικαστικού χαρακτήρα**  
Χάραξη σε μπρελόκ, αναπτήρες, τρόπαια, βραβεία, κοσμήματα.
- **Μηχανολογικού χαρακτήρα**  
Δημιουργία καλουπιών, χάραξη πληροφοριών σε αντικείμενα.



#### Είδη χάραξης, υλικά που μπορούν να χαραχθούν και εφαρμογές

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Η **Lasertec40** είναι μια **εργαλειομηχανή CNC**, η οποία χαράσσει με laser στερεής κατάστασης, υπέρυθρης ακτινοβολίας Nd:YAG fibre, ισχύος 20Watt. Το κέντρο κατεργασίας της Lasertec40 είναι 3 γραμμικών και 2 οπτικών αξόνων με αυτοματοποιημένη καθοδήγηση CNC. Ο προγραμματισμός της επιτυγχάνεται με τα προγράμματα καθοδήγησης LpsWin και LaserSoft 3D.

#### Γενικά χαρακτηριστικά Lasertec40

- Τύπος laser: παλμικό fibre με ισχύ 20Watt.
- Διάμετρος ακτίνας laser: 0.04 – 0.1mm.
- 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.
- Control με 32bit επεξεργαστή.
- Μνήμη με σκληρό δίσκο 40Gb.
- Internet Interface.



#### Εργαλειομηχανή DMG Lasertec40

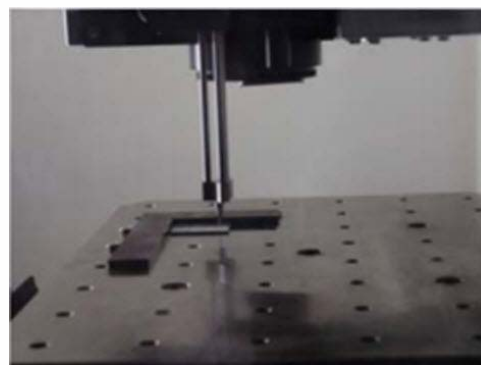
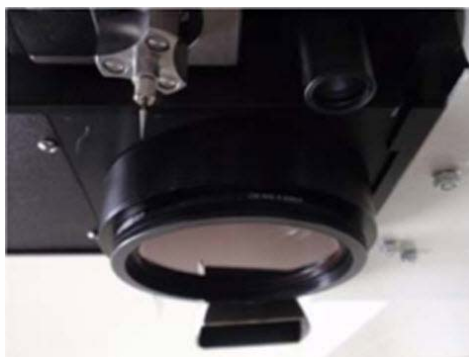
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

- Διαστάσεις τράπεζας: 400 x 300mm
- Μέγιστο φορτίο: 50kg
- Κίνηση τράπεζας στον X άξονα: 400mm
- Κίνηση τράπεζας στον Y άξονα: 300mm
- Κίνηση τράπεζας στον Z άξονα: 500mm



#### Τράπεζα κατεργασίας Lasertec40

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

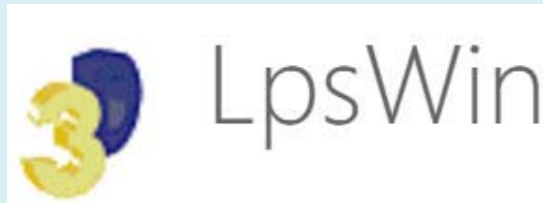
Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

- **LpsWin**

Το LpsWin είναι το λογισμικό, με το οποίο ορίζονται όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις και ρυθμίσεις του τρισδιάστατου αντικειμένου.

- **Lasersoft3D**

Το LaserSoft3D είναι το πρόγραμμα καθοδήγησης της εργαλειομηχανής, μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο κύριος χειρισμός της μηχανής και μέσω αυτού πραγματοποιείται η χάραξη. Δηλαδή, ο χειρισμός της τράπεζας, μηδενισμός στο τεμάχιο, ο ορισμός της ισχύος του laser και των παραμέτρων κοπής.



Προγράμματα χειρισμού της Lasertec40

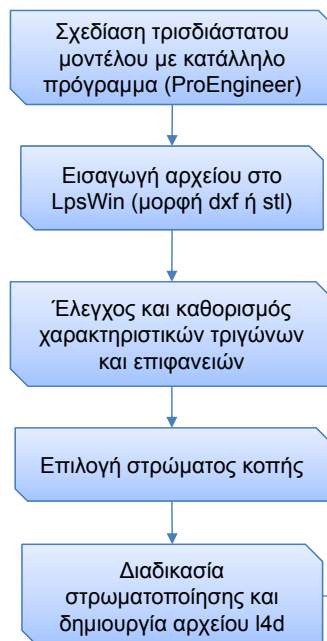
<http://www.m3.tuc.gr>



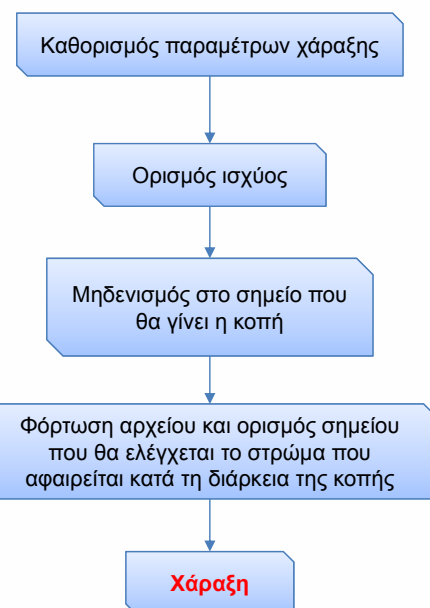
School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

### LpsWin



### Lasersoft3D



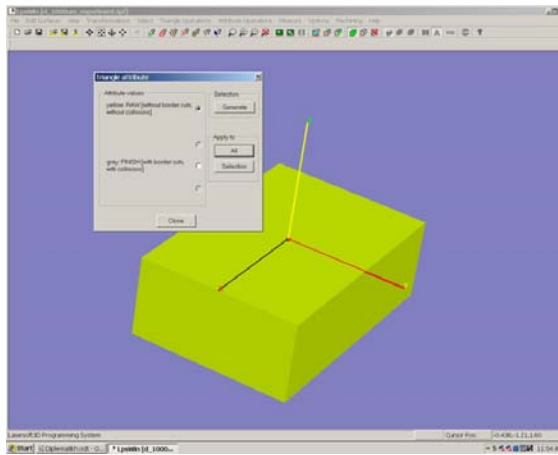
Ακολουθούμενες διαδικασίες στο LpsWin και στο Lasersoft3D

<http://www.m3.tuc.gr>



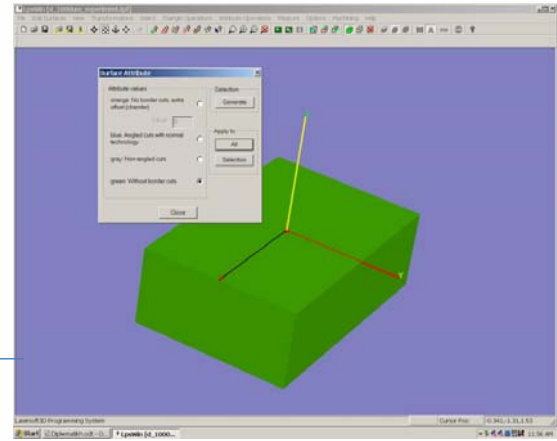
School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



