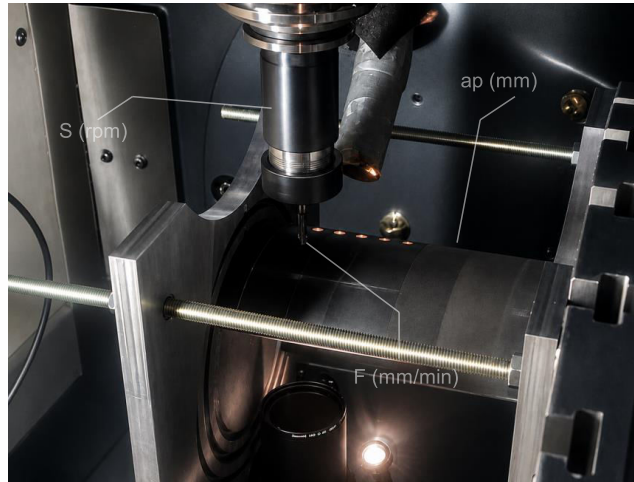


ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ CFRP



Καθηγητής Αριστομένης Αντωνιάδης
Υπ. Διδάκτωρ Ευανθία Μουντάκη

ΓΡΑΨΑ ΝΙΚΟΛΕΤΤΑ
Πολυτεχνείο Κρήτης – Χανιά, 2026

2026

INVESTIGATION of OPTIMAL DRILLING CONDITIONS
for CFRP COMPOSITES



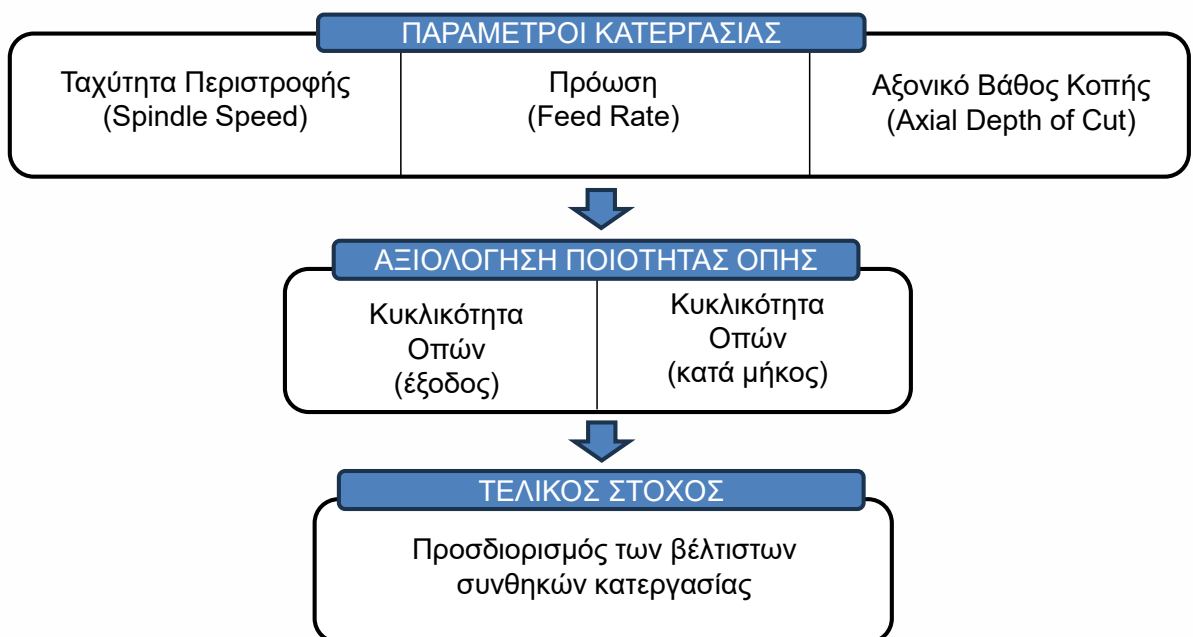
<http://www.m3.tuc.gr>



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

Νικολέττα Γράψα

Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της ελικοειδούς διάτρησης (Helical Milling) στην ποιότητα των οπών που δημιουργούνται σε σύνθετα υλικά CFRP.



