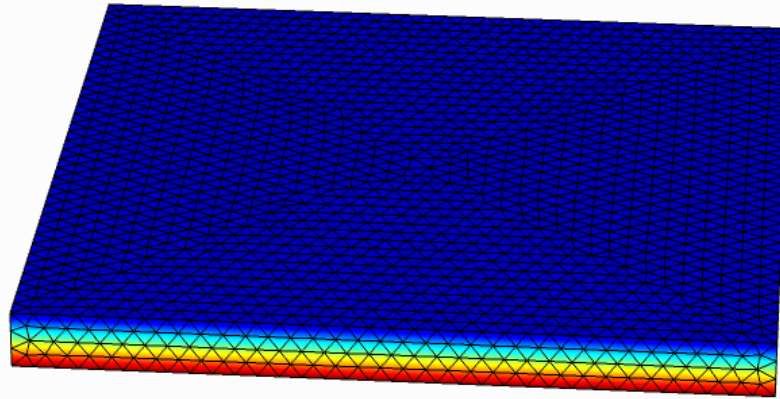


ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΜΕ LASER ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



Διδακτορική διατριβή που υπεβλήθη υπό τον

Ευάγγελο Νικολιδάκη, Διπλ. Μηχ/γο Μηχ/κό ΕΜΠ

2021



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



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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

2

1. Εισαγωγή

- Αντικείμενο της διατριβής

2. Στάθμη γνώσεων

- Κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων
- Προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία
- Διεθνής έρευνα της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser

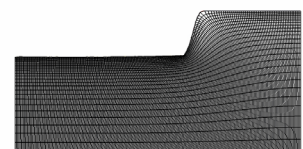
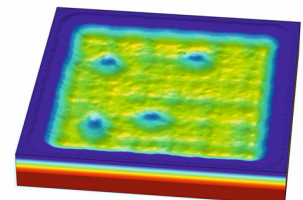
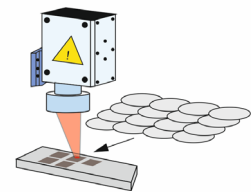
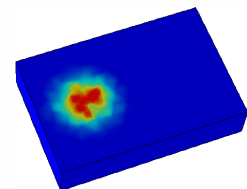
3. 3D μοντέλο προσομοίωσης κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων

- Γενική περιγραφή, δομή, βασικά μεγέθη και παράμετροι
- Γεωμετρία, διακριτοποίηση και μοντελοποίηση φαινομένων
- Μέθοδοι επίλυσης
- Προσομοιώσεις
- Αποτελέσματα και πειραματική επιβεβαίωση

4. Μοντέλο προσομοίωσης της κλίσης των τοιχωμάτων και των διαστατικών αποκλίσεων λόγω λοξοποίησης (kerf)

- Γενική περιγραφή
- Σύγκλιση δέσμης
- Αποτελέσματα και πειραματική επιβεβαίωση

5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα



2021



Δομή παρουσίασης

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



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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Αντικείμενο:

- Ανάπτυξη ενός **μοντέλου προσομοίωσης** της κατεργασίας **χάραξης με παλμούς δέσμης Laser** διάρκειας νανοδευτερολέπτων.
- Χρήση της μεθόδου των **πεπερασμένων στοιχείων**.
- Μελέτη της επίδρασης των διαφόρων **συνθηκών κατεργασίας** με στόχο τη βελτιστοποίηση.
- Μεγάλη σειρά **πειραμάτων χάραξης**.

Ερευνητικά ζητούμενα:

- ✓ Βελτίωση της **ποιότητας** της κατεργασμένης γεωμετρίας.
- ✓ Επίτευξη προεπιλεγείσας **διαστατικής ακρίβειας**.
- ✓ Αποφυγή ανεπιθύμητης **κλίσης** στα τοιχώματα και **διαστατικών αποκλίσεων** λόγω **λοξοποίησης** (kerf).
- ✓ Μεγιστοποίηση της **παραγωγικότητας**.

Σπουδαιότητα:

- Προεκτίμηση **βέλτιστων συνθηκών** κατεργασίας.
- Προεκτίμηση μεγεθών που σχετίζονται με το **τελικό αποτέλεσμα** της χάραξης.



- Χρησιμοποιείται στις τεχνολογίες παραγωγής σε **μικροκλίμακα**.
- Εφαρμόζεται σε βιομηχανίες κατασκευής **προϊόντων υψηλής τεχνολογίας**.
- **Αφαίρεση υλικού:** επαλληλία κρατήρων από υλικό που έχει ατμοποιηθεί λόγω θερμότητας που παρέχουν αλληλεπικαλυπτόμενοι παλμοί δέσμης Laser σε πολλαπλά επίπεδα.
- Επιτρέπει τη χάραξη **μικρών** και **περίπλοκων γεωμετριών** με υψηλή **ακρίβεια**.
- Μεγάλη **ποικιλία υλικών** όπως μέταλλα, κεραμικά, γυαλί, πλαστικά, και σύνθετα υλικά.
- **Πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία:**
 - ✓ χάραξη καλουπιών
 - ✓ διαμόρφωση κοπτικών εργαλείων
 - ✓ κατασκευή μικρο-καναλιών λίπανσης
 - ✓ παραγωγή ιατρικών εργαλείων

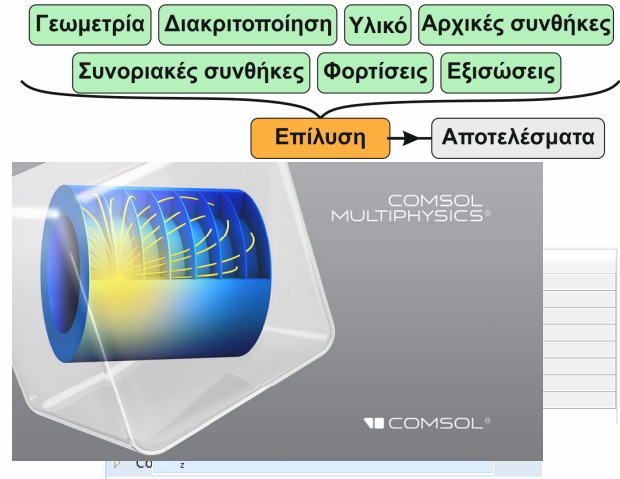


Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία:

- **Προσομοίωση** φυσικών φαινομένων (π.χ. μεταφοράς θερμότητας, μάζας).
- Υλοποιείται συνήθως με τη χρήση κάποιου σχετικού **λογισμικού**.
- **Αριθμητική μέθοδος** προσέγγισης της λύσης για ένα περίπλοκο πρόβλημα.
- Υποδιαιρείται το τεμάχιο σε πολυάριθμα μικρότερα **στοιχεία** (finite elements).
- Συμπεριφορά των στοιχείων μπορεί να περιγραφεί με σχετικά απλές **εξισώσεις**.

Υλοποίηση - βασικά βήματα:

- Γεωμετρία και διακριτοποίηση (δημιουργία πλέγματος) μέσω CAD
- Υλικό (βιβλιοθήκες)
- Αρχικές συνθήκες ($t=0$)
- Συνοριακές συνθήκες
- Φορτίσεις
- Μερικές διαφορικές εξισώσεις
- Επίλυση (αριθμητικοί επιλύτες)
- Αποτελέσματα



Heyl, P., Olschewski, T., and Wijnaendts, R. W., 2001 "Manufacturing of 3D Structures for Micro-Tools Using Laser Ablation"

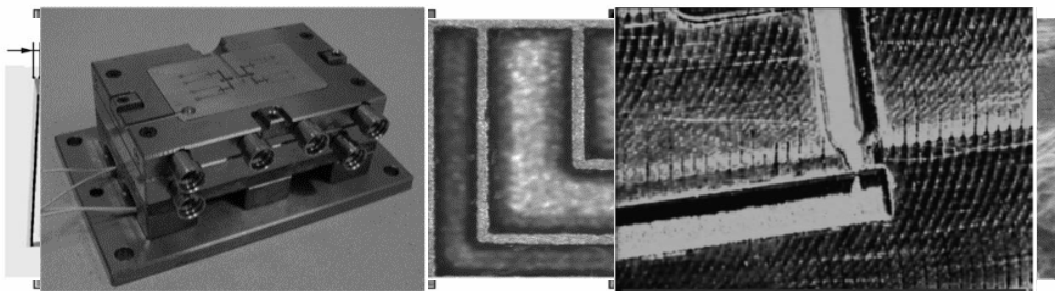
Χάραξη ορισμένων υλικών όπως σκληρομέταλλα και κεραμικά με υπεριώδη δέσμη Laser UV 355nm για **κοπτικά εργαλεία**.

Pham, D. T., Dimov, S. S., Petkov, P. V., and Dobrev, T., 2005 "Laser Milling for Micro Tooling"

Δυνατότητες της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser για κατασκευή **εργαλείων σε μικρο-κλίμακα**.

Vasco, J., Bártolo, P., Silva, B., and Galo, C., 2007 "Laser Micromachining for Mould Manufacturing: II. Manufacture and Testing of Mould Inserts"

Καταλληλότητα της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser για την **κατασκευή καλουπιών**.



Campanelli, S. L., Casalino, G., and Contuzzi, N., 2013 "Multi-Objective Optimization of Laser Milling of 5754 Aluminum Alloy"

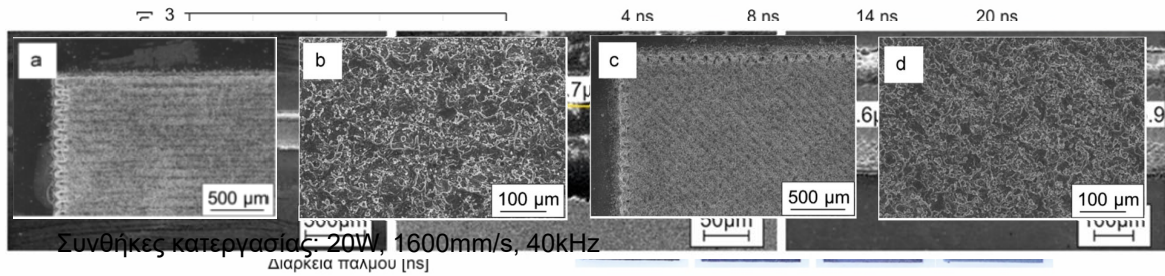
Βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια ως προς **ρυθμό αποβολής υλικού MRR** και **τραχύτητα Ra** της χάραξης με δέσμη Laser Nd:YAG σε **αλουμίνιο Al5754**.

Manninen, M., Hirvimäki, M., Poutiainen, I., and Salminen, A., 2015 "Effect of Pulse Length on Engraving Efficiency in Nanosecond Pulsed Laser Engraving of Stainless Steel"

Επίδραση της **διάρκειας των παλμών** κατά τη χάραξη με δέσμη Laser Yb fiber σε **ανοξειδωτο χάλυβα SAE304**.

Mohammed, M. K., and Al-Ahmari, A., 2020 "Laser-Machining of Microchannels in NiTi-Based Shape-Memory Alloys: Experimental Analysis and Process Optimization"

Επίδραση των **συνθηκών κατεργασίας** στην ποιότητα χάραξης μικρο-καναλιών με παλμούς δέσμης Laser Nd:YAG Q-switched σε κράμα μνήμης σχήματος (SMA) **νικελίου-τιτανίου Ni-Ti**.



2021

Στάθμη γνώσεων



Έρευνα: Πειραματική διερεύνηση της κατεργασίας χάραξης

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



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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Lim, H. S., and Yoo, J., 2011 "FEM Based Simulation of the Pulsed Laser Ablation Process in Nanosecond Fields"

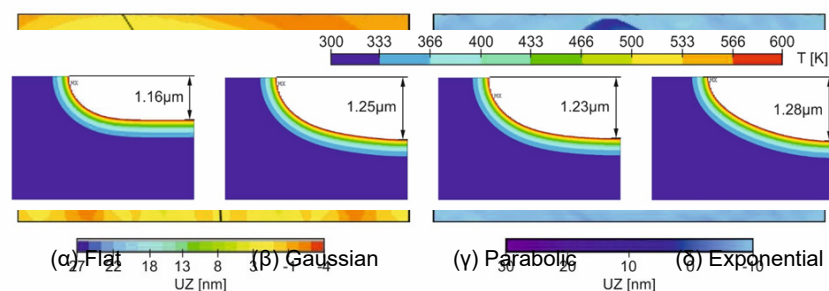
2D μοντέλο FEM για **προσομοίωση ενός παλμού** από πηγή Gauss. Αφαίρεση υλικού: με το πέρας της θέρμανσης **διαγραφή στοιχείων** που η θερμοκρασία τους υπερβαίνει τη θερμοκρασία βρασμού.

Kaselouris, E., Nikolos, I. K., Orphanos, Y., Bakarezos, E., Vainos, N., Papadogiannis, N. A., Tatarakis, M., and Dimitriou, V., 2014 "3D Multiphysics Fem Modeling of Nanosecond Pulsed Laser Interaction with Metallic Films"

3D μοντέλο FEM για **ένα παλμό** σε λεπτά μεταλλικά υμένα. Συζευγμένο θερμικό-μηχανικό μοντέλο. Αφαίρεση υλικού: **τεχνική «killing» στοιχείων** που υπερβαίνουν τη θερμοκρασία βρασμού ελαχιστοποιώντας τη στιβαρότητα.

Swaraj, S., Negi, V., Ansari, A., and Garg, V., 2014 "Development and Modeling of Laser Micromachining Techniques"

Μελέτη επίδρασης της κατανομής **ενός παλμού** Laser στη μορφή κρατήρα μέσω μοντέλου προσομοίωσης FEM. Αφαίρεση υλικού: **διαγραφή στοιχείων** υπερβαίνουν τη θερμοκρασία τήξης.



2021

Στάθμη γνώσεων



Έρευνα: Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία μηχανισμού αφαίρεσης υλικού από παλμό

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



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

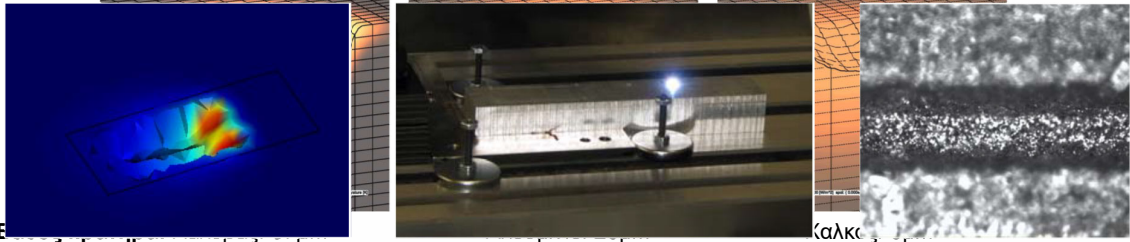
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Tani, G., Orazi, L., Fortunato, A., and Cuccolini, G., 2007 "Laser Milling Simulation System for Moulds Manufacturing"

- Ανέπτυξαν **αριθμητικό προσομοιωτή FDM** για τη χάραξη με παλμούς δέσμης Laser.
- Λήφθηκαν υπόψη: απορρόφηση ενέργειας δέσμης και η μεταφορά στο μέσο (Fourier), οι αλλαγές φάσεων και η δημιουργία πλάσματος.
- Αφαίρεση υλικού: εξίσωση Hertz-Knudsen (Χημεία των Επιφανειών), εκφράζει τον ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης μορίων στην επιφάνεια υγρού λόγω εξάτμισης.
- **Προσομοιώσεις για ένα παλμό** σε κράμα Fe-C, Al και Cu με γραφική απεικόνιση με OpenGL.

Karbasi, H., 2010 "COMSOL Assisted Simulation of Laser Engraving"

- Ανέπτυξε **προσομοιωτικό μοντέλο FEM** για χάραξη από μια ευθεία τροχιά παλμών δέσμης Laser.
- Θεωρήθηκαν: δέσμη με κατανομή Hermit-Gaussian TEM01, συντελεστής απορρόφησης θερμότητας εξαρτώμενος από μήκος κύματος, τη θερμοκρασία και την ποιότητα επιφανείας.
- **Προσομοιώσεις για ευθεία τροχιά παλμών** σε χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό.
- Πειράματα χάραξης για αξιολόγηση αποτελεσμάτων συγκρίνοντας το πλάτος και το βάθος αυλακίου.



Έρευνα: Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης

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



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

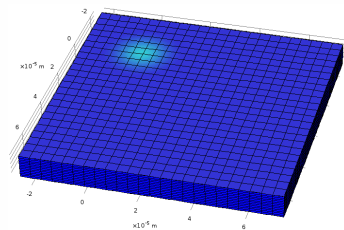
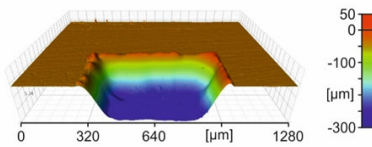
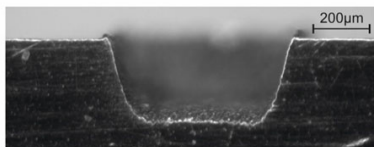
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Βιβλιογραφική ανασκόπηση:

- Απουσία ολοκληρωμένου και επιβεβαιωμένου προσομοιωτικού μοντέλου.

Παρούσα διδακτορική διατριβή:

- ✓ Ανάπτυξη νέου, καινοτόμου, πρακτικού, ολοκληρωμένου και πειραματικά επιβεβαιωμένου **προσομοιωτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων** υψηλής ακρίβειας για κατεργασία **χάραξης με παλμούς δέσμης Laser** διάρκειας νανοδευτερολέπτων.
- ✓ Θεμελίωση με σωστή **θεωρητική βάση** και υλοποίηση σύμφωνα με ορθά **πρότυπα επιστημονικών μεθοδολογιών**.
- ✓ Εκτίμηση της **γεωμετρίας χάραξης, διαστατικών αποκλίσεων** λόγω λοξοποίησης (kerf) και συναφών μεγεθών.
- ✓ Μεγάλος αριθμός εργαστηριακών **πειραμάτων χάραξης**, αναλύσεων και μετρήσεων αρχικά για μελέτη των φαινομένων και σε τελικό στάδιο την επιβεβαίωση του μοντέλου.



Στόχοι και συνεισφορές διατριβής

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

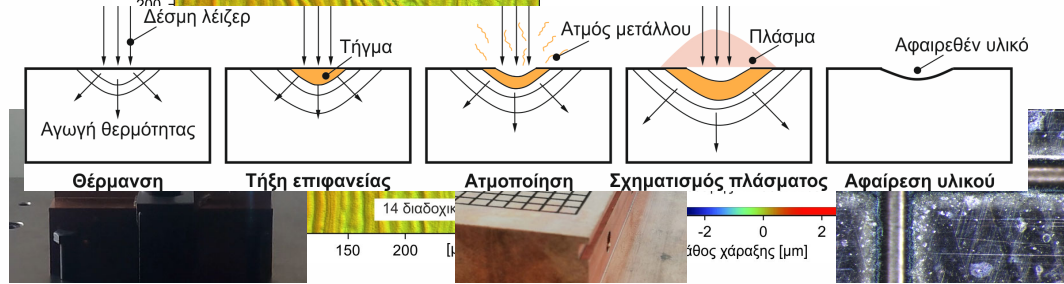


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Βασική αρχή λειτουργίας της κατεργασίας:

- Μέσω **παλμών δέσμης Laser** ένα μεγάλο υψηλά συγκεντρωμένο **θερμικό φορτίο** προσδίδεται τοπικά στο υλικό του τεμαχίου που πρέπει να αφαιρεθεί.
- Το θερμικό φορτίο που δέχεται τοπικά το υλικό οδηγεί:
 - Μετάβαση σε **υγρή φάση**.
 - Μετάβαση σε **αέρια φάση**.
 - Απομάκρυνση κυρίως με τη μορφή **ατμού μετάλλου** (laser ablation).
 - Σχηματισμός **πλάσματος**.
- Για τη χάραξη μιας συγκεκριμένης επιθυμητής γεωμετρίας:
 - Δέση Laser **σαρώνει την επιφάνεια**.
 - Στέλνονται παλμοί σε προκαθορισμένες θέσεις **ευθείων τροχιών**.
 - **Επαλληλία των κρατήρων** αφαιρέθεται υλικό σε ένα επίπεδο σάρωσης.
 - Απομακρύνεται ένα **στρώμα υλικού** που έχει ένα συγκεκριμένο πάχος και μορφή.



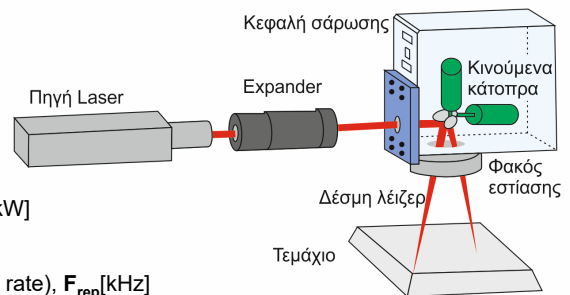
Κατεργασία προς μοντελοποίηση

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Πηγή του Laser (laser source):

- Τύπος Laser (Laser type)
- Μήκος κύματος (Wavelength), λ [μm]
- Μέση ισχύς (Average power), P_{avg} [W]
- Μέγιστη ισχύς παλμού (Pulse peak power), P_{peak} [kW]
- Ενέργεια παλμού (Pulse energy), E [mJ]
- Συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse repetition rate), F_{rep} [kHz]
- Διάρκεια παλμού (Pulse duration-width), t_{pulse} [ns]
- Ποιότητα παραγόμενης δέσμης (Generated beam quality), M_{source}^2

**Κεφαλή σάρωσης (scanning head), φακός εστίασης (F-theta lens):**

- Ταχύτητα δέσμης (Scanning speed), V [mm/s]
- Εστιακή απόσταση (Focal length), f [mm]
- Διάμετρος δέσμης στο σημείο εστίασης (Spot diameter), D_{spot} [μm]
- Ποιότητα προσπίπτουσας δέσμης (Incident beam quality), M^2



Κέντρο κατεργασιών Laser: παράμετροι προς μοντελοποίηση

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

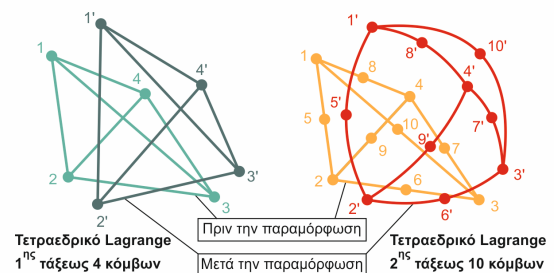
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Γεωμετρία αρχικού τεμαχίου:

- Ως αρχικό τεμάχιο ένα **ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο** διαστάσεων $L \times W \times H$
- Οι **διαστάσεις** του τεμαχίου **προσαρμόζονται** κάθε φορά ανάλογα με το **μέγεθος της τετραγωνικής εσοχής** που πρόκειται να χαραχτεί:
 - Ελαχιστοποίηση **χρόνου επίλυσης**.
 - Επαρκή **απόσταση** ανάμεσα σε συνοριακές επιφάνειες και την προς χάραξη εσοχή.

Διακριτοποίηση:

- Πλεγματοποίηση (meshing): **τετραεδρικά στοιχεία Lagrange 2ης τάξεως 10 κόμβων**
 - Συνθέτουν **πλέγμα για οποιοδήποτε τρισδιάστατο όγκο**.
 - Αναπαράγουν τις **παραμορφώσεις καμπύλης μορφής** με πιο ρεαλιστικό τρόπο.
- Μέγιστο **μέγεθος στοιχείου** στα 5μm.
- Συντελεστής **πύκνωσης του πλέγματος** στη **διεύθυνση του βάθους** κλίμακος 1.5.
- Ανάλυση **ανεξαρτησίας πλέγματος**.

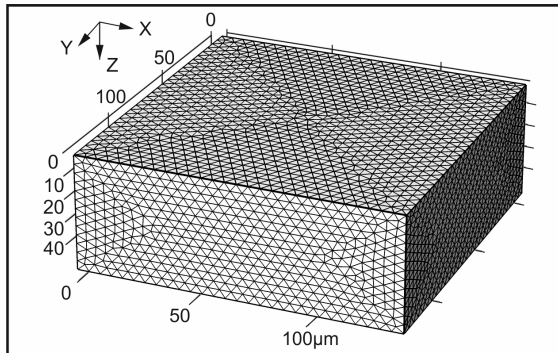


Εξαρτημένες μεταβλητές:

- **u, v, w:** **Μετατοπίσεις** κάθε κόμβου στο X-Y-Z χώρο (αφορούν τις παραμορφώσεις πλέγματος από την αφαίρεση υλικού)
- **T:** **Θερμοκρασία** κόμβου (αφορά το θερμικό μοντέλο)
- **Im:** **Πολλαπλασιαστής Lagrange** της κάθετης ταχύτητας στην επιφάνεια του πλέγματος (αφορά την επιβολή περιορισμών στα σύνορα)

Βαθμοί ελευθερίας:

$$(\#degrees\ of\ freedom) = (\#nodes) * (\#dependent\ variables)$$

**Γεωμετρία:**

- Διαστάσεις τεμαχίου: 140x140x50μm
- Χάραξη: Τετραγωνική εσοχή 100x100x25μm
- Στοιχεία: Τετραεδρικά Lagrange 2ης τάξης 10 κόμβων
- Μέγιστο μέγεθος στοιχείου: 5μm
- Αριθμός στοιχείων: 172534
- Μέση ποιότητα στοιχείων (Skewness): 0.64

Βαθμοί ελευθερίας:

- Μετατοπίσεις κόμβων (u, v, w): 711585
- Θερμοκρασία (T): 237195
- Πολλαπλασιαστής Lagrange (Im): 3845
- Σύνολο βαθμών ελευθερίας: 952625

**Αρχικές συνθήκες:**

- Αρχικό τεμάχιο είναι **απαραμόρφωτο** με **αρχική θερμοκρασία** T_0 είναι ίση περιβάλλοντος T_{amb} .

Συνοριακές συνθήκες:

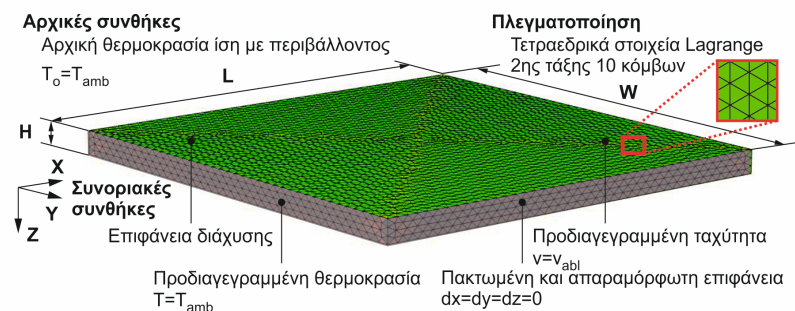
$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4)$$

➤ Άνω επιφάνεια:

- Τοποθετείται η **θερμική πηγή** (μοντελοποίηση Laser).
- Επιφάνεια **διάχυσης** (diffuse surface): διαχέεται ακτινοβολία από επιφάνεια προς το περιβάλλον.
- Θεωρείται ως επιφάνεια **υπό συνθήκη ελεύθερη** προς παραμόρφωση (μοντέλο αφαίρεσης υλικού).

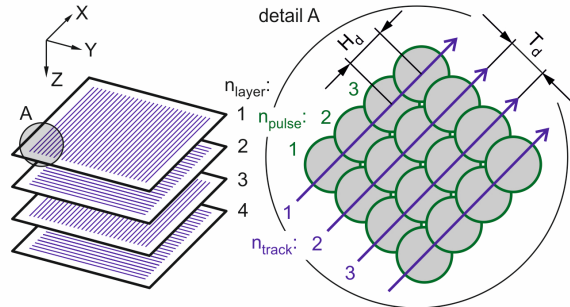
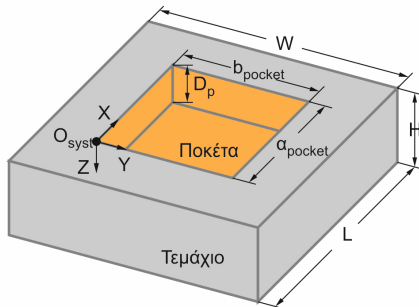
➤ Λοιπές συνοριακές επιφάνειες:

- Συνοριακή συνθήκη τύπου Dirichlet: **σταθερή θερμοκρασία** και ίση με αυτή περιβάλλοντος T_{amb} .
- **Πακτωμένες και απαράμορφωτες** (rigid fixed surface).



Χάρτης σάρωσης:

- **Θέσεις** στις οποίες στέλνονται οι παλμοί.
- Ορίζονται από τη **στρατηγική σάρωσης** (scanning strategy).
- Επιλέχθηκε η **μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης**:
 - **Ευθύγραμμες** και **ισαπέχουσες** μεταξύ τους τροχιές παλμών.
 - **Κάθετη διεύθυνση** μεταξύ τροχιών δυο διαδοχικών επιπέδων σάρωσης.
- **Εξισώσεις κίνησης** για θέση σημείου εστίασης δέσμης (θερμικής πηγής) συναρτήσει του χρόνου.



$$d_u = T_d = H_d = \frac{V}{F_{rep}}$$

$$n_{pulses,x} = \text{floor}\left(\frac{a_{pocket}}{d_u}\right) + 1$$

$$n_{pulses,y} = \text{floor}\left(\frac{b_{pocket}}{d_u}\right) + 1$$

$$t_{period} = \frac{1}{F_{rep}}$$

$$t_{layer} = n_{pulses,x} n_{pulses,y} t_{period}$$

$$n_{layer} = \text{floor}\left(\frac{t}{t_{layer}}\right) + 1$$

$$t_{track} = \begin{cases} n_{pulses,x} t_{period}, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ n_{pulses,y} t_{period}, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases}$$

$$n_{track} = \text{floor}\left(\frac{t - (n_{layer} - 1)t_{layer}}{t_{track}}\right) + 1$$

$$n_{pulse} = \text{floor}\left(\frac{t - (n_{layer} - 1)t_{layer} - (n_{track} - 1)t_{track}}{t_{period}}\right) + 1$$

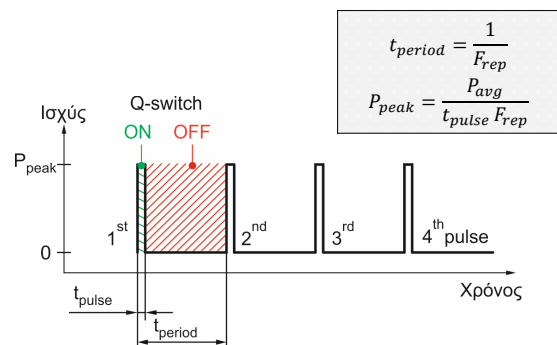
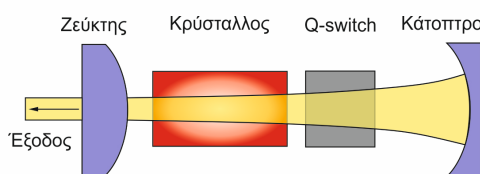
$$x_{focus} = \begin{cases} (n_{pulse} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ (n_{track} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases}$$

$$y_{focus} = \begin{cases} (n_{track} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ (n_{pulse} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases}$$

**Παλμική συμπεριφορά:**

Εξασφαλίζεται μέσω της **τεχνικής μεταγόμενου Q** (Q-switching):

- **Q-switch** συμπεριφέρεται σαν **διάφραγμα** που διαμορφώνει τις απώλειες κοιλότητας συντονισμού.
- **Κλείνει:** - Αυξάνονται απώλειες κοιλότητας συντονισμού.
- Συσσωρεύεται ενέργεια που παρέχεται στο ενεργό μέσο από τη διέγερση.
- Αυξάνεται η αναστροφή πληθυσμού (**μηδενική ισχύς Laser**).
- **Ανοίγει:** - Απώλειες κοιλότητας συντονισμού ξαφνικά ελαττώνονται ($t=0$).
- Αποθηκευμένη ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (**μέγιστη ισχύς Laser**).
- Επαναλαμβάνεται **περιοδικά** η διαδικασία με περίοδο t_{period} .
- Περιοδική **βηματική συνάρτηση** (periodic step function)
 - **Q-switch = OFF:** $P_{pulse}=0$
 - **Q-switch = ON:** $P_{pulse}=P_{peak}$

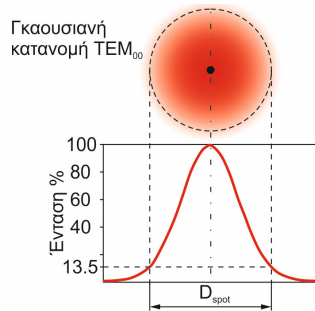


Ένταση ή πυκνότητα ενέργειας δέσμης:

- Ένταση δέσμης Laser: **κατανομή** που εξαρτάται από **σχεδιασμό του συντονιστή**.
- Κατηγοριοποίηση: **χωρικές κατανομές** της έντασης που αντιστοιχούν σε **ερμητιανά πολυώνυμα** διαφόρων τάξεων.
- Ονομάζονται **εγκάρσιοι τρόποι ταλάντωσης** και συμβολίζονται ως **TEM_{MN}**.

Μοντελοποίηση δέσμης:

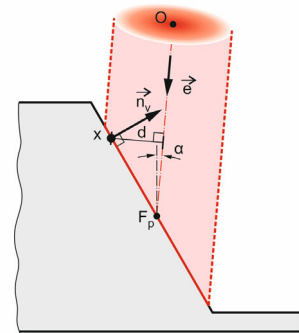
- Πηγή Gauss **TEM₀₀**, **κατανομή έντασης** περιγράφεται από **συνάρτηση Gauss**.
- Διάμετρος **D_{spot}**: αναφέρεται στη **θέση** με ένταση $1/e^2 = 13.5\%$ της **μέγιστης** (ISO 11146).
- **I_{inc}**: **πυκνότητα ενέργειας** που προσπίπτει σε θέση **x** της υπό κλίση επιφάνειας.



$$I_{in} = \frac{2P_{pulse}}{\pi R_{spot}^2} e^{-2\frac{d^2}{R_{spot}^2}}$$

$$d = \frac{\|\vec{e} \times (x - O)\|}{\|\vec{e}\|}$$

$$I_{inc} = I_{in} \frac{|\vec{e} \cdot \vec{n}_v|}{\|\vec{e}\|}$$

**Απορρόφηση από υλικό σε στερεά φάση:**

- Θερμοκρασία είναι ακόμα μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης **T < T_{melt}**.
- Μόνο ένα **μικρό μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται** από το υλικό.
- Το υπόλοιπο **διαφεύγει στο περιβάλλον** εξαιτίας των ανακλάσεων.
- Ποσοτικοποίηση απωλειών λόγω ανακλάσεων: **συντελεστής ανακλαστικότητας R_{solid}**.
- Υπολογισμός **πυκνότητας ενέργειας που απορροφάται** από το τεμάχιο **q_{abs}**:

Μοντέλο επιφανειακής πηγής

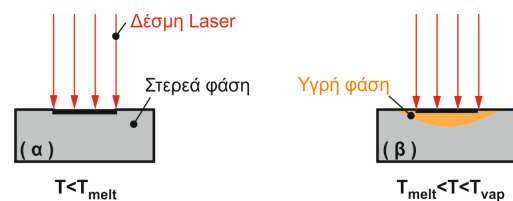
$$q_{abs} = I_{inc} (1 - R_{solid}), \quad T < T_{melt}$$

$$q_{abs} = I_{inc} (1 - R_{liquid}), \quad T_{melt} < T < T_{vap}$$

Απορρόφηση από υλικό σε υγρή φάση:

- Θερμοκρασία **T_{melt} < T < T_{vap}**.
- Αλλαγή φάσης: **απότομη μείωση της ανακλαστικότητας R_{liquid}**.
- Πειραματικές τιμές:

Xie, J., Kar, A., 1999



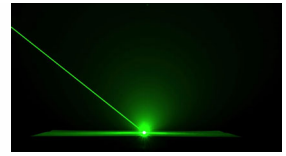
Reflectivity (%) of polished metals for Nd:YAG laser

| Material | Room temp. | Melting temp. |
|-----------------|------------|---------------|
| Aluminum | 94.1 | 79.8 |
| Copper | 95.1 | 83.9 |
| Carbon Steel | 91.3 | 61.8 |
| Stainless Steel | 69.3 | 55.8 |



Ανακλαστικότητα:

- Ανακλαστικότητα **R** αποτελεί **οπτική ιδιότητα του υλικού**.
- Επηρεάζει άμεσα κατεργασίες με Laser (**απώλειες τάξεως 95% στερεά κατάσταση**).
- **Εξαρτάται από:**
 - Μήκος κύματος ακτινοβολίας
 - Θερμοκρασία υλικού
 - Κατάσταση της ύλης
 - Ποιότητα επιφανείας υλικού
 - Γωνία πρόσπτωσης δέσμης

**Τύπος του Fresnel:**

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{(n_{coef} - \cos\alpha)^2 + k_{coef}^2}{(n_{coef} + \cos\alpha)^2 + k_{coef}^2} + \frac{(n_{coef} - (1/\cos\alpha))^2 + k_{coef}^2}{(n_{coef} + (1/\cos\alpha))^2 + k_{coef}^2} \right)$$

- **Απουσία μελέτης** που λαμβάνει υπόψη **όλους τους παράγοντες** επίδρασης.
- **Αξιολόγηση:** εντοπισμός παραγόντων που έχουν **κυρίαρχη επίδραση**.
- Χρήση τιμών ανακλαστικότητας από **πειραματικές μετρήσεις**.

**Ατμοποίηση:**

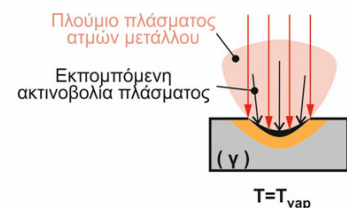
- Θερμοκρασία βρασμού **T=T_{vap}**.
- Το **υλικό της επιφανείας** βρίσκεται στην **υγρή φάση (R_{liquid})**.
- Ατμοποίηση σε πολύ **λεπτό επιφανειακό στρώμα** Knudsen layer, για μέταλλα 0.1μm.
- Το **υλικό απομακρύνεται** με τη μορφή ατμού σχηματίζοντας **πλούμιο ατμών μετάλλου**.

Ανάπτυξη πλάσματος:

- Πλούμιο ατμών **μετάλλου απορροφά H/M ακτινοβολία**.
- Ιονισμός πλουμίου και **ανάπτυξη πλάσματος**.
- Στρώμα από πλάσμα:
 - **Θωρακίζει τη δέσμη** (plasma shielding) κατά τη διέλευσή της.
 - Δημιουργούνται **απώλειες (R_{shielding})** που **ελαττώνουν την ένταση** της δέσμης.
 - **Εκπέμπει H/M ακτινοβολία**.
 - Προσφέρει θερμική ακτινοβολία στο υλικό (**q_{plasma}**).

- Υπολογισμός **πυκνότητας ενέργειας που απορροφάται** από το τεμάχιο **q_{abs}**:

$$q_{abs} = I_{inc} (1 - R_{liquid})(1 - R_{shielding}) + q_{plasma}, \quad T = T_{vap}$$



Απώλειες λόγω διέλευσης δέσμης Laser από πλάσμα:

- Υπολογισμός **συντελεστή απωλειών λόγω θωράκισης** πλάσματος $R_{shielding}$:

$$R_{shielding} = 1 - \exp(-\alpha_{pl} L_{pl})$$

- Πλάσμα έχει μορφή **στρώματος σταθερού πάχους** L_{pl}

- Υπολογισμός **συνολικού συντελεστή απορρόφησης της δέσμης στο πλάσμα** α_{pl} :

$$\alpha_{pl} = \alpha_{IB} + \alpha_{PI} + \alpha_{Mie}$$

- Συντ/στή α_{IB} για **ανάστροφη ακτινοβολία πέδησης** (Inverse Bremsstrahlung IB).
- Συντ/στή α_{PI} για **φωτο-ιονισμό** (Photoionization PI).
- Συντ/στή α_{Mie} για **απορρόφηση Mie** (Mie absorption).

$$\alpha_{IB} = 4.1 * 10^{-23} \frac{Z^2 N_i N_e}{T_p^2} \left(\frac{k T_p}{h \nu} \right)^3 \left(1 - \exp\left(-\frac{h \nu_{beam}}{k T_p}\right) \right)$$

$$\alpha_{PI} = \sigma_p N_{ie}, \sigma_p = 7.9 * 10^{-18} \left(\frac{E_1^*}{h \nu} \right)^3 \left(\frac{I_H}{E_1^*} \right)^{0.5}$$

Θερμική ακτινοβολία πλάσματος:

- Χάραξη με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων:
 - Πυκνότητα ισχύος δέσμης της τάξεως **GW/cm²**, παράγεται **ψυχρό πλάσμα**
- Εκπέμπει **ακτινοβολία ως μέλαν σώμα** (black body radiation).
 - Υπολογίζεται με βάση το **νόμο Stefan-Boltzmann**.
 - Υλικό εμφανίζει **ανακλαστικότητα έναντι της ακτινοβολίας του πλάσματος** (R_p).
- Υπολογίζεται η **ένταση της ακτινοβολίας** του πλάσματος που **απορροφάται** από το υλικό q_{plasma} :

$$q_{plasma} = I_p (1 - R_p)$$

$$I_p = \sigma T_p^4 (1 - \exp(-\sigma_p N_{ie} L_{pl}))$$

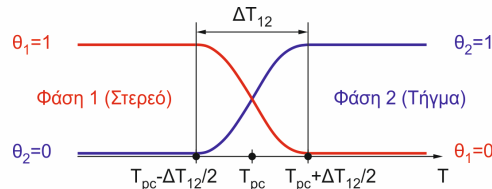
**Μετάδοση θερμότητας:**

- Γενική **τρισεδιάστατη εξίσωση μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε καρτεσιανές συντεταγμένες** που προκύπτει το νόμο του Fourier:

$$\rho(T) c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = 0, \quad \vec{q} = -K(T) \nabla T$$

Αλλαγή φάσης (τήξη):

- Θεώρηση ότι η μεταβολή πραγματοποιείται μέσα σε ένα **θερμοκρασιακό διάστημα μετάβασης**.



- Υπολογισμός **θερμοχωρητικότητας, ενθαλπίας, θερμική αγωγιμότητας**.
- Πυκνότητα:** σταθερή (σταθ. μάζα όγκου ελέγχου)

$$C_p = \theta_1 C_{p,ph1} + \theta_2 C_{p,ph2} + L_H \frac{d\theta_m}{dT}$$

$$H^* = \theta^* H_{ph1} + (1 - \theta^*) H_{ph2}$$

$$K = \theta_1 K_{ph1} + \theta_2 K_{ph2}$$

$$\rho = \rho_{ph1} = \rho_{ph2}$$

$$L_H = H_{ph2} - H_{ph1}, a_m = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}, \theta_1 = \theta^*, \theta_2 = 1 - \theta^*$$



Μοντελοποίηση μηχανισμού αφαίρεσης υλικού:

- Μέθοδος **μετακίνησης πλέγματος** (moving mesh method).
- Κατάλληλες **συνοριακές συνθήκες** για τον υπολογισμό των μεταβολών που υφίσταται η γεωμετρία του τεμαχίου:
 - **Εξερχόμενη ροή θερμότητας** λόγω αφαίρεσης υλικού.
 - **Μετακίνηση πλέγματος** σύμφωνα με απομάκρυνση μάζας από σύστημα.

Εξερχόμενη ροή θερμότητας:

- Εμφανίζεται λόγω της **απομάκρυνσης του υλικού** (ablative heat flux) q_{abl}
- Υπολογίζεται σύμφωνα με τον **νόμο μεταφοράς του Νεύτωνα** στη θερμική του μορφή:

$$q_{abl} = h_a (T_{vap} - T)$$

$$h_a(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{vap} \\ 10^9(T - T_{vap}), & T \geq T_{vap} \end{cases}$$

- Ιδεατός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_a :
 - Εξασφαλίζεται ότι στις ενδιάμεσες επαναλήψεις επίλυσης **αφαιρείται όλη η απαιτούμενη θερμότητα**.
 - Θερμοκρασία του υλικού **να μην υπερβεί τη θερμοκρασία βρασμού**.

**Μεταφορά μάζας:**

- Από **εξερχόμενη ροή θερμότητας** λόγω απομάκρυνσης του υλικού q_{abl} υπολογίζεται:
 - **Πυκνότητα ροής της μάζας** (mass flux) M_{abl}
 - **Ταχύτητα αφαίρεσης υλικού** (ablation velocity) v_{abl}

$$M_{abl} = \frac{q_{abl}}{H_{vap}}$$

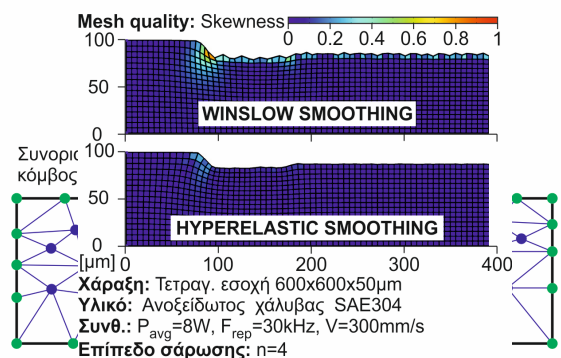
$$v_{abl} = \frac{M_{abl}}{\rho}$$

Μετακίνηση πλέγματος:

- Συνθήκη: **ταχύτητα μετακίνησης κόμβων συνοριακής επιφάνειας** (boundary velocity).
- Προκύπτει η **μετατόπιση (u,v,w) του κάθε κόμβου** της άνω επιφάνειας του πλέγματος του τεμαχίου για την εκάστοτε επανάληψη του χρονικού βήματος της επίλυσης.

Μέθοδος εξομάλυνσης πλέγματος (mesh smoothing method):

- Επιβάλλει ομοιόμορφη μετατόπιση των εσωτερικών κόμβων πλέγματος σύμφωνα με μετατόπιση κόμβων περιγράμματος.
- Αποφυγή δημιουργίας νέου πλέγματος (remeshing) για κάθε αναδιαμόρφωση.
- Υπερελαστική εξομάλυνση (hyperelastic smoothing), πλέγμα υψηλής ποιότητας.



Επίλυση χρονικά εξαρτώμενου (time-dependent) μοντέλου:

- Ολοκλήρωση συνήθων διαφορικών εξισώσεων:
 - Έμμεση (implicit) **μέθοδος BDF** (Backward Differentiation Formula).
- Τεχνική μεταβλητού χρονικού βήματος (adaptive time stepping):
 - **Χρονικό βήμα: προσαρμόζεται** έτσι ώστε να ελέγχεται το **σφάλμα** της μεθόδου, να διατηρείται η **σταθερότητα** της και να μειωθεί στο ελάχιστο το **υπολογιστικό κόστος**.
 - **Δείκτες γεγονότων** (events): **αρχικοποίηση μεταβλητών** και **προσαρμογή βήματος** περιοδικά κατά την **έναρξη** ($t=0$) και **περάτωση** ($t=t_{\text{pulse}}$) κάθε παλμού.
- Προσέγγιση διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver) για το σύστημα εξισώσεων:
 - Ενιαίο σύστημα **διασπάται** σε πολλαπλά **επιμέρους διαχωρισμένα βήματα** (segregated steps):
 - **Step 1: Φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας (T)**
 - **Step 2: Μετακίνηση πλέγματος (u, v, w, Im)**
 - Τα διαχωρισμένα συστήματα εξισώσεων **επιλύονται διαδοχικά** σε κάθε επανάληψη (iteration).
- Επίλυση γραμμικοποιημένων συστημάτων εξισώσεων κάθε διαχωρισμένου βήματος:
 - Αλγόριθμος άμεσης επίλυσης (direct solver) **PARDISO** (parallel sparse direct solver).
- Για τα μη γραμμικά συστήματα εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε:
 - Μέθοδος **Newton-Raphson** με ανανέωση της Ιακωβιανής σε κάθε επανάληψη.

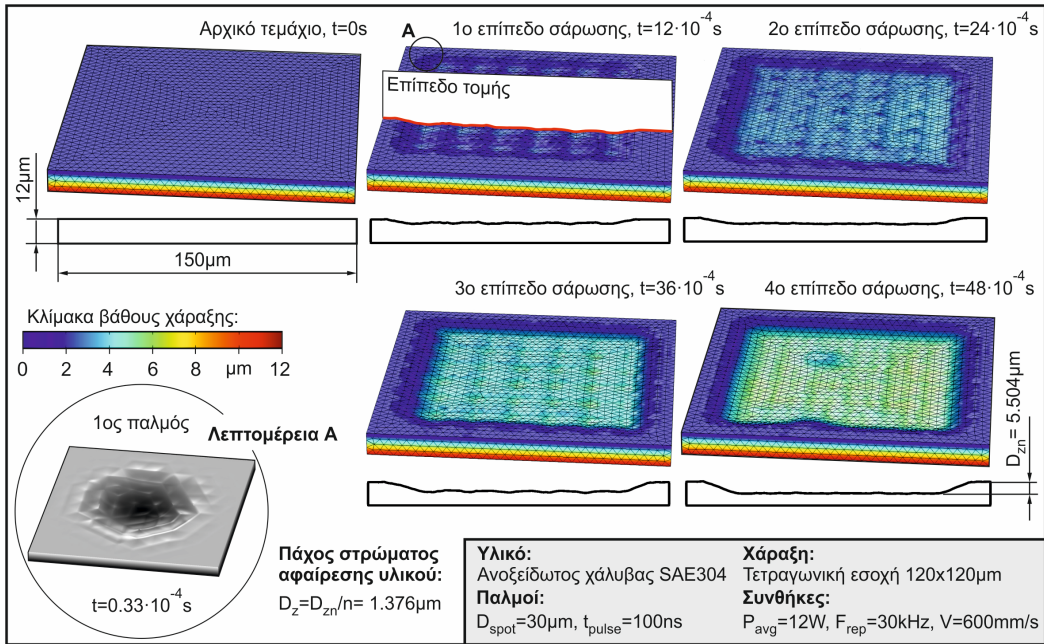
**Προσομοιώσεις για εκτίμηση πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού:**

- Προσομοιώσεις χάραξης τετραγωνικών εσοχών για τέσσερα διαφορετικά υλικά: **ανοξειδωτο χάλυβα SAE304**, **χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH**, **ορείχαλκο C26000** και **κράμα αλουμινίου Al7075-T6**.
 - Τιμές παραμέτρων στο μοντέλο σε συμφωνία με **DMG MORI LASERTEC 40**.
 - Διαστάσεις **τετραγωνικών εσοχών**:
 - Εφικτή η μέτρηση του τελικού βάθους χάραξης (**ευδιάκριτος πυθμένας**).
 - Μειωθεί το μέγεθος της χάραξης στο ελάχιστο δυνατό για **ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης**.
- $$a_{\text{pocket}} = \left[\left(\text{ceil} \left(\frac{D_{\text{spot}}}{d_u} \right) + 5 \right) - 1 \right] d_u, d_u = \frac{v}{F_{\text{rep}}}$$
- Αριθμός των **επιπέδων σάρωσης** διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με **n=4**.
 - Επίπεδα των **συνθηκών κατεργασίας** σύμφωνα με αυτά που ορίζουν οι κατασκευαστές εργαλειομηχανών Laser για εκάστοτε υλικό:

| Συνθήκες κατεργασίας | Μονάδες | Επίπεδα | | | |
|-----------------------------------|---------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------|
| | | Ανοξειδωτος χάλυβας SAE304 | Κράμα αλουμινίου 7075 | Χάλυβας δοχείων πίεσης P355GH | Ορείχαλκος C26000 |
| Μέση ισχύς P_{avg} | W | 8, 12, 16 | 8, 12 | 12 | 8, 12, 16 |
| Ταχύτητα δέσμης V | mm/s | 200, 300, 400, 500, 600, 700 | 200, 300, 400, 500 | 300, 400, 500, 600, 700 | 200, 300, 400, 500 |
| Συχνότητα παλμών F_{rep} | kHz | 20, 30, 40, 50 | 20, 30 | 20, 30, 40, 50 | 20, 30, 40 |



Προσομοίωση χάραξης τετραγωνικής εσοχής σε ανοξείδωτο χάλυβα με το 3D μοντέλο προσομοίωσης για εκτίμηση πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού:



2021



Προσομοίωση χάραξης τετραγωνικής εσοχής

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



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

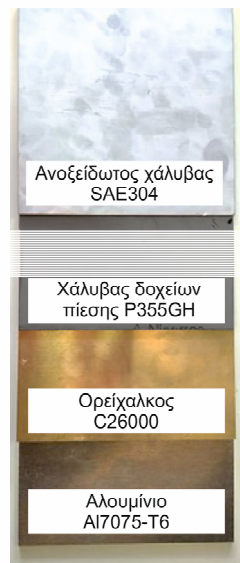
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Εξοπλισμός:

- **DMG MORI LASERTEC 40:** Κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης.
 - 1064nm, Q-switched, 20W, 100ns, 1mJ, 10kW, 20-80kHz, 30μm, 50-1000mm/sec
- **Bruker Contour GT-K:** 3D οπτικό μικροσκόπιο-προφιλόμετρο.

Υλικά:

- **Πλάκες πάχους 5mm και διαστάσεων 200x250mm:**
 - Ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκο C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6.



2021



Πειραματική επιβεβαίωση

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

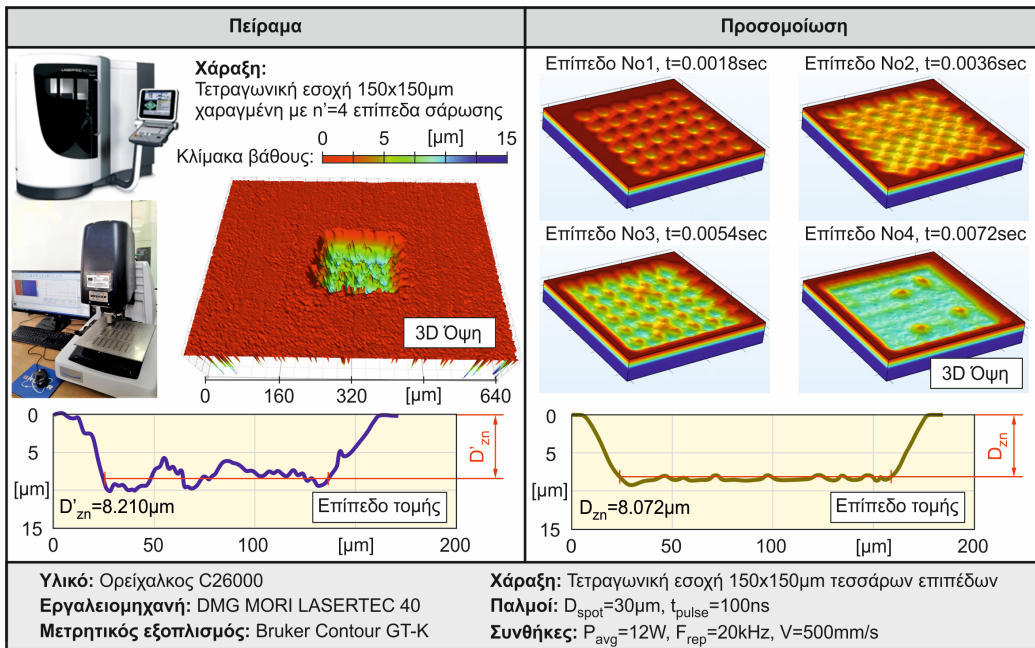


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Πειράματα χάραξης:

- Πανομοιότυπη γεωμετρία χάραξης σε προσομοιώσεις και πειράματα.
- Τεχνικές δυσκολίες: **αδυναμία λήψης προφίλομέτρησης** ικανοποιητικής ποιότητας



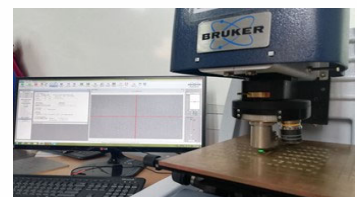
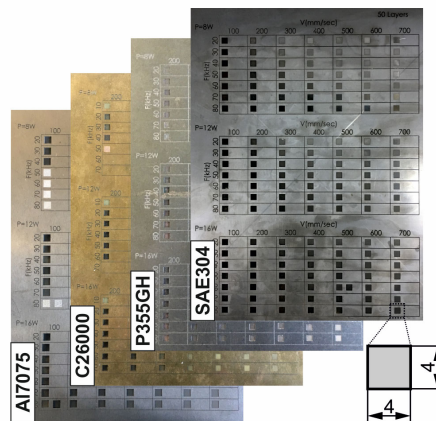
2021

Πειραματική διαδικασία: 1^η εκδοχή<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Πειράματα χάραξης:

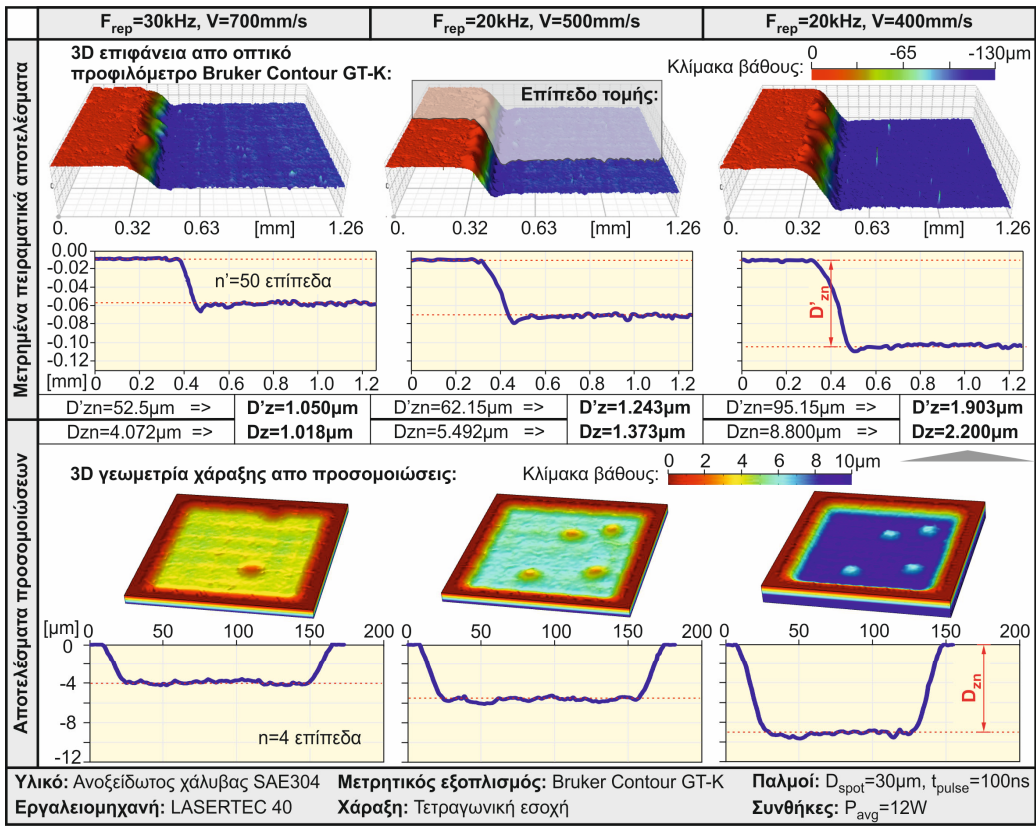
- Χάραξη **τετραγωνικών εσοχών** 4x4mm.
- Συνολικός **αριθμός επιπέδων σάρωσης**:
 - n'=50 για SAE304, P355GH και C26000
 - n'=30 για Al7075-T6
- Μέτρηση **συνολικού βάθους χάραξης** D'zn από προφίλομέτρηση.
- Υπολογισμός **πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού** D'z το οποίο θα αποτελέσει την παράμετρο για **σύγκριση** μεταξύ αποτελεσμάτων πειραμάτων και προσομοιώσεων.



2021

Πειραματική διαδικασία: 2^η εκδοχή<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης



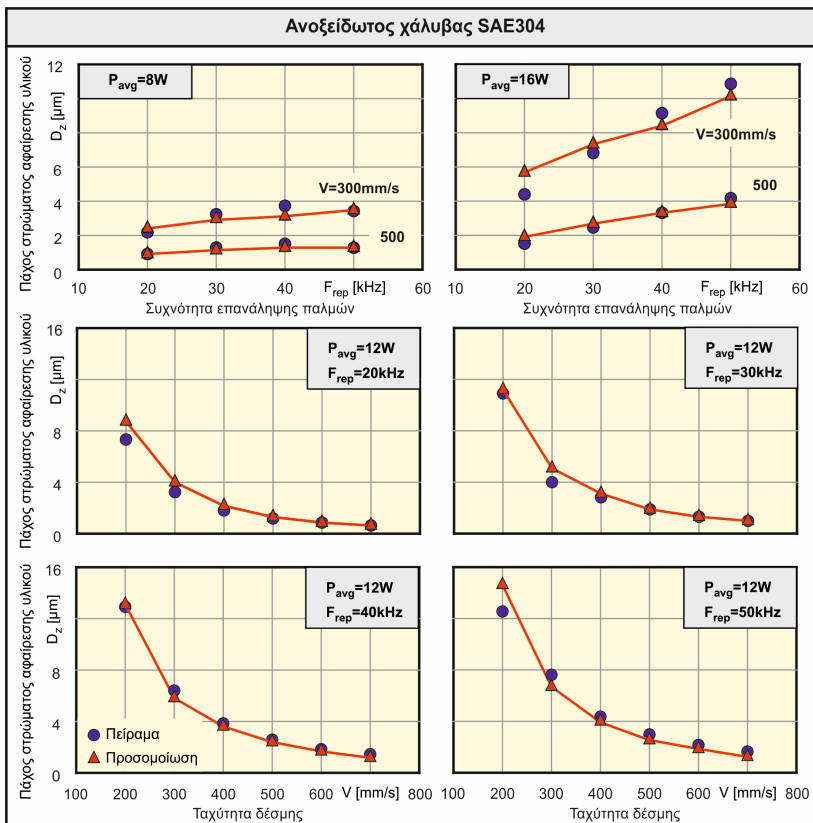
Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων και προσομοιώσεων: πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z

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

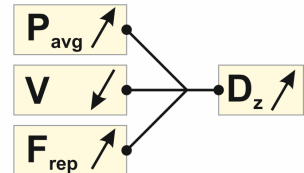


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης



Επίδραση συνθηκών καταργασίας:



Μέγιστο D_z :

- $D_{z,max}=14.6\mu\text{m}$
- 12W, 50kHz, 200mm/s

Ελάχιστο D_z :

- $D_{z,min}=0.7\mu\text{m}$
- 12W, 20kHz, 700mm/s

Σφάλμα προσομοίωσης:

- Μέσο σφάλμα $ME=0.1\mu\text{m}$
- Μέσο απόλυτο σφάλμα $MAE=0.4\mu\text{m}$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_{z,i} - D'_{z,i})$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_{z,i} - D'_{z,i}|$$



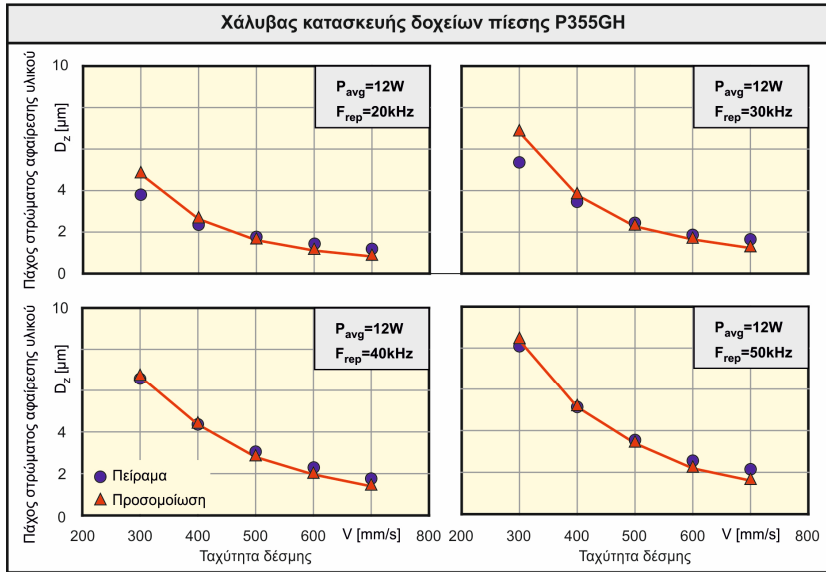
Αποτελέσματα: Πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z για ανοξείδωτο χάλυβα SAE304

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

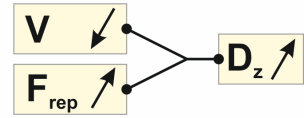


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης



Επίδραση συνθηκών κατεργασίας:



- Μέγιστο D_z :**
- $D_{z,max} = 8.3 \mu m$
 - 12W, 50kHz, 300mm/s
- Ελάχιστο D_z :**
- $D_{z,min} = 0.8 \mu m$
 - 12W, 20kHz, 700mm/s

- Σφάλμα προσομοίωσης:**
- Μέσο σφάλμα $ME = 0.0 \mu m$
 - Μέσο απόλυτο σφάλμα $MAE = 0.3 \mu m$



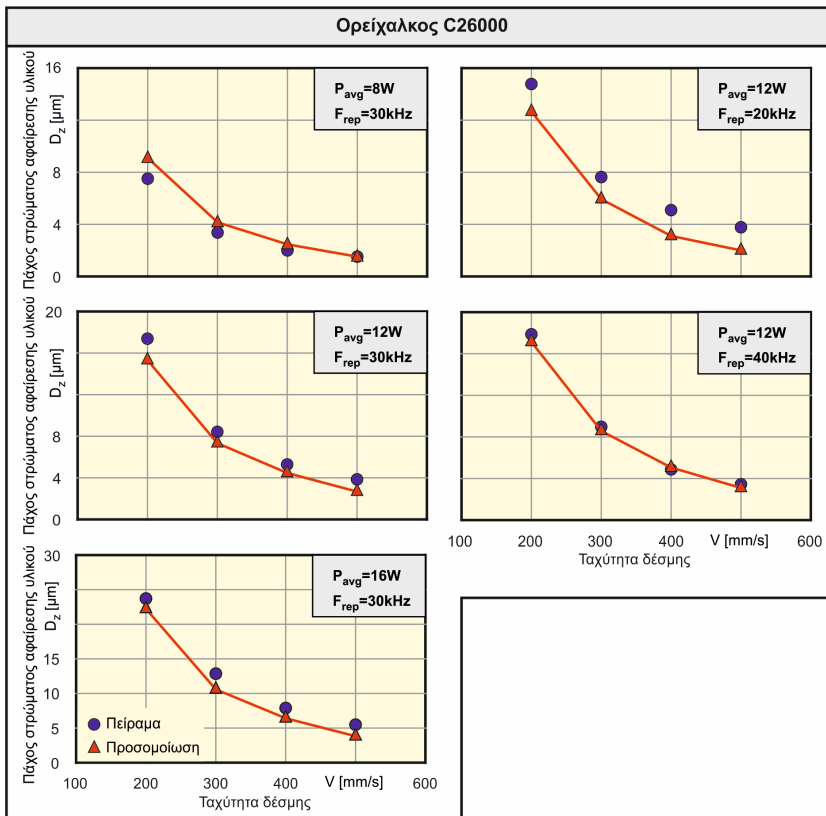
Αποτελέσματα: Πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z για χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH

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

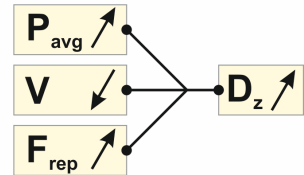


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης



Επίδραση συνθηκών κατεργασίας:



- Μέγιστο D_z :**
- $D_{z,max} = 22.4 \mu m$
 - 16W, 30kHz, 200mm/s
- Ελάχιστο D_z :**
- $D_{z,min} = 1.5 \mu m$
 - 8W, 30kHz, 500mm/s

- Σφάλμα προσομοίωσης:**
- Μέσο σφάλμα $ME = -0.9 \mu m$
 - Μέσο απόλυτο σφάλμα $MAE = 1.2 \mu m$



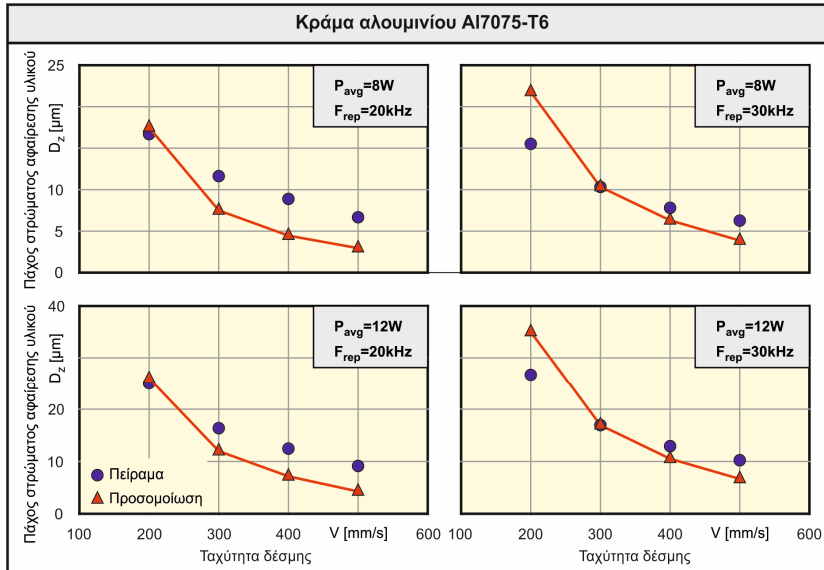
Αποτελέσματα: Πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z για ορείχαλκο C26000

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

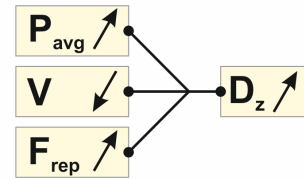


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης



Επίδραση συνθηκών κατεργασίας:



Μέγιστο D_z :

- $D_{z,max}$ =35.2 μm
- 12W, 30kHz, 200mm/s

Ελάχιστο D_z :

- $D_{z,min}$ =3.0 μm
- 8W, 20kHz, 500mm/s

Σφάλμα προσομοίωσης:

- Μέσο σφάλμα $ME=-1.3\mu\text{m}$
- Μέσο απόλυτο σφάλμα $MAE=3.4\mu\text{m}$



Αποτελέσματα: Πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z για κράμα αλουμινίου Al7075-T6

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



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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Επίδραση συνθηκών κατεργασίας:

➤ **Μέση ισχύς P_{avg} :**

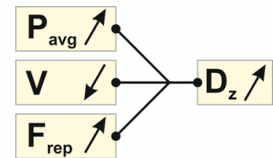
- **Αύξηση P_{avg}** οδηγεί σε αύξηση μέγιστης ισχύος παλμού P_{peak} .
- Ακτινοβολούμενο υλικό δέχεται **μεγαλύτερο ποσό ενέργειας**.
- **Αυξάνεται ρυθμός ατμοποίησης**.
- Δημιουργία **βαθύτερων κρατήρων** στο τεμάχιο.
- Οδηγεί σε **αύξηση πάχους αφαιρούμενου υλικού ανά επίπεδο D_z** .

➤ **Ταχύτητα της δέσμης V :**

- **Μείωση V** οδηγεί σε μείωση της απόστασης μεταξύ των παλμών d_u .
- Προκύπτει ένας **περισσότερο πυκνός χάρτης** από παλμούς δέσμης Laser ίδιων χαρακτηριστικών.
- Οδηγεί σε **αφαίρεση μεγαλύτερου πάχους υλικού ανά επίπεδο D_z** .

➤ **Συχνότητα επανάληψης παλμών F_{rep} :**

- **Αύξηση F_{rep}** οδηγεί σε **μείωση της απόστασης μεταξύ των παλμών d_u** , πυκνότερο χάρτη σάρωσης και συμβάλει στην **αύξηση του D_z** .
- **Αύξηση F_{rep}** οδηγεί σε **μείωση της μέγιστης ισχύος παλμού P_{peak}** , δημιουργούνται **κρατήρες μικρότερου μεγέθους** και συμβάλει στην **μείωση του D_z** .
- Η **συνεισφορά στην αύξηση του D_z** από την πύκνωση του χάρτη **υπερνικά τη μείωση** από το μειωμένο μέγεθος των κρατήρων.
- Αντικρουόμενα μεγέθη: **ασθενέστερη επίδραση F_{rep} στο D_z** .



$$d_u = \frac{V}{F_{rep}}$$

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{t_{pulse} F_{rep}}$$



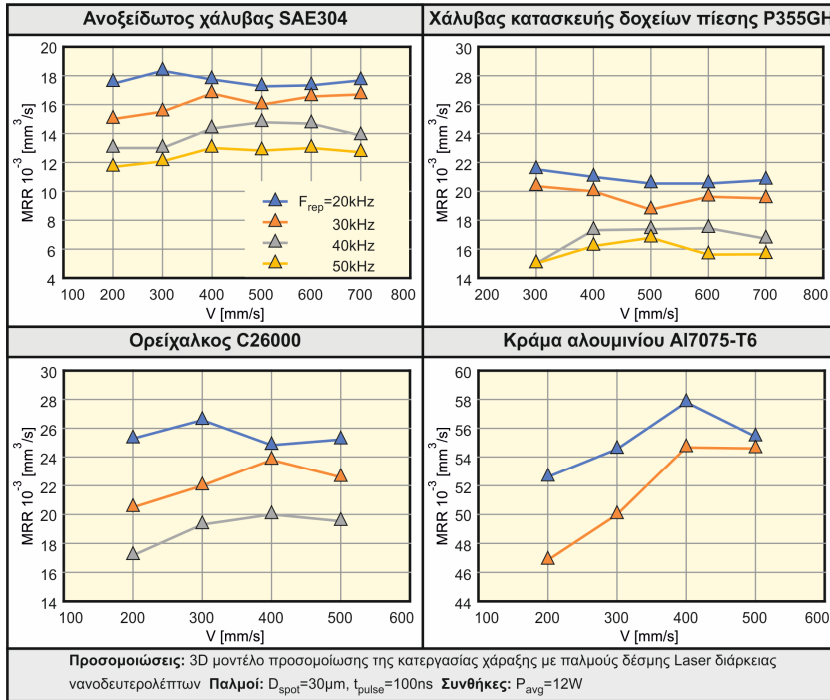
Σχολιασμός

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

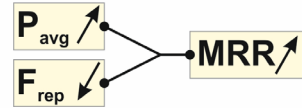


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Ευάγγελος Νικολιδάκης



Επίδραση συνθηκών κατεργασίας:



$$MRR \left[\frac{mm^3}{s} \right] = \frac{V^2 D_z}{F_{rep}} 10^{-6}$$

Μέγιστος ρυθμός αποβολής υλικού MRR:

SAE304: $MRR_{max}=0.0182mm^3/s$ P355GH: $=0.0216mm^3/s$ C26000: $=0.0266mm^3/s$

• 12W, 20kHz, 300mm/s

AL7075: $=0.0579mm^3/s$

• 12W, 20kHz, 400mm/s

2021



Αποτελέσματα: Ρυθμός αποβολής υλικού MRR

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Περιορισμοί 3D μοντέλου προσομοίωσης κατεργασίας χάραξης:

- Επίλυση σε **εύλογο χρονικό διάστημα** προσομοιώσεων για χάραξη **μικρών εσοχών**.
 - Προσομοίωση **τετραγωνικής εσοχής** 120x120x5.5μm σε SAE304: περίπου **52 ώρες** για PC.

Ανάπτυξη ψευδο-3D προσομοιωτικού μοντέλου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων:

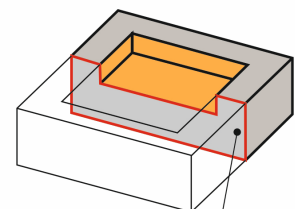
- ✓ Λαμβάνει όλη την απαραίτητη πληροφορία για την **3D φύση της κατεργασίας**.
- ✓ Με κατάλληλη μοντελοποίηση επιλύεται ένα **2D μοντέλο με τη χρήση FEM**.
- ✓ Προσομοιώνει αφαίρεση υλικού από παλμούς για **εγκάρσιο επίπεδο τομής** της εσοχής.

Ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης:

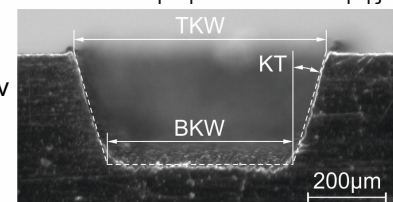
- Ορίστηκε εξαρχής η **2D γεωμετρία**, η **διακριτοποίησή** της, **αρχικές** και **συνοριακές συνθήκες**.
- Εκ νέου ανάπτυξη **χάρτη σάρωσης** (απομόνωση παλμών που συμβάλουν στην αφαίρεση υλικού στο εγκάρσιο επίπεδο τομής).
- Επίδραση της **σύγκλισης της δέσμης** στη λοξοποίησης (kerf) των πλευρών.

Εκτίμηση:

- ✓ **Γωνίας κλίσης** (kerf taper angle) **KT** πλευρικών τοιχωμάτων
- ✓ **Ανω πλάτους χάραξης** (top kerf width) **TKW**
- ✓ **Κάτω πλάτους χάραξης** (bottom kerf width) **BKW**



εγκάρσιο επίπεδο τομής



2021



Γενική περιγραφή

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Περιοχή ενδιαφέροντος:

- 2D ανάλυση FEA για **εγκάρσιο επίπεδο τομής X-Z** για προσομοίωση χάραξη μιας **τετραγωνικής εσοχής** πλευρών $a_{\text{pocket}} \times a_{\text{pocket}}$ και βάθους D_p .
- Αφαίρεση υλικού σε εγκάρσιο επίπεδο τομής: **επηρεάζεται μόνο** από παλμούς για τους οποίους **τμήμα της ακτινοβολούμενης** επιφάνειας βρίσκεται **πάνω στο επίπεδο** αυτό.
- **Περιοχή ενδιαφέροντος** που ορίζεται σε απόσταση $-R_{\text{spot}}$ πριν και $+R_{\text{spot}}$ μετά την θέση του επιπέδου τομής.
- **Εξετάζονται μόνο παλμοί εντός αυτής.**

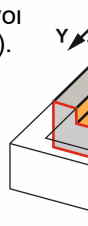
Συμμετρία:

- Ανάλυση **από μέσον και δεξιότερα** του εγκάρσιου επιπέδου τομής X-Z.

Χάρτης σάρωσης:

- ✓ Ψευδο-3D ορθογωνική γεωμετρία με μήκος $a_{\text{pocket}}/2$ (συμμετρία) και πλάτος $2R_{\text{spot}}$ (περιοχή ενδιαφέροντος).
- ✓ Ελαχιστοποίηση χρόνου επίλυσης (λίγοι παλμοί, περιορισμένη γεωμετρία FEM).
- ✓ Εξισώσεις κίνησης θερμικής πηγής για:

μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης.



$$\begin{aligned}
 n_{\text{pulses},x} &= \text{floor} \left(\frac{(a_{\text{pocket}} - 2BD_{\text{offset}})/2}{d_u} \right) + 1 \\
 n_{\text{pulses},y} &= \text{ceil} \left(\frac{2R_{\text{spot}}}{d_u} \right) + 1 \\
 t_{\text{period}} &= \frac{1}{F_{\text{rep}}} \\
 t_{\text{layer}} &= n_{\text{pulses},x} n_{\text{pulses},y} t_{\text{period}} \\
 n_{\text{layer}} &= \text{floor} \left(\frac{t}{t_{\text{layer}}} \right) + 1 \\
 t_{\text{track}} &= \begin{cases} n_{\text{pulses},x} t_{\text{period}}, & n_{\text{layer}} \text{ περιττός} \\ n_{\text{pulses},y} t_{\text{period}}, & n_{\text{layer}} \text{ άρτιος} \end{cases} \\
 n_{\text{track}} &= \text{floor} \left((t - (n_{\text{layer}} - 1)t_{\text{layer}}) / t_{\text{track}} \right) + 1 \\
 n_{\text{pulse}} &= \text{floor} \left((t - (n_{\text{layer}} - 1)t_{\text{layer}} - (n_{\text{track}} - 1)t_{\text{track}}) / t_{\text{period}} \right) + 1 \\
 x_{\text{focus}} &= \begin{cases} (n_{\text{pulse}} - 1)d_u, & n_{\text{layer}} \text{ περιττός} \\ (n_{\text{track}} - 1)d_u, & n_{\text{layer}} \text{ άρτιος} \end{cases} \\
 y_{\text{focus}} &= \begin{cases} (n_{\text{track}} - 1)d_u, & n_{\text{layer}} \text{ περιττός} \\ (n_{\text{pulse}} - 1)d_u, & n_{\text{layer}} \text{ άρτιος} \end{cases}
 \end{aligned}$$

2021



Χάρτης σάρωσης

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

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

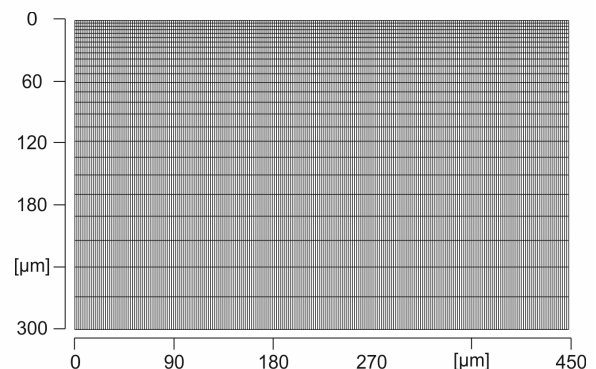
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Γεωμετρία αρχικού τεμαχίου:

- Ως **αρχικό τεμάχιο** ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με:
 - **Μήκος** ίσο με 1.5 φορές το μήκος της χάραξης.
 - **Ύψος** ίσο με 3 φορές το βάθος της χάραξης.
 - **Ελαχιστοποίηση αριθμού στοιχείων** του πλέγματος.
 - Τεμάχιο αρκετά μεγάλο για να **μην εμφανιστούν μεγάλες παραμορφώσεις** στο πλέγμα.

Διακριτοποίηση:

- Πλεγματοποίηση (meshing): στοιχεία μορφής **κανονικού τετραπλεύρου Lagrange 2ης τάξεως 8 κόμβων**.
 - Χαρακτηρίζεται από **απλότητα, ευελιξία** και είναι ιδιαίτερα **αποδοτικό** για 2D προσομοιώσεις.
- Διεύθυνση του **άξονα X**:
 - Τετράπλευρα **μήκους 2μm**.
- Διεύθυνση του **άξονα Z**:
 - **Υψηλότερη ανάλυση** άνω συνοριακή επιφάνεια του τεμαχίου.
 - Τεχνική **γεωμετρικής αύξησης του μεγέθους** των στοιχείων.



2021



Γεωμετρία και διακριτοποίηση

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

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Αρχικές συνθήκες:

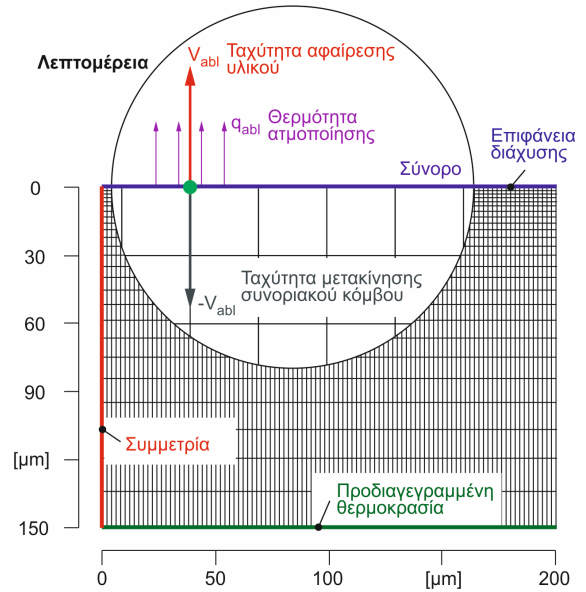
- Αρχικό τεμάχιο απαράμορφωτο με αρχική θερμοκρασία T_0 ίση με περιβάλλοντος T_{amb} .

Συνοριακές συνθήκες:

- **Αριστερό σύνορο:**
 - Συνοριακή συνθήκη που εξασφαλίζει τη **συμμετρία**.
 - **Δεν εμφανίζεται ροή θερμότητας** διαμέσου του συνόρου (thermal insulation condition).
- **Λοιπές συνοριακές επιφάνειες:**
 - Όμοιες συνοριακές συνθήκες με αυτές του 3D μοντέλου προσομοίωσης που παρουσιάστηκε.

Θερμικό μοντέλο και μοντελοποίηση μηχανισμού αφαίρεσης υλικού:

- **Όμοια μοντελοποίηση** με το 3D μοντέλο που παρουσιάστηκε.



2021



Αρχικές, συνοριακές συνθήκες, θερμικό μοντέλο, αφαίρεση υλικού και συνθήκη τερματισμού

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



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

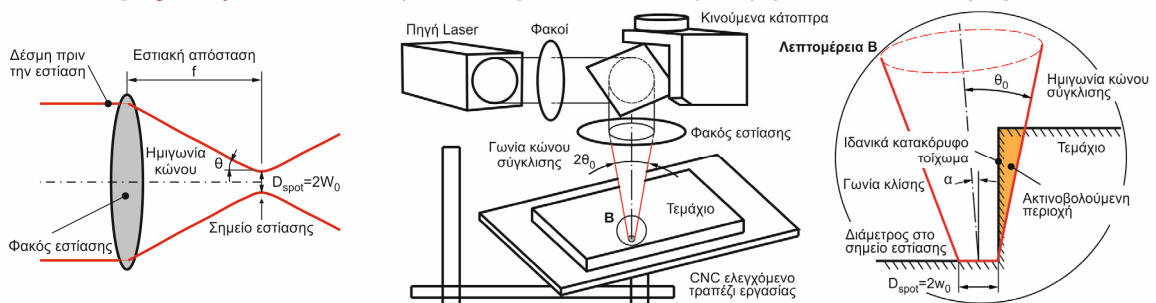
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Σύγκλιση δέσμης:

- Δέσμη Laser κατά την έξοδο από τον φακό F-theta **συγκλίνει** (convergence) μέχρις ότου συναντήσει το επίπεδο εστίασης (focal plane).
- Επίπεδο εστίασης εμφανίζει **ελάχιστη διάμετρο** (beam waist) $D_{spot}=2W_0$.
- Ημιγωνία **κώνου σύγκλισης** θ_0 υπολογίζεται σύμφωνα με **πρότυπο ISO 11146** συναρτήσει του συντελεστή ποιότητας της δέσμης M^2 , του μήκους κύματος λ και της ελάχιστης ακτίνας της δέσμης w_0 :

$$\theta_0 = M^2 \theta_{ideal} = \frac{M^2 \lambda}{\pi w_0}$$

- Η **κωνική μορφή** της δέσμης συμβάλει στην **λοξοποίηση των πλευρών** (kerf formation):
Κλίση στα τοιχώματα και διαστατικές αποκλίσεις.
- Στις ακραίες θέσεις στο σύνορο **ένα τμήμα από το υλικό** του τεμαχίου που **βρίσκεται προς τα έξω** από το σύνορο **ακτινοβολείται** από τη δέσμη και **σταδιακά αφαιρείται**.



2021



Σύγκλιση δέσμης

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



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

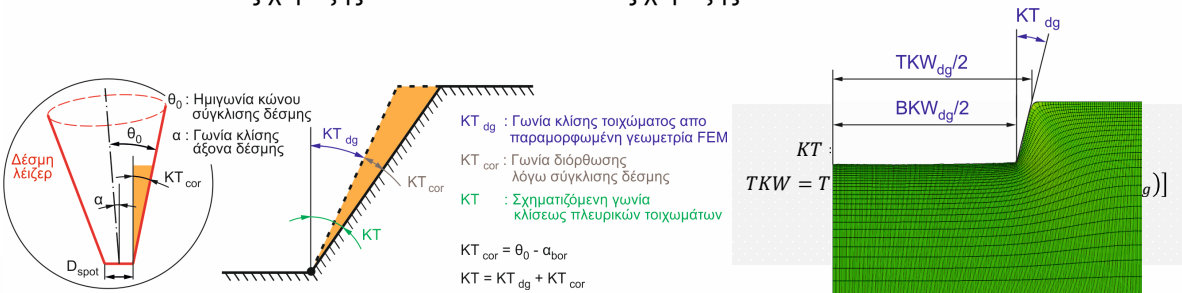
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Κλίση τοιχωμάτων:

- Επίλυση του ψευδο-3D μοντέλου για εγκάρσιο επίπεδο τομής θεωρώντας σταθερή διάμετρο δέσμης κατά τη διάδοση της.
- Από εξαγόμενη **παραμορφωμένη γεωμετρία** (deformed geometry) από FEA υπολογίζεται μια **πρώτη εκτίμηση** για την κλίση του τοιχώματος KT_{dg} και τις τιμές του άνω TKW_{dg} και κάτω BKW_{dg} πλάτους χάραξης.