Καθορισμός Χαρακτηριστικών τριγώνων

Καθορισμός Χαρακτηριστικών επιφανειών



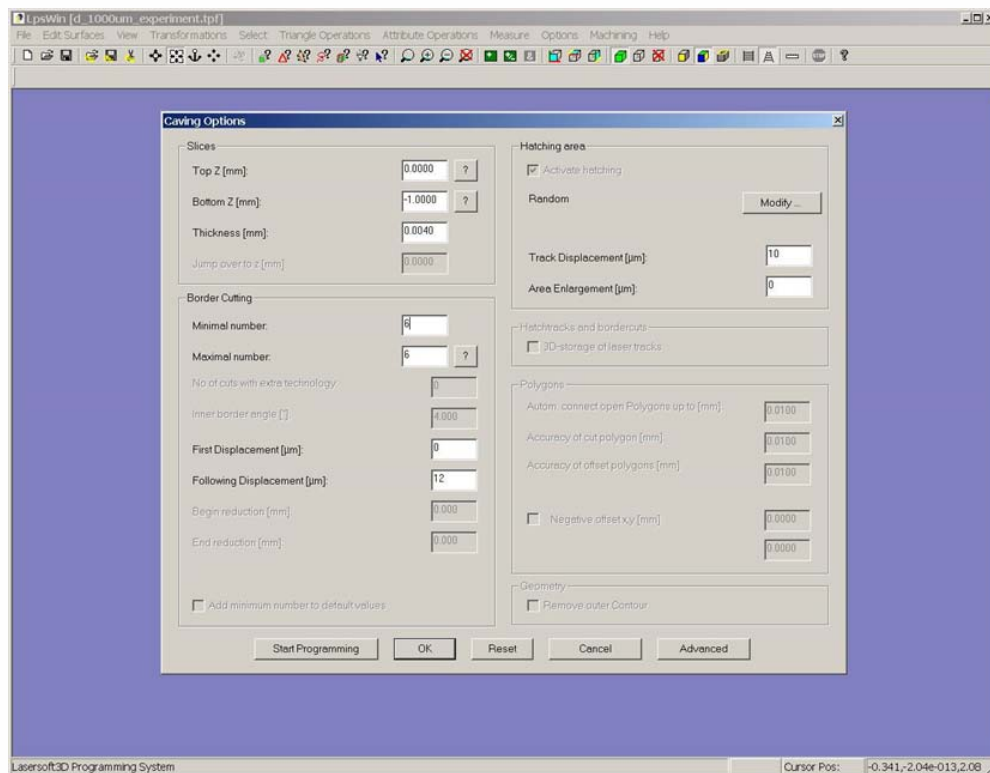
Ρυθμίσεις στο LpsWin

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



Καθορισμός βάθους κοπής στρώματος

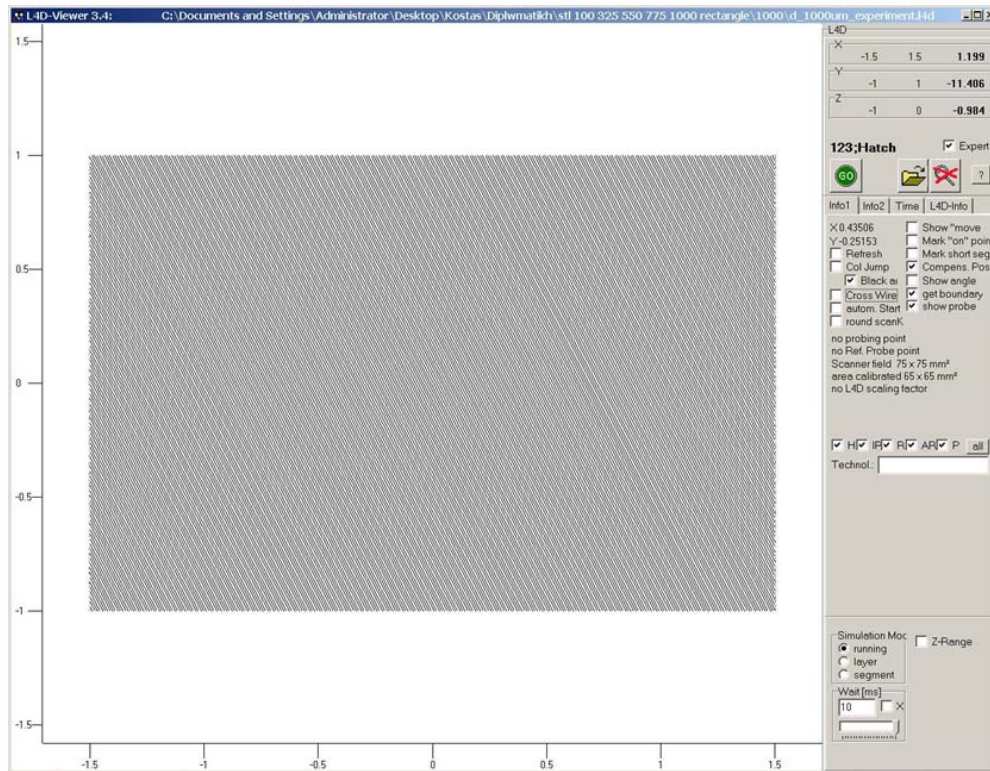
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



Προσομοίωση του αρχείου μέσω του l4d Viewer

<http://www.m3.tuc.gr>

 School of Production Eng. & Management  
 Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
 Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

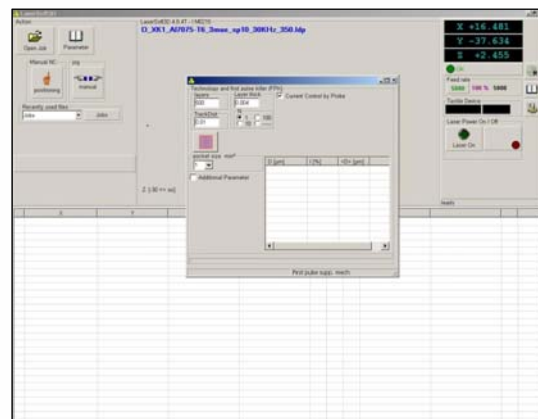
2016

Ο προσδιορισμός της ισχύος καθορίζεται από τη διαδικασία των τεχνολογικών χαρακτηριστικών.

 Τα **τεχνολογικά χαρακτηριστικά** καθορίζονται από τρεις παραμέτρους.

- **Πάχος Στρώματος Κοπής**, Layer Thickness [Μονάδες: mm]
- **Ταχύτητα Χάραξης**, Engraving Speed [Μονάδες: mm/s]
- **Συχνότητα Laser**, Frequency of Laser [Μονάδες: kHz]

Επιλέγονται οι κατάλληλες συνθήκες και καθορίζεται το μέγεθος του τετραγώνου που θα χαραχθεί κατά τον καθορισμό της ισχύος. Το μέγεθος είναι ανάλογο του μεγέθους του αντικειμένου που θα χαραχθεί.



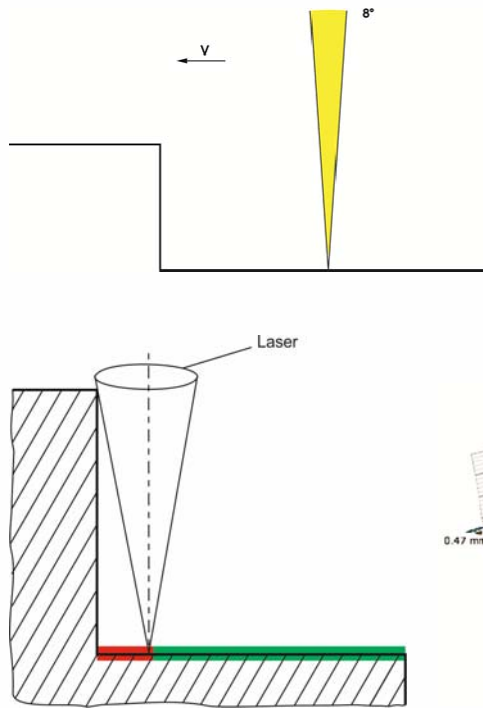
Ορισμός ισχύος της δέσμης του laser

<http://www.m3.tuc.gr>

 School of Production Eng. & Management  
 Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
 Prof. Aristomenis Antoniadis

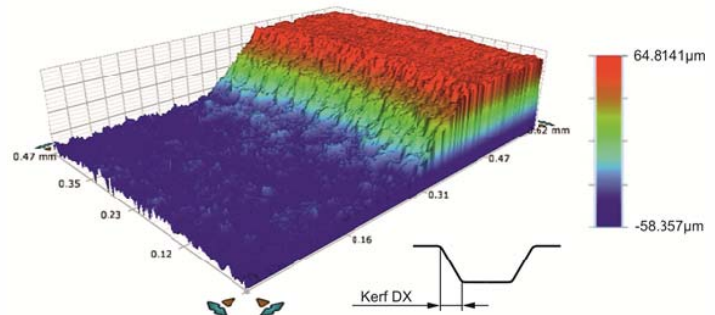
Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



Η δέσμη του laser έχει γωνία  $8^\circ$  και κινείται με ταχύτητα  $V$ . Όταν πλησιάσει στο σημείο για να δημιουργήσει την κάθετη γωνία στο βάθος του πάχους στρώματος που αφαιρείται, υπάρχει και επιπλέον αφαίρεση υλικού, η οποία είναι ανεπιθύμητη. Το επιπλέον υλικό που αφαιρείται κατά τη χάραξη του συνολικού βάθους του αντικειμένου ονομάζεται **kerf**.

Ο **στόχος της πειραματικής διαδικασίας** είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του kerf, σε συνάρτηση με τη μεταβολή των παραμέτρων της χάραξης και το βάθος του αντικειμένου κοπής, καθώς και η παραμετροποίησή του.



Στόχος της εργασίας και Kerf

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016

**Σύσταση κράματος**

- 5.6 έως 6.1% ψευδάργυρος Zn
- 2.1 έως 2.5% μαγνήσιο Mg
- 1.2 με 1.6% χαλκός Cu
- 0.5% πυρίτιο Si
- Σε μικρότερα ποσοστά σίδηρος Fe, μαγγάνιο Mn, τιτάνιο Ti, χρώμιο Cr και άλλα μέταλλα.