2026

INVESTIGATION of OPTIMAL DRILLING CONDITIONS
for CFRP COMPOSITES



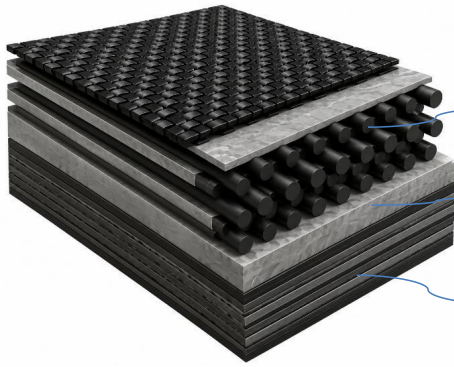
Στόχος της εργασίας

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



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

Νικολέττα Γράψα



Ίνες άνθρακα
(Carbon Fibers)

Πολυμερική μήτρα
(Polymer matrix)

Στρώσεις
(Laminates)



Αυτοκινητοβιομηχανία

Ανεμογεννήτριες

Αθλητικός εξοπλισμός

Βιομηχανικός εξοπλισμός

CFRP

Carbon Fiber Reinforced Polymers

- ✓ Σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα και πολυμερική μήτρα
- ✓ Υψηλή αντοχή και ακαμψία με μικρό βάθος
- ✓ Ευρεία χρήση σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων
- ✓ Δύσκολη κατεργασία λόγω της ανισότροπης και ετερογενούς δομής



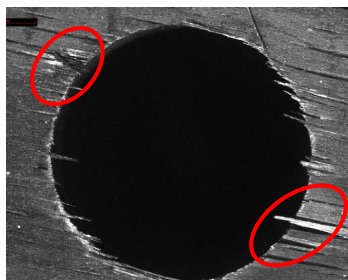
Σύνθετα υλικά CFRP

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

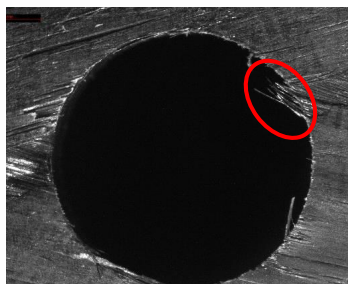


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Νικολέττα Γράψα



Delamination



Uncut Fibers



Ανισότροπο και ετερογενές υλικό

Οι ιδιότητες διαφέρουν ανά διεύθυνση και στρώση.



Υψηλή λειαντικότητα

Οι ίνες άνθρακα προκαλούν ταχεία φθορά των εργαλείων.



Εμφάνιση βλαβών κατά την κατεργασία

Αποκόλληση, άκοπες ίνες κ.α.



Απαιτείται βελτιστοποίηση παραμέτρων

Για την ελαχιστοποίηση των βλαβών και τη βελτίωση της ποιότητας των σπών.



Δομή του CFRP και βλάβες κατά την κατεργασία

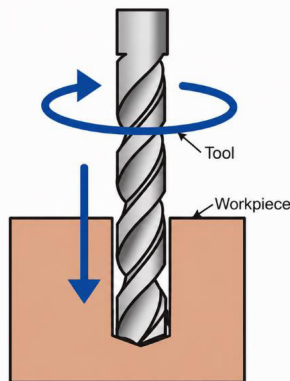
<http://www.m3.tuc.gr>



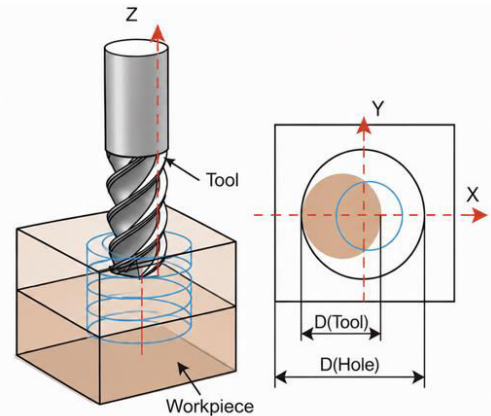
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Νικολέττα Γράψα