Συνεισφορά σύγκλισης:

- ✓ Γωνία KT_{dg} από FEA **συνυπολογίζεται διόρθωση** KT_{cor} .
- ✓ Εξαρτάται από **ημιγωνία του κώνου σύγκλισης** θ_0 και τη **γωνία κλίσης** α_{bor} του άξονα της δέσμης ως προς το κατακόρυφο άξονα στο σύνορο.
- ✓ Υπολογισμός **διορθωμένων τιμών** της γωνίας κλίσης του πλευρικού τοιχώματος KT , άνω πλάτους χάραξης TKW και κάτω πλάτους χάραξης BKW .



2021



Μοντελοποίηση συνεισφοράς σύγκλισης

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

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

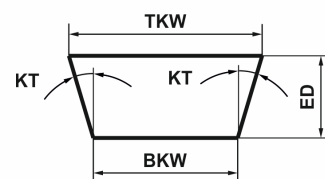
Ευάγγελος Νικολιδάκης

Προσομοιώσεις με ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης:

- Προσομοιώσεις χάραξης **τετραγωνικών εσοχών** σε **ανοξειδωτο χάλυβα** SAE304.
- Μήκος πλευράς $\alpha_{pocket}=0.6\text{mm}$, βάθος $D_p=0.05\text{mm}$ και 0.1mm .
- Διάφορες τιμές των **συνθηκών κατεργασίας**: P_{avg} , V , F_{rep}
- Τιμές παραμέτρων στο μοντέλο σε συμφωνία με **DMG MORI LASERTEC 40**.

| Συνθήκες κατεργασίας | Μονάδες | Επίπεδα |
|----------------------------|---------|---------------|
| Μέση ισχύς P_{avg} | W | 8, 12 |
| Ταχύτητα δέσμης V | mm/s | 200, 300, 400 |
| Συχνότητα παλμών F_{rep} | kHz | 20, 30, 40 |
| Βάθος εσοχής D_p | mm | 0.05, 0.1 |

Εκτίμηση χαρακτηριστικών γεωμετρίας χάραξης:



2021



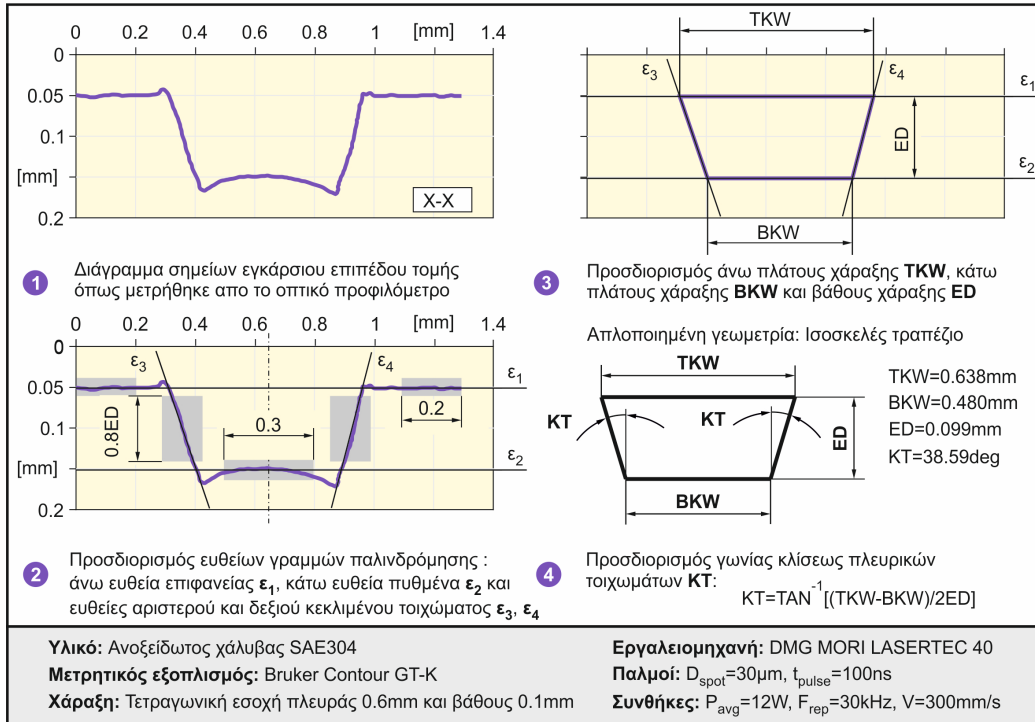
Προσομοιώσεις με ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης

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

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

4.



2021



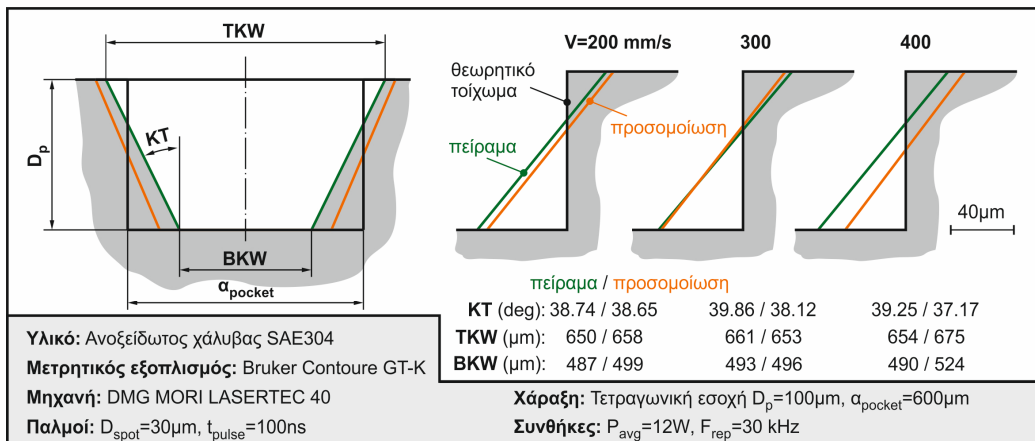
Επεξεργασία μετρήσεων

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


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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

4.



2021

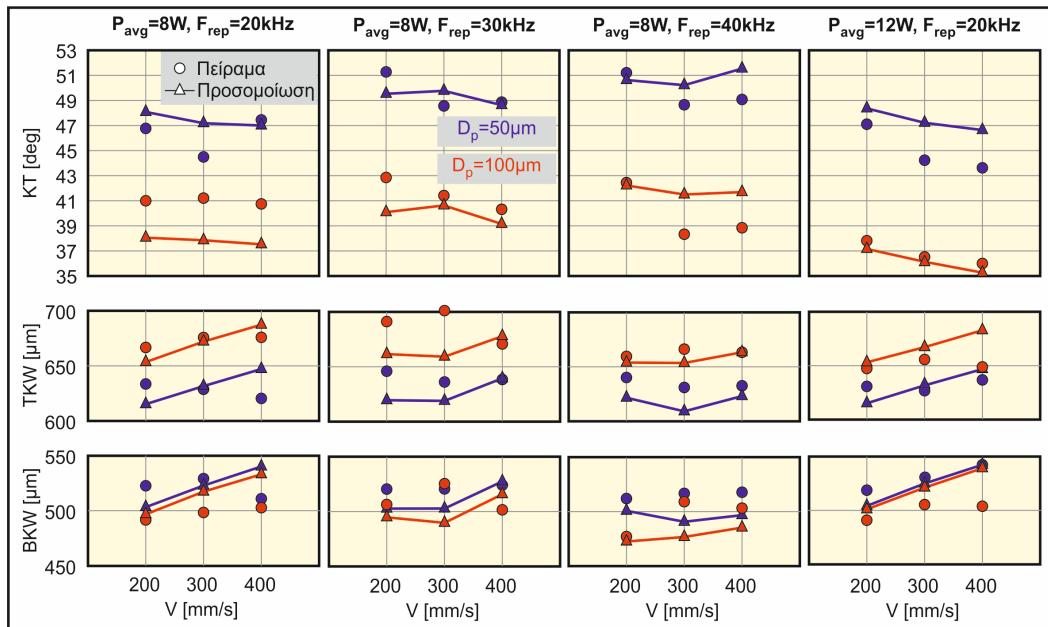


Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων και προσομοιώσεων: KT, TKW, BKW

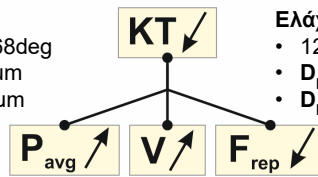
<http://www.m3.tuc.gr>


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

Ευάγγελος Νικολιδάκης


Σφάλματα προσομοίωσης:

- **KT:** ME=0.01deg, MAE=1.68deg
- **TKW:** ME=-3μm, MAE=14μm
- **BKW:** ME=-1μm, MAE=17μm


Ελάχιστη κλίση τοιχώματος KT προσομοίωσης:

- 12W, 20kHz, 400mm/s
- $D_p=50\mu\text{m}$: $KT_{\min}=46.7\text{deg}$, $TKW=647\mu\text{m}$, $BKW=541\mu\text{m}$
- $D_p=100\mu\text{m}$: $KT_{\min}=35.3\text{deg}$, $TKW=681\mu\text{m}$, $BKW=540\mu\text{m}$

2021


Αποτελέσματα: κλίση τοιχώματος KT, άνω πλάτος χάραξης TKW και κάτω πλάτος χάραξης BKW
<http://www.m3.tuc.gr>

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Παρούσα διδακτορική διατριβή:

- Μελέτη ερευνητικών εργασιών σε διεθνές επίπεδο για κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser
- Μοντελοποίηση κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων
- Ανάπτυξη 3D μοντέλου προσομοίωσης με FEM
- Προσομοιώσεις για εκτίμηση πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού και ρυθμού αποβολής υλικού
- Ανάπτυξη ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης με FEM
- Προσομοιώσεις για εκτίμηση της κλίσης των τοιχωμάτων και διαστατικών αποκλίσεων
- Πειραματική επιβεβαίωση
- Ανάλυση για την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στα χαρακτηριστικά χάραξης

2021


Σύνοψη
<http://www.m3.tuc.gr>

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

Ευάγγελος Νικολιδάκης

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Σύγχρονα μοντέλα κέντρων κατεργασιών Laser χάραξης:
 - Εξοπλισμένα και με **περιστροφικούς άξονες** του τραπέζιού.
 - Εξελεγκμένες **κεφαλές σάρωσης**.
 - Παρέχουν τη δυνατότητα για **κίνηση της δέσμης σε μεγάλο εύρος**.
- **Εξέλιξη του μοντέλου προσομοίωσης:**
 - Εκτίμηση της **βέλτιστης διεύθυνσης της δέσμης** κατά την πρόσπτωση στο τεμάχιο ώστε να **εξαλειφθεί η λοξοποίηση** των τοιχωμάτων (kerf).
- Στο αναπτυχθέν μοντέλο προσομοίωσης δόθηκε έμφαση:
 - Εκτίμηση μεγεθών που σχετίζονται κυρίως με τις **διαστάσεις της γεωμετρίας χάραξης**.
- **Εξέλιξη του μοντέλου προσομοίωσης:**
 - Εκτίμηση μεγεθών που σχετίζονται με την **ποιότητα της χάραξης** όπως η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας και η μεταβολή στην σκληρότητα.
- **Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση:**
 - Αναζήτηση του **βέλτιστου συνδυασμού των συνθηκών κατεργασίας**.
 - Εξυπηρετούνται ταυτόχρονα **πολλαπλές και εν μέρει αντικρουόμενες απαιτήσεις:** παραγωγικότητα, διαστατική ακρίβεια, ποιότητα επιφανείας.

**Δημοσιευμένες εργασίες σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με κριτές:**

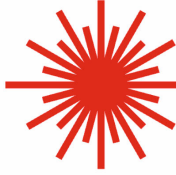
- Nikolidakis, E., Choreftakis, I., Antoniadis, A., 2018, "Experimental Investigation of Stainless Steel SAE304 Laser Engraving Cutting Conditions," *Machines*, **6**(3), pp. 40
 - Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2019, "FEM modeling simulation of laser engraving," *Int J Adv Manuf Technol.*, **105**, pp. 3489-3498
 - Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2020, "Modeling and simulation of the nanosecond pulsed laser engraving process," *MATEC Web Conf.*, **318**, No. 01044
- Επαναδημοσίευση: Proc. of the 7th International Conference on Manufacturing and Materials Engineering - ICMMEN20, Thessaloniki, Greece, 2-3 July 2020
- Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2021, "FEM modeling and simulation of kerf formation in the nanosecond pulsed laser engraving process," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (υπό κρίση)

Κεφάλαια βιβλίων:

- Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2021, "Experimental investigation of process parameters effect on laser engraving process quality," *Experiments and simulations in advanced manufacturing*, Springer, pp 117-169



Σας ευχαριστώ
Για την προσοχή σας



Απορίες;
Ερωτήσεις;