Το **αλουμίνιο** ή **αργίλιο** είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο, το οποίο έχει σχετικά μεγάλη ικανότητα να αντιστέκεται στη διάβρωση που οφείλεται στην επαφή του με το περιβάλλον. Λόγω του ότι το αλουμίνιο έχει την ικανότητα να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, καθώς η πυκνότητά του είναι αρκετά μικρή, έχει γίνει ένα στρατηγικό μέταλλο στη βιομηχανία.

Το **κράμα Al7076-T651** ανήκει στη σειρά κραμάτων 7000, τα οποία είναι κράματα αργιλίου Al, με πρωταρχικό στοιχείο κράματος τον ψευδάργυρο Zn.

**Ιδιότητες κράματος**

- **Σκληρότητα:** 170br
- **Υψηλή αντοχή** σε εφελκυστική καταπόνηση
- **Ακαταλληλότητα** για κάμψη

**Χρήσεις**

- Κατασκευή καλουπιών για πλαστικά και εξαρτήματα
- Εφαρμογές στις μεταφορές
- Εφαρμογές στην Αυτοκινητοβιομηχανία
- Εφαρμογές στην Αεροναυπηγική
- Μηχανολογικά εξαρτήματα



Υλικό πειραμάτων Al7075-T651

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Οι **παράμετροι** και οι **τιμές** που επιλέχθηκαν για τα πειράματα είναι :

- Συχνότητα Δέσμης Laser: 20 kHz
- Πάχος Στρώματος: 2, 4, 6, 8  $\mu\text{m}$
- Ταχύτητα Χάραξης: 300, 500, 700 mm/s

Συνδυάζοντας τις **συνθήκες κοπής** μεταξύ τους δημιουργούνται 12 διαφορετικοί συνδυασμοί τεχνολογικών παραμέτρων:

| A/A | Συχνότητα f (kHz) | Ταχύτητα Κοπής V (mm/s) | Πάχος Στρώματος Lth ( $\mu\text{m}$ ) | Ισχύς Laser I (%) |
|-----|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1   | 20                | 300                     | 2                                     | 17                |
| 2   | 20                | 500                     | 2                                     | 15.5              |
| 3   | 20                | 700                     | 2                                     | 16                |
| 4   | 20                | 300                     | 4                                     | 18.3              |
| 5   | 20                | 500                     | 4                                     | 19                |
| 6   | 20                | 700                     | 4                                     | 20.9              |
| 7   | 20                | 300                     | 6                                     | 21.9              |
| 8   | 20                | 500                     | 6                                     | 23.5              |
| 9   | 20                | 700                     | 6                                     | 26.5              |
| 10  | 20                | 300                     | 8                                     | 26.1              |
| 11  | 20                | 500                     | 8                                     | 29.2              |
| 12  | 20                | 700                     | 8                                     | 31.4              |



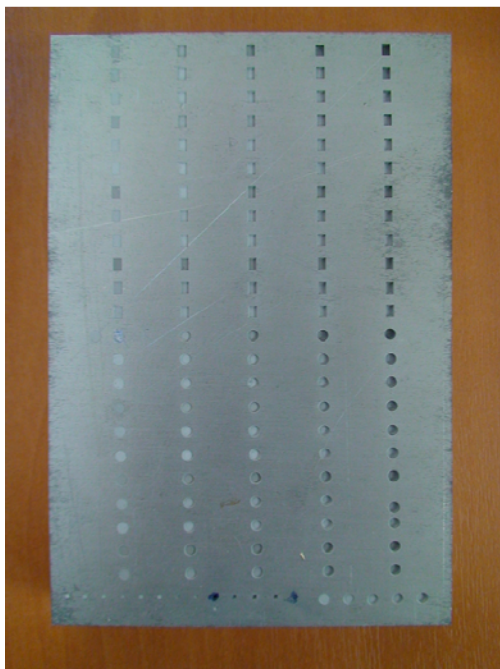
## Σχεδιασμός του πειράματος

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



Το μέγεθος του kerf αναλύεται για δύο διαφορετικά σχήματα, το **ορθογώνιο** **παραλληλόγραμμο** και τον **κύκλο**. Το μέγεθος των ορθογωνίων είναι 2mm x 3mm, ενώ η διάμετρος του κύκλου είναι ίση με  $R = 1.381976\text{mm}$ .

Η μηχανή μπορεί να εκτελέσει κοπές του μεγέθους - τάξης του χιλιοστού του μέτρου (mm).

Οι τιμές του πάχους κοπής επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να καλυφθεί ομοιόμορφα το εύρος των τιμών που εμπεριέχονται σε ένα χιλιοστό του μέτρου.

|                                                          |                          |
|----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Συχνότητα Δέσμης Laser<br>Laser Frequency f (kHz)        | 20                       |
| Πάχος Στρώματος<br>Layer thickness Lth ( $\mu\text{m}$ ) | 2, 4, 6, 8               |
| Ταχύτητα Χάραξης<br>Laser Engraving Speed<br>V (mm/s)    | 300, 500, 700            |
| Πάχος Κοπής<br>Depth Cut Zth ( $\mu\text{m}$ )           | 100, 325, 550, 775, 1000 |



## Σχεδιασμός του πειράματος

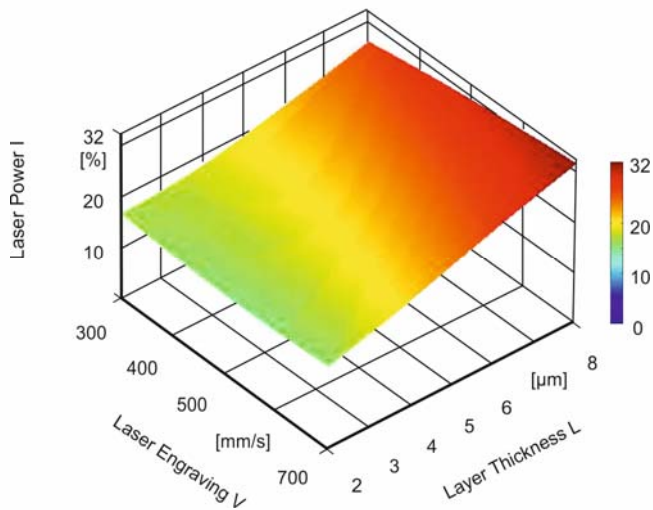
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



- Η **ισχύς** καθορίζεται ως το εκατοστιαίο ποσοστό της συνολικής ισχύς που έχει το laser 20Watt.
- Στα πειράματα, η μέγιστη τιμή της ισχύος είναι 31.4%, δηλαδή 6.28Watt, για πάχος στρώματος 8μm και ταχύτητα 700mm/s.
- Η ελάχιστη τιμή της είναι 15.5%, δηλαδή 3.1Watt, για πάχος στρώματος 2μm και ταχύτητα 500mm/s.
- Η ισχύς δε μεταβάλλεται αισθητά εάν κρατηθεί σταθερό το στρώμα κοπής.



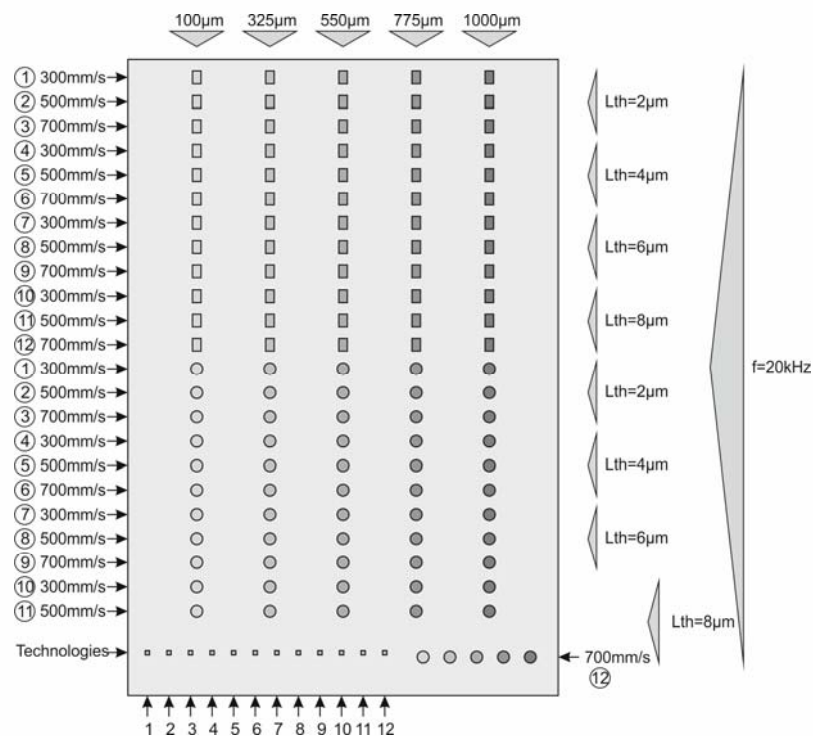
## Επιφάνεια ισχύος της δέσμης του laser

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



## Δοκίμιο Πειράματος και συνθήκες χάραξης

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

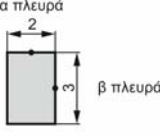
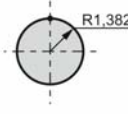
Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το **προφιλόμετρο Contour GT-K**. Το προφιλόμετρο είναι ένα οπτικό μικροσκόπιο, το οποίο καταγράφει επιφάνειες και παρουσιάζει προφίλ επιφανειών. Το προφιλόμετρο μπορεί να κάνει μετρήσεις για την τραχύτητα μιας επιφάνειας, είτε στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας το μέγεθος του kerf.