Στη συμβατική διάτρηση το εργαλείο κινείται αποκλειστικά κατά τον άξονα Z, ενώ στην ελικοειδή διάτρηση ακολουθεί ελικοειδή τροχιά. Η διαφορετική κινηματική της κατεργασίας μειώνει τις αξονικές δυνάμεις και οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα οπής.

ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

- Υψηλές αξονικές δυνάμεις
- Αποκόλληση στρώσεων
- Υποβάθμιση της ποιότητας της οπής

ΕΛΙΚΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

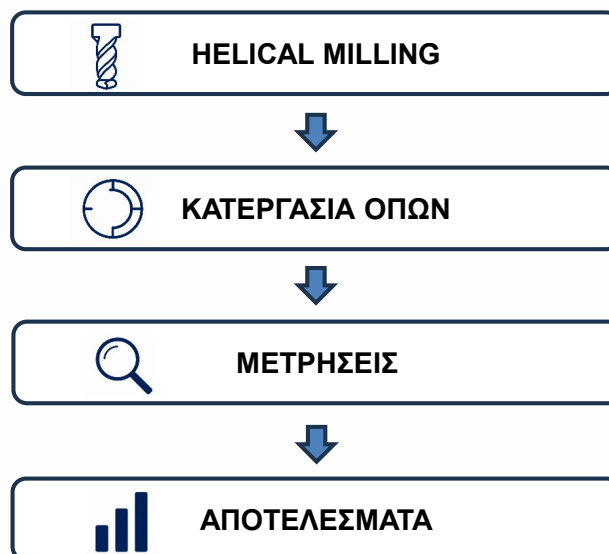
- Μειωμένες αξονικές δυνάμεις
- Ελάχιστη αποκόλληση
- Καλύτερη επιφάνεια

**Είδη διάτρησης**<http://www.m3.tuc.gr>

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

Νικολέττα Γράψα

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την εκτέλεση κατεργασιών ελικοειδούς διάτρησης, την κατεργασία των οπών και τη μετέπειτα αξιολόγηση της γεωμετρικής τους ποιότητας μέσω κατάλληλων μεθόδων μέτρησης και ανάλυσης.

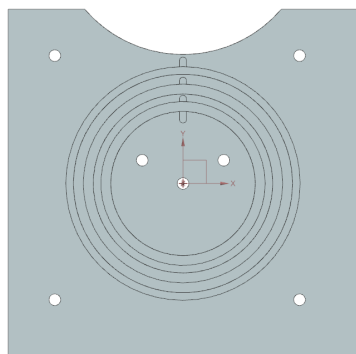
**Πειραματική διαδικασία**<http://www.m3.tuc.gr>

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

Νικολέττα Γράψα

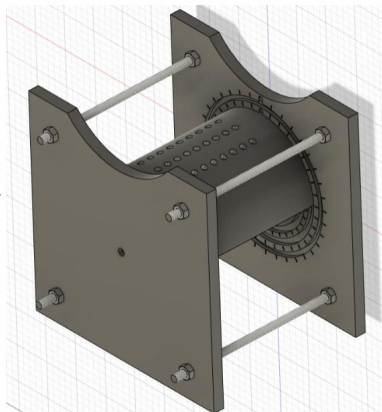
Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδική διάταξη για την ασφαλή και επαναλαμβανόμενη συγκράτηση του δοκιμίου CFRP κατά την κατεργασία.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ (CAD)



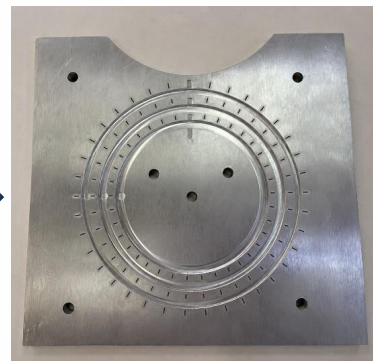
✓ Σταθερή και ασφαλής συγκράτηση δοκιμίου

ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ



✓ Ακριβής ευθυγράμμιση δοκιμίου

ΤΕΛΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟ



✓ Επαναληψιμότητα πειραμάτων



Σχεδιασμός και κατασκευή ιδιοσυσκευής συγκράτησης

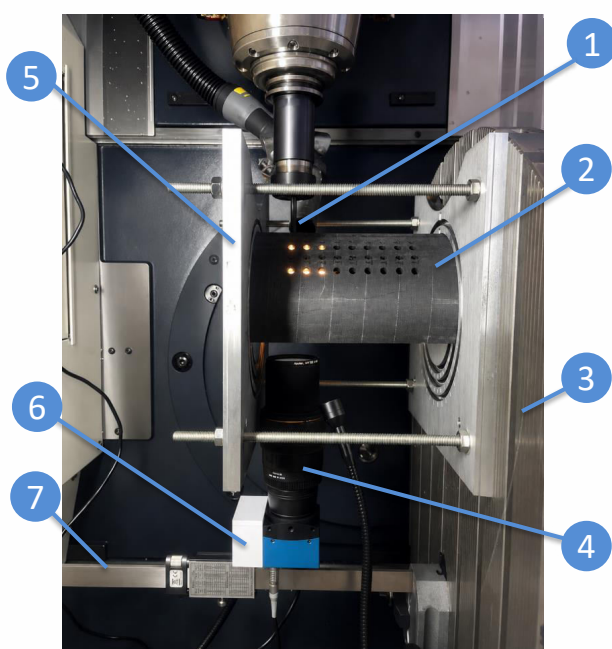
<http://www.m3.tuc.gr>



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

Νικολέττα Γράψα

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κέντρο κατεργασίας DMU 50eco, με χρήση της ειδικά σχεδιασμένης διάταξης συγκράτησης και περιστροφή της τράπεζας εργασίας κατά 90°.



1. Κοπτικό εργαλείο Kennametal CBDB0600AXAS
2. Δοκίμιο CFRP
3. Τράπεζα κατεργασίας DMU 50eco
4. Κάμερα υψηλής ταχύτητας MotionBLITZ EOS mini 2
5. Ιδιοσυσκευή συγκράτησης
6. Βάση συγκράτησης κάμερας υψηλής ταχύτητας
7. Ηλεκτρονικός Υψομετρικός χαράκτης



Πειραματική διάταξη

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



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

Νικολέττα Γράψα

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας μελετήθηκαν τρεις βασικές παράμετροι. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν πειράματα ελικοειδούς διάτρησης και αξιολογήθηκε η κυκλικότητα των τελικών οπών, στην έξοδο και σε τρεις θέσεις του άξονα Z.

Παράμετρος	Σύμβολο	Επίπεδα
 Ταχύτητα περιστροφής (spindle speed)	S (rpm)	3000 4500 6000
 Πρόωση (feed rate)	F (mm/min)	50 100 150
 Αξονικό βάθος κοπής (axial DOC)	ap (mm)	0,5 1 1,5

Μετρήσεις	
	Κυκλικότητα οπών στην έξοδο
	Κυκλικότητα οπών κατά τον άξονα Z

Συνολικά πειράματα: 27



Πειραματικός σχεδιασμός

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

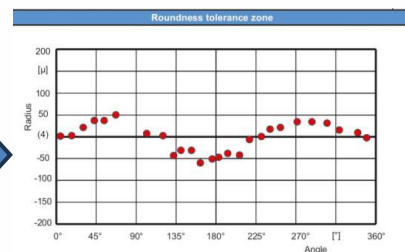
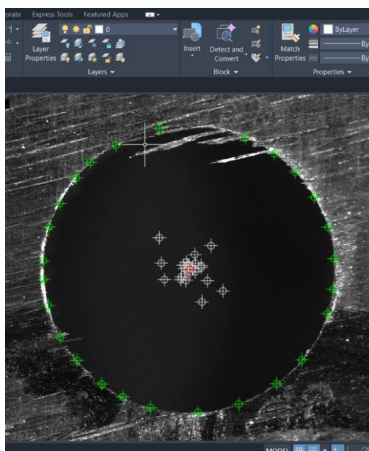


