



Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Εφαρμοσμένα Συστήματα Αυτοματοποίησης



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

**Διπλωματική Εργασία με Τίτλο: “Προσομοίωση Κατεργασίας
Φραιζαρίσματος με Χρήση Σύγχρονων Τεχνικών Μοντελοποίησης”**



Επιβλέπων Καθηγητής:
Ταπόγλου Νικόλαος

Πολυχρόνης Θεόδωρος
Θεσσαλονίκη
Ιούλιος 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1°

Σκοπός Εργασίας

Κεφάλαιο 2°

Στάθμη των Γνώσεων

- 2.1 Ιστορική Αναδρομή
- 2.2 Δομή CNC Μηχανών
- 2.3 Τύποι Μηχανών CNC
- 2.4 Είδη Μηχανουργικών Κατεργασιών
- 2.5 Εξισώσεις Φραιζαρίσματος (*Milling Equations*)
- 2.6 Κοπτικά Εργαλεία (*Cutting Tools*)
- 2.7 Σύστημα Ψύξης (*Coolant*)
- 2.8 Τεχνολογία Υλικών

Κεφάλαιο 3°

- 3.1 Εισαγωγή σε CAD & CAM
- 3.2 Σύστημα Συντεταγμένων & Αρχικό Σημείο CNC
- 3.3 Κώδικας G (Post-Process)
- 3.4 Τροχιά Εργαλείου (2D & 3D Toolpath)
- 3.5 Κατεργασίες Φραιζαρίσματος (*Milling Operations*)
- 3.6 Δεδομένα Κοπής (*Cutting Data*)
- 3.7 Ροή Εργασιών (*Workflow*)

Κεφάλαιο 4°

- 4.1 Ανάλυση Εφαρμογής Διπλωματικής Εργασίας
- 4.2 Μέση Τραχύτητα Επιφάνειας Ra (*Microns*)
- 4.3 Αποτελέσματα Εφαρμογής I
- 4.4 Αποτελέσματα Εφαρμογής II

Κεφάλαιο 5°

Εξακρίβωση (*Verification*)

Κεφάλαιο 6°

- 6.1 Συμπεράσματα
- 6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις Εφαρμογής

Κεφάλαιο 7°

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1^ο Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περατώθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών με τίτλο Εφαρμοσμένα Συστήματα Αυτοματοποίησης, του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος (*στη Θεσσαλονίκη*) από τον μεταπτυχιακό φοιτητή Πολυχρόνη Θεόδωρο.

Ο ελληνικός τίτλος της εργασίας είναι “Προσομοίωση Κατεργασίας Φραιζαρίσματος με Χρήση Σύγχρονων Τεχνικών Μοντελοποίησης” και εστιάζει στην προσομοίωση ενός περάσματος (*Pass*) περιφερειακού φραιζαρίσματος (*Peripheral - Side Milling*), με τη χρήση του εμπορικού σχεδιαστικού λογισμικού Autodesk Inventor (*CAD – Computer Aided Design*) και με τη βοήθεια του εργαλείου VB για εφαρμογές (*VBA – Visual Basic for Applications*). Τα αποτελέσματα που θα βγουν αφορούν την ποιότητα της επιφάνειας κοπής (*Surface Roughness*) αλλά και το μέγεθος των αποβλήτων (*Chips*) για συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο (*Button Insert*).

Επιπρόσθετα της παραπάνω έρευνας και των αποτελεσμάτων της, πραγματοποιείται αναφορά κι ανάλυση στο θεωρητικό μέρος των μηχανών CNC (*Computer Numerical Control*) και δη της φραιζας (*Milling Machine*) που αποτελούν τον βασικό λόγο της βιομηχανικής επανάστασης (*Industrial Revolution*).

Κεφάλαιο 2^ο (Στάθμη των Γνώσεων)

2.1 Ιστορική Αναδρομή



Εικόνα 1: Απεικόνιση Βιομηχανικής Επανάστασης.
(<https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2021/july/industrial-revolution.html>)

Από τη Βιομηχανική Επανάσταση (*Industrial Revolution*) και ύστερα, η μοντέρνα ζωή είναι εξαρτώμενη από προηγμένα μηχανήματα για κάθε κατασκευή, ανεξαρτήτως υλικών. Ένας εκ των σημαντικότερων τύπων μηχανημάτων είναι οι CNC (*Computer Numerical Control*) μηχανές. Οι μηχανές CNC διαδραματίζουν κύριο ρόλο στο χώρο της βιομηχανίας και των κατασκευών, αλλά και στον αυξανόμενο ρυθμό της εξέλιξής τους.

Μια μηχανή CNC είναι ένα σύστημα που συνδυάζει πολλαπλά εργαλεία (*Cutting Tools - Drills, Lathes and Milling Tools*), τα οποία το μηχάνημα μπορεί να τα επιλέξει και να τα χρησιμοποιήσει. Έχει σχεδιαστεί για την κατασκευή τρισδιάστατων εξαρτημάτων. Τα πιο απλά μηχανήματα κινούνται σε έναν ή δύο άξονες. Από την άλλη πλευρά, τα πιο προηγμένα συστήματα διαθέτουν κίνηση των αξόνων X και Y και μπορούν να κινούνται κατά μήκος στον άξονα Z. Πολλά έχουν δυνατότητα περιστροφικής κίνησης (*επί των προαναφερθέντων αξόνων που συνήθως θεωρούνται επιπλέον άξονες A και C*) και ακόμη και αυτόματης αλλαγής κοπτικών εργαλείων, ώστε το υλικό να μπορεί να κοπεί από όλες τις πλευρές χωρίς χειροκίνητη επέμβαση.

Το πρώτο σύστημα αριθμητικού ελέγχου εφευρέθηκε από τον John T. Parsons (1913 – 2007), ο οποίος τιμήθηκε το 1985 με το National Medal of Technology των ΗΠΑ, ενώ το 1993 έγινε μέλος του National Inventors Hall of Fame των ΗΠΑ. Ο Parsons τη δεκαετία του 1940 άρχισε να εργάζεται και να εισάγει καινοτόμες ιδέες στην κατασκευή εξαρτημάτων ελικοπτέρων για την εκκολαπτόμενη τότε αεροδιαστημική βιομηχανία. Συνεργαζόμενοι με τον Frank Stulen, οι δυο τους ανέπτυξαν μια μέθοδο όπου ένας

μηχανικός διάβαζε τις συντεταγμένες κατά μήκος ενός άξονα x και ενός άξονα y , σε δύο άλλους μηχανουργούς που στη συνέχεια θα έκαναν την τομή/ κοπή. Από εκεί, συνεργάστηκαν με ερευνητές στο MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) αναπτύσσοντας διάτρητες κάρτες (*Punch Cards*) με δυνατότητα να προγραμματίζονται με αρκετά σημεία ώστε να παρέχουν πλήρως αυτοματοποιημένη μηχανική κατεργασία αφαίρεσης υλικού (*Machining*).

Η έννοια του αριθμητικού ελέγχου εισήχθη τη δεκαετία 1970 ως 1980, όταν ο τότε μικροεπεξεργαστής έγινε ο εγκέφαλος του μηχανισμού ελέγχου των εργαλειομηχανών και νέες ευφυείς δομές συστημάτων έκαναν την είσοδο τους στο χώρο της βιομηχανίας.

2.2 Δομή CNC Μηχανών



Grinding CNC Machine



Lathe CNC Machine



Plasma Cutting CNC Machine



CNC Electric Discharge



5 Axis CNC Machine



Laser Cutting CNC Machine

Εικόνα 2. Μηχανές CNC.

<https://engineeringlearn.com/types-of-cnc-machine-definition-operation-working-materials-support-software/>

Μέρη CNC Μηχανών (*Parts*):

1. Συσκευή Εισόδου (*Input Device*)
2. Μονάδα Ελέγχου Μηχανής (*Machine Control Unit - MCU*)
3. Εργαλειομηχανή (*Machine Tools*)
4. Σύστημα Καθοδήγησης (*Driving System*)
5. Σύστημα Ανατροφοδότησης (*Feedback System*)
6. Μονάδα Ψηφιακής Απεικόνισης (*Display Unit*)
7. Πίνακας Ελέγχου (*Control Panel*)

Ο όρος CNC σημαίνει «αριθμητικός έλεγχος υπολογιστή» κι ο ορισμός της κατεργασίας CNC είναι μια εναλλακτική (*Substandard*) διαδικασία κατασκευής που συνήθως χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά χειριστήρια και εργαλειομηχανές για την αφαίρεση στρωμάτων υλικού (*Layers*) από τη κατεργασία τεμαχίων, γνωστά ως ακατέργαστο τεμάχιο (*Blank*) ή υπό επεξεργασία αντικείμενο (*Workpiece*), παράγοντας έτσι ένα ειδικά σχεδιασμένο τελικό προϊόν (*Custom Designed Part*). Η διαδικασία είναι κατάλληλη για ευρεία γκάμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, πλαστικών, ξύλου, γυαλιού, αφρού και σύνθετων υλικών. Συναντά εφαρμογές σε πληθώρα βιομηχανιών, όπως μεγάλα κέντρα μηχανικών κατεργασιών CNC (*Workshops*), πρωτότυπα εξαρτήματα (*Prototyping*) και

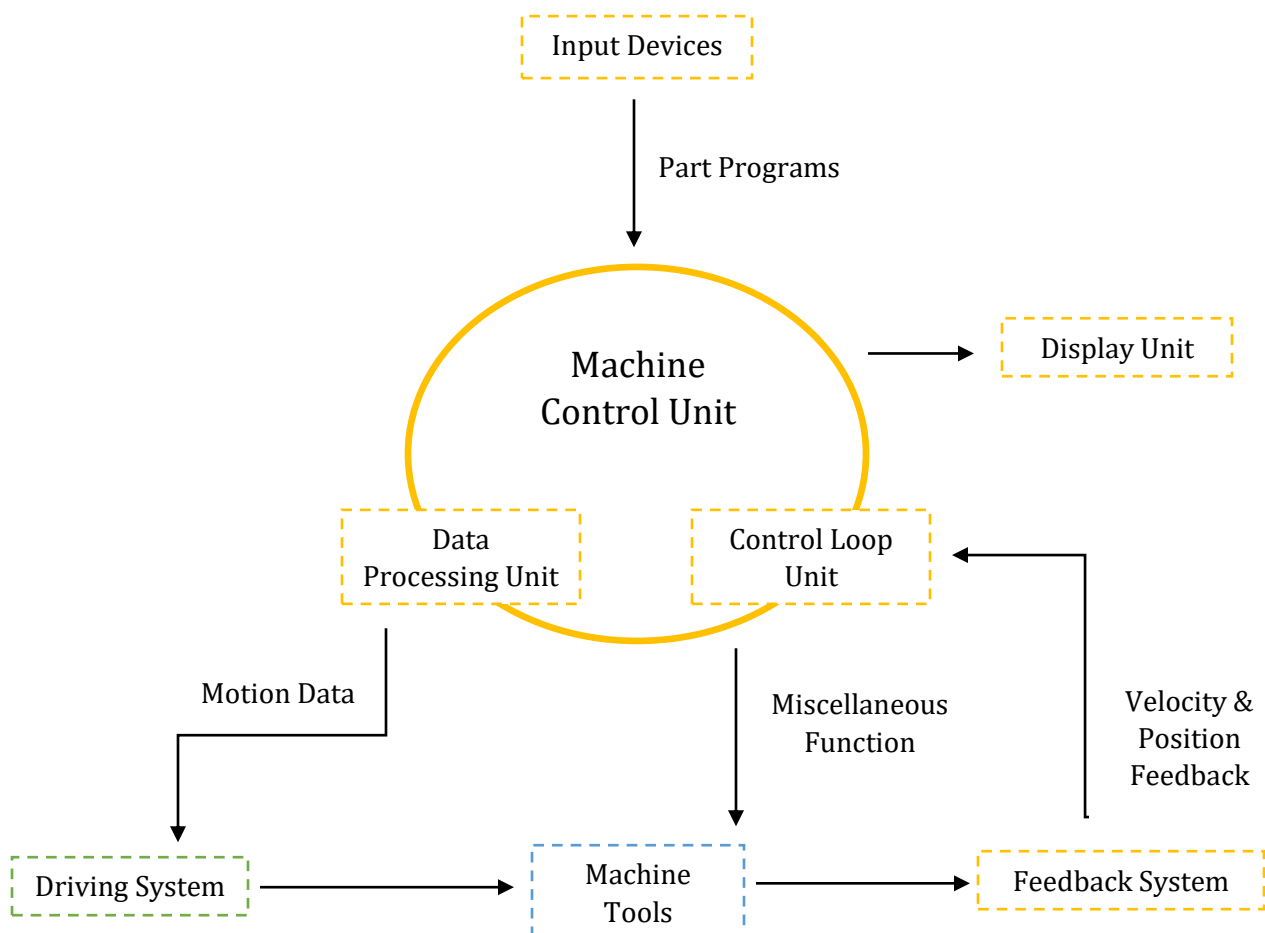
τηλεπικοινωνίες (*Telecommunications*), Αεροδιαστημική (*Aerospace*), Βιομηχανία Οχημάτων (*Automotive Industries*), Ναυπηγική (*Maritime Industries*), οι οποίες απαιτούν αυστηρότερες ανοχές (*Strict Tolerances*) σε σύγκριση με άλλες βιομηχανίες κ.α.

Η αυτοματοποιημένη φύση των μηχανικών κατεργασιών CNC επιτρέπει την παραγωγή απλών προϊόντων υψηλής ακρίβειας κι ευστοχίας (*Precision & Accuracy*), σε χαμηλό κόστος για μέτριο όγκο παραγωγής.

Η εργασία κοπής που εκτελείται από το CNC ονομάζεται κατεργασία CNC. Τα προγράμματα κατεργασίας CNC αρχικά σχεδιάζονται, προετοιμάζονται και προσομοιώνονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (*H/Y*), ενώ στη συνέχεια τροφοδοτούνται/ εισάγονται σε μια μηχανή CNC. Σύμφωνα με το πρόγραμμα, το CNC εκτός των άλλων ελέγχει και την ταχύτητα των εργαλειομηχανών.

Υπάρχουν οι όροι “Machine” και “Machining” στην αγγλική γλώσσα. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ορισμών είναι πως με τον πρώτο όρο αναφερόμαστε στο μηχάνημα (*CNC Machine*) ενώ με τον δεύτερο όρο στη διαδικασία, δηλαδή την κατεργασία (*CNC Machining*). Συνεπώς, μια μηχανή CNC είναι μια προγραμματιζόμενη μηχανή ικανή να εκτελεί αυτόνομα λειτουργίες κατεργασίας CNC.

Μπλοκ Διάγραμμα Δομής CNC (*Block Diagram*):



Μέρη μηχανής CNC:

Τα κύρια μέρη της μηχανής CNC είναι τα ακόλουθα.

#1. Συσκευή εισόδου (*Input Device*)

Είναι η συσκευή που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή προγραμμάτων, μέσω λογισμικών CAM (*Computer Aided Manufacturing*), σε μια μηχανή CNC. Υπάρχουν τριών ειδών συσκευές εισόδου που χρησιμοποιούνται συνήθως, κι αυτές είναι οι συσκευές ανάγνωσης ταινίας διάτρησης (*Punch Tape Readers*), οι συσκευές ανάγνωσης μαγνητικής ταινίας (*Magnetic Tape Readers*) και οι υπολογιστές μέσω επικοινωνίας RS-232-C (*Computers via RS-232-C Communication*).

#2. Μονάδα Ελέγχου Μηχανής (*Machine Control Unit*)

Αυτή είναι η “καρδιά” της μηχανής CNC. Εκτελεί όλες τις λειτουργίες ελέγχου της μηχανής CNC. Διάφορες εργασίες που εκτελούνται από την MCU είναι: να διαβάζει τις κωδικοποιημένες οδηγίες που δίνονται σε αυτήν (*Coded*), να αποκωδικοποιεί την κωδικοποιημένη εντολή (*Decode*). Η MCU είναι υπεύθυνη για την αναπαραγωγή εντολών κίνησης, εφαρμόζοντας παρεμβολές (*γραμμικές, σφαιρικές ή ελικοειδής*) στους άξονες (*Interpolation - Linear, Spherical, & Helical*).

Η MCU μεταδίδει την εντολή για τη ταχύτητα του άξονα στο κύκλωμα του ενισχυτή (*Amplifier Circuit*) για να κινήσει τον μηχανισμό της ατράκτου (*Spindle*). Λαμβάνει σήματα ανάδρασης για τη θέση και τη ταχύτητα για κάθε άξονα κίνησης (*Drive Axis*). Εφαρμόζει βοηθητικές λειτουργίες ελέγχου, όπως η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ψυκτικού υγρού (*Coolant On/ Off*) ή ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του κινητήρα της ατράκτου (*Spindle On/ Off*) και αλλαγή εργαλείου (*Tool Change*).

#3. Εργαλειομηχανή (*Machine Tools*)

Μια εργαλειομηχανή CNC έχει πάντα ένα συρόμενο τραπέζι (*Sliding Table*) και μια άτρακτο για τον έλεγχο θέσης και ταχύτητας (*Position & Speed*). Τα τραπέζια του μηχανήματος ελέγχονται στην κατεύθυνση του άξονα X και Y ενώ η άτρακτος ελέγχεται στην κατεύθυνση του άξονα Z.

#4. Σύστημα Καθοδήγησης (*Driving System*)

Το σύστημα οδήγησης της μηχανής CNC αποτελείται από ένα κύκλωμα ενισχυτή (*Amplifier Circuit*), από κινητήρες μετάδοσης κίνησης (*Drive Motors*) και επικεφαλής έδρανα μετάδοσης κίνησης (*Ball Lead Screws*). Η MCU μεταδίδει τα σήματα (*δηλαδή, θέση και ταχύτητα*) του κάθε άξονα στο κύκλωμα του ενισχυτή.

Εν συνεχεία, τα σήματα ελέγχου ενισχύονται για να ενεργοποιηθούν (*Activate*) οι κινητήρες μετάδοσης κίνησης. Οι ενεργοποιημένοι (*Actuated*) κινητήρες μετάδοσης κίνησης περιστρέφουν τα ρουλεμάν για να τοποθετήσουν (*Position*) το τραπέζι του μηχανήματος στην κατάλληλη θέση.

#5. Σύστημα ανατροφοδότησης (*Feedback System*)

Το σύστημα αυτό, αποτελείται από μορφομετατροπείς (*Transducers*) που λειτουργούν ως αισθητήρες (*Sensors*). Ονομάζεται επίσης μετρητικό σύστημα (*Measurement System*). Αποτελείται από μορφομετατροπείς θέσης και κίνησης που παρακολουθούν (*Monitoring*) συνεχώς τη θέση και την ταχύτητα του κοπτικού εργαλείου (*Located*) κάθε δεδομένη στιγμή.

Η MCU λαμβάνει σήματα από αυτούς τους μετατροπείς και χρησιμοποιεί τη διαφορά μεταξύ των σημάτων αναφοράς (*Reference Signals*) και των σημάτων απόκρισης (*Response Signals*) με σκοπό τη δημιουργία σημάτων ελέγχου (*Control Signals*) που οδηγούν στη διόρθωση των σφαλμάτων (*Errors*) θέσης και κίνησης.

#6. Μονάδα Ψηφιακής Απεικόνισης (*Display Unit*)

Μια οθόνη που χρησιμοποιείται για την εμφάνιση προγραμμάτων, εντολών και οποιωνδήποτε άλλων χρήσιμων δεδομένων της μηχανής CNC.

#7. Πίνακας Ελέγχου (*Control Panel*)

Οι πίνακες ελέγχου είναι επίσης ένα από τα σημαντικά μέρη των μηχανών CNC, ειδικά για τους χειριστές τους (*Operators*) που χρησιμοποιούνται για ρυθμίσεις, τροποποιήσεις, εισαγωγές προγραμμάτων για τις λειτουργίες που πρέπει να εκτελεστούν στα ακατέργαστα τεμάχια εργασίας. Ονομάζεται επίσης “εγκέφαλος” της μηχανής CNC.

Διαδικασία Εργασίας Μηχανών CNC (*Procedure*):

1. Πρώτα απ' όλα πραγματοποιείται εγκατάσταση (*Install*) όλων των απαιτούμενων προγραμμάτων και λογισμικών στη μονάδα MCU.
2. Η είσοδος ή η οδηγία (*Input/ Instruction*) παρέχεται στην MCU χειροκίνητα (*Manual Input*) ή μέσω άλλων συστημάτων.
3. Η MCU ξεκινά την εκτέλεση των προγραμμάτων σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται και παράγει (*Generate*) ένα κοινό σήμα εξόδου το οποίο τροφοδοτείται (*Feed*) στο κύκλωμα μετάδοσης κίνησης.

4. Μόλις το κύκλωμα μετάδοσης κίνησης λάβει τα σήματα εντολών από την MCU, ξεκινά την πραγματική λειτουργία του μηχανήματος.
5. Το σύστημα ανάδρασης μετρά και παρακολουθεί συνεχώς τη λειτουργία του μηχανήματος και παρέχει το σήμα ανάδρασης στην MCU.
6. Η MCU παράγει ξανά τα σήματα εντολών για την εξάλειψη των σφαλμάτων, συγκρίνοντας το σήμα αναφοράς με το σήμα ανάδρασης.
7. Στη ψηφιακή μονάδα απεικόνισης δεδομένων ο χειριστής μπορεί να δει όλες τις εντολές, τις ενέργειες, τις πληροφορίες και τα δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία του μηχανήματος.

Πλεονεκτήματα της μηχανής CNC:

- Μπορεί να δημιουργήσει θέσεις εργασίας με την υψηλότερη ακρίβεια από οποιοδήποτε άλλο χειροκίνητο μηχάνημα.
- Μπορεί να λειτουργήσει για 24 ώρες.
- Τα εξαρτήματα που παράγονται από αυτό έχουν την ίδια ακρίβεια. Δεν υπάρχουν διαφοροποιήσεις των τελικών προϊόντων.
- Δεν απαιτεί χειριστή με υψηλή εξειδίκευση για να λειτουργήσει. Ένας ημιειδικευμένος χειριστής μπορεί επίσης να εργαστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με κάποιο αντίστοιχο χειροκίνητο μηχάνημα.
- Οι χειριστές μπορούν εύκολα να κάνουν αλλαγές και διορθώσεις και να μειώσουν τους κενούς χρόνους και χρόνους καθυστέρησης.
- Έχει τη δυνατότητα να υλοποιεί πολύπλοκες γεωμετρίες με υψηλή ακρίβεια στο συντομότερο δυνατό χρόνο.
- Το σύγχρονο λογισμικό σχεδίασης επιτρέπει στους σχεδιαστές να μιμηθούν τους δημιουργούς της ιδέας του. Εξαλείφει την ανάγκη δημιουργίας πρωτοτύπων ή μοντέλων, εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα.
- Απαιτούνται λιγότεροι εργαζόμενοι για τη λειτουργία CNC, οπότε πραγματοποιείται εξοικονόμηση κόστους εργασίας.

Μειονεκτήματα της μηχανής CNC:

- Το κόστος αυτών των μηχανών είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με τα μηχανήματα που λειτουργούν χειροκίνητα.

- Τα ανταλλακτικά εξαρτήματα των μηχανών CNC είναι ακριβά.
- Το κόστος συντήρησης είναι σημαντικά υψηλότερο.
- Το μηχάνημα απαιτεί ακριβό εξοπλισμό για να λειτουργήσει (*Εργαλεία, Coolants* κα).

Οι μηχανές CNC χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε βιομηχανία παραγωγής/ κατασκευής. Με την αυξανόμενη ζήτηση στη βιομηχανία αυτή, η χρήση CNC έχει επίσης αυξηθεί. Οι εργαλειομηχανές που συνοδεύουν το CNC είναι τόρνοι (*Lathes*), φραιζες (*Mills*), διαμορφωτές (*Shapers*), συγκολλητές (*Weldments*) κτλ.

Οι βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μηχανές CNC είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία αφαίρεσης μετάλλων (*Metal Removal Industry*), η βιομηχανία μορφοποίησης μετάλλων (*Metal Forming Industry*), η βιομηχανία κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (*Electrical Discharge Machining Industry*), η βιομηχανία ξύλου (*Wood Industry*), κα.

2.3 Τύποι Μηχανών CNC

Η έννοια CNC μπορεί να οριστεί ως μια διαδικασία κατά την οποία το προ-προγραμματισμένο λογισμικό υπολογιστή υπαγορεύει την κίνηση των εργοστασιακών μηχανημάτων και εργαλείων. Ως αποτέλεσμα, οι κατασκευαστές μπορούν να παράγουν προϊόντα σε λιγότερο χρόνο, να μειώνουν τα απόβλητα και να εξαλείφουν τον κίνδυνο ανθρώπινου λάθους.

Αυτή η διαδικασία κατασκευής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μιας μεγάλης ποικιλίας πολύπλοκων μηχανημάτων, τα οποία θα αναφερθούν παρακάτω. Ουσιαστικά, η κατεργασία CNC καθιστά δυνατή την ολοκλήρωση της τρισδιάστατης κοπής ακολουθώντας ένα σύνολο εντολών.

Το ακρωνύμιο CNC σημαίνει Computer Numerical Control, δηλαδή αριθμητικός έλεγχος μέσω υπολογιστή, με τα μηχανήματα αυτά να διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στη βιομηχανία και τις παραγωγές τους. Αυτά τα πολύπλοκα μηχανήματα ελέγχονται από έναν υπολογιστή και παρέχουν ένα επίπεδο αποτελεσματικότητας, ακρίβειας και συνέπειας που θα ήταν αδύνατο να επιτευχθεί μέσω οποιασδήποτε χειροκίνητης διαδικασίας.

Λειτουργίες που ήταν αδύνατες πριν από δεκαετίες πλέον είναι εφικτές, χάρη στις CNC κατεργασίες. Ακριβώς όπως υπάρχουν πολλά διαφορετικά εξαρτήματα που μπορούν να κατασκευάσουν οι μηχανές CNC, υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι μηχανών CNC που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί αυτό. Κάθε μηχανή διαφέρει ως προς την κατασκευή, τον τρόπο λειτουργίας και τους τύπους προϊόντων που μπορούν να φτιάξουν.

Οι διαφορετικοί τύποι μηχανών CNC

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι μηχανών CNC με σκοπό να κατασκευάζουν μεγάλη ποικιλία αντικειμένων. Φυσικά ο χειρισμός τους απαιτεί εκπαίδευση ώστε να μπορούν να παράγουν υψηλής ποιότητας εμπορικά προϊόντα. Όλα τα ακόλουθα μηχανήματα χρησιμοποιούν G κώδικα, ο οποίος είναι η γλώσσα που κατανοεί μια μηχανή CNC. Κάθε τύπος μηχανής CNC εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο σκοπό.

Φραιζα CNC (CNC Milling Machine)

Ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους μηχανών CNC, η φραιζα CNC χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό υπολογιστή (ενώ διαθέτει και χειριστήρια) για την κοπή διαφόρων υλικών. Οι φραιζες μπορούν να μεταφράσουν συγκεκριμένα προγράμματα από σύμβολα και αριθμούς για να μετακινήσουν τον άξονα με διάφορους τρόπους.

Πολλές φραιζες CNC χρησιμοποιούν, όπως αναφέρθηκε, αυτό που είναι γνωστό ως G-Code, ο οποίος είναι μια τυποποιημένη γλώσσα προγραμματισμού που αναγνωρίζεται από τις περισσότερες μηχανές CNC. Μια φρέζα CNC μπορεί να έχει ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών, όπως φραιζάρισμα προσώπου, πλευρικό φρεζάρισμα, κολαούζο, διάτρηση και περιστροφή (Face Milling, Shoulder Milling, Tapping, Drilling & Turning). Οι πιο κοινές φρέζες CNC διατίθενται σε διαμορφώσεις τριών έως έξι αξόνων.

Μια φρέζα CNC είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με άλλες μηχανές και ενδεχομένως να είναι αρκετά δαπανηρή. Ορισμένοι κατασκευαστές μηχανών φρεζαρίσματος CNC είναι οι: Okuma, HAAS και DMG Mori.



Εικόνα 3. Φραιζα CNC

<https://www.cnclathing.com/guide/what-cnc-milling-machine-to-buy-tips-for-choosing-your-first-cnc-milling-machine-cnclathing>

Τόρνος CNC (CNC Lathe Machine)

Ο τόρνος είναι μια μηχανή CNC που λειτουργεί για να κόβει τεμάχια εργασίας καθώς περιστρέφονται. Οι τόρνοι CNC μπορούν να κάνουν γρήγορα ακριβείς κοπές χρησιμοποιώντας διάφορα εργαλεία.

Αυτά τα μηχανήματα CNC είναι αρκετά αποτελεσματικά στην ακρίβεια που προσφέρουν σε σύγκριση με τους χειροκίνητους τόνους. Συχνά έχουν λιγότερους άξονες από τις μηχανές φρεζαρίσματος CNC και επομένως είναι μικρότεροι σε μέγεθος και πιο συμπαγείς.

Οι τόννοι CNC διαθέτουν παρόμοια χειριστήρια με αυτά των φρεζών CNC και μπορούν να διαβάσουν τόσο τον G κώδικα όσο και άλλες αποκλειστικές από τον κατασκευαστή γλώσσες προγραμματισμού. Μερικοί από τους πιο συνηθισμένους κατασκευαστές μηχανών τόννου CNC είναι οι: HAAS, Mori Seiki και Okuma. Το πλαίσιο των τόννων CNC είναι παρόμοιο με τους χειροκίνητους τόνους.



Εικόνα 4. Τόννος CNC.

<https://www.cnclathing.com/guide/is-there-any-difference-between-cnc-machining-center-and-cnc-lathe>

Δρομολογητής CNC (CNC Router)

Ένας δρομολογητής CNC είναι ένα μηχάνημα που μοιάζει πολύ με τον δρομολογητή χειρός που χρησιμοποιείται συνήθως για την κοπή διαφόρων υλικών. Αυτός ο τύπος μηχανής CNC μπορεί να βοηθήσει στην κοπή χάλυβα, ξύλου, αλουμινίου, σύνθετων υλικών, πλαστικού και αφρού.

Ένας δρομολογητής CNC είναι παρόμοιος με μια φρέζα CNC. Κατασκευάζεται με τη δυνατότητα χρήσης αριθμητικού ελέγχου υπολογιστή για τη δρομολόγηση των διαδρομών των εργαλείων που επιτρέπουν τη λειτουργία του μηχανήματος. Οι δρομολογητές CNC μειώνουν τη σπατάλη και αυξάνουν την παραγωγικότητα με την

παραγωγή διαφόρων ειδών σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από άλλα μηχανήματα.

Οι περισσότεροι δρομολογητές μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα συγκεκριμένο υλικό και στις τρεις διαστάσεις και είναι ιδανικοί για μικρότερα έργα και τη δημιουργία πρωτότυπων μοντέλων και πολύπλοκων σχεδίων. Επίσης, υπάρχουν δρομολογητές τριών, τεσσάρων, πέντε και έξι αξόνων.



Εικόνα 5. CNC Δρομολογητής.

<https://www.multicam.com/en/cnc-routers>

CNC Πλάσμα Κοπής (CNC Plasma Cutter)

Η διαδικασία κοπής πλάσματος περιλαμβάνει την κοπή ενός υλικού με τη χρήση ενός φακού πλάσματος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται πιο συχνά για την κοπή βαρέων υλικών, όπως ο χάλυβας και άλλες μορφές μετάλλου.

Με έναν CNC πλάσμα κοπής, το αέριο διοχετεύεται με πολύ υψηλή ταχύτητα από ένα ακροφύσιο. Παράλληλα, σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό τόξο μέσω του αερίου που βγαίνει

από το ακροφύσιο προς την επιφάνεια που κόβεται. Αυτό μετατρέπει μέρος του αερίου σε πλάσμα, όπου οι θερμοκρασίες πλάσματος κυμαίνονται από 10.000-50.000 βαθμούς. Το πλάσμα είναι αρκετά ζεστό για να λιώσει ό,τι υλικό βρίσκεται υπό κατεργασία, και απομακρύνει κάθε λιωμένο μέταλλο από το σημείο κοπής.

Όσον αφορά το σχήμα και το μέγεθος, οι CNC πλάσμα κοπής μοιάζουν πολύ με τους δρομολογητές CNC. Αυτά τα μηχανήματα λειτουργούν μόνο με δισδιάστατα σχήματα.



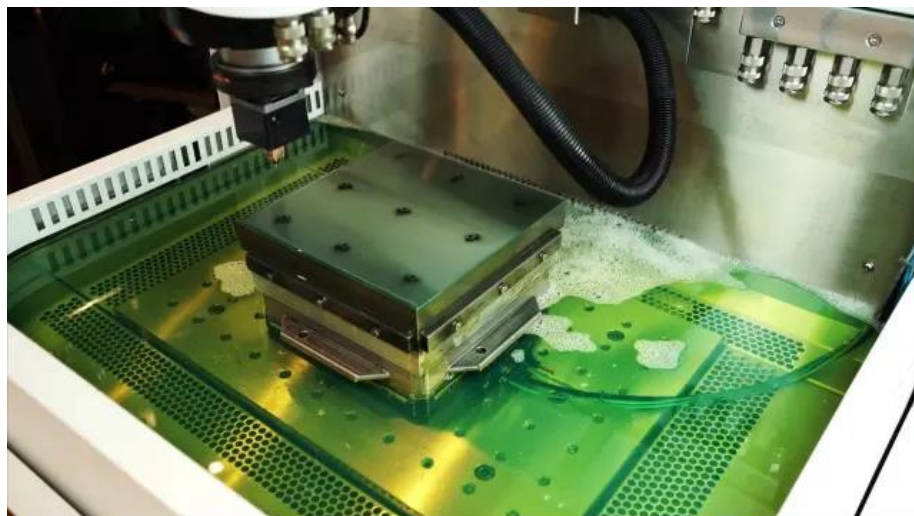
Εικόνα 6. CNC Πλάσμα Κοπής.
<https://www.shopsabre.com/cnc/plasma/sidekick/>

Μηχάνημα Ηλεκτρικής Διάβρωσης CNC (CNC Electric Discharge Machine)

Η κατεργασία ηλεκτρικής διάβρωσης, ή EDM για συντομία, περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου σχήματος μέσα σε ένα συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές εκκενώσεις ή σπινθήρες.

Σε αυτή τη διαδικασία, το υλικό αφαιρείται από ένα συγκεκριμένο τεμάχιο εργασίας με μια σειρά επαναλαμβανόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Αυτά τα ηλεκτρόδια χωρίζονται από ένα διηλεκτρικό ρευστό, το οποίο συχνά δέχεται ηλεκτρική

τάση. Σε αυτό το μηχάνημα, το υλικό τοποθετείται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια και το μηχάνημα στη συνέχεια υπολογίζει για να δει την ποσότητα ηλεκτρικής εκφόρτισης που χρειάζεται να παράγει κάθε ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 7. CNC Ηλεκτροδιάβρωση Σύρματος.

<https://www.engineering.com/story/edm-101-electrical-discharge-machining-basics>

Λείζερ Κοπής CNC (CNC Laser Cutter)

Τελευταίο αλλά σίγουρα όχι λιγότερο σημαντικό, υπάρχουν κοπτήρες λέιζερ CNC.

Αυτοί οι τύποι μηχανών είναι παρόμοιοι με τις CNC μηχανές πλάσμα με τη διαφορά ότι τα λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως για κοπή και είναι άκρως αποτελεσματικά όταν πρόκειται για κοπή μετάλλων, πλαστικού ή σκληρού ξύλου. Ανάλογα με την πυκνότητα και την αντοχή του υλικού, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της έντασης του λέιζερ.



Εικόνα 8. Λείζερ Κοπής CNC.

<https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/laser-cutting-technology/>

2.4 Είδη Μηχανουργικών Κατεργασιών

Στη μηχανουργική τεχνολογία υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες κατεργασιών. Αυτές είναι οι κατεργασίες με διαμόρφωση υλικού και οι κατεργασίες με αφαίρεση υλικού. Στις πρώτες ανήκουν κατεργασίες όπως χύτευση, έλαση, ολκή, σφυρηλάτηση, απότμηση. Ενώ στις δεύτερες ανήκουν κατεργασίες όπως τόννευση, πλάνιση, φραιζάρισμα, διάτρηση, λείανση.



Εικόνα 9. Κατηγορίες Κατεργασίας στο Φάσμα της Μηχανουργικής Τεχνολογίας.

Ένα από τα βασικότερα κριτήρια για την ταξινόμηση των κατεργασιών με αφαίρεση υλικού είναι η μορφή του κοπτικού εργαλείου. Οι κατηγορίες που προκύπτουν είναι: η γεωμετρικά καθορισμένη μορφή του κοπτικού εργαλείου, η γεωμετρικά ακαθόριστη μορφή του κοπτικού εργαλείου και οι μη συμβατικές κατεργασίες.

Γεωμετρικά καθορισμένη μορφή του κοπτικού εργαλείου: Τόννευση, Πλάνιση, Διάτρηση, Αυλάκωση, Boring, Πριόνισμα, Φραιζάρισμα, Γραναζοκοπή κ.ά.

Γεωμετρικά ακαθόριστη μορφή του κοπτικού εργαλείου: Λείανση, Honning, Lapping, Υπερλείανση κ.ά.

Μη συμβατικές κατεργασίες: Ηλεκτροχημικές κατεργασίες, Ηλεκτροδιάβρωση (EDM), Laser, Plasma, Δέσμη ηλεκτρονίων (EBM), Δέσμη ιόντων (IBM), Υπέρηχοι κ.ά.

2.5 Εξισώσεις Φραιζαρίσματος (*Milling Equations*)

Ταχύτητα Περιστροφής – Rotational Speed:

$$N = v / (\pi * 0.001 * D)$$

N: Ταχύτητα Περιστροφής (*RPM*)

v: Ταχύτητα Κοπής (*SFPM*)

D: Διάμετρος Κοπής/ Κοπτικού Εργαλείου (*mm*)

Ρυθμός Τροφοδοσίας – Feed Rate:

$$f_r = N * n_t * f$$

f_r: Ρυθμός Τροφοδοσίας (*Dist./Min.*)

N: Ταχύτητα Περιστροφής (*RPM*)

n_t: Αριθμός Οδοντών του Κοπτικού Εργαλείου (*Tooth*)

f: Τροφοδοσία (*In./Tooth*)

Απόσταση Προσέγγισης (σε Περιφερειακό Φραιζάρισμα – *Peripheral Milling*):

$$A = \sqrt{d * 0.001 * (D - d)}$$

A: Απόσταση Προσέγγισης (*mm*)

D: Διάμετρος Κοπής/ Κοπτικού Εργαλείου (*mm*)

d: Βάθος Κοπής

Απόσταση Προσέγγισης (σε Φραιζάρισμα Προσώπου – *Face Milling*):

$$A = O = 0.001 * D/2$$

A: Απόσταση Προσέγγισης (*mm*)

O: Απόσταση Εξαντλημένης Κοπής (*mm*)

D: Διάμετρος Κοπής/ Κοπτικού Εργαλείου (*mm*)

Χρόνος Κατεργασίας (σε Φραιζάρισμα Προσώπου – *Peripheral Milling*):

$$T_m = (0.001 * (L + A)) / f_r$$

T_m: Χρόνος Κατεργασίας (*Min.*)

L: Μήκος Κοπής (*mm*)

A: Απόσταση Προσέγγισης (*mm*)

f_r: Ρυθμός Τροφοδοσίας (*Dist./Min.*)

Χρόνος Κατεργασίας (σε Φραιζάρισμα Προσώπου – *Face Milling*):

$$T_m = (0.001 * (L + A + O)) / f_r$$

T_m: Χρόνος Κατεργασίας (*Min.*)

L: Μήκος Κοπής (*mm*)

A: Απόσταση Προσέγγισης (*mm*)

O: Απόσταση Εξαντλημένης Κοπής (*mm*)

f_r: Ρυθμός Τροφοδοσίας (*Dist./Min.*)

Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού – Material Removal Rate:

$$MRR = 0.001 * w * d * f_r$$

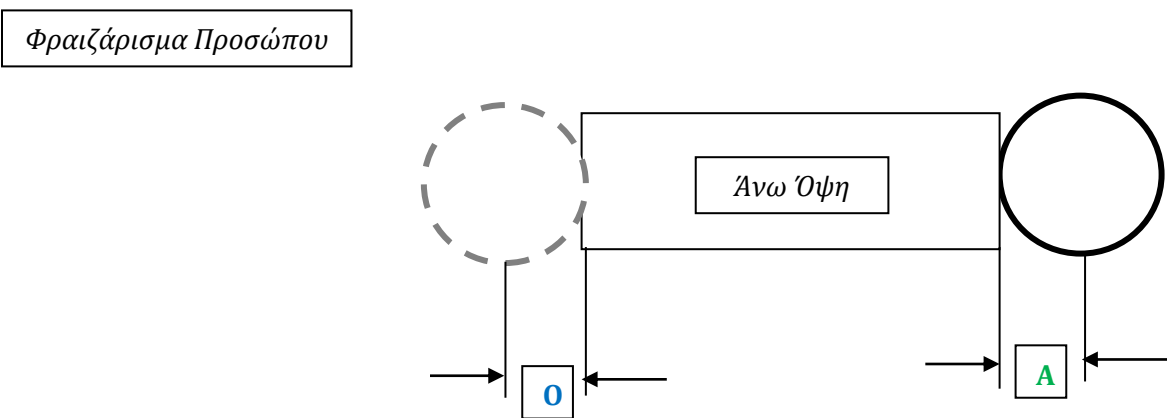
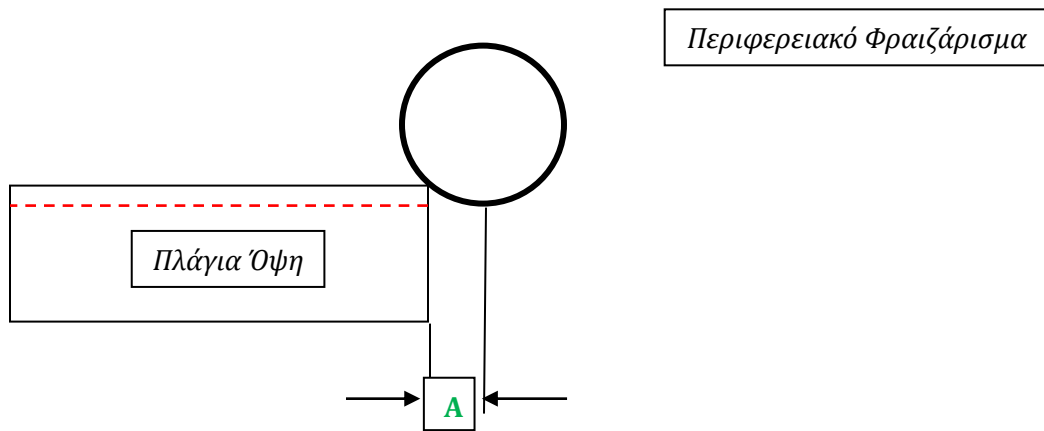
MRR: Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (*in.cu./Min.*)

w: Πλάτος Κοπής (*mm*)

d: Βάθος Κοπής (*mm*)

f_r: Ρυθμός Τροφοδοσίας (*Dist./Min.*)

Αποστάσεις Προσέγγισης:



2.6 Κοπτικά Εργαλεία (*Cutting Tools*)

Τα κοπτικά εργαλεία διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στο πεδίο των κατεργασιών καθώς ορίζουν και ταυτοχρόνως ορίζονται από τις κατεργασίες (*Δηλαδή είναι αλληλένδετα μεταξύ τους*). Ως αποτέλεσμα προσφέρουν το καθένα τους με τη δική του μοναδική ιδιότητα την καλύτερη δυνατή τελική γεωμετρία ενός απτού προϊόντος (*Τελικό στάδιο*), από την ψηφιακή μοντελοποίηση (*Αρχική ιδέα*) μέχρι το τελικό στάδιο.

Παρακάτω παρατίθενται κι αναλύονται σχετικά οι πιο βασικές κατηγορίες κοπτικών εργαλείων με τη λογική σειρά τους μέσα σε μια συνολική/ συλλογική ακολουθία CNC κατεργασιών. Η φιλοσοφία είναι στην εκκίνηση να χρησιμοποιούνται μεγάλου μεγέθους και πιο γενικής φύσεως εργαλεία, ώστε στο συντομότερο χρονικό διάστημα να αφαιρεθεί μεγάλος όγκος υλικού, καταλήγοντας στις λεπτομέρειες με πιο ειδικά εργαλεία για την απόδοση της γεωμετρίας και της ιδανικής ποιότητας επιφάνειας. Τέλος, τη θέση παίρνουν τα τρυπάνια, τα γλύφανα, οι σπειροτόμοι κτλ. για τη δημιουργία οπών και σπειρωμάτων (*Holes & Threads*).

#1 - Κονδύλια & Φραιζες (*End Mills {Flat, Ball & Chamfer} & Face Mill*):



Εικόνα 10. Κοπτικά εργαλεία.
<https://epictool.ca/end-mills/>

Επίπεδο Κονδύλι (*Flat Nose*): Φραιζάρισμα δισδιάστατων περιγραμμάτων και ποκετών (*2D Contours & Pockets*).

Κονδυλοφόρο Εργαλείο Σφαιρικής Απόληξης (*Ball Nose*): Φραιζάρισμα τρισδιάστατων περιγραμμάτων (*3D Contours*).

Bull Nose: Δημιουργεί ράδια στις γωνίες των επί κατεργασίας τεμαχίων (*Radius Corner - Fillet*).

Λοξοτόμος (*Chamfer*): Διαθέτει κωνική μύτη ώστε να σπάει τις γωνίες.

Φραιζα με Ένθετα Πλακίδια (*Face Mill {Carbide Insert}*): Διαθέτει ένθετα πλακίδια κοπής τα οποία αντικαθίστανται εύκολα μόλις φθαρούν (*Worn*), συνήθως είναι τέσσερις κοπτικές ακμές (*Flutes*) οι οποίες αφαιρούν μεγάλες ποσότητες υλικών μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό, τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούνται πρώτα στις κατεργασίες για να πραγματοποιήσουν το ξεχόνδρισμα και να φανερώσουν τη βασική γεωμετρία του μοντέλου.

#2 – Εργαλείο Γωνιακής Σμίλευσης (*Corner Rounding Tools*):



Εικόνα 11. Εργαλείο Γωνιακής Σμίλευσης.

<https://www.indiamart.com/proddetail/corner-rounding-end-mill-17693492597.html>

Τα εργαλεία αυτά προσφέρουν στις εξωτερικές γωνίες των τεμαχίων εξωτερικά ράδια.

#3 – Εργαλεία Πριονίσματος (*Slot Tools {Mills/Saws}*):



Εικόνα 12. Εργαλεία Πριονίσματος.

<https://waykenrm.com/blogs/milling-cutter-tools/>

Slitting Saw, Side Milling Cutter, Woodruff Cutter: Τα συγκεκριμένα εργαλεία μέσω κυρίως του πριονίσματος είναι ιδανικά ώστε να δημιουργούν υποδοχές και υποσκαφίματα (*Slots &*

Undercuts).

#4 – Εργαλεία Οπών (*Hole-Making Tools*):

Κεντραδόρος (*Center-Spot Drills*): Αυτό το εργαλείο είναι μικρό σε μήκος, εξαιρετικά άκαμπτο (*Rigid*) και χρησιμοποιείται για να δημιουργεί έναν κώνο στην επιφάνεια του τεμαχίου που θα βρισκονται μετέπειτα τα κέντρα των οπών.

Τρυπάνια (*Countersink Drill Bits*):

Τα τρυπάνια έχουν ένα κωνικό σημείο κοπής και έναν άξονα με έναν ή περισσότερους αυλούς (*Flutes*), τις ελικοειδείς αυλακώσεις που διατρέχουν το εξωτερικό του εργαλείου. Τα τρυπάνια συνήθως ποικίλουν (*Combined, Twist and Ejector Drills*), με κάθε τύπο να έχει διαφορετικό σκοπό για την τελική επίτευξη της δημιουργίας οπών.



Εικόνα 13. Εργαλεία Οπών.

<https://www.cnccookbook.com/cnc-twist-drills-cobalt-carbide/>

#5 – Σπειροτόμοι (*Taps*):

Bottoming Tap, Spiral Point Tap: Σχηματίζουν σπειρώματα μέσω της διάτμησης υλικού.

#6 – Γλύφανα (*Reamers*):

Οπές με εξαιρετική τραχύτητα επιφάνειας (*Surface Finish*), όπου στην κατεργασία αποπεράτωσης μέσω γλύφανσης υπάρχει ακρίβεια έως 0.005 mm. Προκειμένου να δημιουργηθεί αποτελεσματικά μια οπή στο τεμάχιο εργασίας, πρώτα χρησιμοποιούμε ένα

μικρότερης διαμέτρου τρυπάνι απ' το τελικό αποτέλεσμα και ύστερα χρησιμοποιούμε ένα διαφορετικό κοπτικό εργαλείο, το γλύφانو. Τα γλύφανα επιτρέπουν την διεύρυνση του μεγέθους των υπαρχουσών οπών, ενώ επιτυγχάνεται η ακρίβεια (*Accuracy*) διαστάσεων και ανοχών (*Dimensions & Tolerances*). Ο λόγος χρησιμοποίησης των ειδικών αυτών εργαλείων είναι η αποφυγή υπερμεγέθους τρύπας από αυτής που έχει ήδη καθοριστεί από τα τρυπάνια.



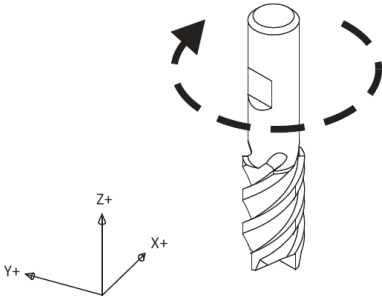
Εικόνα 14. Σπειροτόμοι και Γλύφανα.

<https://www.neill-lavielle.com/taps-reamers-and-threads-percentage-of-success/>

Άλλα σημαντικά κοπτικά εργαλεία που ανήκουν επίσης στη μεγάλη ποικιλία των CNC κατεργασιών αναφορικά με τις φραιζες είναι: οι κοπτήρες γραναζιών (*Gear Cutters – για Spur, Bevel, Worm, Screw, & Helical Gears*), οι φραιζες με διάκενο (*Hollow Mills*), τα Slab Mills, Slab Cutters ή Plain Mills, τα Fly Cutters κ.α.

Πληροφορίες για τα κοπτικά εργαλεία:

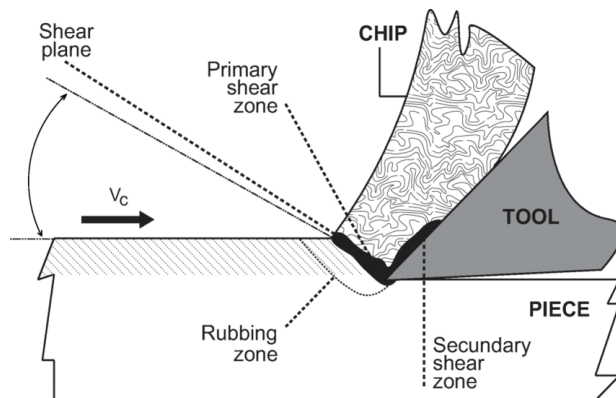
Κατεύθυνση Περιστροφής (*Rotation Direction*):



Εικόνα 15. Ωρολογιακή Κίνηση/ Περιστροφή Κοπτικού Εργαλείου.
(<https://en.cncforum.net/t/cnc-cutting-tool-fundamentals/332>)

Όλα τα εργαλεία περιστρέφονται με ωρολογιακή κατεύθυνση με την οπτική από το spindle του μηχανήματος με κατεύθυνση προς τα κάτω, δηλαδή στο προς κατεργασία τεμάχιο.

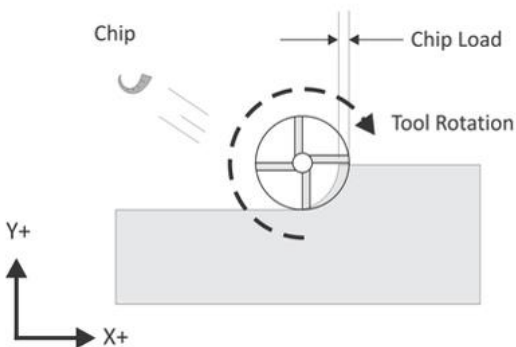
Σχηματισμός Αποβλήτου (*Chip Formation*):



Εικόνα 16. Σχηματική Απεικόνιση CNC Κατεργασίας (Μέσω Διάτμησης).
(https://www.researchgate.net/figure/Chip-formation-during-machining-according-to-18_fig1_348519499)

Τα κοπτικά εργαλεία αφαιρούν τα μέταλλα μέσω διάτμησης (*Shearing Action*), καθώς το εργαλείο εισχωρεί (*Advance*) εντός του υλικού προκαλώντας την αποκοπή μίας μικρής ποσότητας υλικού, σχηματίζοντας ένα απόβλητο.

Φορτίο Αποβλήτου (*Chip Load*):

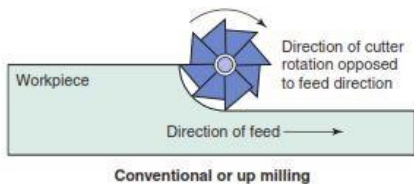
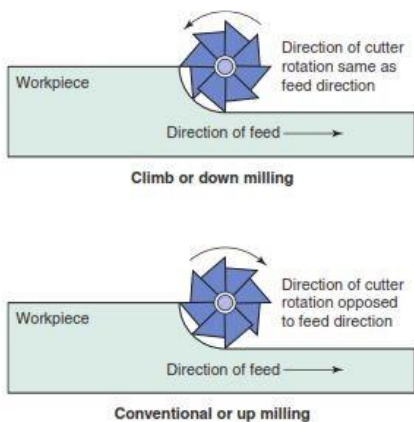


Εικόνα 17: Σχηματική Απεικόνιση Φορτίου Αποβλήτου.

(<https://chrisandjimcim.com/what-is-chip-load/>)

Η στρώση του υλικού που αποκόπτεται από τον κάθε έναν κοπτικό οδόντα αποκαλείται πρόωση ανά οδόντα (*Feed Per Tooth - FPT*), ή αλλιώς φορτίο αποβλήτου.

Ομόρροπο & Αντίρροπο Φραιζάρισμα (*Climb & Conventional Milling*):



Εικόνα 18: Σχηματική Απεικόνιση Ομόρροπου & Αντίρροπου Φραιζαρίσματος.

(<https://cadcamengineering.net/climb-and-conventional-milling/>)

Ομόρροπο Φραιζάρισμα: Τα εργαλεία φραιζαρίσματος εισχωρούν στο υλικό με τέτοιον τρόπο όπου οι κοπτικοί αιθέρες (*Cutting Flutes*) δεσμεύουν (*Engage*) το υλικό στο μέγιστο πάχος (*Thickness*) ώσπου φθίνουν στο μηδενικό πάχος.

Αντίρροπο Φραιζάρισμα: Η κοπή με την αντίθετη κατεύθυνση (*Opposite Direction*) προκαλεί τη συλλογή (*Scour Up*) του υλικού, από το κοπτικό εργαλείο, ξεκινώντας με μηδενικό πάχος αυξάνοντας στο μέγιστο πάχος.

2.7 Σύστημα Ψύξης (Coolant)



Εικόνα 19. Σύστημα Ψύξης

<https://waykenrm.com/blogs/which-cnc-coolant-should-you-pick-when-milling-aluminum/>

Το ψυκτικό, γνωστό κι ως υγρό κοπής, είναι ένας τύπος λιπαντικού που βοηθά μια μηχανή CNC να κόβει εύκολα υλικά όπως μέταλλα, υαλοβάμβακα και πλαστικά υψηλής πυκνότητας, μεταξύ άλλων.

Όταν ένας χειριστής (*CNC Operator*) χρησιμοποιεί το μηχάνημα σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, το ψυκτικό υγρό βοηθά στη λίπανση της διαδικασίας κοπής. Σε υψηλές ταχύτητες κοπής, το ψυκτικό υγρό ψύχει το τεμάχιο εργασίας. Οι χειριστές, εφαρμόζουν επίσης ψυκτικό για να διατηρήσουν τον χώρο εργασίας απαλλαγμένο από σωματίδια και απόβλητα που προέρχονται από το τεμάχιο εργασίας που κόβει ο χειριστής.

Το ψυκτικό στη μηχανή CNC, διαδραματίζει τρεις ρόλους. Αρχικά, βοηθά στην απομάκρυνση των θραυσμάτων ή γρεζιών (*Chips or Swarf*). Ύστερα, εξασφαλίζει τη λίπανση της δράσης κοπής. Τέλος, παρέχει δράση «ψυκτικού», μέσω μεταφοράς θερμότητας από το εξάρτημα ή εργαλείο, στο υγρό κοπής ή στο ψυκτικό. Αναλυτικότερα:

1. Καθαρισμός γρεζιών (*Chip Clearing*):

Ο ψεκασμός ενός υγρού κοπής στην τομή βοηθά να μετακινηθούν τα τσιπ από τη μέση του κοπτικού εργαλείου. Η εκκαθάριση των τσιπ ελαχιστοποιεί την επανακοπή των τσιπ. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν λιγότερα τσιπς που πρέπει να αφαιρέσει το κοπτικό εργαλείο κι επίσης ότι τα παλιά τσιπ δεν γλιστρούν και δεν χτυπούν στα τοιχώματα της κοπής. Η κοπή των τσιπ καταστρέφει το φινίρισμα της επιφάνειας και φθείρει τα εργαλεία πολύ πιο γρήγορα. Στη χειρότερη περίπτωση, ένα κοπτικό εργαλείο ενδέχεται να καλύψει μια σχισμή ή οπή με τσιπς, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του κοπτικού εργαλείου ή ακόμα και τη θραύση του.

2. Λίπανση (*Lubrication*):

Ορισμένα υλικά, όπως το αλουμίνιο ή κάποιοι χάλυβες, είναι κολλώδη. Έχουν μια χημική συγγένεια με το κοπτικό εργαλείο, έτσι δύναται η πιθανότητα να συγκολληθούν με αυτό. Η λίπανση καθιστά τα αντικείμενα ολισθηρά, έτσι τα τσιπ είναι λιγότερο πιθανό να προσκολληθούν και να συγκολληθούν. Η εκκαθάριση των τσιπ καθιστά επίσης λιγότερο πιθανή την προσκόλληση.

3. Ψύξη (*Coolant*):

Τα υγρά είναι ικανά να μεταφέρουν πολύ περισσότερη θερμότητα μακριά από την περιοχή της κοπής, συγκριτικά με τον αέρα. Για παράδειγμα, το απλό νερό μεταφέρει τη θερμότητα 25 φορές πιο αποτελεσματικά από τον αέρα. Άρα, τα υδατοδιαλυτά ψυκτικά είναι αποτελεσματικότερα στην ψύξη, σε σχέση με τα λιπαντικά.

Άλλες χρήσεις του ψυκτικού στη μηχανική κατεργασία περιλαμβάνουν: Την προστασία του μηχανήματος από τη διάβρωση, την ψύξη θερμών επιφανειών για την εξασφάλιση ασφαλούς χειρισμού του μηχανήματος και του τεμαχίου εργασίας, τη βελτίωση της διάρκειας ζωής του μηχανήματος, τη προστασία του τεμαχίου εργασίας από παραμόρφωση λόγω έντονης θερμότητας.

Οι τύποι και οι μέθοδοι μεταφοράς (*Types and Delivery Methods*) του ψυκτικού είναι οι παρακάτω:

Το ψυκτικό CNC είναι διαθέσιμο σε πολλές διαφορετικές μορφές. Οι πιο κοινές μορφές περιλαμβάνουν αέρα, νέφος, μεγάλες ποσότητες ψυκτικού, υψηλή πίεση και ελάχιστη ποσότητα λιπαντικού (*Minimum Quantity Lubricant*). Η επιλογή λανθασμένης πίεσης (*Pressure*) μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε εξαρτήματα ή εργαλεία, ενώ η επιλογή λανθασμένης πίεσης, ενδέχεται να οδηγήσει στην εξάντληση των πόρων του εργαστηρίου (*Workshop Resources*).

Αέρας (*Air*):

Ψύξη και αφαίρεση γρεζιών, αλλά χωρίς λιπαντικό σκοπό. Η απόδοση ψύξης του ψυκτικού μέσω αέρα δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή του ψυκτικού υγρού με βάση το νερό ή το λάδι. Για πιο ευαίσθητα υλικά, συνήθως προτιμάται το ψυκτικό αέρα σε σύγκριση με τον τύπο που έρχεται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα. Για πολλά πλαστικά, αυτό είναι ορθό. Εάν χρησιμοποιείται άμεσο ψυκτικό, μπορεί να προκληθεί θερμικό σοκ (*Thermal Shock*) ή ταχεία διαστολή και συστολή εξαρτημάτων.

Νέφος (*Mist*):

Για περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται αφαίρεση γρεζιών και απαγωγή θερμότητας, αυτό το ψυκτικό χαμηλής πίεσης είναι αρκετό. Δεδομένου ότι η πίεση που ασκείται στο νέφος δεν είναι υψηλή, τα εξαρτήματα και τα εργαλεία δεν θα υποστούν πρόσθετη πίεση.

Μεγάλες Ποσότητες Ψυκτικού (*Flood*):

Αυτή η μέθοδος χαμηλής πίεσης έχει τη δυνατότητα να λιπαίνει και να ξεπλένει τα τσιπ στα εξαρτήματα για να αποφευχθεί η εκ νέου κοπή των τσιπ, η οποία είναι μια

συνηθισμένη κατάσταση που καταστρέφει το εργαλείο.

Υψηλή Πίεση (*High-Pressure*):

Πλήρωση με ψυκτικό και πίεση παροχής μεγαλύτερη από 1.000 psi. Αυτή είναι μια εξαιρετική επιλογή για την αφαίρεση και την αποστράγγιση των τσιπς γιατί θα απομακρύνει τα τσιπ από το εξάρτημα. Αν κι αυτή η μέθοδος θα ψύξει το εξάρτημα αμέσως και αποτελεσματικά, η πίεση μπορεί να είναι αρκετά υψηλή ώστε να βλάψει ένα εργαλείο μικρής διαμέτρου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως σε εργασίες βαθιάς κοιλότητας ή διάτρησης και μπορεί να μεταφερθεί από το εργαλείο μέσω του ψυκτικού ή της δεξαμενής ψυκτικού που είναι ενσωματωμένη στο ίδιο το εργαλείο (*Coolant Thru*).

Ελάχιστη Ποσότητα Λιπαντικού (*MQL*):

Κάθε μηχανολογικό εργαστήριο εστιάζει στον τρόπο απόκτησης ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος-μείωσης κόστους, αύξησης της παραγωγής και βελτίωσης της αποδοτικότητας του εργαστηρίου. Αυτός είναι ο λόγος που πολλές εταιρίες επιλέγουν το MQL και τα προφανή περιβαλλοντικά οφέλη του. Η χρήση μόνο της απαραίτητης ποσότητας ψυκτικού θα μειώσει σημαντικά το κόστος και τη σπατάλη υλικών. Αυτό το λιπαντικό χρησιμοποιείται με τη μορφή αερολύματος ή πολύ λεπτού νέφους για να παρέχει αρκετό ψυκτικό για την αποτελεσματική εκτέλεση μιας δεδομένης λειτουργίας.

Συνοπτικά, το ψυκτικό CNC συχνά δε θεωρείται το κύριο συστατικό των εργασιών κατεργασίας. Ο τύπος του ψυκτικού ή του λιπαντικού και η πίεση που ασκεί είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη μηχανική κατεργασία (*Machining*) και τη βέλτιστη απόδοση του εργαστηρίου. Το ψυκτικό μπορεί να εφαρμοστεί με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα, νέφους, υπερχειλίσσης ή υψηλής πίεσης. Ορισμένα μηχανήματα έχουν επίσης δυνατότητες MQL, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να περιορίσουν αποτελεσματικά την ποσότητα του ψυκτικού που χρησιμοποιείται στην ποσότητα που απαιτείται για την αποφυγή της υπερκατανάλωσης.

Οι τύποι του ψυκτικού είναι οι εξής:

Τα ψυκτικά χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες και έχουν πολλές διαφορετικές συνθέσεις. Η επιλογή του ψυκτικού θα πρέπει να βασίζεται στη συνολική απόδοση που παρέχει, η οποία επικεντρώνεται στην εφαρμογή επεξεργασίας και στα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Διαλυτά Έλαια (*Soluble Oils*):

Όλα τα υδατοδιαλυτά υγρά κοπής, αποτελούν μια εξαιρετική επιλογή για κατεργασίες (*Operations*) γενικής χρήσης. Τα υδατοδιαλυτά έλαια σχηματίζουν συνήθως γαλακτώματα μετά την ανάμιξη με νερό. Το συμπύκνωμα που προκύπτει, περιέχει το γαλάκτωμα και το βασικό ορυκτέλαιο για να ληφθεί ένα κατάλληλο γαλάκτωμα. Όταν υπάρχει σε αραιωμένη μορφή έχει καλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας και καλή λιπαντική ικανότητα. Το διαλυτό έλαιο είναι πολύ οικονομικό και χρησιμοποιείται

συνήθως ως ρευστό στη βιομηχανία. Η προσθήκη ορισμένης ποσότητας αναστολέα οξειδωσης μπορεί να λιπαίνει και να αντιστέκεται σε αυτή ταυτόχρονα. Το μειονέκτημα είναι ότι εάν η δεξαμενή ψυκτικού υγρού δεν συντηρείται σωστά, μπορεί εύκολα να προκληθεί μικροβιακή ανάπτυξη μυκήτων και βακτηρίων.

Συνθετικά Έλαια (*Synthetic Oils*):

Αυτοί οι τύποι ελαίων τείνουν να είναι οι πιο καθαροί από όλα τα υγρά κοπής και δεν έχουν ορυκτέλαιο ή πετρέλαιο. Αντίθετα, παρασκευάζονται με βασικές οργανικές και ανόργανες ενώσεις και πρόσθετα για την πρόληψη της διάβρωσης. Παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε αραιωμένη μορφή. Το συνθετικό υγρό έχει την καλύτερη απόδοση ψύξης από άλλα υγρά κοπής.

Ημισυνθετικά Έλαια (*Semi-synthetic Oils*):

Όταν αναμιγνύονται διαλυτό έλαιο και συνθετικό ρευστό, μπορεί να ληφθεί ένα ημι-συνθετικό ρευστό. Θεωρούνται ως τα καλύτερα και των δύο ειδών (*Διαλυτών/Συνθετικών*), έχουν λιγότερο έλαιο από τα βασικά έλαια γαλακτώματος, έχουν λιγότερη οσμή και διατηρούν πολλές από τις ίδιες λιπαντικές ιδιότητες. Αυτό τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύτερο φάσμα επεξεργασίας. Επιπλέον, η απόδοση μεταφοράς θερμότητας και το κόστος των ημισυνθετικών ρευστών είναι μεταξύ αυτών των διαλυτών και των συνθετικών ρευστών.

Καθαρά Έλαια (*Straight Oils*):

Τα καθαρά έλαια αναφέρονται σε εκείνα τα έλαια που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες μηχανικής κατεργασίας σε μη αραιωμένη μορφή και δεν αναμιγνύονται με νερό. Συνήθως, η σύνθεσή τους είναι ορυκτέλαιο βάσης ή πετρέλαιο. Περιέχουν επίσης πολικά λιπαντικά όπως φυτικά έλαια, λίπη και σύνθετα έλαια (*Compound Oils*). Μπορεί επίσης να περιέχουν πρόσθετα όπως θείο, χλώριο και φώσφορο. Παρέχουν την καλύτερη λίπανση αλλά τη χειρότερη απόδοση ψύξης.

Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2):

Το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται ως ψυκτικό και μπορεί να ψυχθεί με υγρό υπό πίεση. Το CO_2 είναι ένα διαστελλόμενο κράμα που βοηθά στη μείωση της θερμοκρασίας, αρκεί για να μετατρέψει τη φάση σε στερεό. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός εξωτερικού ακροφυσίου (*Nozzle*) ή Coolant-Thru, αυτοί οι κρύσταλλοι απλώνονται στην περιοχή κοπής για να κρυώσουν το εργαλείο κοπής και το τεμάχιο εργασίας με έλεγχο θερμοκρασίας.

Αερόλυμα (*Aerosol*):

Το αερόλυμα μπορεί να οριστεί ως ένα υγρό κοπής στο οποίο ο αέρας με μικροσκοπικά σταγονίδια διασπείρεται σε όλο το υγρό κοπής. Η μετάδοση του αερολύματος πραγματοποιείται με Coolant-Thru. Από πλευράς τοποθεσίας και χρόνου, η παράδοση του αερολύματος έχει ολοκληρωθεί, κάτι που μοιάζει σχεδόν με ξηρή επεξεργασία από την πλευρά του χειριστή. Τα τσιπ που παράγονται είναι πολύ κοντά στα τσιπς ξηρής μηχανής και δεν χρειάζονται αποστράγγιση.

Για την ορθή επιλογή του ψυκτικού πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι:

Το καλύτερο ψυκτικό θα προστατεύσει το μηχάνημα και θα παρατείνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, παρέχοντας παράλληλα ένα υγιές και ασφαλές περιβάλλον για τους χειριστές.

Η επιλογή του καλύτερου ψυκτικού για τη βελτιστοποίηση όλων αυτών των παραμέτρων συνδυάζεται καλύτερα με τις απόψεις του κατασκευαστή εργαλειομηχανών και του προμηθευτή ψυκτικού.

Οι υπεύθυνοι εταιριών και οι μηχανικοί βασίζονται συνήθως στην τεχνογνωσία των προμηθευτών ψυκτικού για να συζητήσουν και να προτείνουν το καλύτερο ψυκτικό για το επεξεργαζόμενο υλικό. Οι περισσότερες εταιρίες έχουν ως σκοπό να μειώνουν όσο το δυνατόν περισσότερο τον αριθμό των διαφορετικών ψυκτικών που χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το κόστος συντήρησης και κόστος απομάκρυνσης αποβλήτων του ψυκτικού και να τους επιτρέψουν να προμηθευτούν ψυκτικά σε μεγάλες ποσότητες για να εξοικονομήσουν περισσότερο κόστος.

CNC Coolant	Specific Heat of Coolant	Steel A (Tempered) Temp Decrease %	Steel B (Annealed) Temp Decrease %
Air	0.25		
Compound Oil (High Viscosity)	0.489	3.9	4.7
Compound Oil (Low Viscosity)	0.556	6	6
Aqueous Solution of Wetting Agent	0.872	14.8	8.4
Aqueous "Soda Product" Solution (4%)	0.923	-	13
Water	1.00	19	15

Πίνακας 1. Πίνακας Ψυκτικών και Θερμοτήτων.

2.8 Τεχνολογία Υλικών

Υλικά Κατεργαζόμενων Τεμαχίων:

Η κατεργασία με CNC είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές μηχανικής κατεργασίας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία σήμερα. Υπάρχουν πολλά υλικά (*Materials*) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τις μηχανές CNC, ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα πολύ κοινά υλικά που συνδυάζονται πολύ αποτελεσματικά με μηχανές CNC. Γενικά, τα πιο κοινά υλικά χρήσης με μηχανές CNC είναι το αλουμίνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο ορείχαλκος, ο ανθρακούχος χάλυβας, το κράμα χάλυβα, το τιτάνιο, το πλαστικό κ.ά. (*Aluminum, Stainless Steel, Brass, Carbon Steel, Alloy Steel, Titanium, Plastics, etc.*).

Ακολουθεί μια λίστα υλικών που είναι πολύ δημοφιλή στην κατεργασία εξαρτημάτων:

1. Ποιότητες Αλουμινίου 6061, 7075 (*Aluminium Grades 6061, 7075*)

Το αλουμίνιο είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά στην κατεργασία CNC. Δεδομένου ότι τα εξαρτήματα αλουμινίου έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε έναν αριθμό βιομηχανιών, είναι ιδιαίτερα δημοφιλές υλικό στην κατεργασία CNC. Αν και όλοι οι τύποι ποιοτήτων αλουμινίου χρησιμοποιούνται με τις μηχανές CNC, οι ποιότητες αλουμινίου 6061 και 7075 είναι πολύ συνηθισμένες για χρήση με αυτές. Αυτό οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες (*Properties*) αντιστοίχισης των βαθμών αλουμινίου 6061 και 7075.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του έχουν πολύ καλή αναλογία αντοχής προς βάρος (*Strength-to-Weight Ratio*) και είναι ανθεκτικά στη διάβρωση (*Resistant to Corrosion*). Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του αλουμινίου και των διαφόρων ποιοτήτων του, έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στη βιομηχανία.

Η κατηγορία αλουμινίου 6061 χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή εξαρτημάτων οχημάτων, εξαρτημάτων αεροσκαφών και διαφόρων άλλων εφαρμογών.

Το αλουμίνιο 7075 είναι ένα κράμα με ψευδάργυρο (*Zinc*). Είναι ένα από τα ισχυρότερα κράματα αλουμινίου που έχει εφαρμογή με τη μηχανή CNC. Όπως το αλουμίνιο 6061, το αλουμίνιο 7075 χρησιμοποιείται παρομοίως για την κατασκευή μερών οχημάτων κι αντιστοίχως αεροδιαστημικής (*Aerospace*).

2. Ανοξείδωτος χάλυβας 303, 304, 316L, 410 και 416 (*Stainless Steel*)

Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά στον τομέα της κατεργασίας CNC. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ποιότητες χάλυβα είναι οι 303, 304, 316L, 410 και 416.

Αυτές οι ποιότητες ανοξείδωτου χάλυβα διαφέρουν ως προς τις ποσότητες χρωμίου (*Chromium*) που προστίθεται στο κύριο υλικό. Για τον ανοξείδωτο χάλυβα 303, στη

σύνθεση προστίθεται επίσης θείο (*Sulphur*). Δεδομένου ότι ο βαθμός 303 έχει εξαιρετικές δυνατότητες κατεργασίας, έχει υψηλή εφαρμογή στην προετοιμασία εξαρτημάτων. Ως εκ τούτου, τα πιο κοινά εξαρτήματα που κατασκευάζονται από την κατηγορία 303 είναι κοχλίες, περικόχλια, οδοντωτοί τροχοί, έδρανα κ.λπ (*Bolts, Nuts, Gears, Fittings, etc.*).

Από την άλλη πλευρά, ο ανοξειδωτος χάλυβας 304 είναι επίσης ένα πολύ κοινό υλικό CNC που έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Με τη σύνθεση 18% χρωμίου και 8% νικελίου (*Nickel*), αυτός ο βαθμός έχει πολύ καλή εφαρμογή μηχανικής κατεργασίας. Τα πιο συνηθισμένα εξαρτήματα για την κατηγορία 304 είναι μαγειρικά σκεύη, δεξαμενές, αγωγοί κ.λπ (*Utensils, Tanks, Pipes, etc.*).

Ο ανοξειδωτος χάλυβας 316 είναι πολύ ανθεκτικός και γι' αυτό έχει μεγάλη εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία. Ονομάζεται επίσης "ναυπηγικός" ανοξειδωτος χάλυβας. Έτσι, ο βαθμός 316 χρησιμοποιείται για τη μηχανική κατεργασία εξαρτημάτων ναυπηγικής.

Ο ανοξειδωτος χάλυβας 410 είναι ένας τύπος ανοξειδωτου χάλυβα που παράγεται σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM, ισοδύναμος με τον ανοξειδωτο χάλυβα 1Cr13, S41000 (AISI, ASTM). Περιέχει 0,15% άνθρακα (*Carbon*) και 13% χρώμιο. Ο ανοξειδωτος χάλυβας 410: διαθέτει καλή αντοχή στη διάβρωση, δυνατότητα επεξεργασίας και παράγει λεπίδες γενικής χρήσης και διάφορες κατηγορίες βαλβίδων (*General-Purpose Blade, Valve Class*).

Ο ανοξειδωτος χάλυβας 416 είναι ένα υλικό με καλύτερη απόδοση στην ευκολία κοπής, όπου χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων, ειδικών μικροκινητήρων και ηλεκτρικών εξαρτημάτων (*Solenoid Valves, Micro Special Motors, & Electrical Components*). Όλα τα παραπάνω υλικά από ανοξειδωτο χάλυβα διαθέτουν ευκολία κοπής, είναι ειδικά κατάλληλα για αυτόματους τόνους και CNC για μαζική παραγωγή.

Τα πιο κοινά παραγόμενα μέρη ανοξειδωτου χάλυβα είναι σκεύη, εξαρτήματα μηχανών, διάφορα εξαρτήματα κ.λπ (*Utensils, Machine Parts, Fittings, etc.*).

3. Ορείχαλκος C3604 και C3602 (*Brass C3604 & C3602*)

Η C3604 ορειχάλκινη ράβδος προστασίας περιβάλλοντος (*Environmental Protection Brass Rod*) διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά και πεδίο εφαρμογής: είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος ορειχαλκος, με καλή μηχανική επεξεργασία, καλές μηχανικές ιδιότητες, μπορεί να αντέξει την επεξεργασία πίεσης υπό ψύξη αλλά και θέρμανση, ιδανικός για συγκολλήσεις και διαθέτει σταθερότητα ως προς τη γενική διάβρωση, τείνει όμως να διαβρώνεται και να ραγίζει.

Η C3602 ορειχάλκινη ράβδος, διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά και πεδίο εφαρμογής: καλές μηχανικές ιδιότητες, καλή πλαστικότητα (*Plasticity*) σε θερμή κατάσταση, αποδεκτή πλαστικότητα σε ψυχρή κατάσταση, καλές μηχανικές ιδιότητες, ιδανική στη

συγκόλληση, αντοχή στη διάβρωση, αλλά εύκολο να προξενήσει διάβρωση και ρωγμές. Εκτός από τη χαμηλή τιμή αγοράς, είναι μια συνηθισμένη ποικιλία ορείχαλκου που χρησιμοποιείται ευρέως.

4. Χαλκός T2 (*Copper T2*)

Ένα άλλο κοινό υλικό που έχει τεράστια χρήση στη βιομηχανία κατεργασίας CNC είναι ο χαλκός. Ο χαλκός έχει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές που κυμαίνονται από την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων έως ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Επιπλέον, ο χαλκός έχει ένα πολύ δημοφιλές κράμα με ψευδάργυρο σε μορφή ορείχαλκου. Λόγω της μαλακής φύσης του, μπορεί να κατεργαστεί χωρίς τη χρήση λιπαντικών. Επίσης, το συγκεκριμένο κράμα έχει αντιμικροβιακές ιδιότητες που τον καθιστούν καλή επιλογή για την κατασκευή σκευών και δοχείων τροφίμων. Λόγω της υψηλότερης αντοχής του στη διάβρωση, ο ορείχαλκος και ο χαλκός είναι μια πολύ καλή επιλογή για εξαρτήματα υδραυλικών και υδάτινων σωμάτων (*Plumbing & Water Bodies*).

5. Ανθρακούχος Χάλυβας 12L14, C1045 (*Carbon Steel 12L14, C1045*)

Ο χάλυβας κοπής έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην κατασκευή εξαρτημάτων οργάνων ακριβείας, εξαρτημάτων οχημάτων και σημαντικών εξαρτημάτων διαφόρων τύπων μηχανημάτων. Το όριο καταπόνησης επαφής (*Fatigue Contact*) του χάλυβα κοπής είναι χαμηλό, επομένως δεν είναι κατάλληλος για να φέρει φορτίο καταπόνησης (*Fatigue Stress Load*) μεγάλων οδοντωτών τροχών, ρουλεμάν και άλλων μερών. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο χάλυβας 12L14. Η απόδοση κοπής του είναι επίσης πολύ καλή. Είναι κατάλληλο για πιο αυστηρές περιπτώσεις όπου το 12L14 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Ο χάλυβας ποιότητας 1045, είναι ένας μαλακός χάλυβας, που θεωρείται ένα πολύ κοινό υλικό για χρήση με μηχανές CNC. Λόγω της σκληρότητας και της τραχύτητάς του (*Toughness & Hardness*), ο βαθμός ανθρακούχου χάλυβα 1045 χρησιμοποιείται κυρίως για την κατεργασία οδοντωτών τροχών, κοχλιών, ράβδων και εξαρτημάτων που απαιτούν τραχύτητα και αντοχή (*Hardness & Strength*).

6. Κράμα Χάλυβα 4130 και 4140 (*Alloy Steel 4130 & 4140*)

Το κράμα χάλυβα 4130 και 4140 είναι ο κοινός κραματοποιημένος χάλυβας. Ο χάλυβας 4140 είναι ένα κράμα δομικού χάλυβα με υψηλή αντοχή, υψηλή σκληρυνσιμότητα, καλή σκληρότητα και χαμηλή παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της απόσβεσης. Ο χάλυβας 4140 είναι αμερικανικής ποιότητας, ισοδύναμος με τον κινεζικό κράμα δομικού χάλυβα 42CrMo, ο χάλυβας 4130 είναι αμερικανικής ποιότητας, ισοδύναμος με τον 30CrMo της Κίνας.

7. Τιτάνιο (*Titanium-Titanium Grade 5*)

Το τιτάνιο είναι ένα σπάνιο μέταλλο και έχει πολλές εφαρμογές στην ιατρική και τη βιομηχανία σκληρών μετάλλων. Είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και ελαφρύ. Το τιτάνιο είναι το πιο δημοφιλές εξάρτημα για χρήση στη βιοϊατρική βιομηχανία. Η κατεργασία CNC είναι πολύ συνηθισμένη με υλικό τιτανίου.

8. Πλαστικά (*ABS, Acrylics, Delrin, HDPE, Nylon, PTFE*)

Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές σήμερα. Οι μηχανές CNC μπορούν να κόψουν αποτελεσματικά σχεδόν όλους τους τύπους πλαστικών και να δημιουργήσουν αποκλειστικά εξαρτήματα. Οι κύριοι τύποι πλαστικών για χρήση με μηχανές CNC είναι το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (*ABS*), τα ακρυλικά, το πολυοξυμεθυλένιο (*Delrin*), το πολυαιθυλένιο (*HDPE*), τα νάιλον και το πολυτετραφθοροαιθυλενίο (*PTFE*). Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στις οποίες κατεργάζονται blank από πλαστικό στη μηχανή CNC. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν διακοσμητικά μέρη, παιχνίδια, σύνθετα πλαστικά εξαρτήματα, πλαστικά εξαρτήματα επίπλων κ.λπ.

Υλικά Κοπτικών Εργαλείων

Με την άνοδο της επιστήμης των υλικών, οι μηχανές CNC έχουν φθάσει στο σημείο να κατεργάζονται επιτυχώς όλα τα υλικά.

Τα κοπτικά εργαλεία των CNC μηχανών διαθέτουν τρεις (3) βασικούς τύπους υλικών: τους χάλυβες υψηλής ταχύτητας ή high-speed steel (*H-SS*), τα καρβίδια βολφραμίου (*Tungsten Carbide*) και τα κεραμικά (*Ceramic*).

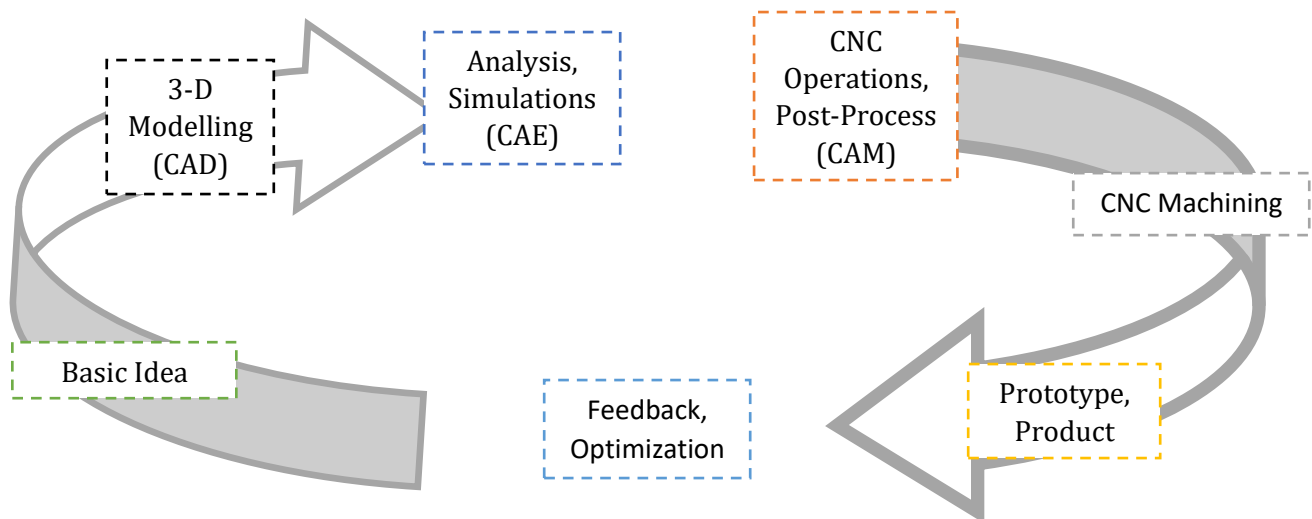
Οι πρώτοι απευθύνονται γενικά σε αλουμίνιο και άλλα μη σιδηρούχα κράματα, ενώ οι δεύτεροι σε αλουμίνια με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, ανοξείδωτους χάλυβες και εξωτικά μέταλλα (*High-Silicon Aluminums, Stainless Steels & Exotic Metals*).

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Εισαγωγή στο CAD – CAM

Για να φτάσει μια ανθρώπινη ιδέα, καινοτομία, μελέτη κι όλα τα σχετικά, στην υλοποίηση της, δηλαδή την κατασκευή της και συνάμα τη δημιουργία νέου προϊόντος παρεμβάλουν κάποια βήματα.

Ως πρώτο βήμα λοιπόν υπάρχει η ιδέα κι ως τελικό βήμα το προϊόν. Ενδιάμεσα υπάρχουν η μελέτη σε κάποιο λογισμικό CAD (*Computer Aided Design*), για δισδιάστατο 2D και τρισδιάστατο σχεδιασμό 3D με σκοπό την ανάπτυξη και μοντελοποίηση του νέου προϊόντος. Εν συνεχεία, το προϊόν δοκιμάζεται υπό κάποιες συνθήκες στις οποίες θα πρέπει να ανταπεξέρχεται σε επίπεδο προσομοίωσης, με κάποιο λογισμικό CAE (*Computer Aided Engineering*). Αν δεν περνάει τις δοκιμές, οι μελετητές οφείλουν να επιστρέψουν στο προηγούμενο βήμα, ώστε να διορθώσουν και να προσαρμόσουν κατάλληλα τα νέα δεδομένα στο μοντέλο. Αφού επιτευχθεί αυτό, έρχεται το επόμενο βήμα επίσης σε κάποιο λογισμικό, αυτό των κατεργασιών CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Οι μελετητές εδώ ορίζουν άκρως αναλυτικά τις κατάλληλες μεταβλητές και συνθήκες για να μπει το ακατέργαστο κομμάτι στις διαθέσιμες CNC μηχανές, ώστε να παραχθεί το επιθυμητό πρωτότυπο, το οποίο με τον τερματισμό όλων των κατεργασιών θα πρέπει να μετρηθεί με ειδικά εργαλεία και να διασαφηνιστεί το μέγεθος της απόκλισης του από τη θεωρία στη πράξη.



Οι έννοιες του CAD, του CAM και του CAE είναι βασικές, θεμελιώδεις και μείζονος σημασίας για την επιστήμη της μηχανολογίας κι όχι μόνο. Η διάκριση των λογισμικών που θα χρησιμοποιηθούν, απαιτούν αρκετή έρευνα και σκέψη, ενώ θα πρέπει να συνεργάζονται στο έπακρο μεταξύ τους, ή να επιλεγεί ένα λογισμικό όπου θα υπάρχουν στο πακέτο του όλες οι επιλογές, δηλαδή μοντελοποίηση, κατεργασίες, προσομοιώσεις κ.ο.κ.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η βασική φιλοσοφία των λογισμικών των κατεργασιών μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ή αλλιώς όπως είναι ευρέως γνωστό κι απλουστευμένο με το ακρωνύμιο CAM.

Όλα τα λογισμικά είναι δομημένα με το Interface. Δηλαδή την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με το περιβάλλον του λογισμικού και το αντίστροφο. Όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία τα λογισμικά γίνονται όλο και πιο φιλικά προς τον χρήστη. Αυτό μεταφράζεται με τη μείωση της δυσκολίας χρήσης τους και την αύξηση κατανόησής τους.

Έτσι λοιπόν τα λογισμικά CAM δίνουν όλες τις πιθανές επιλογές για τις CNC κατεργασίες στον χρήστη. Ενδεικτικά, την επιλογή του τύπου και μοντέλου μηχανής CNC, τη θέση και το μέγεθος του ακατέργαστου κομματιού, τα είδη των κατεργασιών που θα παραχθούν, τις θέσεις, τους τύπους και το μέγεθος των κοπτικών εργαλείων, την κίνηση του κοπτικού εργαλείου (μεταφορά, περιστροφή, επιβράδυνση, επιτάχυνση, ταχύτητα κινητήρα, πρόωση κτλ.), την αλλαγή του με το επόμενο κοπτικό, τον ψεκασμό και το είδος ψύξης στο σύστημα ψύξης και πολλά άλλα.

Ο χρήστης ξεκινάει με τη δημιουργία του "Workpiece". Εισάγει τα μοντέλα του από το ακατέργαστο έως το επιθυμητό τελικό. Συνήθως το τελικό ονομάζεται "Part" ενώ το αρχικό "Blank".

Δεύτερον, δημιουργεί τα εργαλεία, "Tools". Δηλώνει τον τύπο, αν φέρουν αποστάτες, συστολικά, τα ύψη τους, τις διαμέτρους τους, τα σημεία και μεγέθη κοπής του κοπτικού εργαλείου.

Τρίτον, δημιουργεί το δέντρο με τις κατεργασίες, "Operations". Δηλαδή, χτίζει τη φιλοσοφία και τον τρόπο σκέψης του για το πως θα κατεργαστεί το Workpiece. Στο σημείο αυτό όλα τα λογισμικά διαθέτουν global συγκεκριμένες κατεργασίες οι οποίες είναι κοινές για όλα τα λογισμικά.

Όταν αποφασίσει πως όλα τα παραπάνω είναι έτοιμα ξεκινάει ένας κύκλος ελέγχων. Το λογισμικό συλλέγει όλα τα δεδομένα και υπολογίζει τα outputs, ουσιαστικά τα αποτελέσματα. Πρωτίστως παράγει μέσω του Post-Process το επικείμενο πρόγραμμα σε κώδικα G. Επόμενο βήμα είναι να παραχθεί η τροχιά του εργαλείου. Βάσει αυτών κι επιπροσθέτων ελέγχων ο προγραμματιστής οφείλει να ορίσει αν το πρόγραμμα είναι ασφαλές για να το μεταφέρει στο μηχάνημα ώστε να ξεκινήσουν οι κατεργασίες. Στη περίπτωση που δεν είναι αποδεκτή η χρήση του εκείνος θα προβεί στις όποιες διορθωτικές κινήσεις.

3.2 Σύστημα Συντεταγμένων & Αρχικό Σημείο CNC

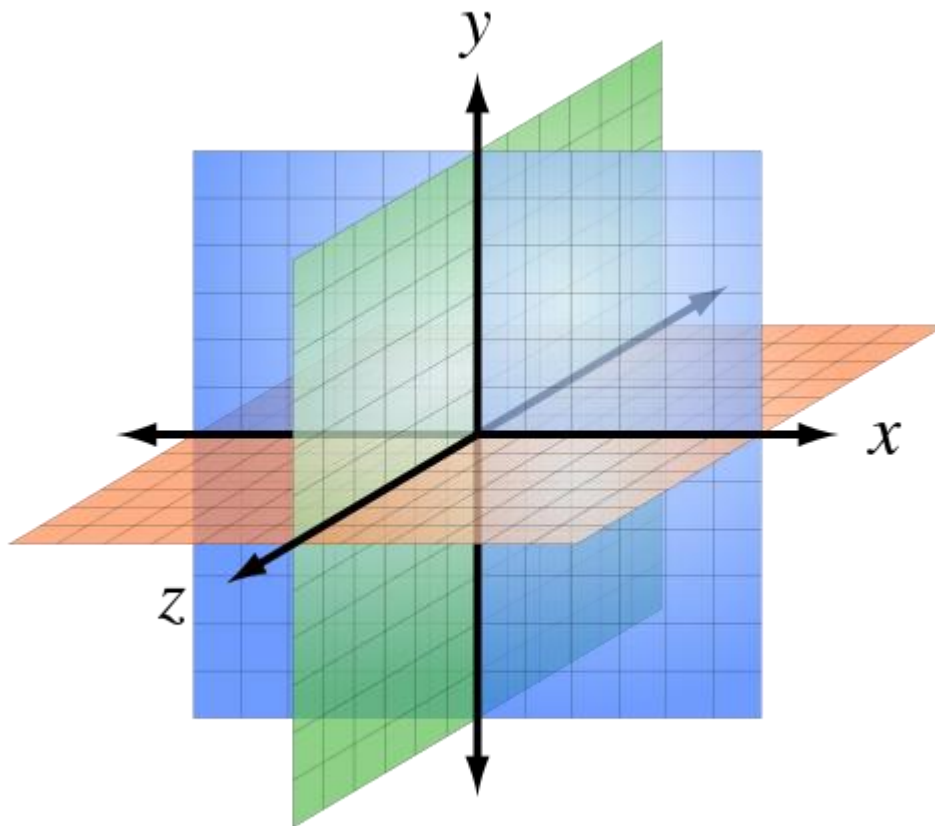
Η κίνηση μιας CNC μηχανής βασίζεται στο τρισδιάστατο Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων (*3D Cartesian Coordinate System*).

Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων (*Cartesian Coordinate System*):

Η βάση αυτού του συστήματος είναι μια γραμμή από αριθμούς χωρισμένους σε διαστήματα, ισομερή μεταξύ τους (*Equal Intervals*). Οι άξονες χαρακτηρίζονται X, Y ή Z, το κέντρο αυτών είναι η αρχή των αξόνων (*Origin*), ενώ φέρουν κατευθύνσεις θετικές και αρνητικές (*Positive or Negative*).

Τρισδιάστατο Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων (*3D CCS*):

Αποτελείται από 3 γραμμές τις X, Y, Z τοποθετημένες υπό γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους, των οποίων η αρχή βρίσκεται στο σημείο τομής τους.



Εικόνα 20. 3D CCS

<https://socratic.org/questions/what-is-meant-by-the-3-d-cartesian-coordinate-system>

Τεταρτημόρια (*Quadrants*):

Οποιοσδήποτε σχηματισμός δυο αξόνων δημιουργεί ένα επίπεδο (*Plane*) με την ονομασία των αξόνων που το καθορίζουν.

Μονάδες Μέτρησης (*Units*):

Μονάδες Μέτρησης & Ακρίβεια (<i>Units & Precision</i>)		
Τύπος Δεδομένων (<i>Data Type</i>)	Μονάδες Συστήματος Ιντσών (<i>Inch Units</i>)	Μονάδες Μετρικού Συστήματος (<i>Metric Units</i>)
Coordinate	Inches 0.0001	mm 0.001
Speed	Rev/min 1	Rev/min 1
Feed	In/min 1	mm/min 1
Tap Feed	In/min 0.001	mm/min 0.01

Το αρχικό σημείο για ένα μηχάνημα αποκαλείται "Machine Home", ενώ το σύστημα συντεταγμένων του μηχανήματος σύστημα συντεταγμένων εργασίας (*Work Coordinate System – WCS*). Το αρχικό σημείο ορίζεται από τον CNC προγραμματιστή και συνήθως τοποθετείται στο ακατέργαστο τεμάχιο ή σε κάποιο σημείο αναφοράς εντός του θαλάμου εργασίας της μηχανής (*Part, Stock or Fixture*).

Εκτός του WCS, υπάρχει ακόμη ένα σύστημα συντεταγμένων, αυτό της CNC μηχανής (*Machine Coordinate System – MCS*). Τα δύο αυτά συστήματα συνδέονται άρρηκτα μεταξύ τους καθώς επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια των κατεργασιών. Γι' αυτό υπάρχει η έννοια της αντιστάθμισης (*Offset*). Οι χειριστές των μηχανών είναι υπεύθυνοι προτού ξεκινήσει η λειτουργία των κατεργασιών να ελέγχουν και να ρυθμίζουν τα *Offset* της Μηχανής και των Εργαλείων (*Machine & Tool Offsets*), παραμέτρους όπως *Fixtures Offset X, Y, Fixtures Offset Z* και *Tool Length Offset*.

3.3 Κώδικας G (*Post-Process*)

Για την εξαγωγή του κώδικα G προς όφελος της μηχανικής κατεργασίας υπάρχουν οι κάτωθι επιλογές:

1. Χειροκίνητη (*Συγγραφή Κώδικα*)
2. Με τη Βοήθεια Υπολογιστή (*Σχεδιασμός τροχιάς 2D*)
3. CAD CAM (*20 ή 30.000 γραμμές σε μηδέν χρόνο – Κώδικας G*)

Ο κώδικας G ουσιαστικά είναι η γλώσσα μηχανής που αναγνωρίζουν τα CNC μηχανήματα και εμπεριέχεται εντός ενός αρχείου μορφής συνήθως .txt. Το αρχείο ορίζεται ως το πρόγραμμα του οποίου η κάθε σειρά ονομάζεται block ενώ το σύνολο των blocks ορίζεται ως set.

Μορφή Σειράς & Περιορισμοί Αυτών (*Block Format & Restrictions*):

Μορφή Σειράς Κώδικα G

N135 G01 X1.0 Y1.0 Z0.125 F5

Περιορισμοί στα Blocks

Κάθε block ενδέχεται να περιέχει αποκλειστικά την κίνηση μόνο ενός εργαλείου.

Κάθε block ενδέχεται να περιέχει πάνω από μια κίνηση κώδικα G, που όμως δεν είναι κίνηση εργαλείου (*Non-Tool Move*).

Κάθε block ενδέχεται να περιέχει μια μόνο τιμή για την πρόωση (*Feed Rate*).

Κάθε block ενδέχεται να περιέχει μόνο ένα συγκεκριμένο εργαλείο ή μόνο μια ταχύτητα ενός συγκεκριμένου Spindle.

Οι αριθμοί των blocks θα πρέπει να είναι διαδοχικοί ο ένας μετά τον άλλον (*Sequential*).

Τα δεδομένα εντός ενός block θα πρέπει να τηρούν μια συγκεκριμένη διαδοχή καθ' όλο το Set των Blocks.

Παράδειγμα Προγράμματος CNC (*Program*):

```
N5  G90  G20
N10 M06  T3
N15 M03  S1250
N20 G00  X1    Y1
N25 Z0.1
N30 G01  Z-0.125  F5
N35 X3   Y2    F10
```

```
N40 G00 Z1
N45 Z0 Y0
N50 M05
N55 M30
```

Κάθε οδηγία (*Instruction*) ενός κώδικα G προς το μηχάνημα αποτελείται (*Consists*) από ένα γράμμα που ακολουθείται από μια τιμή.

Κάθε γράμμα σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο τύπο ενέργειας ή μέρους πληροφορίας (*Action or Information*) που χρειάζεται το μηχάνημα για να λειτουργήσει.

Γράμματα (*Σύμβολα*) που χρησιμοποιούνται στους κώδικες είναι τα: N, G, X, Y, I, J, K, F, S, T, M.

Πρόγραμμα (*Part Program*):

Ένα πρόγραμμα υπολογιστή ορίζει, ποιο εργαλείο από την εργαλειοθήκη θα πρέπει να φορτωθεί (*Loaded*) ως εργαλείο μηχανής (*Machine Tool*). Επίσης, ορίζει ποιες είναι οι συνθήκες κοπής, δηλαδή ταχύτητα Spindle, πρόωση εργαλείου, Ενεργοποίηση/ Απενεργοποίηση υγρού κοπής (*Speed, Feed, Coolant On/ Off*), το σημείο έναρξης κι αυτό της λήξης στο σύστημα συντεταγμένων ανά τμήμα κίνησης (*Motion Segment*). Επιπρόσθετα, τον τρόπο κίνησης του εργαλείου.

Ακολουθία & Μορφή Block Κώδικα G:

```
N3 G2 X+1.4 Y+1.4 Z+1.4 I1.4 J1.4 K1.4 F3.2 S4 T4 M2
```

N3: Αριθμός Ακολουθίας (*Sequence no*)

G2: Λειτουργία Προετοιμασίας (*Preparatory Function*)

X+1.4 Y+1.4 Z+1.4: Προορισμός Συντεταγμένων (*Destination Coordinates*)

I1.4 J1.4 K1.4: Απόσταση Κέντρου Κύκλου (*Distance to Center of Circle*)

F3.2: Πρόωση (*Feed Rate*)

S4: Ταχύτητα (*Spindle Speed*)

T4: Εργαλείο (*Tool*)

M2: Πολυποίκιλη Λειτουργία (*Miscellaneous Function*)

Πίνακες για τον προγραμματισμό κώδικα G διατίθενται με έννοιες όπως Program Format, Alphabetic & Special Character Address Codes, G & M Codes κα.

3.4 Τροχιά Εργαλείου (*2D & 3D Toolpath*)

Προκειμένου η CNC μηχανή να πραγματοποιήσει μια κατεργασία, χρειάζεται πρωτίστως να υπάρχει η πορεία που θα διασχίσει το εργαλείο. Αυτή η πορεία μεταφράζεται από τα blocks του προγράμματος σε κινήσεις πάνω στο σύστημα, ώστε να τις λάβει η μηχανή και να τις μεταφράσει σε ρεύμα.

Τα λογισμικά CAM ανάλογα με τα δεδομένα που εισάγει ο προγραμματιστής αναπαράγουν την ιδανικότερη τροχιά του εργαλείου ανά κατεργασία. Με τη global επιλογή της εξακρίβωσης (*Verify*) πραγματοποιείται σε προσομοίωση ο έλεγχος της τρισδιάστατης κίνησης/ κατεργασίας του κοπτικού εργαλείου. Αλλά και σε επίπεδο CAE στην επίσης global επιλογή της ανάλυσης (*Analyze*) εμφανίζεται σε κλίμακα απόκλισης +/- από το μηδέν με χρωματισμό το τελικό μοντέλο, συνεπώς ο προγραμματιστής γνωρίζει σε επίπεδο προσομοίωσης πού έχει αφήσει stock, πού έχει κάνει super finish και στην χειρότερη περίπτωση πού έχει αφαιρέσει περισσότερο υλικό από την επιθυμητή γεωμετρία.

Δισδιάστατες Τροχιές Εργαλείων Φραιζαρίσματος 2D Milling Toolpaths

Τροχιές Εργαλείων (*Τύπος & Χρήση*)

Η εξέλιξη των μηχανών CNC προσφέρει την ικανότητα κίνησης σε δυο άξονες, τρεις, τέσσερις και πέντε (*2D/ 3D/ 4X/ 5X*). Ανάλογα με την ικανότητα του κάθε μηχανήματος αναπαράγεται και η αντίστοιχη τροχιά, όπου για toolpath 2.5 κινήσεων δεν υπάρχει μεγάλη απαίτηση στο σύστημα, για 3D toolpath απαιτείται η κίνηση στους XYZ συνεπώς μεγαλύτερη πολυπλοκότητα (*Complex*), και τέλος κινήσεις τεσσάρων και πέντε αξόνων με την/τις περιστροφή/ές να θεωρούνται ως επιπρόσθετος/οι άξονες (*Για κατεργασίες με αρκετά μεγάλη ακρίβεια – Accuracy*).

Ορολογία Toolpath (*TLO*)

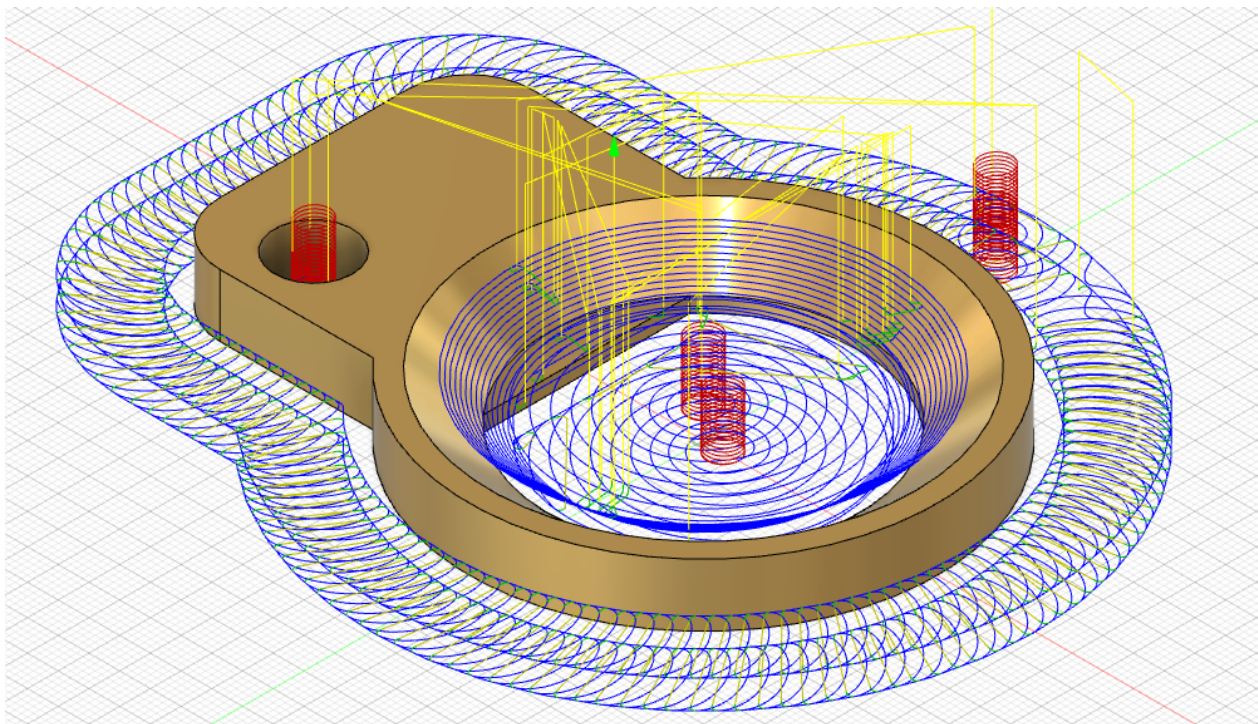
Για την αποσαφήνιση της τροχιάς που αναπαράγεται από το CAM είναι αρκετά σημαντική η αναφορά κι επεξήγηση των TLO όρων. Αρχικά, ως Clearance Height μεταφράζεται η απόσταση του ύψους που δημιουργείται από το αρχικό σημείο ως το κατώτερο σημείο κοπής που θα δηλωθεί από τον προγραμματιστή, στο υπό κατεργασία τεμάχιο. Στη συνέχεια, Rapid Height ονομάζεται το ύψος στο οποίο θα φτάσει με ασφάλεια το εργαλείο όταν δεν κατεργάζεται το κομμάτι. Αντιθέτως, το Feed Height είναι το ύψος στο οποίο θα βρεθεί το εργαλείο από μια κοπή ώστε να συνεχίσει στην επόμενη, συνηθίζεται να είναι το ίδιος ύψος με το Clearance Height. Ως Top of Stock θεωρείται η ανώτερη επιφάνεια του τελικού όμως μοντέλου, δηλαδή του part. Αναφορικά

με το Stepdown είναι η επανάληψη της κίνησης του κοπτικού για μια συγκεκριμένη κατεργασία, αλλά μια στρώση πιο κάτω, όπως έχουμε ορίσει στο Depth, δηλαδή στο βάθος. Ομοίως, το Steponer φέρει την ίδια φιλοσοφία με το Stepdown, με μόνη διαφορά πως το Steponer πραγματοποιεί ακτινική κοπή, ενώ το Stepdown αξονική. Όσον αφορά το XY Stock Allowance (*Floor*) είναι το επιπλέον πάχος που διατηρείται στο πάτωμα και μετά το ξεχόνδρισμα, ώστε να αφαιρεθεί με κατάλληλο εργαλείο φινιρίσματος. Τα ίδια ισχύουν και για το Z Stock Allowance (*Wall*) με τη διαφοροποίηση αντί του Floor, υπάρχει το Wall, δηλαδή διατηρείται πάχος στα τοιχώματα του workpiece. Τέλος, ως Toolpath Centerline ορίζεται η γραμμή η οποία θ' ακολουθήσει το κέντρο του κοπτικού εργαλείου (Δηλαδή το *Tool Center Point – TCP*) που υπάρχει στο Spindle.

3D Toolpaths:

Μια περιπλοκότερη διαδικασία από αυτή της παραγωγής δισδιάστατων τροχιών εργαλείων, είναι αυτή της παραγωγής τρισδιάστατων τροχιών εργαλείων.

Αυτή η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη/ ενσωματωμένη στις παρακάτω έννοιες: Constant Thickness Roughing Strategies (*Surface*), 3D Cutter Compensation (*Concerning Shape Tool*), 3D Roughing, 3D Finishing, Rest Milling, Pencil Toolpaths κα.



Εικόνα 21. Toolpath.

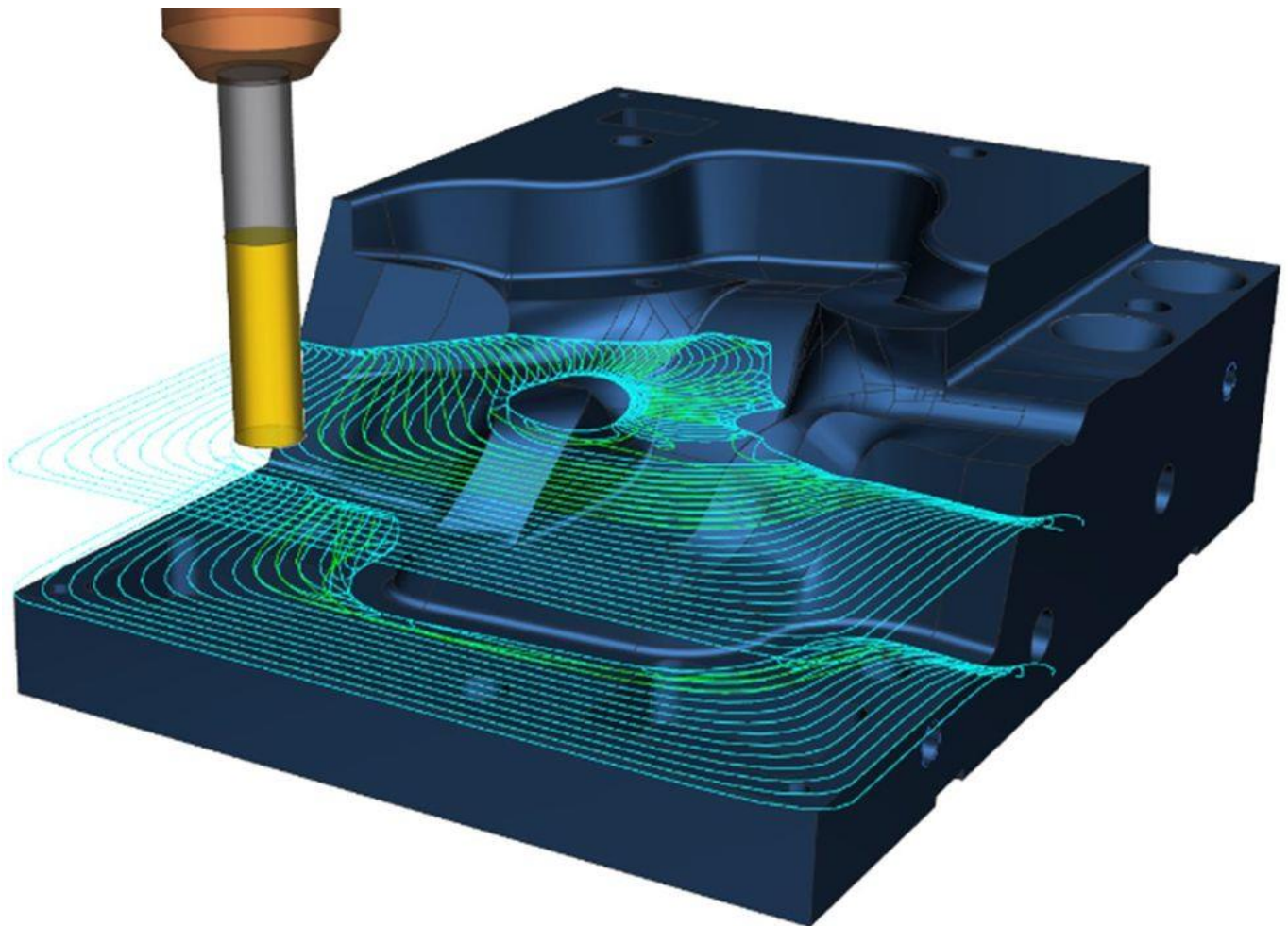
<https://www.bantamtools.com/blog/three-essential-cam-toolpaths-in-fusion-360-btafw>

3.5 Κατεργασίες Φραιζαρίσματος (*Milling Operations*)

Οι κατεργασίες φραιζαρίσματος σε ένα λογισμικό CAM ορίζονται όπως και στην πράξη με την ορολογία όπως δόθηκε από την αρχή της εμφάνισης των μηχανών CNC και δη της φραιζας.

Οι πιο σύνηθες κατεργασίες που εμφανίζονται και στα λογισμικά είναι αυτές όπως κατεργασίες ξεχονδρίσματος ή αλλιώς Cavity, προσώπου ή Facing, δισδιάστατων ή τρισδιάστατων περιγραμμάτων ή 2D/ 3D Contour, ποκέτες ή Pocketing, λοξοτόμησης ή Chamfer, δημιουργία εξωτερικών ράδιων Corner – Round, οπών ή Drilling, σπειροτόμησης ή Tapping.

Άλλες κατεργασίες εξίσου σημαντικές είναι η Center Drill (Conical Small Cut), η Slot Milling και άλλες.



Εικόνα 22. Κατεργασίες Φραιζαρίσματος στο CAM

<https://www.prolim.com/adaptive-machining-feature-based-machining-in-solid-edge-cam-pro-2/>

3.6 Δεδομένα Κοπής (*Cutting Data*)

Για την διατήρηση της εύρυθμης λειτουργίας και ασφάλειας των μηχανών CNC, υπάρχουν εγκεκριμένοι πίνακες με τις συνθήκες κοπής. Αυτές, λαμβάνουν υπόψιν, το υλικό του workpiece, το υλικό του εργαλείου, το είδος της ψύξης, το είδος της κατεργασίας κτλ.

Το συγκεκριμένο πεδίο είναι άκρως καταλυτικό για τα workshop καθώς με τις κατάλληλες συνθήκες κοπής αποφεύγουμε απώλειες εργαλείων, αστοχίες στο τελικό προϊόν, ταχύτητα παραγωγής, αποφυγή συγκρούσεων κα.

Οι πίνακες που έχουν δημιουργηθεί αναφέρουν Δεδομένα Κοπής ή *Cutting Data*, Ταχύτητες Φραιζαρίσματος ή *Mill Cutting Speeds (SFM) Surface ft/min*, Ταχύτητες Αυλάκωσης ή *Drill Cutting Speeds (SFM) Surface ft/min*, Προώσεις ή *Cutting Feed (IPR) in/rev*, Επιτρεπόμενα Πάχη Stock ή *Stock Finish Allowances*, Προτεινόμενες Παράμετροι Μηχανουργικής ή *Recommended Machining Parameters* κα.

3.7 Ροή Εργασιών (*Workflow*)

Ανάλογα τη περίπτωση παρατίθενται ορισμένα workflows για κάθε διαδικασία.

Γενική Ροή Εργασίας:

- 1- Μοντέλο CAD
- 2- Ταυτοποίηση Γενικών Παραμέτρων Εργασίας (*Επιλογή Υλικών, Μεγέθη Blank, Σημείο Εκκίνησης κτλ.*)
- 3- Επιλογή Διαδικασιών και Λειτουργιών
- 4- Επιλογή Κοπτικών Εργαλείων και Μηχανικών Κατεργασιών
- 5- Επιλογή Κατάλληλων Γεωμετριών CAD (*Για τη Καθοδήγηση του CAM*)
- 6- Εξακρίβωση Τροχιάς Εργαλείων (*Verify Toolpath*)
- 7- Εξαγωγή Κώδικα G (*Post Process*)
- 8- Μεταφορά του Κώδικα G στο Μηχάνημα CNC
- 9- Χειρισμός του Μηχανήματος CNC για τη Παραγωγή του Προϊόντος

Σειρά Πληροφοριών Μηχανής CNC:

1. Δεδομένα Προετοιμασίας Μηχανήματος (*Units, Absolute or Incremental*)
2. Συντεταγμένες x, y, z
3. Μηχανουργικές Παράμετροι (*Feed Rate & Spindle Speed*)
4. Έλεγχος Συστήματος Ψύξης (*On/ Off*)
5. Έλεγχος Εργαλείων (*Tool & Tool Parameters*)
6. Cycle Functions
7. Επιπρόσθετος Έλεγχος (*Direction of Rotation, Spindle On/ Off*)

Δομή CNC Γλώσσας Προγραμματισμού:

1. Program Start
2. Load Tool
3. Spindle On
4. Coolant On
5. Rapid to Position above Part
6. Machining Operation
7. Coolant Off
8. Spindle Off
9. Move to Safe Position
10. End Program

*Βήματα 5. και 9. Εκτελούν ακριβώς την ίδια λειτουργία.

Κεφάλαιο 4^ο

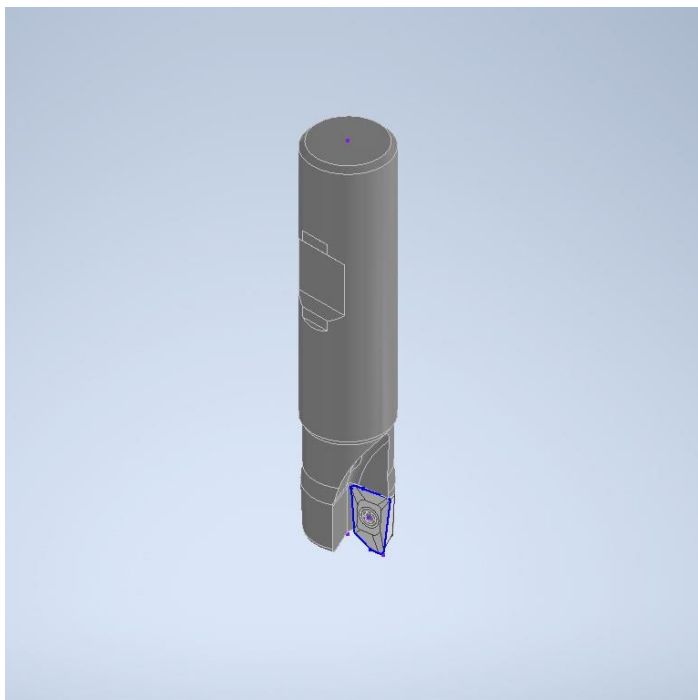
4.1 Εφαρμογή Διπλωματικής Εργασίας

Ο ελληνικός τίτλος της εργασίας όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή είναι “Προσομοίωση Κατεργασίας Φραιζαρίσματος με Χρήση Σύγχρονων Τεχνικών Μοντελοποίησης” και εστιάζει στην προσομοίωση ενός περάσματος (*Pass*) περιφερειακού φραιζαρίσματος (*Peripheral - Side Milling*), με τη χρήση του εμπορικού σχεδιαστικού λογισμικού Autodesk Inventor (*CAD – Computer Aided Design*) και με τη βοήθεια του εργαλείου VB για εφαρμογές (*VBA – Visual Basic for Applications*).

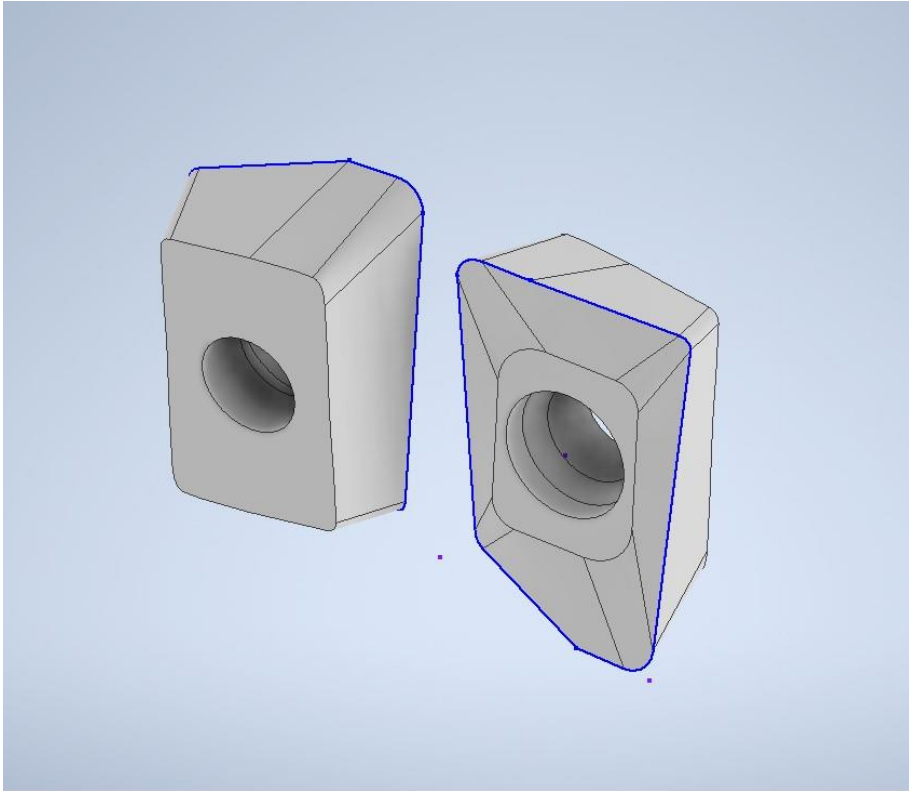


AUTODESK Inventor Professional

Αρχικά εκλέχθηκε ένα αξιόπιστο κοπτικό εργαλείο με ένθετα πλακίδια της επώνυμης εταιρίας Secotools, με κωδικό προϊόντος R217.69-1616.3-10-2A.

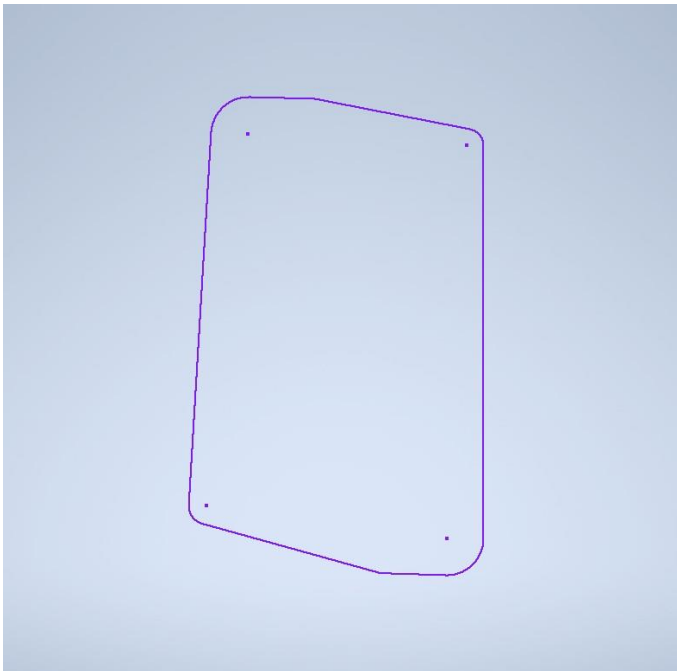


Εικόνα 23. R217.69-1616.3-10-2A.



Εικόνα 24. Ένθετα Πλακίδια.

Με τη λήψη και αποθήκευση του 3D μοντέλου του προϊόντος από την ιστοσελίδα της Secotools, μέσω σχεδιαστικών τεχνικών, δηλαδή, με χρήση προβολής γραμμής (*Project Curve*) πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση του 2D περιγράμματος του ενός ενθέτου από το λογισμικό Autodesk Inventor.

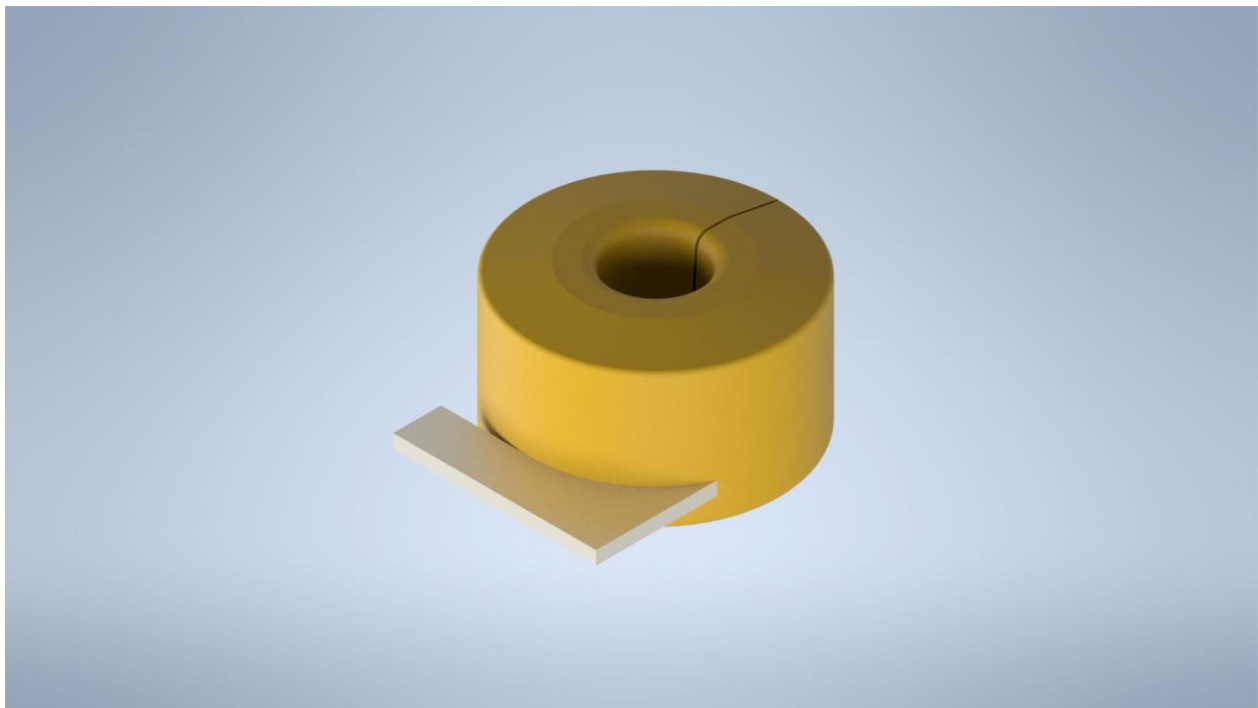


Εικόνα 24. 2D Περιγράμμα.

Εν συνεχεία, το αρχείο μορφής .ipt μετονομάστηκε σε "tool". Στην επιλογή που προσφέρεται από το λογισμικό για Visual Basic for Applications, αναπτύχθηκαν οι κώδικες. Ενδεικτικά, ο πρώτος κώδικας φέρει τη δημιουργία του workpiece, την εισαγωγή του προφίλ του εργαλείου, τις παραμέτρους και τις εξισώσεις των συνθηκών κοπής, ενώ διαθέτει ως έξοδο αρχεία με τα 3D μοντέλα για τη κατεργασία του workpiece, τα απόβλητα και τη κατάσταση του workpiece σε κάθε φάση, από την εκκίνηση της κατεργασίας ως το πέρας της.

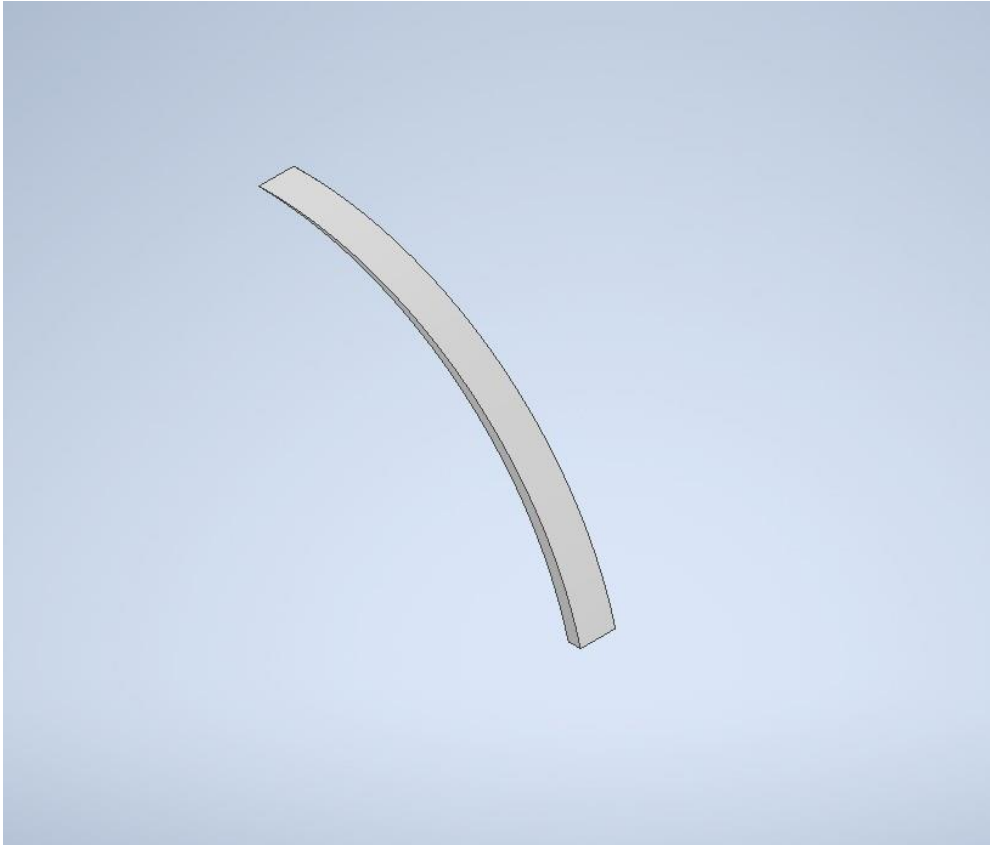
Οι παραμέτροι που μεταβλήθηκαν ήταν:
η πρόωση,
το ακτινικό βάθος κοπής και
το αξονικό βάθος κοπής.

Με την ολοκλήρωση αυτών των προσομοιώσεων, εξορύχθηκαν οι πληροφορίες για τον όγκο των αποβλήτων (*Chip Volume*) όπου για την αξιοπιστία εκλέχθηκε σε όλα τα run ένα συγκεκριμένο σημείο όταν το κοπτικό εργαλείο βρισκόταν στο κέντρο του workpiece και το προφίλ της συνολικά κατεργασμένης επιφάνειας (*Surface Roughness*) του τεμαχίου.

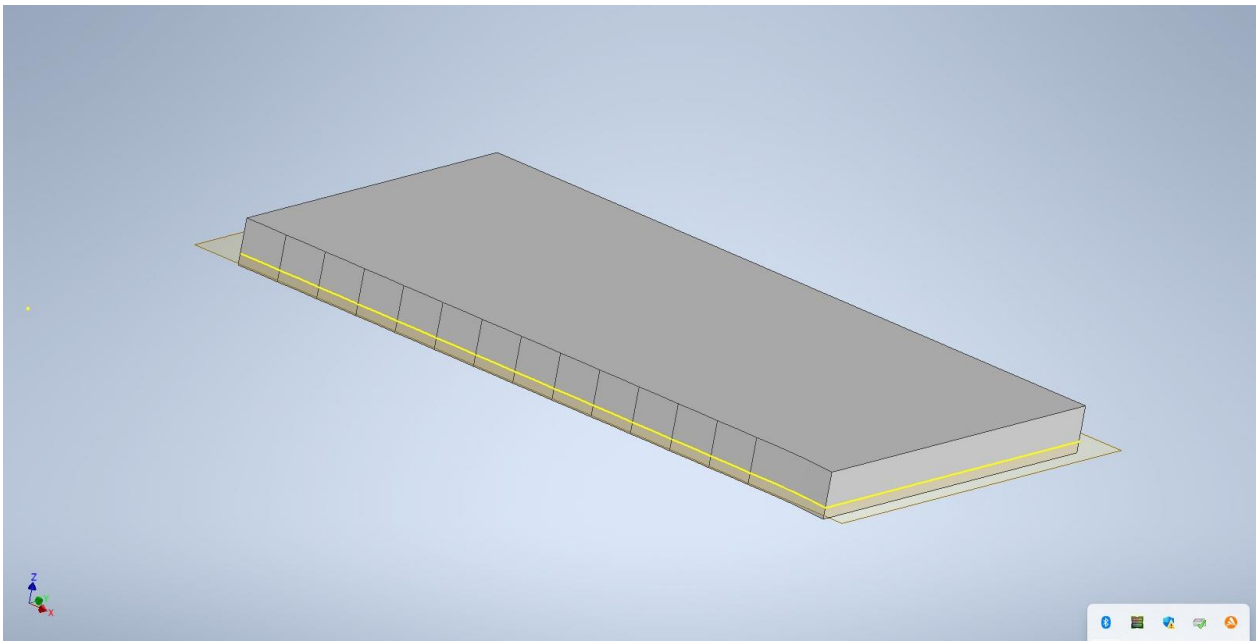


Εικόνα 25. Assembly

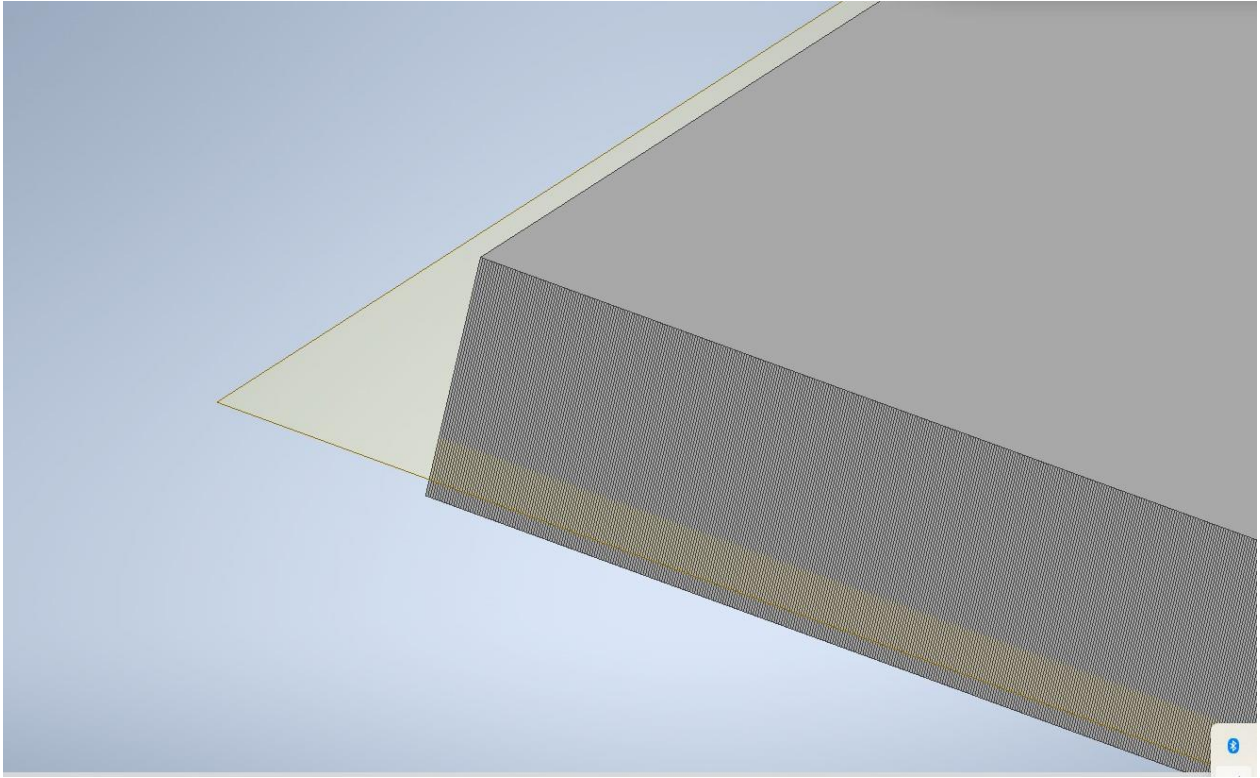
Τέλος, με τον δεύτερο κώδικα πάρθηκαν τα αποτελέσματα σε μορφές .txt για την μέση τραχύτητα της επιφάνειας Ra και οι τιμές για το διάγραμμα της.



Εικόνα 26. Chip.



Εικόνα 27. Workpiece.



Εικόνα 28. Surface Roughness.

4.2 Μέση Τραχύτητα Επιφάνειας Ra (Microns)

Τραχύτητα επιφάνειας

Κατηγορίες της τραχύτητας επιφάνειας (*Roughness*)

Η τραχύτητα μιας επιφάνειας (για βιομηχανικά προϊόντα) καθορίζεται με συγκεκριμένους ορισμούς και παραμέτρους. Είναι η μέση αριθμητική τραχύτητα (*Arithmetical Mean Roughness - Ra*), το μέγιστο ύψος (*Maximum Height - Ry*), η μέση τραχύτητα δέκα σημείων (*Ten-Point Mean Roughness - Rz*), η μέση απόσταση των ανωμαλιών των προφίλ (*Mean Spacing of Profile Irregularities - Sm*), η μέση απόσταση των τοπικών κορυφών του προφίλ (*Mean Spacing of Local Peaks of the Profile - S*) και ο δείκτης επαφής (*Profile Bearing Length Ratio - tp*). Η τραχύτητα επιφάνειας δίνεται ως η αριθμητική μέση τιμή για μια τυχαία δειγματοληπτική περιοχή. [*Η μέση κεντρική γραμμή τραχύτητας (Ra) ορίζεται στα παραρτήματα των JIS B 0031 και JIS B 0061*].

Το πρόβλημα καθορισμού του βαθμού της τραχύτητας τεχνολογικών επιφανειών για δεδομένη εφαρμογή, της ποιοτικής δυναμικότητας, δηλαδή ό,τι αφορά την τραχύτητα των διαφόρων κατεργασιών, όπως και της με παραδεκτή ακρίβεια και με χαμηλό κόστος μετρήσεως (εκτιμήσεως) της, αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία τόσο στη σχεδίαση μηχανών και μηχανολογικών εν γένει συστημάτων (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συνεργαζόμενων επιφανειών), όσο και στη σχεδίαση και την αξιολόγηση της μηχανουργικής παραγωγής. Στο σχήμα Σ 3.1 φαίνεται η μεθοδολογία μέτρησης ενός μεγέθους κάποιου φυσικού φαινομένου.

Αποκλίσεις κατεργασμένης επιφάνειας. Μια κατεργασμένη επιφάνεια παρουσιάζει γενικά αποκλίσεις από τη θεωρητική μορφή της (ή από τη λεγόμενη ονομαστική επιφάνεια) οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε κατηγορίες. Εδώ ως ονομαστική επιφάνεια θεωρείται η επίπεδη επιφάνεια, τα ίδια όμως ισχύουν και για άλλες μορφές επιφάνειας από αυτές που συναντάμε στις μηχανουργικές κατασκευές.

Έτσι έχουμε:

Αποκλίσεις πρώτης τάξης. Είναι μακρογεωμετρικές αποκλίσεις από την ονομαστική επιφάνεια (π.χ. αποκλίσεις από επιπεδότητα, παραλληλότητα, καθετότητα, κυλινδρικότητα κ.τ.λ.). Τις ονομάζουμε αποκλίσεις μορφής. Οφείλονται σε σφάλματα στους ολισθητήρες της εργαλειομηχανής, σε σοβαρές παραμορφώσεις της εργαλειομηχανής, του εργαλείου ή του κομματιού, σε κακή στήριξη του κομματιού ή του εργαλείου κ.α.

Αποκλίσεις δεύτερας τάξεως. Αναφέρονται στις κυματώσεις της επιφάνειας με μεγάλη

σχετικά περίοδο, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε εκκεντρότητα του κομματιού ή του εργαλείου, σε ταλαντώσεις, κ.τ.λ.

Αποκλίσεις τρίτης τάξεως. Είναι ανωμαλίες της επιφάνειας συνήθως υπό μορφή αυλακώσεων, που οφείλονται στη μορφή των εργαλείων και στην κινηματική των κατεργασιών.

Αποκλίσεις τέταρτης τάξεως. Είναι μικρογεωμετρικές ανωμαλίες της επιφάνειας, οι οποίες προκύπτουν από ατέλειες στην τρόχιση του εργαλείου, στη φθορά του εργαλείου, στην ψευδοκόψη κ.τ.λ.

Αποκλίσεις πέμπτης και ανωτέρας τάξεως. Είναι ανωμαλίες της επιφάνειας, μικρογεωμετρικής βέβαια μορφής, τις οποίες μπορούμε να αποδώσουμε σε χημικές επιδράσεις, σε μεταβολές στον κρυσταλλικό ιστό του μετάλλου και σε άλλες αιτίες.

Η τραχύτητα επιφάνειας χαρακτηρίζεται από τις αποκλίσεις τρίτης και ανωτέρας τάξης που αναφέρονται στη μικρομορφή της επιφάνειας. Τις απαιτήσεις των σύγχρονων μηχανουργικών κατασκευών σε ό,τι αναφορά τη τραχύτητα τις κατατάσσουμε σε τρεις κατηγορίες:

1. Στο προσδιορισμό του βαθμού τραχύτητας που κάθε φορά απαιτείται, όπου ο ψηλός βαθμός τραχύτητας αντιστοιχεί σε βελτιωμένη τραχύτητα, δηλαδή σε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας άρα σε μικρές τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών τραχύτητας. Και αντίστοιχα είναι ο χαμηλός βαθμός τραχύτητας.
2. Στη γνώση του βαθμού τραχύτητας τον οποίο μπορούν να αποδώσουν οι χρησιμοποιούμενες κατεργασίες κοπής ή διαμόρφωσης.
3. Στη προτυποποίηση των χαρακτηριστικών μεγεθών της τραχύτητας καθώς και των μεθόδων για τη μέτρηση αυτών.

Ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος τρόπος μέτρησης της τραχύτητας είναι ο εξής: στο πραγματικό περίγραμμα της επιφάνειας σύρουμε τη κεντρική γραμμή έτσι ώστε να ισομοιράζονται τα εκατέρωθεν εμβαδά (αυτό γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων) μέσα σε ορισμένο μήκος που ονομάζεται δειγματοληπτικό μήκος. Με τη βοήθεια της κεντρικής γραμμής μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη της τραχύτητας, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

Μέσο ύψος τραχύτητας R_a (arithmetic average roughness) ή CLA.

Ορίζεται από την αριθμητική μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων του πραγματικού περιγράμματος από την κεντρική γραμμή μέσα στο καθορισμένο

δειγματοληπτικό μήκος L (όλες οι αποκλίσεις παίρνονται θετικές). Η σχέση από την οποία υπολογίζουμε το μέσο ύψος της τραχύτητας δίδεται:

$$R_a = (1/L) \int_0^L |y(x)| dx$$

Είναι γενικά αποδεκτό ότι αυτό το μέγεθος της τραχύτητας αποτελεί το ενδεδειγμένο αντιπροσωπευτικό μέγεθος αποτιμήσεως της τραχύτητας κατεργασμένων επιφανειών, πρέπει όμως να αναφέρεται και το είδος της κατεργασίας.

Ενδεικνυόμενο ύψος τραχύτητας R_q (geometric average roughness) ή R.M.S (root mean square).

Ορίζεται σαν τη τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των αποκλίσεων όλων των σημείων του προγραμματικού περιγράμματος από την κεντρική γραμμή.

$$R_q = \sqrt{(1/L) \int_0^L y^2(x) dx}$$

Η τιμή αυτής της τραχύτητας ίσχυε ως το 1955 (στις Η.Π.Α.) οπότε και αντικαταστάθηκε από το μέσο ύψος της R_a . Η τιμή R.M.S. προκύπτει συνήθως από το μέσο ύψος R_a κατά 10%.

Μέγιστο ύψος τραχύτητας R_{max} ή R_t (maximum peak- to- valley roughness height).

Ορίζεται σαν κατακόρυφη απόσταση του βαθύτερου από το υψηλότερο σημείο του περιγράμματος στο δειγματοληπτικό μήκος. Είναι ένα μέγεθος το οποίο έχει φυσική σημασία γιατί μπορεί να γίνει εύκολα αισθητό από την αφή. Προκύπτει από το άθροισμα των παραμέτρων R_v , R_p .

$$R_{max} = R_v + R_p$$

όπου R_v είναι το μέγιστο βάθος του περιγράμματος κάτω από τη μέση γραμμή στο δειγματοληπτικό μήκος, και R_p είναι αντίστοιχα το μέγιστο ύψος του περιγράμματος πάνω από τη μέση γραμμή στο δειγματοληπτικό μήκος.

Παράμετρος R_z (ten- point height).

Είναι ο μέσος όρος των κατακόρυφων αποστάσεων από την υψηλότερη εξοχή στη βαθύτερη εσοχή πέντε τμημάτων του δειγματοληπτικού μήκους, μετρούμενες από μία

γραμμή αναφοράς παράλληλη προς τη μέση γραμμή και που η οποία δεν τέμνει το περίγραμμα της επιφάνειας. Η σχέση που μας δίνει την Rz είναι:

$$Rz = Rt1 + Rt2 + Rt3 + Rt4 + Rt5/5 = 1/5 \sum_{i=1}^5 Rt_i$$

Παράμετρος S.

Η παράμετρος S είναι το μέσο διάστημα των γειτονικών τοπικών κορυφών του δειγματοληπτικού μήκους (ως τοπική κορυφή ορίζεται το υψηλότερο τμήμα του περιγράμματος που μετριέται μεταξύ δύο γειτονικών ελαχίστων). Μία τοπική κορυφή περιλαμβάνεται στην παράμετρο S μόνο όταν η απόσταση μεταξύ αυτής και του προηγούμενου ελαχίστου είναι τουλάχιστον το 1% του $R_p + R_v$ του περιγράμματος.

$$S = S1 + S2 + \dots + S_n/n = 1/n \sum_{i=1}^n S_i$$

όπου n είναι ο αριθμός των διαστημάτων των τοπικών κορυφών.

Παράμετρος Sm.

Η παράμετρος Sm είναι η μέση τιμή μεταξύ των διαστημάτων των κορυφών του περιγράμματος, ή της μέσης γραμμής, μετρούμενων στο δειγματοληπτικό μήκος.

$$S_m = S1 + S2 + \dots + S_n/n = 1/n \sum_{i=1}^n S_i$$

Δείκτης επαφής t_p (bearing length ratio).

Ο δείκτης επαφής t_p είναι το μήκος της επιφάνειας επαφής (bearing surface), εκφρασμένο σε ποσοστό του δειγματοληπτικού μήκους μέτρησης, σε ορισμένο βάθος κάτω από την υψηλότερη κορυφή του περιγράμματος της επιφάνειας. Η παράμετρος t_p ορίζεται σαν το λόγο του αθροίσματος των ευθυγράμμων τμημάτων, στα οποία χωρίζεται το περίγραμμα από παράλληλη ως προς τη κεντρική γραμμή, γραμμή αναφοράς, δια του δειγματοληπτικού μήκους σε ποσοστό επί %. Πρακτικά ο δείκτης επαφής t_p χαρακτηρίζει τη φθορά σε διάφορα βάθη της επιφάνειας.

$$t_p = (b_1 + b_2 + \dots + b_n)/L = 100/L \sum_{i=1}^n b_i$$

Η καμπύλη του δείκτη επαφής, καμπύλη Abbot, δείχνει τη μεταβολή του δείκτη επαφής t_p σε σχέση με το βάθος μέτρησης.

Αριθμός κορυφών P_c (peak count).

Είναι ο αριθμός των τοπικών κορυφών που προεκβάλλουν δια μέσου μίας επιλεγμένης ζώνης, ορισμένου πλάτους, συμμετρικής ως προς τη μέση γραμμή. Ο αριθμός ορίζεται μόνο για το συνολικό εξεταζόμενο μήκος, επομένως τα αποτελέσματα δίνονται σε κορυφές/cm (ή σε κορυφές/in).

Παράμετρος H.S.C. (high spot count).

Είναι ο αριθμός των κορυφών που προεκβάλλουν πάνω από γραμμή παράλληλη ως προς τη μέση γραμμή του περιγράμματος και σε ορισμένο βάθος από την υψηλότερη κορυφή.

Μεγέθη κυμάτωσης

Μέσο ύψος κυμάτωσης W_a Ορίζεται σαν τη μέση αριθμητική τιμή των αποκλίσεων της κυμάτωσης του περιγράμματος από τη μεσαία γραμμή.

$$W_a = (1/L) \int_0^L |w(x)| dx$$

Ενδεικνυόμενο ύψος κυμάτωσης W_q Ορίζεται σαν τη τετραγωνική ρίζα της μέσης αριθμητικής τιμής των τετραγώνων των αποκλίσεων της κυμάτωσης.

$$W_q = \sqrt{(1/L) \int_0^L |w^2(x)| dx}$$

Μέγιστο ύψος κυμάτωσης W_{max} Ορίζεται σαν τη κατακόρυφη απόσταση από το βαθύτερο στο υψηλότερο σημείο του περιγράμματος της κυμάτωσης.

4.3 Αποτελέσματα Εφαρμογής I

Όγκος Αποβλήτων (*Chip Volume*)

Δεν υπήρξαν επιλήψιμα αποτελέσματα για αξονικά βάθη κοπής 1 και 3 mm σε συνδυασμό με ακτινικό βάθος κοπής -9.3 mm.

1. Αξονικό βάθος κοπής 1 mm και ακτινικό βάθος κοπής 0.1 mm.

α/α	Fz (mm/rev/tooth)	Volume (mm ³)
1.	0.100	0.690
2.	0.175	1.205
3.	0.200	1.380
4.	0.250	1.725
5.	0.300	2.070
6.	0.350	2.415
7.	0.400	2.752
8.	0.500	3.450
9.	0.750	5.173
10.	1.000	6.230

2. Αξονικό βάθος κοπής 1 mm και ακτινικό βάθος κοπής 4.65 mm.

α/α	Fz (mm/rev/tooth)	Volume (mm ³)
1.	0.100	0.741
2.	0.175	1.255
3.	0.200	1.639
4.	0.250	2.201
5.	0.300	2.825
6.	0.350	3.015
7.	0.400	3.190
8.	0.500	5.307
9.	0.750	8.390
10.	1.000	11.377

3. Αξονικό βάθος κοπής 1 mm και ακτινικό βάθος κοπής 9.3 mm.

α/α	Fz (mm/rev/tooth)	Volume (mm ³)
1.	0.100	1.500
2.	0.175	2.625

3.	0.200	3.000
4.	0.250	3.750
5.	0.300	4.500
6.	0.350	5.250
7.	0.400	6.000
8.	0.500	7.496
9.	0.750	11.250
10.	1.000	15.001

4. Αξονικό βάθος κοπής 3 mm και ακτινικό βάθος κοπής 0.1 mm.

α/α	Fz (mm/rev/tooth)	Volume (mm ³)
1.	0.100	2.070
2.	0.175	3.615
3.	0.200	4.139
4.	0.250	5.174
5.	0.300	6.210
6.	0.350	7.244
7.	0.400	8.256
8.	0.500	10.349
9.	0.750	15.518
10.	1.000	20.688

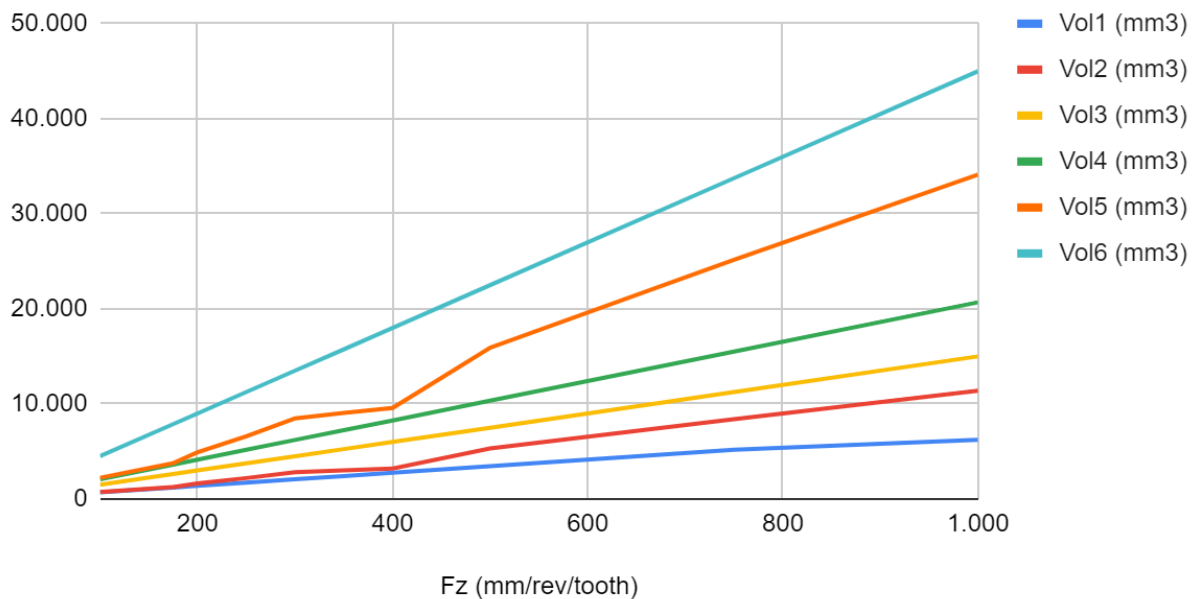
5. Αξονικό βάθος κοπής 3 mm και ακτινικό βάθος κοπής 4.65 mm.

α/α	Fz (mm/rev/tooth)	Volume (mm ³)
1.	0.100	2.224
2.	0.175	3.766
3.	0.200	4.916
4.	0.250	6.605
5.	0.300	8.478
6.	0.350	9.044
7.	0.400	9.573
8.	0.500	15.918
9.	0.750	25.170
10.	1.000	34.129

6. Αξονικό βάθος κοπής 3 mm και ακτινικό βάθος κοπής 9.3 mm.

α/α	Fz (mm/rev/tooth)	Volume (mm ³)
1.	0.100	4.500
2.	0.175	7.875
3.	0.200	9.001
4.	0.250	11.252
5.	0.300	13.500
6.	0.350	15.749
7.	0.400	18.000
8.	0.500	22.500
9.	0.750	33.750
10.	1.000	44.995

Vol1 (mm³), Vol2 (mm³), Vol3 (mm³), Vol4 (mm³), Vol5 (mm³)...

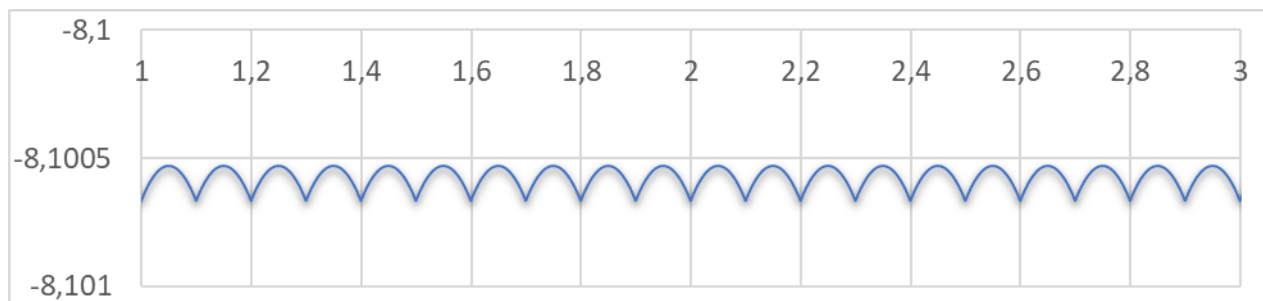


4.4 Αποτελέσματα Εφαρμογής II

Μέση Τραχύτητα Επιφάνειας (*Surface Roughness*) Ra (*Microns*)

Τα αποτελέσματα ήταν ακριβώς τα ίδια για αξονικά βάθη κοπής Z 1 και 3 mm στους συνδυασμούς ακτινικών βαθών κοπής Offset Y 0.1 και 4.65 mm, ενώ δεν υπήρξε κάτι επιλήψιμο στα αποτελέσματα των ακτινικών βαθών κοπής ± 9.3 .

Last Workpiece	Fz (mm/rev/tooth)	Ra (Microns)
17	1.000	3.393
25	0.750	1.889
45	0.500	0.870
55	0.400	0.558
60	0.350	0.433
70	0.300	0.318
80	0.250	0.266
110	0.200	0.141
130	0.175	0.107
180	0.100	0.035



Κεφάλαιο 5^ο Εξακρίβωση (*Verification*)

Ύστερα από μελέτη αντίστοιχων δημοσιεύσεων και σύγκριση με την παρούσα εργασία προκύπτει ότι τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί συνάδουν με αυτά των δημοσιεύσεων με ορισμένες διαφοροποιήσεις οι οποίες είναι συνέπεια των διαφορετικών παραμέτρων, όπως η έννοια της φθίνουσας ταλάντωσης στο σύστημα του μοντέλου τους, την διαφορετική επιλογή και γεωμετρία κοπτικού εργαλείου κα.

Οι δημοσιεύσεις για τις οποίες γίνεται αναφορά είναι οι κάτωθι:

-“Cutting Force & Surface Roughness Depend On the Tool Path Used in Side Milling: An Experimental Investigation”, Rodrigo Henriques Lopes da Silva & Amauri Hassui.

-“Modelling & Simulation of Surface Topography Machined by Peripheral Milling Considering Tool Radial Runout & Axial Drift”, Hui-Qun Chen & Qing-HuiWang.

-“An Improved Cutting Force & Surface Topography Prediction Model In End Milling”, O.E.E.K. Omara,b, T. El-Wardany,c, E. Ngb, M.A. Elbestawi.

Κεφάλαιο 6°

6.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι τα εξής:

Όσο μειώνεται η πρόωση στο φραιζάρισμα, τόσο πιο λεία επιφάνεια δημιουργείται κι αντιθέτως όσο αυξάνεται η πρόωση τόσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια του κατεργασμένου υλικού. Αυτό αποδεικνύεται στα αποτελέσματα της μέσης τραχύτητας επιφάνειας.

Όσο διαφοροποιούνταν οι παράμετροι, η μέση τραχύτητα επιφάνειας παρέμενε ίδια ανά στάδιο. Αυτό εξηγείται για τον λόγο ό,τι το R_a εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την πρόωση F_z .

Όσο αυξάνεται η πρόωση τόσο μεγαλώνει ο όγκος του αποβλήτου ενώ όσο μειώνεται η πρόωση τόσο μικραίνει ο όγκος του αποβλήτου. Η πρόωση ορίζεται με το πόσο μήκος υλικού αφαιρεί ανά περιστροφή ανά δόντι, συνεπώς όσο η πρόωση μειώνεται τόσο λιγότερο όγκο αφαιρεί ενώ όσο αυξάνεται τόσο περισσότερο όγκο αφαιρεί.

Με τις παραπάνω παρατηρήσεις προκύπτει πως όσο πιο μικρή οριστεί η πρόωση τόσο καλύτερο αποτέλεσμα επιφάνειας θα ληφθεί.

Τέλος, ο όγκος του αποβλήτου αυξάνεται, όσο αυξάνεται και το αξονικό βάθος κοπής.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις Εφαρμογής

Πεδία που θα μπορούσαν να διερευνηθούν περαιτέρω είναι η εισαγωγή της έννοιας της φθίνουσας ταλάντωσης στο σύστημα του κώδικα, για πιο ρεαλιστική προσέγγιση. Επιπλέον, η πρόσθεση των υπολογισμών των δυνάμεων κοπής. Αλλά κι ένα θέμα που απασχολεί ιδιαίτερος το χώρο της μηχανουργικής τεχνολογίας και των CNC κατεργασιών, τον υπολογισμό των θερμοκρασιών που επικρατούν στο σημείο κοπής.

Κεφάλαιο 7° Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1°,
Εξώφυλλο:

I.

<https://zappysys.com/blog/export-rest-api-ms-access-using-vba-command-button/>

Κεφάλαιο 2°, Στάθμη των Γνώσεων,
2.1 Ιστορική Αναδρομή:

I.

Αριστομένης Αντωνιάδης, Μηχανουργική Τεχνολογία, Τόμος Β

2.2 Δομή CNC Μηχανών:

I.

<https://mechanicaljungle.com/cnc-block-diagram/>

II.

<https://www.etechnog.com/2022/04/how-cnc-machine-works-learn-with-diagram.html>

III.

<https://www.quora.com/How-would-you-define-CNC-and-explain-the-structure-of-CNC-with-a-block-diagram>

IV.

<https://mechanicalnotes.com/cnc-machine/>

2.7 Σύστημα Ψύξης (*Coolant*):

I.

Bob Warfield - The Role of CNC Coolant in Machining,

<https://www.cnccookbook.com/cnc-coolant-system-mist-high-pressure-through-spindle/>

2.8 Τεχνολογία Υλικών:

I.

Lia Fang - The Most 21 Materials We Use For CNC Machining,

<https://www.linkedin.com/pulse/most-21-materials-we-use-cnc-machining-joyce-lee-cnc-machining/>

Κεφάλαιο 3°

Mohamed Gamal, G Code & CNC Machining (Siemens NX CAM Introduction),

<https://www.udemy.com/course/g-code-cnc-machining-overview-manufacturing-guide/learn/lecture/33008794?start=225#overview>

Κεφάλαιο 4^ο,

4.2 Μέση Τραχύτητα Επιφάνειας Ra (*Microns*):

I.

Μπουζάκης Κ., Καραχάλιου Δ., Process Models in Grinding Based on a Three Dimensional Description of the Grinding Wheel Topomorphy, Ch. Proceeding of the 13th, NAMRC (1985)

II.

Πετρόπουλος Π., Μηχανουργική Τεχνολογία, Τόμοι Α & Β

III.

Παππάς Κ., Σπηλιοπούλου Μ., Ανάλυση της Τραχύτητας & Γραφική Παρουσίαση των Χαρακτηριστικών της με τη Βοήθεια Η/Υ, Διπλωματική Εργασία

IV.

Τσεκούρας Γ., Πειραματικός – Αναλυτικός Προσδιορισμός της Τραχύτητας Επιφάνειας & των Δυνάμεων Κοπής Κατά τη Διαμήκη Επίπεδη Λείανση, Διπλωματική Εργασία

Κεφάλαιο 5^ο, Εξακρίβωση (*Verification*):

I.

Rodrigo Henriques Lopes da Silva & Amauri Hassui, Cutting Force & Surface Roughness Depend On the Tool Path Used in Side Milling: An Experimental Investigation

II.

Hui-Qun Chen & Qing-Hui Wang, Modelling & Simulation of Surface Topography Machined by Peripheral Milling Considering Tool Radial Runout & Axial Drift

III.

O.E.E.K. Omara,^b T. El-Wardany^c, E. Ngb, M.A. Elbestawi, An Improved Cutting Force & Surface Topography Prediction Model In End Milling