Το FOV (field of view) του αντικειμενικού φακού X10 που χρησιμοποιήθηκε, είναι  $623\mu\text{m} \times 467.3\mu\text{m}$ .

Οι μετρήσεις έγιναν με τον παρακάτω τρόπο για τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα και τους κύκλους.

| Γεωμετρία Σχήματος | Σημείο Μέτρησης                                                                   |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Ορθογώνια          |  |
| Κύκλοι             |  |



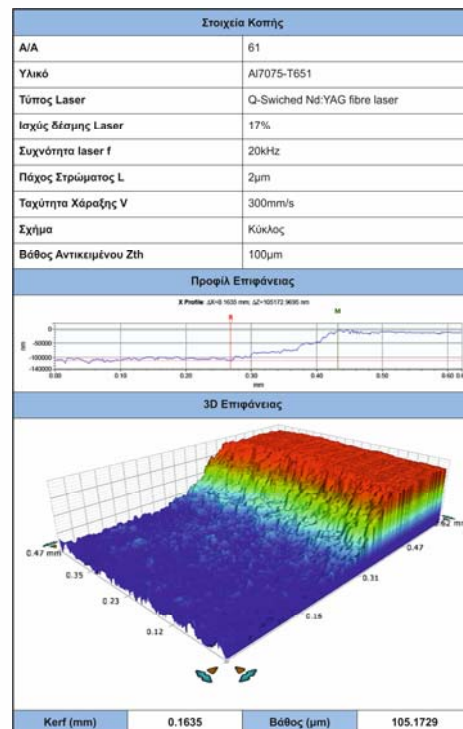
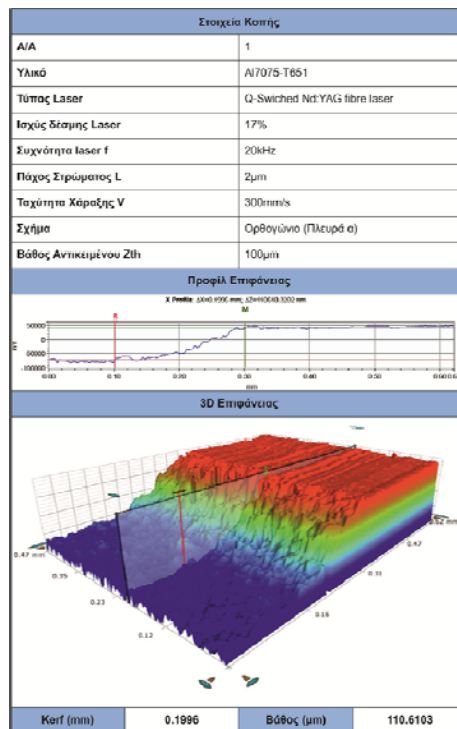
## Διεξαγωγή μετρήσεων - Προφιλόμετρο

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



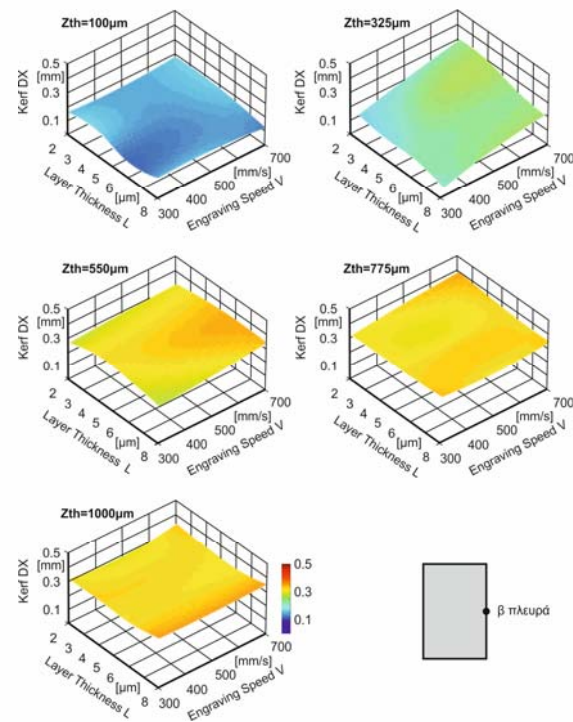
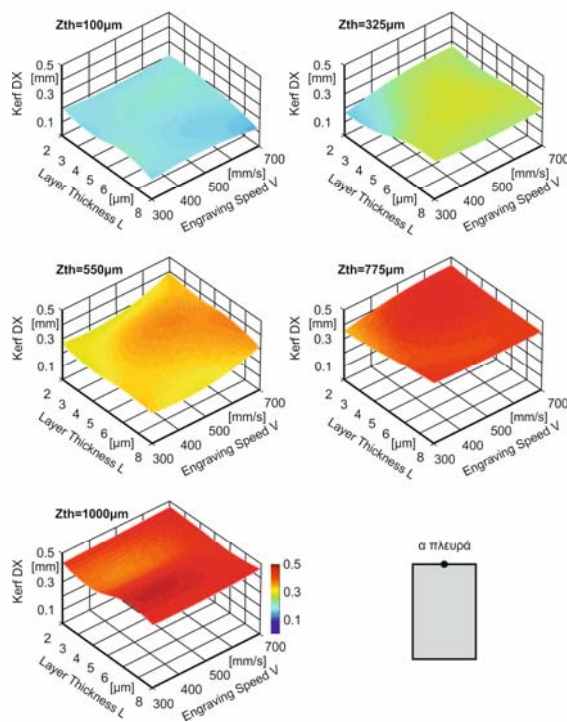
## Πρότυπα βάσης δεδομένων

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



Επιφάνειες kerf στην κατεργασία των ορθογώνιων

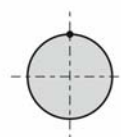
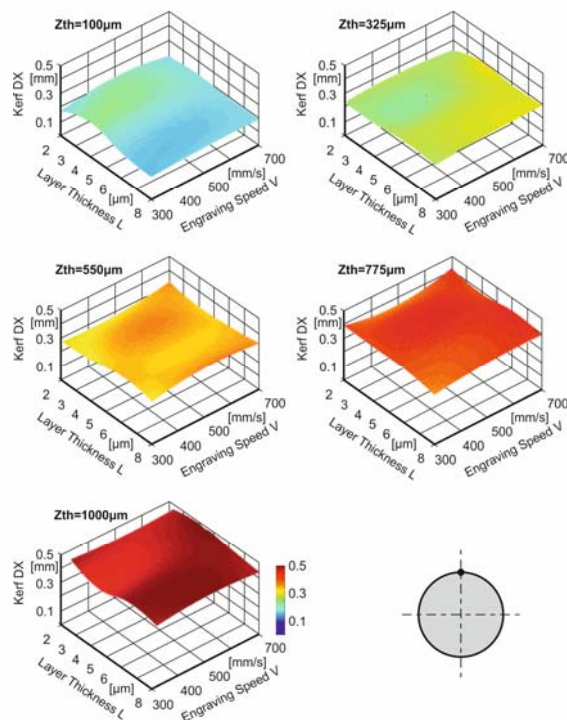
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



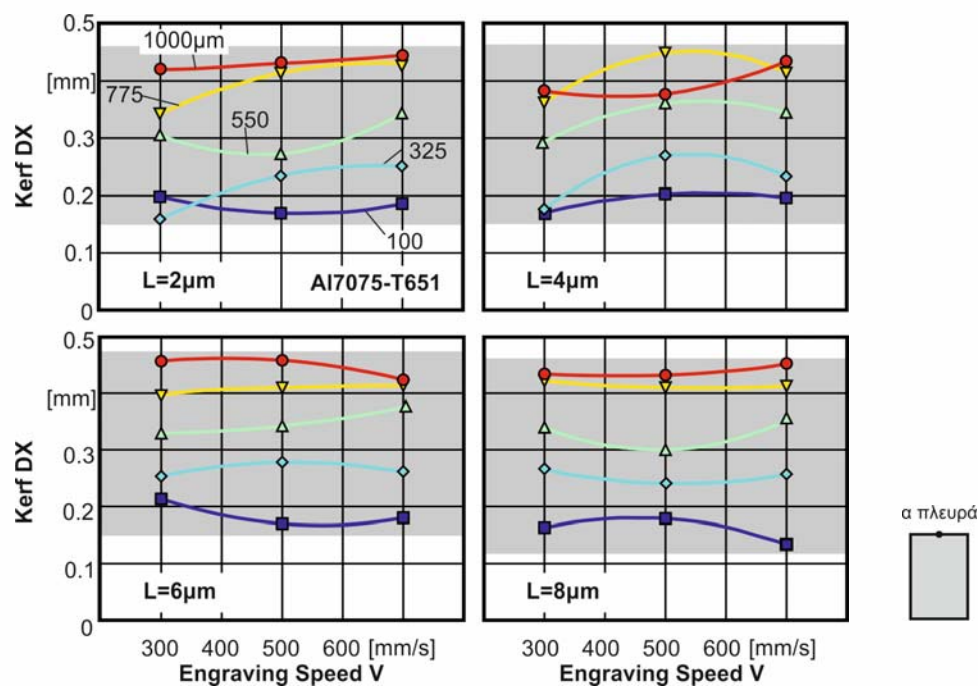
Επιφάνειες kerf στην κατεργασία των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