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Νικολέττα Γράφα

ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟ – AUTOCAD

1. Λήψη εικόνας της οπής με στερεοσκόπιο
2. Επεξεργασία των μετρήσεων στο AutoCAD με χρήση της AutoLISP
3. Δημιουργία προφίλ ανοχής κυκλικότητας



Η κυκλικότητα στην έξοδο της οπής υπολογίζεται μέσω ανάλυσης εικόνας σε περιβάλλον AutoCAD.



Διαδικασία μετρήσεων - AutoCAD

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



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

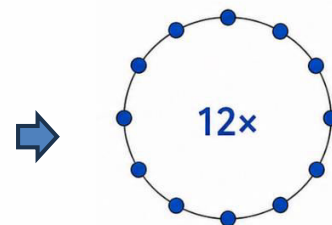
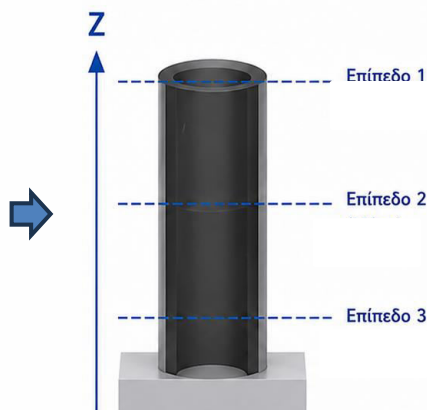
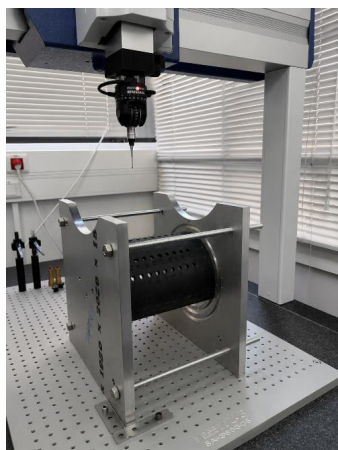
Νικολέττα Γράφα

COORDINATE MEASURING MACHINE - CMM

1. Τοποθέτηση δοκιμίου στη CMM

2. Επιλογή 3 επιπέδων κατά μήκος του άξονα Z

3. Μέτρηση 12 σημείων ανά επίπεδο



Η κυκλικότητα κατά μήκος της οπής μετράται με CMM σε τρία επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο λαμβάνονται 12 σημεία και δημιουργούνται τα αντίστοιχα polar plots.

2026



Διαδικασία μετρήσεων - CMM

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

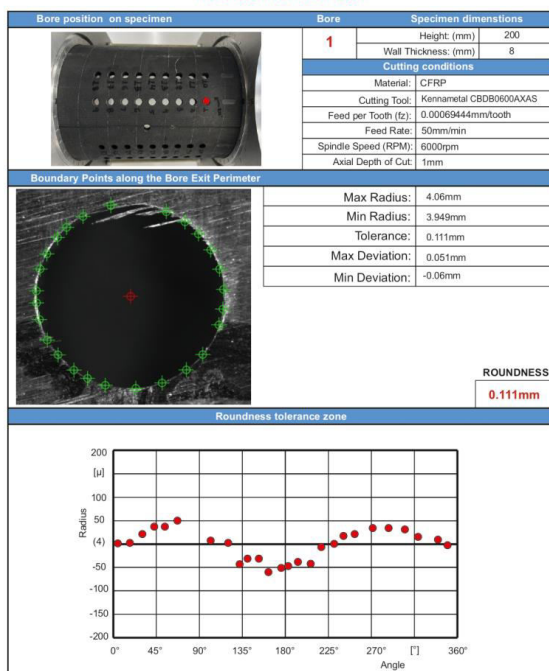


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Νικολέττα Γράψα

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE SCHOOL of PRODUCTION ENGINEERING & MANAGEMENT MICROMACHINING & MANUFACTURING MODELING LABORATORY