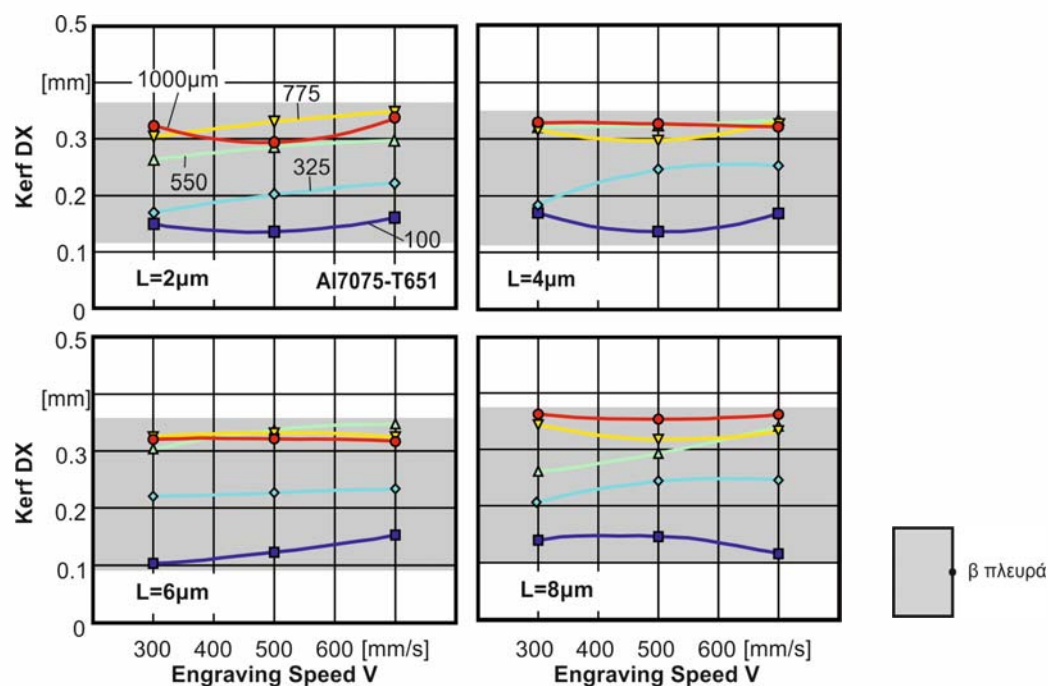
Διαγράμματα kerf στην κατεργασία των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



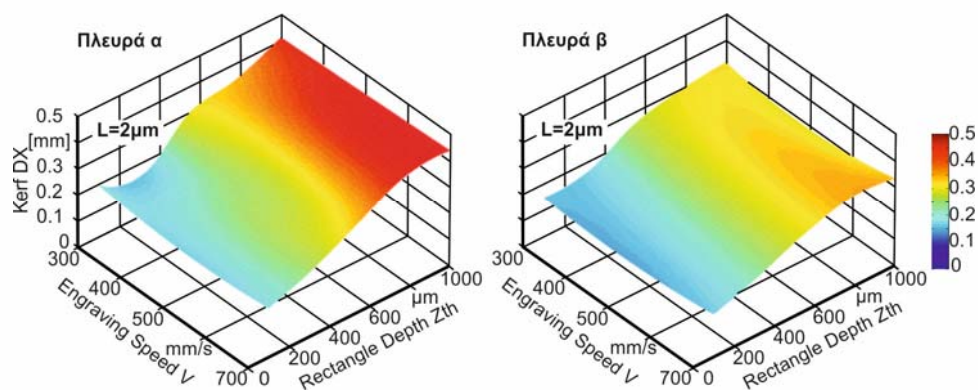
Διαγράμματα kerf στην κατεργασία των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



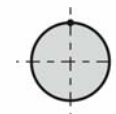
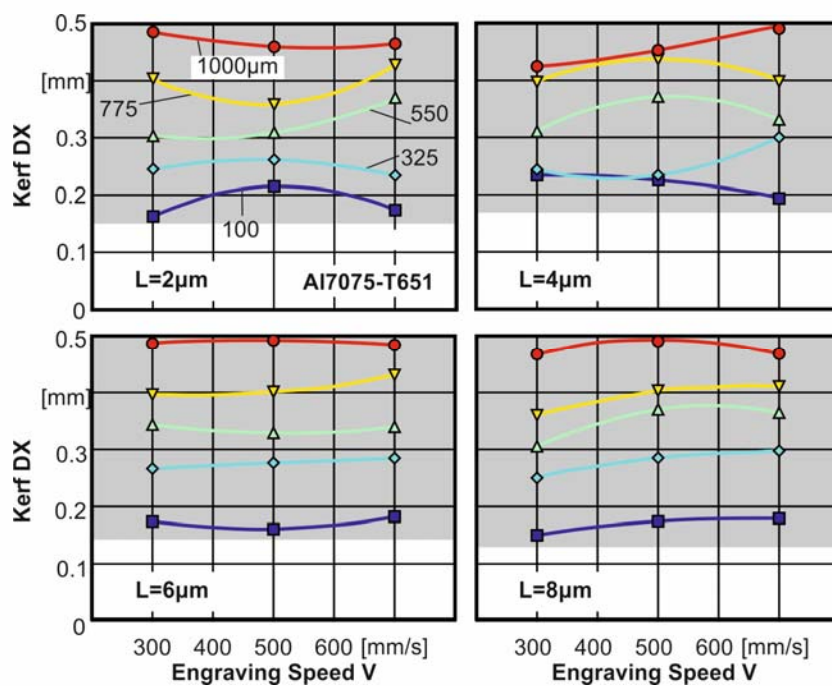
Επιφάνειες kerf σταθερού πάχους στρώματος  $2\mu\text{m}$  των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



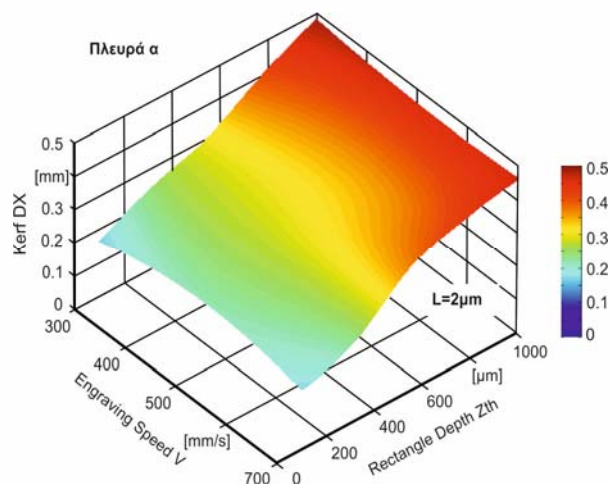
Διαγράμματα kerf στην κατεργασία των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



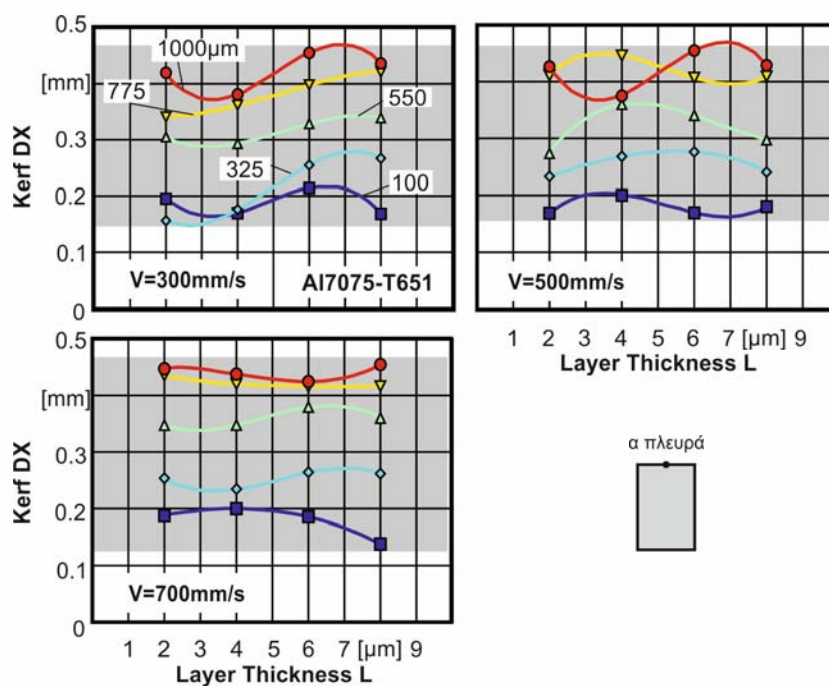
### Επιφάνεια kerf σταθερού πάχους στρώματος 2μm των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



### Διαγράμματα kerf στην κατεργασία των ορθογωνίων

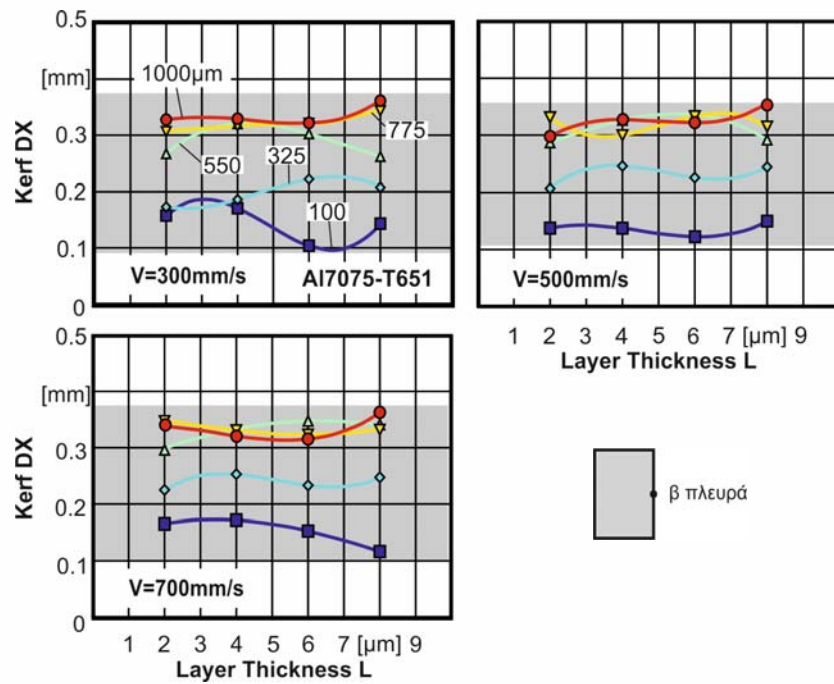
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



Διαγράμματα kerf στην κατεργασία των ορθογώνιων

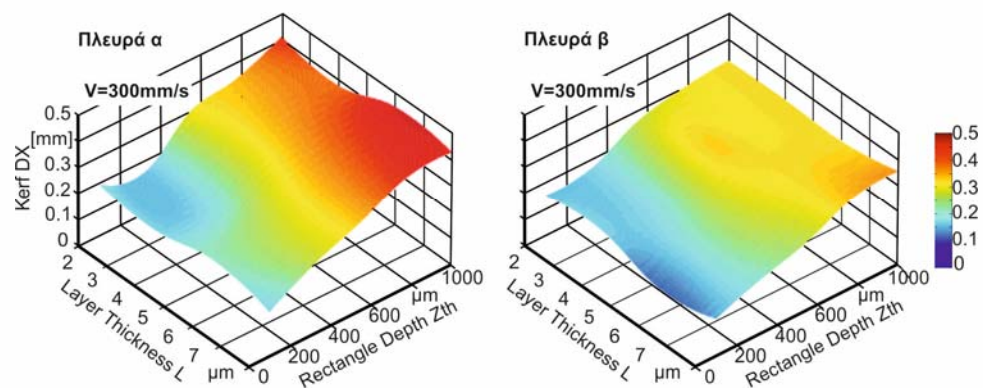
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

2016



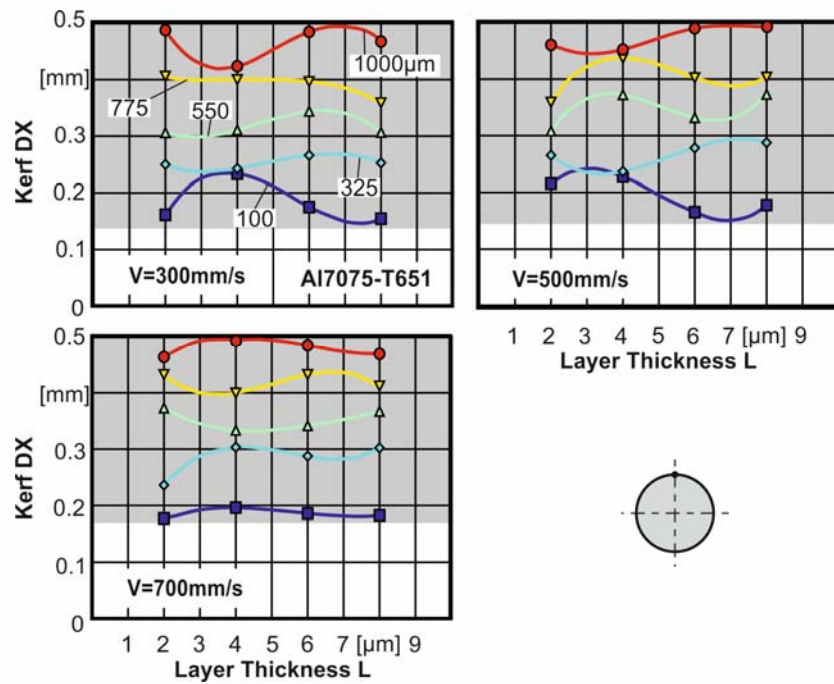
Επιφάνειες kerf σταθερής ταχύτητας 300mm/s των ορθογώνιων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



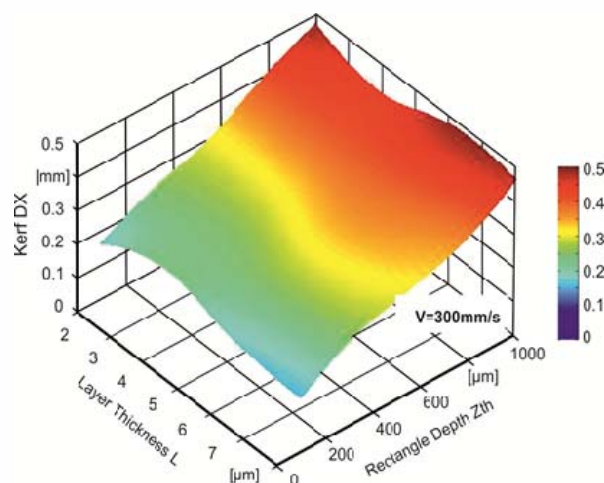
Διαγράμματα kerf στην κατεργασία των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



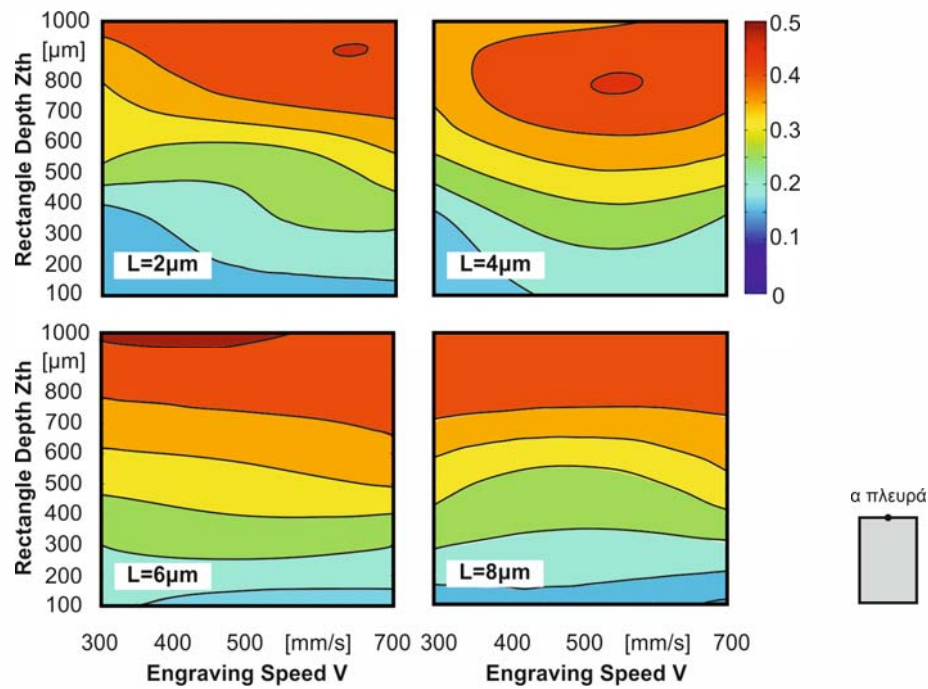
Επιφάνεια kerf σταθερής ταχύτητας 300mm/s των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