INSPECTION REPORT



Διαδικασία αξιολόγησης

- Για κάθε οπή δημιουργήθηκε πρωτόκολλο μέτρησης.
- Καταγράφηκαν οι συνθήκες κατεργασίας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και η τιμή της κυκλικότητας.
- Από τα δεδομένα του πρωτοκόλλου κάθε οπής δημιουργήθηκε το αντίστοιχο προφίλ ανοχής κυκλικότητας, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

2026



Κυκλικότητα εξόδου - AutoCAD

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



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

Νικολέττα Γράψα

Παρατηρήσεις

- Για χαμηλές στροφές (3000rpm) οι τιμές κυκλικότητας ξεπερνούν τα 100μm
- Για υψηλές στροφές (6000rpm) παρατηρούνται επίσης αυξημένες τιμές κυκλικότητας
- Οι 4500rpm παρουσιάζουν σταθερά τις μικρότερες τιμές κυκλικότητας για όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων

Γενικό συμπέρασμα

Η ταχύτητα περιστροφής αποτελεί την παράμετρο με τη μεγαλύτερη επίδραση στην κυκλικότητα εξόδου της οπής.

Η ταχύτητα περιστροφής των 4500rpm οδηγεί στις καλύτερες επιδόσεις με τον συνδυασμό, $S=4500\text{rpm}$, $F=100\text{mm/min}$, $ap=1\text{mm}$, να είναι ο βέλτιστος.



Κυκλικότητα εξόδου - AutoCAD

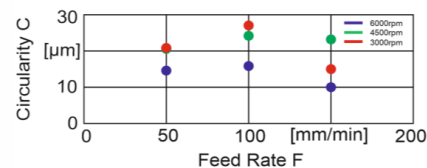
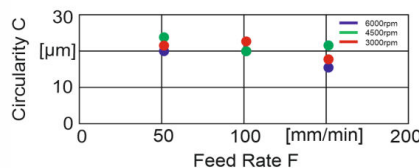
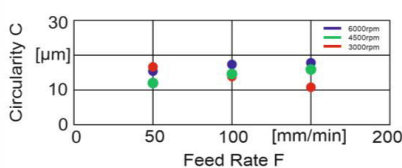
<http://www.m3.tuc.gr>



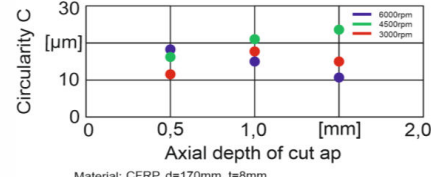
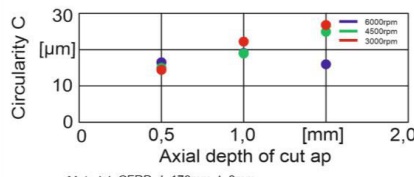
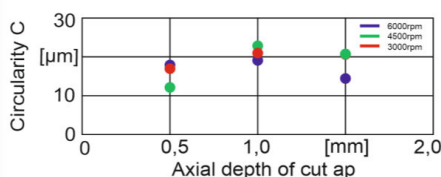
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Νικολέττα Γράφα

Επίδραση πρόωσης (F) για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής (S) – αξονικό βάθος κοπής (ap)



Επίδραση αξονικού βάθους κοπής (ap) για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής (S) – προώσεις (F)



Κυκλικότητα κατά μήκος - CMM

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



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

Νικολέττα Γράφα

Παρατηρήσεις

- Στις περισσότερες συνθήκες κατεργασίας, το αξονικό βάθος κοπής 0,5mm οδηγεί στις μικρότερες τιμές κυκλικότητας κατά μήκος της οπής.
- Η ελάχιστη τιμή της κυκλικότητας παρατηρήθηκε για $ap=1,5\text{mm}$ σε έναν μόνο συνδυασμό παραμέτρων, γεγονός που υποδηλώνει μεμονωμένο αποτέλεσμα και όχι γενική τάση.
- Το αξονικό βάθος κοπής 0,5mm παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά μεταξύ των μετρήσεων, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη σταθερότητα και επαναληψιμότητα.