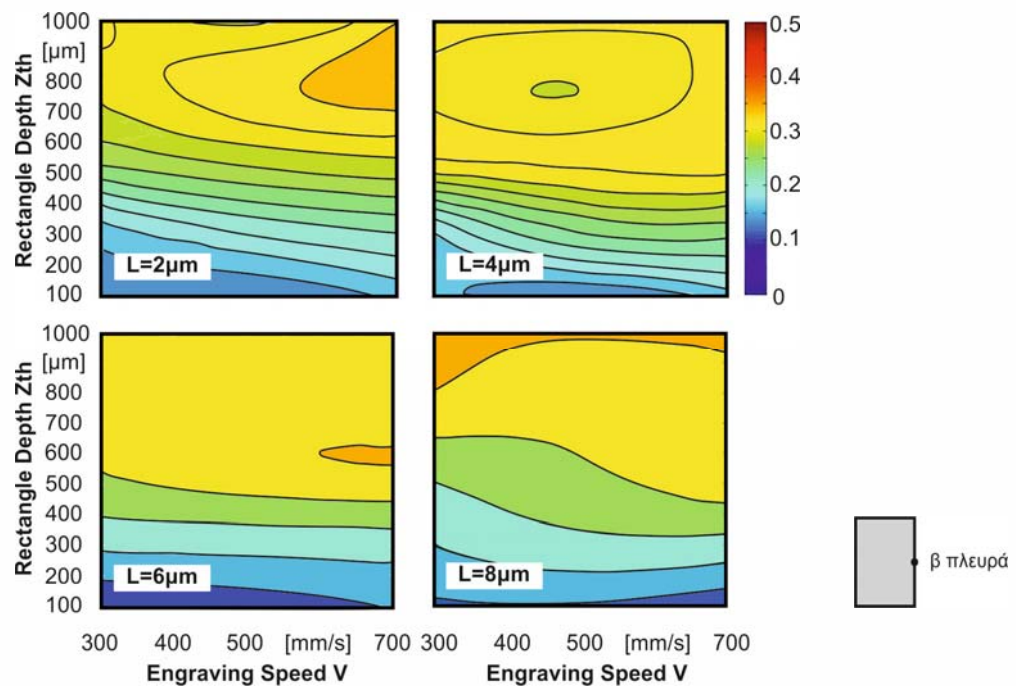
Χάρτες kerf για την κατεργασία των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



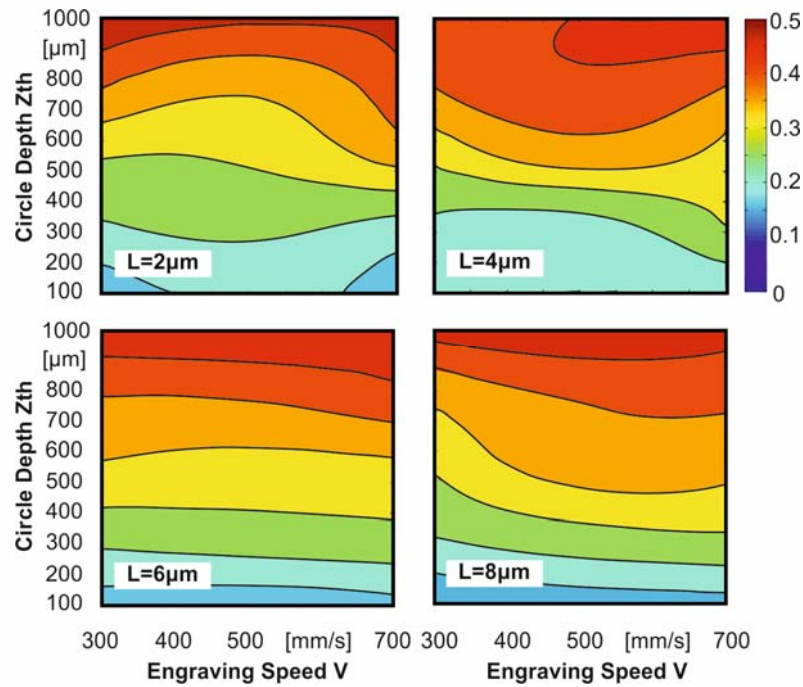
Χάρτες kerf για την κατεργασία των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



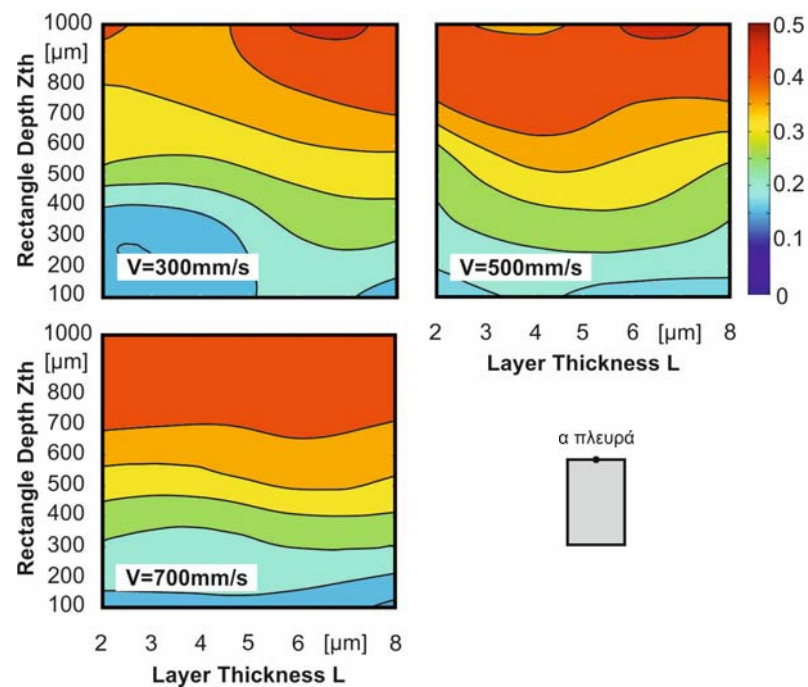
Χάρτες kerf για την κατεργασία των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



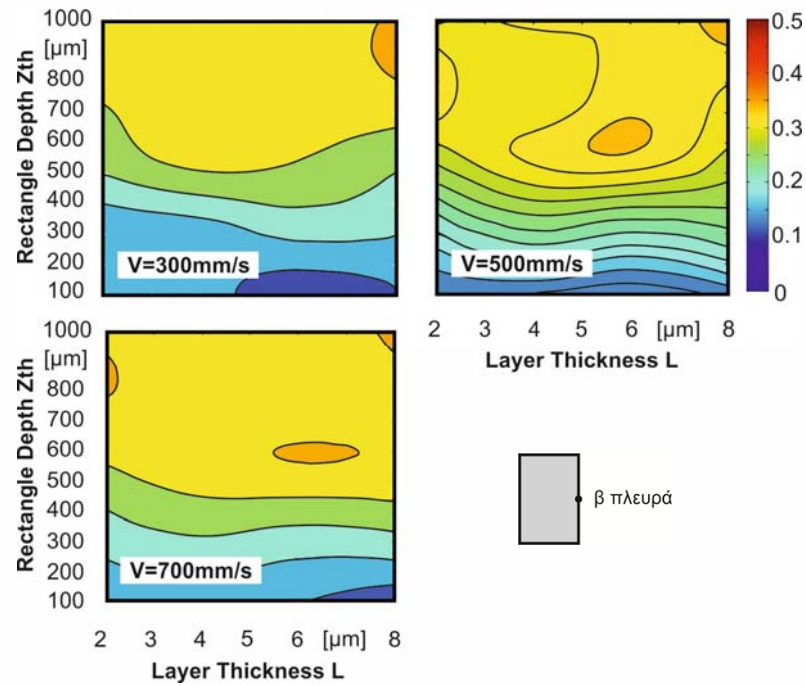
Χάρτες kerf για την κατεργασία των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