Γενικό συμπέρασμα

Για τη συνολική γεωμετρική ποιότητα της οπής, οι βέλτιστες συνθήκες επιτυγχάνονται σε υψηλές στροφές, υψηλή πρόωση και μικρό αξονικό βάθος κοπής.

Συνεπώς, το $ap=0,5\text{mm}$, $S=6000\text{rpm}$, $F=150\text{mm/min}$, επιλέγεται ως η βέλτιστη συνθήκη κατεργασίας.



Κυκλικότητα κατά μήκος - CMM

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



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

Νικολέττα Γράψα

AUTOCAD

	Αξιολόγηση	Έξοδος οπής
	Βέλτιστη ταχύτητα (S)	4500rpm
	Βέλτιστη πρόωση (F)	100mm/min
	Βέλτιστο αξονικό βάθος κοπής (ap)	1mm
	Κυκλικότητα	0,062mm

CMM

	Αξιολόγηση	Κατά μήκος της οπής
	Βέλτιστη ταχύτητα (S)	6000rpm
	Βέλτιστη πρόωση (F)	150mm/min
	Βέλτιστο αξονικό βάθος κοπής (ap)	0,5mm
	Κυκλικότητα	0,011mm

Οι δύο μέθοδοι οδηγούν σε διαφορετικές βέλτιστες συνθήκες καθώς αξιολογούν διαφορετικά χαρακτηριστικά της οπής. Το AutoCAD εξετάζει αποκλειστικά την έξοδο της οπής, ενώ το CMM αξιολογεί την κυκλικότητα σε όλο το μήκος της.



Σύγκριση AutoCAD - CMM

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



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

Νικολέττα Γράψα

- ✓ Η ταχύτητα περιστροφής αποτέλεσε την παράμετρο με την μεγαλύτερη επίδραση στην κυκλικότητα των οπών.
- ✓ Η αύξηση της πρόωσης οδήγησε στις μικρότερες τιμές κυκλικότητας για τις περισσότερες συνθήκες κατεργασίας.
- ✓ Οι μετρήσεις AutoCAD και CMM παρείχαν συμπληρωματική αξιολόγηση της γεωμετρικής ποιότητας των οπών.
- ✓ Οι βέλτιστες συνθήκες εξαρτώνται από το γεωμετρικό χαρακτηριστικό που αξιολογείται.

Βασικό Συμπέρασμα

Δεν υπάρχει μια και μοναδική βέλτιστη συνθήκη κατεργασίας.

Η επιλογή των παραμέτρων εξαρτάται από το γεωμετρικό χαρακτηριστικό που επιδιώκεται να βελτιωθεί



Συμπεράσματα

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



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

Νικολέττα Γράψα

- ✓ Διερεύνηση μεγαλύτερου εύρους συνθηκών κατεργασίας και διαφορετικών κοπτικών εργαλείων.
- ✓ Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε δοκίμια CFRP με διαφορετική πλέξη και προσανατολισμό των ανθρακονημάτων.
- ✓ Συσχέτιση της κυκλικότητας με βλάβες κατά την κατεργασία και φθορά κοπτικού εργαλείου.

Μελλοντικός στόχος

Ανάπτυξη βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας που θα εξασφαλίζουν ταυτόχρονα υψηλή γεωμετρική ακρίβεια τόσο στην έξοδο όσο και σε όλο το μήκος της οπής.



Μελλοντική εργασία

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



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

Νικολέττα Γράψα

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!

Ερωτήσεις & Συζήτηση



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



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

Νικολέττα Γράψα