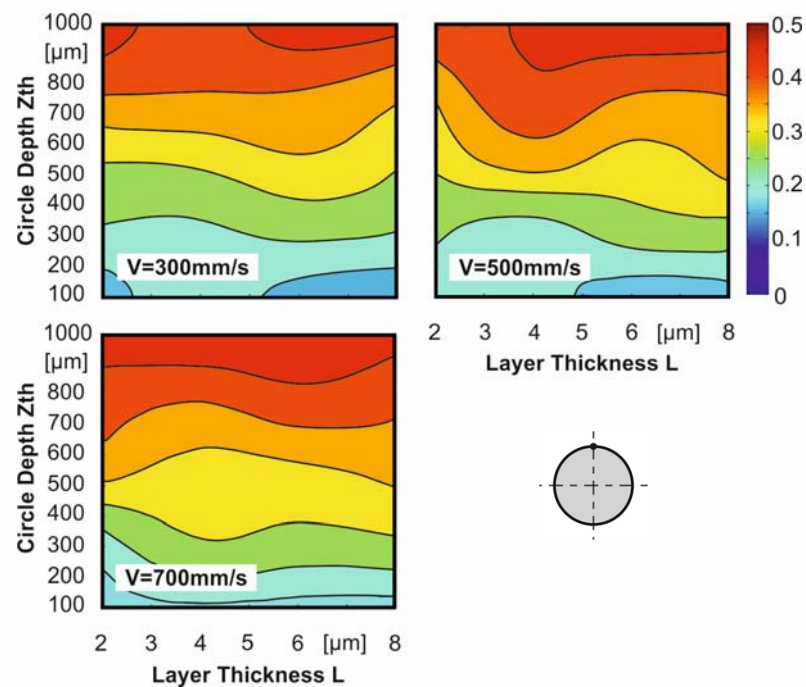
Χάρτες kerf για την κατεργασία των ορθογωνίων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



Χάρτες kerf για την κατεργασία των κύκλων

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



## Εξισώσεις για το kerf και την ισχύ του laser

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Οι **εξισώσεις** δημιουργήθηκαν με το στατιστικό πακέτο **Minitab**. Δημιουργήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης (regression models), βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, σε συνάρτηση των συνθηκών κοπής (πάχους στρώματος, ταχύτητας) και του βάθους του τελικού αντικειμένου. Το R-sq(pred) αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό ακριβείας και ασφαλείας για τον υπολογισμό των ζητούμενων.

**Εξίσωση Kerf DX για τα ορθογώνια πλευρά α:**

$$DX(mm) = 0.0853 - 0.00315 \cdot L(\mu m) + 0.000145 \cdot V(mm/s) + 0.000265 \cdot Zth(\mu m) + 3.68 \cdot L/V - 0.613 \cdot L/Zth,$$

R-sq(pred) : 90,27%

**Εξίσωση Kerf DX για τα ορθογώνια πλευρά β:**

$$DX(mm) = 0.1452 + 0.00568 \cdot L(\mu m) + 0.000075 \cdot V(mm/s) + 0.000136 \cdot Zth(\mu m) + 0.91 \cdot L/V - 1.724 \cdot L/Zth,$$

R-sq(pred) : 85,74%

**Εξίσωση Kerf DX για τους κύκλους:**

$$DX(mm) = 0.1616 + 0.00700 \cdot L(\mu m) + 0.000008 \cdot V(mm/s) + 0.000295 \cdot Zth(\mu m) - 1.84 \cdot L/V - 0.504 \cdot L/Zth$$

R-sq(pred) : 95,00%

**Εξίσωση για τον υπολογισμό ισχύος I:**

$$I(\text{ισχύς}) = 0.12455 + 0.03015 \cdot L(\mu m) - 0.000021 \cdot V(mm/s) - 0.000000 \cdot Zth(\mu m) - 3.891 \cdot L/V - 0.0000 \cdot L/Zth$$

R-sq(pred) : 96,65%



## Εξισώσεις για το πραγματικό βάθος των αντικειμένων

<http://www.m3.tuc.gr>


School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων με το προφίλόμετρο παρατηρήθηκε ότι το πειραματικό βάθος είχε κάποιες μικρές διαφορές σε σχέση με το αρχικά καθορισμένο.

**Εξίσωση πειραματικού - πραγματικού βάθους για τα ορθογώνια:**

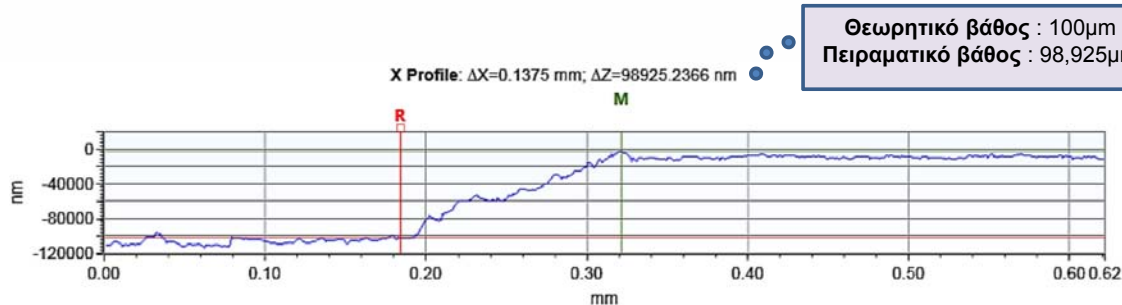
$$Z_{exp}(\mu m) = 57.4 - 5.11 \cdot L(\mu m) - 0.0491 \cdot V(mm/s) + 0.9568 \cdot Zth(\mu m)$$

R-sq(pred) : 98.21%

**Εξίσωση πειραματικού - πραγματικού βάθους για τους κύκλους:**

$$Z_{exp}(\mu m) = 79.5 - 8.15 \cdot L(\mu m) - 0.0698 \cdot V(mm/s) + 0.9663 \cdot Zth(\mu m)$$

R-sq(pred) : 98.27%



Τα **κύρια συμπεράσματα** που εξαγονται είναι:

- Η **ισχύς του laser I** καθορίζεται άμεσα από το πάχος του στρώματος χάραξης L και για αυτό το λόγο, με την αύξηση του L παρατηρείται αύξηση της τελικής ισχύος. Συνεπώς, ο χρόνος κοπής μειώνεται σημαντικά.
- Όσο μεγαλώνει το **βάθος** των ορθογωνίων, αλλά και των κυκλικών αντικειμένων που χαράσσονται από τη μηχανή, τόσο αυξάνεται και το kerf.
- Οι τιμές του **kerf DX** που εμφανίζεται στην α πλευρά των ορθογωνίων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες β πλευρές των ορθογωνίων.
- Οι τιμές του **kerf DX** στους κύκλους είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην πλευρά α των ορθογωνίων και στις περισσότερες της β πλευράς.
- Όσο αυξάνει το **πάχος** του στρώματος L που αφαιρείται από τη μηχανή, αλλά και η ταχύτητα της κοπής, τόσο αυξάνει και το kerf DX.
- Η σχέση ανάμεσα στη **ταχύτητα κοπής V** και στο **kerf DX** χαρακτηρίζεται από μια σταθερότητα, διατηρώντας σταθερό το πάχος του αφαιρούμενου στρώματος L.
- Η σχέση ανάμεσα στο **πάχος του αφαιρούμενου στρώματος L** και στο **kerf DX** χαρακτηρίζεται από σταθερότητα, διατηρώντας σταθερό τη ταχύτητα χάραξης V.
- Οι μικρότερες τιμές του **kerf DX** εμφανίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις για πάχος στρώματος L ίσο με 2μm και ταχύτητα σάρωσης 300 με 500mm/s.
- Το **kerf DX** δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη μεταβολή του πάχους κοπής L, εφόσον κρατηθεί σταθερή η ταχύτητα κοπής V.
- Η **ισχύς του laser I** διατηρώντας σταθερό το πάχος κοπής του στρώματος L δεν αλλάζει αυξομειώνοντας την ταχύτητα χάραξης V. Δηλαδή ο υπολογισμός της ισχύος εξαρτάται άμεσα και κατάλυτικά από το πάχος στρώματος.
- Οι **εξισώσεις** που δημιουργήθηκαν για το **kerf DX** δίνουν αποτελέσματα με ποσοστά ασφαλείας 85,74% για την α πλευρά των ορθογωνίων, 90,27% για τη β πλευρά των ορθογωνίων και 95,00% για τους κύκλους.



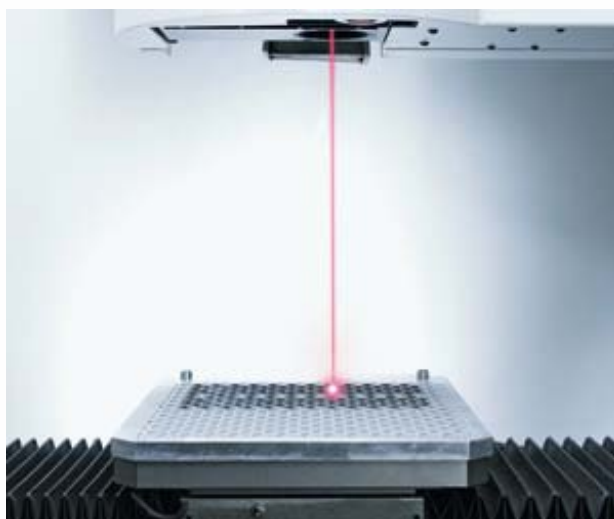
## Συμπεράσματα

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος



School of Production Eng. & Management  
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab  
Prof. Aristomenis Antoniadis

<http://www.m3.tuc.gr>

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος