



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αναβάθμιση εργαλειομηχανής CNC από τριών σε πέντε αξόνων του
εργαστηρίου CNC του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών**

Συγγραφέας

ΔΡΙΒΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ - ΘΕΟΡΩΡΟΣ

ΑΜ: 45028

Επιβλέπων

Δρ. ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Υποψ. Δρ. ΤΣΑΙΝΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Αθήνα, Ιούνιος 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA SCHOOL OF
ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Diploma Thesis

**CNC MACHINE UPGRADE FROM 3-AXIS TO 5-AXIS FOR THE
CNC LAB OF MECHANICAL ENGINEERING**

DRIVAS NIKOLAOS - THEODOROS

Registration Number: 45028

Supervisor name and surname:

Dr. STERGIOY KONSTANTINOS

PhD Cand. TSAINIS ANDREAS

Athens, June 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος εργασίας:

Αναβάθμιση εργαλειομηχανής CNC από τριών σε πέντε αξόνων του εργαστηρίου
CNC του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	Καθηγητής	
2	ΡΩΣΣΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ	Ακαδημαϊκός Υπότροφος	
3	ΠΡΟΕΣΤΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ	Λέκτορας Εφαρμογών	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δρίβας Νικόλαος Θεόδωρος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 45028 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή*

Ο/Η Δηλών/ούσα

*** Δρίβας Νικόλαος Θεόδωρος /Προπτυχιακός Φοιτητής**



Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

*** Σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από αιτιολόγηση και έγκριση του επιβλέποντα, προβλέπεται χρονικός περιορισμός πρόσβασης (embargo) 6-12 μήνες. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6):**

https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf

Περίληψη

Η τεχνολογία των CNC (Computer Numerical Control) μηχανών έχει σημειώσει σημαντική εξέλιξη και ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Οι CNC μηχανές αποτελούν αυτόματα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών, με την ευελιξία και την ακρίβεια που προσφέρουν θεωρούνται υψίστης σημασίας αναφορικά με την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του κόστους παραγωγής.

Αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει την εξέλιξη των CNC μηχανών από την έναρξη της τεχνολογίας τους έως σήμερα μέσα από μια βιβλιογραφική έρευνα. Περιγράφονται οι πρώτες εφαρμογές τους στον βιομηχανικό τομέα και οι βασικές τεχνολογίες που έχουν συμβάλει στην πρόοδο της τεχνολογίας αυτής. Εξετάζονται επίσης οι σημαντικότερες εξελίξεις και καινοτομίες που έχουν συμβάλει στην αύξηση της ακρίβειας, της ταχύτητας και της αξιοπιστίας των CNC μηχανών.

Στη συνέχεια η ανωτέρω εργασία θα επικεντρωθεί στην αναβάθμιση της CNC φρέζας Haas Mini Mill Edu του εργαστηρίου Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, μετατρέποντάς την από τριαξονική σε πενταξονική και προσθέτοντάς της ένα διπλό σύστημα ψύξης . Παρουσιάζονται οι λόγοι που δικαιολογούν την ανάγκη για αναβάθμιση και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται. Αναλύονται οι πιθανές επιλογές αναβάθμισης και παρουσιάζονται οι προηγμένες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες στην αγορά για τη βελτίωση των επιδόσεων της.

Τέλος, αναφέρονται τα αποτελέσματα και τα οφέλη που θα προκύψουν από την αναβάθμιση της CNC φρέζας, όπως η αύξηση της ακρίβειας της κατεργασίας, η μείωση του χρόνου παραγωγής και η βελτίωση της γενικής απόδοσης του εργαστηρίου CNC Μηχανολόγων Μηχανικών.

Λέξεις κλειδιά: CNC μηχανές, Φρέζα, Βιομηχανία, Εξέλιξη, Αναβάθμιση, Παραγωγικότητα

Abstract

The technology of Computer Numerical Control (CNC) machines has experienced significant advancement and development in recent years. CNC machines are automated tools used in a variety of industrial applications, known for their flexibility and precision, which are considered crucial for increasing productivity and reducing production costs.

This dissertation examines the evolution of CNC machines from their inception to the present day through a literature review. It describes their initial applications in the industrial sector and the key technologies that have contributed to the progress of this technology. It also explores the significant developments and innovations that have enhanced the precision, speed, and reliability of CNC machines.

Subsequently, this work focuses on the upgrade of the Haas Mini Mill Edu CNC milling machine in the Mechanical Engineering Laboratory of the University of West Attica. The upgrade involves converting it from a three-axis to a five-axis system and adding a dual cooling system. The reasons justifying the need for the upgrade and the challenges faced are presented. The possible upgrade options are analyzed, and advanced technologies available in the market to improve the machine's performance are discussed.

Finally, the dissertation highlights the results and benefits that will arise from the upgrade of the CNC milling machine, such as increased machining accuracy, reduced production time, and improved overall performance of the CNC Mechanical Engineering Laboratory.

Key words: CNC machines, milling machine, industry, evolution, upgrade, productivity

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract	7
Περιεχόμενα Εικόνων	9
Περιεχόμενα Πινάκων	10
1. Εισαγωγή.....	11
2. CNC εργαλειομηχανές και αριθμητικός έλεγχος.....	16
2.1 Η πορεία τους στο χρόνο	16
2.2 Τύποι CNC εργαλειομηχανών	22
3. Κέντρα κατεργασίας: τριών αξόνων και πέντε αξόνων.....	23
4. Περιπτώσιολογική μελέτη της CNC φρέζας του εργαστηρίου.....	32
5. Πρόταση αναβάθμισης.....	36
5.1 Αναβάθμιση από τρεις άξονες σε πέντε άξονες.....	36
5.2 Προσθήκη συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής.....	39
6. Διαδικασία αναβάθμισης και περιγραφή	41
6.1 Διαδικασία εγκατάστασης του TRT70	41
6.2 Διαδικασία εγκατάστασης συστημάτων ψύξης εργαλείων κοπής.....	45
7. Αποτελέσματα.....	54
Συμπεράσματα	60
Βιβλιογραφία	61

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 Οι πρώτες εφαρμογές CNC	16
Εικόνα 2 Το Cincinnati Hydro-Tel	17
Εικόνα 3 Αργαλειός με διάτρητες κάρτες	19
Εικόνα 4 Cincinnati Milling Machine Company Hydro-Tel.	21
Εικόνα 5 . Κίνηση 5 αξόνων	25
Εικόνα 6: CNC φρέζα με X & Y άξονες στο τραπέζι και Z άξονα στην άτρακτο	26
Εικόνα 7: CNC φρέζα με Z & X άξονες στην άτρακτο και Y άξονα στο τραπέζι	27
Εικόνα 8: CNC φρέζα με Z & Y άξονες στην άτρακτο και X άξονα στο τραπέζι	27
Εικόνα 9: CNC φρέζα με X & Y & Z άξονες στην άτρακτο	28
Εικόνα 10: Διάφορες κινηματικές αλυσίδες ανάλογα την κατασκευή.	29
Εικόνα 11: Β άξονας και C άξονας στο τραπέζι και X & Y & Z άξονες στην άτρακτο.	29
Εικόνα 12: Α άξονας και C άξονας στο τραπέζι και X & Y & Z άξονες στην άτρακτο.	30
Εικόνα 13: X & Y & C άξονες στο τραπέζι και B & Z άξονες στην άτρακτο	30
Εικόνα 14 : Haas Mini Mill Edu	32
Εικόνα 15: Haas TRT70 ⁸	38
Εικόνα 16: Διάγραμμα σύνδεσης servo amplifiers - επεξεργαστή	41
Εικόνα 17: Ρύθμιση θέσης Α άξονα = 0 deg.....	43
Εικόνα 18: Ρύθμιση θέσης Α άξονα = 90 deg.....	44
Εικόνα 19: Ρυθμίσεις 255, 256, 257	45
Εικόνα 20: Σύνδεση ηλεκτροβαλβίδας στο μπλοκ αέρα.....	46
Εικόνα 21: Διάγραμμα εγκατάστασης πλαστικής σωλήνας ¹²	46
Εικόνα 22: Ακροφύσιο αέρα	47
Εικόνα 23: Ηλεκτρικό διάγραμμα ηλεκτροβαλβίδας.....	48
Εικόνα 24: Βάνα παροχής αέρα	49
Εικόνα 25: Αντλία συνδεδεμένη με την πλαστική σωλήνα	50
Εικόνα 26: Διάγραμμα εγκατάστασης πλαστικής σωλήνας	50
Εικόνα 27: Ακροφύσιο ψυκτικού υγρού	51
Εικόνα 28: Η ασφάλεια 10A συνδεδεμένη στην PSUP	52
Εικόνα 29: Ηλεκτρικό διάγραμμα αντλίας σαπουνελαίου ¹⁴	52
Εικόνα 30: 2D σχέδιο πεταλιέρας	54
Εικόνα 31: 3D σχέδιο πεταλιέρας	55
Εικόνα 32: Πραγματική απεικόνιση του τεμαχίου.....	55
Εικόνα 33: Απεικόνιση κομματιού μετά την ολοκλήρωση της 1ης φάσης σε 5αξονική κατεργασία	56
Εικόνα 34: Απεικόνιση κομματιού μετά την ολοκλήρωση της 1ης φάσης σε 3αξονική κατεργασία	57
Εικόνα 35: Απεικόνιση κομματιού μετά την ολοκλήρωση της 2ης φάσης σε 3αξονική κατεργασία	58

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των NC μηχανών	21
Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Haas Mini Mill Edu.....	34
Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά Haas TRT70	38

1. Εισαγωγή

Η μηχανουργική βιομηχανία παρουσιάζεται με αυξανόμενη ζήτηση για μηχανήματα που παράγουν όλο και πιο πολύπλοκα σχήματα σε πιο δύσκολα κοπτικά υλικά [1]. Μεγάλη ποικιλία από επιλογές κατάλληλες για τέτοιες δύσκολες εργασίες είναι διαθέσιμες πλέον στην αγορά, αλλά η αγορά εργαλειομηχανής ή τεχνολογίας CAD/CAM απαιτεί σημαντική οικονομική επένδυση και δεν μπορεί να γίνει χωρίς προσεκτική εξέταση. Η εσφαλμένα επιλεγμένη τεχνολογία περιορίζει την ακρίβεια, την παραγωγικότητα και την ευελιξία μια επιχείρησης [2]. Έτσι οι εταιρείες συχνά δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις επιδόσεις και τις τεχνικές δυνατότητες παρά στο κόστος.

Λόγω του σκληρού παγκόσμιου ανταγωνισμού, το κόστος έχει γίνει τόσο κρίσιμο όσο και η ποιότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Τα κέντρα κατεργασίας είναι πλέον ο πιο σημαντικός παράγοντας για την οικονομικά αποδοτική κατεργασία [3]. Η κατεργασία μηχανικών μερών, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την γεωμετρική πολυπλοκότητα καθώς και τις ιδιότητες του υλικού. Δεδομένου ότι οι λεπίδες εκτίθενται σε δύσκολες συνθήκες, πρέπει να είναι κατασκευασμένες από τέτοια ποιότητα υλικού, που προκαλεί την κοπή αποτελεσματικά σε ένα μεγάλο εύρος υλικών [4], [5], [6].

Επιπρόσθετα, η θέση του εργαλείου σε σχέση με την κατεργασμένη επιφάνεια (γωνία κλίσης) έχει ισχυρό αντίκτυπο στις δυνάμεις κοπής [7], [8]. Για να αποκτηθεί το επιθυμητό φινιρίσμα επιφάνειας, η γωνία κλίσης πρέπει να διατηρείται εντός των προκαθορισμένων ορίων [9], [10], [11], [12]. Σε κέντρο CNC 3 αξόνων, οι διορθώσεις της θέσης είναι περιορισμένες, επομένως η γωνία συχνά πέφτει έξω από αυτά τα όρια [13]. Αυτό καθιστά αδύνατη την επίτευξη των απαιτούμενων φινιρισμάτων επιφάνειας [6], [14], [15]. Αντίθετα, η θέση του εργαλείου μπορεί εύκολα να διορθωθεί στα μηχανήματα CNC 5 αξόνων, αν και είναι πιο ακριβά τόσο στην αρχική αγορά όσο και στην συντήρησή και συνεπώς έχουν υψηλότερο κόστος απόσβεσης [3].

Βέβαια το κόστος απόσβεσης μπορεί εν μέρει να αποπληρωθεί από τα οφέλη της μείωσης του χρόνου παραγωγής. Οι Layegh, ανέπτυξαν μια τεχνική, στην οποία οι κοπτικές δυνάμεις μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας μηχανιστικό υψηλό επίπεδο προσέγγισης και οι συντελεστές του μοντέλου βαθμονομούνται από τις πειραματικές περικοπές [16]. Η τεχνική επιτρέπει τη διατήρηση των δυνάμεων κοπής σταθερή κατά μήκος της διαδρομής του εργαλείου προσαρμόζοντας τον ρυθμό τροφοδοσίας, κάτι που μειώνει σημαντικά τον χρόνο κατεργασίας για κέντρα κατεργασίας 5 αξόνων.

Οι μηχανές ενώ συνεισφέρουν μόνο στο 2% περίπου της συνολικής βιομηχανικής παραγωγής, η μηχανή είναι θεμελιώδης για τη βιομηχανία των επενδυτικών αγαθών. Παρέχει δηλαδή την κύρια βάση του βιομηχανικού εξοπλισμού για τις μεταποιητικές βιομηχανίες. Η βιομηχανία των εργαλειομηχανών αναπτύχθηκε και ωρίμασε με τις κύριες αγορές της, που είναι η βιομηχανία μηχανημάτων, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αμυντική και αεροδιαστημική βιομηχανία και άλλες βιομηχανίες επενδυτικών αγαθών [55].

Από το στις αρχές του εικοστού αιώνα, οι ΗΠΑ είχαν αναπτύξει ισχυρή θέση στις παγκόσμιες εξαγωγές στην αγορά αυτή, μέσω ενός καλά οργανωμένου δικτύου αντιπροσώπων πωλήσεων. Ακόμη και οι παγκόσμιοι πόλεμοι ενίσχυσαν τη θέση των αμερικανικών κατασκευαστών [17]. Η Γερμανία, που ήταν ο μεγαλύτερος εξαγωγέας

του κόσμου, έμεινε πίσω. Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, μεγάλο μέρος της βιομηχανίας στη Γερμανία είχε εξαρθρωθεί. Το Ηνωμένο Βασίλειο, το οποίο είχε ηγηθεί της ανάπτυξη εργαλειομηχανών από τη βιομηχανική επανάσταση, ήταν στην τυχερή θέση να έχει μια μεταποιητική υποδομή που έμεινε αρκετά ανέγγιχτη από τον πόλεμο [18].

Ο εξοπλισμός αποτελεί θεμελιώδες μέρος στις μεταπολεμικές στρατηγικές των κατασκευαστικών εταιρειών. Ο εξοπλισμός ήταν πολύ απαραίτητος σε σχεδόν οποιαδήποτε τιμή. Αυτό επέτρεψε στη βιομηχανία να αναπτυχθεί με σταθερό ρυθμό περίπου 10% ετησίως από το 1950 έως το 1970. Η καινοτομία ήταν σταδιακή μέχρι τη δεκαετία του 1970, που εμφανίστηκε ο αριθμητικός έλεγχος στις μηχανές. Η εμφάνιση του αριθμητικού ελέγχου προκάλεσε μια μεγάλη ασυνέχεια στην παραδοσιακή σειρά προϊόντων της βιομηχανίας των ΗΠΑ και ώθησε τη βιομηχανία στην εποχή των ψηφιακών ηλεκτρονικών εργαλειομηχανών. Κάποιες εταιρείες μπόρεσαν να μετασηματιστούν και να παραμείνουν στην αγορά, ενώ πολλές άλλες όχι. Πολλές καθιερωμένες εταιρείες έχασαν τη θέση τους στην αγορά, χρεοκόπησαν, εξαγοράστηκαν ή εγκατέλειψαν. Στις ΗΠΑ ο κλάδος των εργαλειομηχανών βρισκόταν σε αναταράξεις, από το 1971 έως το 1986, όπου μόνο 5 από τις 15 μεγαλύτερες εταιρείες του κλάδου μπόρεσαν να διατηρήσουν τη θέση τους μεταξύ των κορυφαίων. Μεταξύ 1972 και 1987, οι ΗΠΑ έχασαν την ηγετική τους θέση ως ο μεγαλύτερος παραγωγός εργαλειομηχανών από τη Γερμανία, τη νεοεισερχόμενη Ιαπωνία καθώς και την Σοβιετική Ένωση [19].

Από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι ΗΠΑ είχαν αναδειχθεί ως ο κορυφαίος παραγωγός εργαλειομηχανών με ποσοστό έως και 30% της παγκόσμιας αγοράς στα μεταπολεμικά χρόνια. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 όμως, η επιρροή των ΗΠΑ μειώθηκε. Αν και η κατανάλωση εργαλειομηχανών στις Η.Π.Α αυξήθηκε, το μερίδιο του κατασκευαστή των ΗΠΑ στην παγκόσμια αγορά μειώθηκε στο 15% μέχρι το 1970, μετά τη Γερμανία, η οποία κατείχε μεταξύ 15 και 20% [20].

Μέχρι το 1977 η Γερμανία έλεγχε το 30% του παγκόσμιου εξαγωγικού εμπορίου. Αυτή η κατάσταση κράτησε μέχρι το 1980 όταν η Ιαπωνία – παράλληλα με την εισαγωγή των αριθμητικών ελέγχων - κατέκτησε το 20% της παγκόσμιας αγοράς [21], [22]. Το μερίδιο των ΗΠΑ υποχώρησε περαιτέρω σε περίπου 10% και επίσης έχασε τον έλεγχο στην εγχώρια αγορά της. Ομοίως, την ίδια στιγμή το βρετανικό μερίδιο της παγκόσμιας αγοράς μειώθηκε από 8% το 1971 σε 5% το 1977 και σε 3% το 1981. Η απασχόληση μειώθηκε από 81.000 το 1960 σε 62.000 το 1976. Οι εισαγωγές εργαλειομηχανών αυξήθηκαν μεταξύ 1971 και 1982 από 30% σε 61% της εγχώριας κατανάλωσης [23].

Ωστόσο, γενικά, οι ευρωπαϊκές εταιρείες έχασαν τη σημασία τους. Μετά το 1973 χαρακτηρίστηκαν ως οι οικονομίες των μεγαλύτερων βιομηχανικών χωρών με αργή ανάπτυξη. Οι χρήστες εργαλειομηχανών έψαχναν τρόπους για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών τους. Έτσι, οι εργαλειομηχανές NC, οι οποίες προσέφεραν βελτιωμένη ευελιξία και μειωμένο κόστος, ήταν πολύ ευπρόσδεκτες για την αγορά. Στις ΗΠΑ και τη Δυτική Ευρώπη σημειώθηκε δραματική άνοδος σε ζήτηση για μηχανές NC με χαμηλότερο κόστος [24].

Η επακόλουθη φάση της τεχνολογικής αλλαγής και η εφαρμογή τεχνολογίας Η/Υ, οδήγησε εξίσου σε σημαντικές αλλαγές στην αγορά [25]. Μετά από ένα επιπλέον χρονικό πλαίσιο 12 ετών, καμία από τις αρχικά κορυφαίες εταιρείες του 1971 δεν παρέμεινε στις 15 κορυφαίες. Δύο από τις νέες κορυφαίες εταιρείες το

1999/2000, ήταν η UNOVA και η Thyssen Krupp. Ελαβαν χώρα αρκετές ενοποιήσεις, συγχωνεύσεις και εξαγορές στις εταιρείες του κλάδου, ωστόσο, ο συνολικός αριθμός των εταιρειών μάλλον αυξήθηκε τα τελευταία 50 χρόνια. Η μικρής κλίμακας δομή του κλάδου, η οποία μπορεί να είναι δείκτης ωριμότητας της αγοράς, παρέμεινε μάλλον αμετάβλητος από τη δεκαετία του 1970 μέχρι τώρα - η κατανομή του μεγέθους των εταιρειών παρέμεινε η ίδια από το 1955 [26].

Οι πιο σημαντικές διαδικασίες κατασκευής ή κοπής είναι η στροφή, η διάτρηση, φρεζάρισμα και άλεση. Σημαντικές διαδικασίες σχηματισμού μετάλλων είναι η σφυρηλάτηση, η συμπίεση, η κάμψη, και διάτμηση. Μέχρι σήμερα, οι περισσότερες εθνικές στατιστικές ακολουθούν αυτές τις κατηγορίες παραγωγών. Πριν από την έλευση της τεχνολογίας αριθμητικού ελέγχου μερικοί παραγωγοί ειδικεύονταν στις μηχανές τórνευσης, άλλοι σε μηχανές λείανσης, πρέσες κλπ. Η εισαγωγή αριθμητικών ελέγχων επέτρεψε τον συνδυασμό πολλών διαδικασιών κοπής σε μηχανές με μεγαλύτερη ευελιξία. Επίσης οι περισσότερες εταιρείες αύξησαν τις γνώσεις τους σχετικά με την τεχνολογία κοπής. Ωστόσο, υπάρχουν μέχρι και σήμερα – με εξαίρεση ορισμένες μεγάλες ιαπωνικές εταιρείες - λίγα μόνο παραδείγματα παραγωγών εργαλειομηχανών που κατασκευάζουν εργαλειομηχανές τόσο για κοπή όσο και για μορφοποίηση [27].

Πλέον, τα χειριστήρια αλλάζουν τους δίσκους ενεργοποίησης και απενεργοποίησης, ενεργοποιούν τα γρανάζια και τους σφιγκτήρες και κατευθύνουν την κίνηση των εργαλείων. Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιούν, τα χειριστήρια ταξινομούνται σε μηχανικά, υδραυλικά, πνευματικά και τέλος σε ηλεκτρικά χειριστήρια. Αυτή η τεχνολογία κατάφερε να αναστατώσει το σύνολο της βιομηχανίας. Ο ψηφιακός ή αριθμητικός έλεγχος ελέγχει αυτόματα τις εργαλειομηχανές μέσω μιας προγραμματισμένης ακολουθίας εργασιών με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών ταινιών ελέγχου [28].

Η αλλαγή των οδηγιών γίνεται εύκολα αντικαθιστώντας την ταινία ελέγχου με άλλο πρόγραμμα. Τα αριθμητικά στοιχεία ελέγχου σημείωσαν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο αυτόματου ελέγχου των διεργασιών που πραγματοποιούνταν παραδοσιακά [29]. Αρχικά ο εργαζόμενος καθοδηγούσε τη διαδικασία ενώ δούλευε με τα εργαλεία ή έλεγχε τη διαδικασία και την ύπαρξη του εκάστοτε μηχανήματος. Τα χειριστήρια NC ήταν προγραμματιζόμενα έτσι ώστε ο εργαζόμενος να μην χρειάζεται να είναι παρών κατά τη διαδικασία παραγωγής. Τεχνικά αυτό σήμαινε τη δυνατότητα εκτέλεσης ελέγχου σε πραγματικό χρόνο μέσω της χρήσης ψηφιακών σημάτων που αντιστοιχούν σε αριθμούς, σε αντίθεση με τον παραδοσιακό τρόπο χρήσης συνεχών σημάτων που ήταν ανάλογα των φυσικών ποσοτήτων [30].

Στην ανάπτυξη του αριθμητικού ελέγχου υπήρξαν μικρές ασυνέχειες. Τα πρώτα αριθμητικά χειριστήρια ήταν «καλωδιωμένα» και κατασκευάστηκαν ειδικά για τα διάφορα είδη εργαλειομηχανών. Τα οποία δεν είχαν ευελιξία, ήταν ακριβοί και επιρρεπείς σε αποτυχία. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 η μονάδα αριθμητικού ελέγχου βασιζόταν σε έναν μικροϋπολογιστή. Το 1974 μικροϋπολογιστές χρησιμοποιήθηκαν για να κάνουν τα χειριστήρια προγραμματιζόμενα και αυτό επέτρεψε τη χρήση του ίδιου υλικού ελέγχου για μια ορισμένη κατηγορία εργαλειομηχανών. Έτσι, ο προγραμματισμός έγινε ευκολότερος και ο περαιτέρω αυτοματισμός εφικτός. Η αναλογία τιμής/απόδοσης βελτιώθηκε σημαντικά και τελικά άνοιξε μια μαζική αγορά για τις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου [31].

Η σύγχρονη ανάπτυξη των NC ξεκίνησε περίπου το 1948 – 1949 και μεγάλη ώθηση δόθηκε από την Πολεμική Αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών, η οποία επιθυμούσε να έχει μηχανές για την βιομηχανία αεροσκαφών που ήταν σε θέση να κατασκευαστούν σύνθετα εξαρτήματα, φθηνότερα, ταχύτερα και με περισσότερη ακρίβεια από ό,τι με τις συμβατικές μεθόδους. Έτσι, η Πολεμική Αεροπορία χρηματοδότησε μελέτες απόδειξης σκοπιμότητας εργαλειομηχανών, που θα μπορούσαν να εκτελέσουν αυτοματοποιημένη κατεργασία [32].

Επιπρόσθετα, το MIT και η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ, ξεκίνησαν ακόμη και πρόγραμμα για τη «διάδοση πληροφοριών» της τεχνολογίας NC κατά τα έτη 1953 έως 1954. Σταδιακά, δημιουργήθηκε μια αγορά για έναν ψηφιακό υπολογιστή στον οποίο θα μπορούσαν να ενσωματωθούν αισθητήρες, ελεγκτές και εργαλειομηχανές, και τα οποία θα μπορούσαν να διαχειριστούν το ψηφιακό έλεγχο ολόκληρου του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Η ιδέα ήταν να δημιουργηθούν ιεραρχικά δομημένες γλώσσες υπολογιστών στις οποίες οι εντολές θα μπορούσαν να εκφραστούν με απλές λέξεις που ακούγονται αγγλικά και όχι με κωδικοποιημένη μορφή, και η οποία θα μπορεί επίσης να μεταγλωττίζει αυτόματα υποπρογράμματα σε ένα πρόγραμμα ολοκληρωμένων συστημάτων. Με διαρκή έρευνα αναπτύχθηκαν συστήματα άμεσου αριθμητικού ελέγχου, κυρίως μιας εθνικής παραγωγής συστημάτων λογισμικού που ονομάζεται «EXAPT» στο Άαχεν. Αυτά τα ιδρύματα ανέπτυξαν επίσης πόρους διαχείρισης για τον κλάδο. Πολλοί εμπειρογνώμονες του κλάδου που συμμετείχαν σε αυτή τη μελέτη καθώς και συνεισφέροντες στην έρευνα βρέθηκαν στο μητρώο αποφοίτων του Άαχεν⁷⁴. Πολλοί βιομηχανικοί οργανισμοί, ιδίως ο «Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.» (VDW) βοήθησε στον εντοπισμό των αναγκών της αγοράς και προσπάθησε να ξεκινήσει συνεργασίες και ερευνητικά έργα. Η Siemens άρχισε να αναπτύσσει μονάδες αριθμητικού ελέγχου το 1958 και κατάφερε παραδώσει τις πρώτες μονάδες δύο χρόνια αργότερα [33].

Βλέποντας από τη θέση του σήμερα την ανάπτυξη και εφαρμογή της νέας τεχνολογίας στις εργαλειομηχανές, παρατηρεί κανείς ότι συνέβη σε πολλά κύματα. Το πρώτο κύμα ήταν προφανώς η εισαγωγή αριθμητικών ελέγχων για τις εργαλειομηχανές στις δεκαετίες του 1950 και του 1960. Από το 1959 έως το 1965 ο αριθμός της πωλήσεων αυξήθηκε πάνω από 40% κατά μέσο όρο. Οι πελάτες προέρχονταν κυρίως από το χώρο υψηλών προδιαγραφών βιομηχανιών όπως η αεροδιαστημική. Η συνολική αξία των πωλήσεων συνέχισε να αυξάνεται με αυτόν τον ρυθμό ακόμη και μετά το 1965 [34]

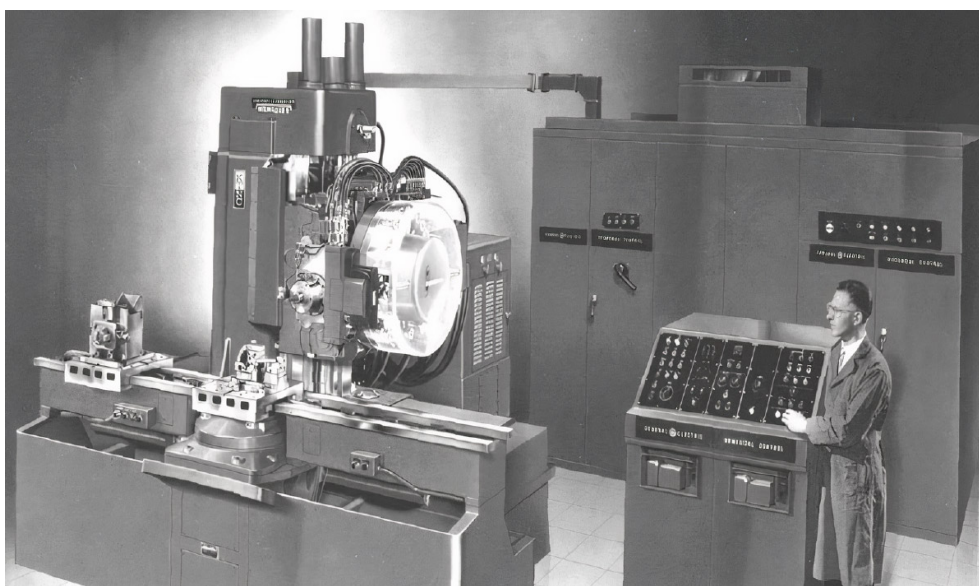
Το δεύτερο κύμα στις δεκαετίες του 1970 και του 1980 πυροδοτήθηκε από τη ζήτηση μικροϋπολογιστών για τους αριθμητικούς ελέγχους. Οι πωλήσεις μηχανών NC αυξήθηκαν εντυπωσιακά κατά περίπου 30% - 40% ετησίως από το 1978 έως το 1984. Το δεύτερο κύμα ενισχύθηκε από σημαντικές μειώσεις τιμών και αύξηση της απόδοσης στην αγορά επεξεργαστών. Η τιμή για μια μονάδα CNC μικροϋπολογιστή το 1973 είχε πέσει περίπου στο 50% της ίδιας μονάδας NC το 1963. Η τιμή μιας μονάδας CNC μικροεπεξεργαστή το 1978 ήταν μόνο περίπου το ένα τέταρτο της τιμής μιας μονάδας NC και το 1982 η τιμή για μια μονάδα CNC πολλαπλών επεξεργαστών ήταν ακόμη πιο χαμηλή. Το κέρδος στην ευελιξία και η πτώση της τιμής έκανε τις εργαλειομηχανές CNC ενδιαφέρουσες για την πλειοψηφία των βιομηχανιών. Αυτό το ενδιαφέρον διήρκεσε για περισσότερα από 5 χρόνια και έπεσε μετά το 1984.

Σε απόλυτους αριθμούς, το δεύτερο κύμα ήταν πολύ ισχυρότερο από το πρώτο κύμα λόγω τριών σημαντικών εξελίξεων. Η πρώτη εξέλιξη ήταν, όπως συζητήθηκε παραπάνω, η εμφάνιση μιας μαζικής αγοράς. Οι παραγωγοί του «main stream» ενδιαφέρθηκαν για ψηφιακά ελεγχόμενα μηχανήματα μαζικά. Ξεκινώντας το 1980, εισήχθη και ο ψηφιακός έλεγχος για ειδικές μηχανές καθώς και για μηχανές διαμόρφωσης, που ως επί το πλείστον ήταν μηχανικά ελεγχόμενες μέχρι τότε. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας NC έγινε με αντιστάθμιση αρκετών ετών. Η δεύτερη εξέλιξη ήταν γύρω στο 1980 όταν οι ιαπωνικές εταιρείες ξεκίνησαν μια μαζική εισβολή στις εξαγωγικές αγορές, ιδιαίτερα στην αγορά των ΗΠΑ. Οι ιαπωνικές εταιρείες κατάφεραν να κατακτήσουν ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας αγοράς. Τέλος η τρίτη εξέλιξη προκλήθηκε από την επίδραση που είχαν οι υπολογιστές σε ολόκληρη την αξία της αλυσίδας. Με απώτερο στόχο την αυτοματοποίηση ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας (ολοκληρωμένη κατασκευή ηλεκτρονικών υπολογιστών – CIM) [35].

2. CNC εργαλειομηχανές και αριθμητικός έλεγχος

2.1 Η πορεία τους στο χρόνο

Μια μηχανή CNC είναι ένα σύστημα που συνδυάζει πολλαπλά εργαλεία (συμπεριλαμβανομένων τρυπανιών, τόνρευσης και εργαλείων φρέζας), τα οποία είναι ενσωματωμένα σε κελιά από τα οποία το μηχάνημα μπορεί να τα επιλέξει και να τα χρησιμοποιήσει, 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 και του άξονα Z. Επιπρόσθετα, πολλά έχουν δυνατότητα περιστροφικής κίνησης και ακόμη και ανάκλησης εξαρτημάτων αυτόματα, ώστε το υλικό να μπορεί να κοπεί από όλες τις πλευρές χωρίς χειροκίνητη επέμβαση.



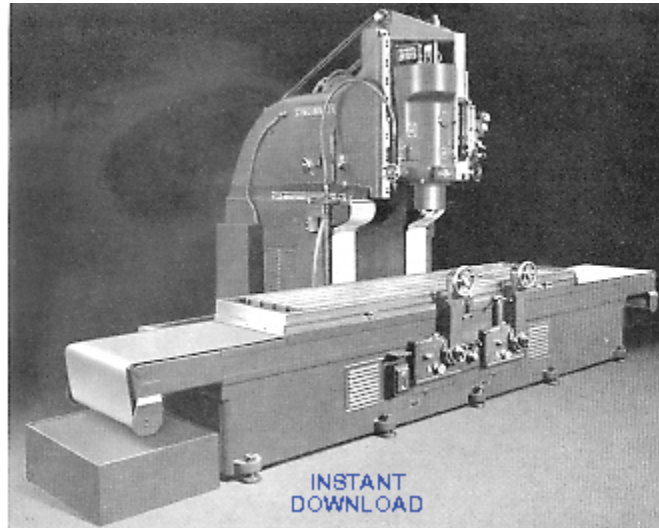
Εικόνα 1 Οι πρώτες εφαρμογές CNC¹

Αν και η ιδέα υπήρχε πολύ καιρό πριν, η πρώτη ιδέα Αριθμητικού Ελέγχου αναπτύχθηκε μόλις το 1949. Ο John T. Parsons, πρωτοπόρος στους υπολογιστές, την ανέπτυξε ως μέρος ενός ερευνητικού προγράμματος της Πολεμικής Αεροπορίας που πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT). Μια πειραματική μηχανή φρεζαρίσματος κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Servomechanisms του ινστιτούτου, με στόχο τη χρήση μηχανοκίνητων αξόνων για την παραγωγή λεπίδων ελικοπτέρων και πιο άκαμπτων υλικών για αεροσκάφη.

Η Parsons Corporation στο Traverse City του Μίσιγκαν, άρχισε να δουλεύει πάνω στο πρώτο σύστημα πριν από τη συνεργασία του MIT. Ο Parsons μπόρεσε να χρησιμοποιήσει μια ηλεκτρομηχανική αριθμομηχανή IBM 602A για να υπολογίσει τις συντεταγμένες αεροτομής. Τα σημεία δεδομένων τροφοδοτήθηκαν σε ένα ελβετικό τρυπάνι τροφοδοσίας με διάτρηση καρτών στο σύστημα και αυτό ήταν ο πρόδρομος

¹ <https://jyoti.co.in/2021/07/24/the-history-of-cnc-machine/>

του προγραμματισμού μηχανών CNC. Η ιδέα αναπτύχθηκε περαιτέρω και, το 1952, ο Richard Kegg (σε συνεργασία με το MIT) παρουσίασε το Cincinnati Hydro-Tel, μια μηχανή φρεζαρίσματος κάθετου άξονα 28 ιντσών. Η εμπορική του εισαγωγή ήρθε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια «Ελεγχόμενη συσκευή με κινητήρα σε εργαλειομηχανή εντοπισμού θέσης». Στο πρωτότυπο, αν και λειτουργούσε χρησιμοποιώντας χαρτοταινία οκτώ στηλών, συσκευή ανάγνωσης ταινίας και ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου σωλήνα κενού, έγινε εστίαση για μελλοντικές εξελίξεις.



Εικόνα 2 Το Cincinnati Hydro-Tel²

Οι πρώτες μηχανές CNC στις δεκαετίες του 1940 και του 1950 χρησιμοποιούσαν ταινία διάτρησης, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε στις τηλεπικοινωνίες και την αποθήκευση δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία αντικαταστάθηκε από αναλογικές τεχνολογίες υπολογιστών. Από τη δεκαετία του 1960 έως τη δεκαετία του 1970, εμφανίστηκαν οι ψηφιακές τεχνολογίες, καθιστώντας τη διαδικασία παραγωγής αυτοματοποιημένη και πιο αποτελεσματική. Ο Parson το 1968, έλαβε το πρώτο βραβείο Joseph Marie Jacquard από το Numerical Control Society. Η Εταιρεία Μηχανικών Κατασκευής του απένειμε τιμητική πλακέτα το 1975, η οποία ονόμασε τον Πάρσονς ως «Ο Πατέρας της Δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης».

Τα εξαιρετικά αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου κίνησης που χρησιμοποιούν τώρα οι κατασκευαστές εξακολουθούν να βασίζονται στα τρία κύρια στοιχεία των προκατόχων τους. Απαιτούν μια λειτουργία εντολών (είτε είναι με ψηφιακό είτε με αναλογικό σύστημα, έναν ακολουθητή κάμερας ή χειρολαβή πτερυγίου για να την ενεργοποίηση), ένα σύστημα κίνησης όπως κινητήρας, κύλινδρος, βαλβίδα ή συμπλέκτης και ένα σύστημα που παρέχει ανατροφοδότηση, όπως ένας κωδικοποιητής. Στις πρώτες μηχανές NC, ένα επίπεδο ελέγχου θα οδηγούσε σε ένα έκκεντρο. Με τη σειρά του, ο κινητήρας θα περιστρεφόταν για να λειτουργήσει το μηχάνημα, αλλά, εάν το καλώδιο ανάδρασης έσπαγε, η ροή του υγρού δεν θα μπορούσε να σταματήσει. Οι σύγχρονες μηχανές CNC ελέγχονται ηλεκτρονικά, επομένως αυτό το σενάριο είναι εξαιρετικά απίθανο και τα τελικά

² https://www.mcspt.com/shop/CINCINNATI_28_INCH_HYDROTEL_PARTS_SERVICE_MANUAL.html

αποτελέσματα είναι πλέον πιο προβλέψιμα. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιήσουν σχεδόν οποιοδήποτε είδος υλικού, όπως μέταλλο, ξύλο, πλαστικό, υαλοβάμβακα ή αφρό. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί νέες μορφές μηχανικής κατεργασίας. Χρησιμοποιώντας την ίδια ιδέα με τη μηχανική κατεργασία CNC, περιλαμβάνουν την κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων, τη μηχανική κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης και τη φωτοχημική κατεργασία. Αυτά και άλλα επιλέγονται συχνά ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται στη διαδικασία μαζικής παραγωγής.

Η προοπτική της ταχείας δημιουργίας πρωτότυπων έχει αλλάξει με τα χρόνια. Παλιά, όλα τα εξαρτήματα κατασκευάζονταν στο χέρι, ακόμη και τα συστήματα με διάτρητη ταινία έφεραν επανάσταση στη όλη διαδικασία. Σήμερα, υπάρχουν πολλές επιλογές πρωτότυπων για να διαλέξει κανείς ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό, την οικονομία και την πολυπλοκότητα των εξαρτημάτων CNC.

Τα διαθέσιμα εργαλεία και οι άξονες περιστροφής εξακολουθούν να κάνουν τις μηχανές CNC ελκυστικές και εξαιρετικά χρήσιμες. Με την έλευση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν αρχίσει να δείχνουν τους περιορισμούς τους. Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής μπορεί να παράγει πολύπλοκα μέρη, συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών τους στοιχείων. Έτσι, ο ρόλος των παραδοσιακών μηχανουργών εξασθενεί γρήγορα. Στον 21ο αιώνα, η ζήτηση για ειδικούς CNC έχει αυξηθεί. Οργανισμοί όπως το Institute for Technical Trades προσφέρουν εκπαίδευση για να εξοπλίσουν τους μηχανουργούς με τις δεξιότητες που απαιτούνται για να εργαστούν για εργοδότες σε αυτόν τον τομέα. Σε πολλούς κλάδους, οι προοπτικές εργασίας είναι ισχυρές και ορισμένοι προβλέπουν ότι οι θέσεις εργασίας τεχνολογίας, όπως ο χειρισμός εξοπλισμού CNC, θα αντιπροσωπεύουν το 40% των μελλοντικών ανοιχτών θέσεων εργασίας [36].

Ο αριθμητικός έλεγχος (NC) σημαίνει τη χρήση προγραμματιζόμενης λογικής (δεδομένα με τη μορφή γραμμάτων, αριθμών, συμβόλων, λέξεων ή συνδυασμού) για την αυτοματοποίηση του ελέγχου των εργαλείων μηχανικής κατεργασίας. Πριν από την εμφάνισή του, τα εργαλεία μηχανικής κατεργασίας ελέγχονταν πάντα από ανθρώπους χειριστές. Ο αριθμητικός έλεγχος μέσω υπολογιστή (CNC) συμβαίνει όταν αποστέλλονται ακριβείς κωδικοποιημένες οδηγίες σε έναν μικροεπεξεργαστή στο σύστημα ελέγχου ενός μηχανήματος μηχανουργικής κατεργασίας, επιτρέποντας βελτιωμένο επίπεδο ακρίβειας και συνέπειας. Τεχνικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει οποιοδήποτε μηχάνημα που ελέγχεται από υπολογιστή. Ορισμένες εφευρέσεις ήταν απαραίτητες για να τεθούν τα θεμέλια για την ανάπτυξη μηχανών CNC. Τα πιο βασικά από αυτά είναι οι πρώιμες εργαλειομηχανές, οι διάτρητες κάρτες, ο αριθμητικός έλεγχος και η γλώσσα προγραμματισμού

Όσον αφορά τις διάτρητες κάρτες, το 1725, ο Γάλλος εργάτης κλωστοϋφαντουργίας Basile Bouchon εφηύρε έναν τρόπο ελέγχου των αργαλειών χρησιμοποιώντας δεδομένα κωδικοποιημένα σε χαρτοταινίες μέσα από μια σειρά από τρύπες. Ενώ ήταν πρωτοποριακή, αυτή η μέθοδος ήταν εύθραυστη και απαιτούσε χειριστή. Το 1805, ο Joseph Marie Jacquard υιοθέτησε αυτή την ιδέα, αλλά την ενίσχυσε και την απλοποίησε συνδέοντας πιο στιβαρά χαρτιά στη σειρά και αυτοματοποιώντας έτσι τη διαδικασία. Αυτές οι διάτρητες κάρτες θεωρούνται ευρέως ως θεμελιώδεις για αυτό που επρόκειτο να γίνει σύγχρονος υπολογιστής. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο αργαλειός Jacquard αντιμετώπισε αντίσταση από τους μεταξουργούς της εποχής, οι οποίοι φοβούνταν ότι αυτός ο αυτοματισμός θα τους έκλεβε τις δουλειές και τα προς το ζην. Έκαψαν επανειλημμένα τους αργαλειούς που τέθηκαν σε

παραγωγή. Ωστόσο, η αντίστασή τους αποδείχθηκε μάταιη καθώς η βιομηχανία αναγνώρισε τα πλεονεκτήματα του αργαλειού. Μέχρι το 1812, στη Γαλλία, υπήρχαν 11.000 αργαλειοί Jacquard σε χρήση.



Εικόνα 3 Αργαλειός με διάτρητες κάρτες³

Οι διάτρητες κάρτες αναπτύχθηκαν στο δεύτερο μισό του 1800 και βρήκαν πολλές χρήσεις, από την τηλεγραφία μέχρι τα αυτόματα πιάνο. Στο δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, οι διάτρητες κάρτες χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για εισαγωγή και αποθήκευση δεδομένων σε υπολογιστές και αριθμητικά ελεγχόμενα μηχανήματα. Η αρχική μορφή περιείχε πέντε σειρές οπών, ενώ οι επόμενες εκδόσεις είχαν έξι, επτά, οκτώ ή περισσότερες σειρές.

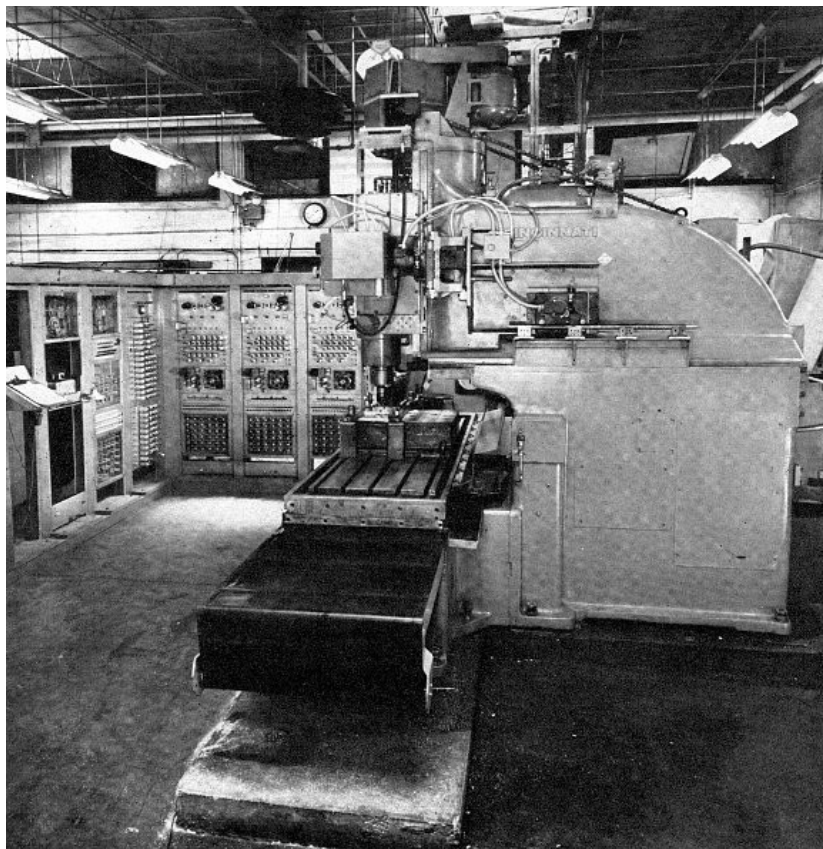
³ <https://www.athinodromio.gr/%CE%BF%CE%B9-%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%80%CF%81%CF%8E%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83/>

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά βήματα στην πορεία των NC.

Χρονολογία	Γεγονότα
1942	Ο John T. Parsons αναλαμβάνει υπεργολαβία από τη Sikorsky Aircraft για την κατασκευή λεπίδων ρότορα ελικοπτέρων.
1944	Προκλήθηκε ατύχημα από ένα σχεδιαστικό ελάττωμα σε μια από τις πρώτες 18 λεπίδες που κατασκεύασαν με αποτέλεσμα τον θάνατο του πιλότου.
1946	Η δημιουργία ενός εργαλείου κατασκευής για την ακριβή παραγωγή των λεπίδων θα ήταν περίπλοκη, έτσι ο Parsons προσλαμβάνει τον μηχανικό αεροσκαφών Frank Stulen και συγκροτεί μια ομάδα μηχανικών με άλλους τρεις. Ο Stulen έχει την ιδέα να χρησιμοποιήσει κάρτες διάτρησης της IBM για να καθορίσει τα επίπεδα πίεσης στις λεπίδες και νοικιάζει επτά μηχανές IBM για το έργο.
1948	Ο στόχος της εύκολης μεταβολής της αλληλουχίας των κινήσεων μιας αυτόματης εργαλειομηχανής - σε αντίθεση με την απλή κίνηση μιας σταθερής ακολουθίας - επιδιώκονταν με δύο βασικούς τρόπους: έλεγχο ιχνηθέτη και αριθμητικό έλεγχο. Το πρώτο, απαιτούσε ένα φυσικό μοντέλο του αντικειμένου που έπρεπε να κατασκευαστεί (ή τουλάχιστον ένα πλήρες σχέδιο του, όπως με το Cincinnati Line-Tracer Hydro-Tel). Το δεύτερο δεν απαιτούσε μια εικόνα του έτοιμου αντικειμένου ή μέρους, αλλά μόνο μια αφαίρεση του: ένα μαθηματικό μοντέλο και οδηγίες για τη μηχανή.
1949	Η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ χρειάζεται βοήθεια για την εξαιρετικά ακριβή κατασκευή πτερυγίων. Ο Parson τοποθετεί το αριθμητικά ελεγχόμενο μηχάνημα του και του ανατίθεται συμβόλαιο 200.000 δολαρίων για να το κάνει πραγματικότητα.
1949	Ο Parsons και ο Stulen δούλευαν με τη Snyder Machine & Tool Corp. στο μηχάνημα και συνειδητοποίησαν ότι χρειάζονται σερβοκινητήρες για να λειτουργεί με ακρίβεια. Η Parsons αναθέτει υπεργολαβικά τους σερβομηχανισμούς για τις «Card-a-matic Milling Machines» στο εργαστήριο Servomechanisms του MIT.
1951	Η συμφωνία μηχανών NC της Πολεμικής Αεροπορίας ανατίθεται τώρα στο MIT. Υπάρχουν διάφοροι λογαριασμοί για το τι συνέβη που οδήγησε στον αποκλεισμό της Parsons από τη συμφωνία:
1952 (Μάιος):	Η Parsons κατέθεσε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το "Motor Controlled Apparatus for Positioning Machine

	Tool".
1952 (Αύγουστος):	Σε απάντηση, το MIT κατέθεσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το "Servo-System Αριθμητικού Ελέγχου.
1955	Η Concord Controls (που δημιουργήθηκε από μέλη της αρχικής ομάδας του MIT) δημιουργεί το Numericord, το οποίο αντικαθιστά την ταινία διάτρησης στο μηχάνημα MIT NC με έναν αναγνώστη μαγνητικής ταινίας.
1958	Ο Parsons λαμβάνει το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ΗΠΑ 2.820.187 και πουλά μια αποκλειστική άδεια χρήσης στην Bendix. Η IBM, η Fujitsu και η GE λαμβάνουν όλες τις δευτερεύουσες άδειες αφού έχουν ήδη ξεκινήσει την ανάπτυξη των δικών τους μηχανών.
1958	Το MIT δημοσιεύει έκθεση για τα οικονομικά του NC, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η τρέχουσα ενσάρκωση δεν εξοικονομεί πραγματικά χρόνο, αλλά αντ' αυτού μετατοπίζει την εργασία σε αυτούς που δημιουργούν τις ταινίες διάτρησης.

Πίνακας 1: Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των NC μηχανών



Εικόνα 4 Cincinnati Milling Machine Company Hydro-Tel.¹

2.2 Τύποι CNC εργαλειομηχανών

Οι CNC εργαλειομηχανές μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, που είναι οι μηχανές κοπής και οι μηχανές διαμόρφωσης. Οι πρώτες είναι εργαλειομηχανές οι οποίες κατεργάζονται το κομμάτι αφαιρώντας υλικό, ενώ οι δεύτερες κατεργάζονται το κομμάτι χωρίς να πειράζουν καθόλου τη μάζα του. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι μηχανές κοπής είναι οι τόννοι και οι φρέζες ενώ μηχανές διαμόρφωσης είναι οι πρέσες και οι στράτζες [37], [38].

Οι φρέζες αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες εργαλειομηχανές και έχουν τρεις άξονες, X, Y και Z. Το κομμάτι που τοποθετείται σε μία φρέζα είναι πάντα σταθερό, στερεωμένο στην τράπεζα της μηχανής. Το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται, κινείται πάνω – κάτω ή μέσα – έξω σε μερικές μηχανές, αλλά δεν μπορεί να ακολουθήσει τη διαδρομή κοπής, αντ' αυτού κινείται η τράπεζα. Αποτελούν απλές μηχανές και συγκριτικά με άλλες εργαλειομηχανές η δύναμή τους δεν είναι πολύ μεγάλη. Οι φρέζες διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες με βάση των εξής χαρακτηριστικά [56]:

- Τον αριθμό αξόνων: τρεις ή και περισσότερους
- Την διεύθυνση των αξόνων: κατακόρυφα ή οριζόντια
- Την ύπαρξη ή όχι μηχανισμού αλλαγής εργαλείου.

Οι φρέζες όπου η κίνηση της ατράκτου είναι πάνω και κάτω, κατηγοριοποιούνται ως κατακόρυφες (vertical) ενώ όταν η κίνηση είναι μέσα - έξω κατηγοριοποιούνται ως οριζόντιες (horizontal) [37]. Όταν οι φρέζες και τα κέντρα κατεργασίας πέρα από τους τρεις άξονες X, Y, Z διαθέτουν και τέταρτο ή πέμπτο άξονα γίνονται πιο "ευέλικτες".

Μια CNC εργαλειομηχανή είναι εξοπλισμένη με ένα υπολογιστικό αριθμητικό σύστημα ελέγχου. Ουσιαστικά η φρέζα είναι το σώμα και η μονάδα ελέγχου είναι ο εγκέφαλος και το νευρικό σύστημα της εργαλειομηχανής. Η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, η κίνηση των αξόνων και εκατοντάδες άλλες διεργασίες προγραμματίζονται από έναν προγραμματιστή CNC και χειρίζονται από έναν υπολογιστή, ο οποίος είναι αναπόσπαστο κομμάτι της μονάδας [39].

3. Κέντρα κατεργασίας: τριών αξόνων και πέντε αξόνων.

Ο σχεδιασμός συσκευών σε επίπεδο ερευνητικών εργαστηρίων συνεχίζει να προχωρά. Κάθε φορά, πρωτότυπα μηχανήματα σχεδιάζονται και αναπτύσσονται συνεχώς [40], [41], [42]. Οι μηχανές CNC (Computer Numerical Control) δεν έχουν εξαιρεθεί από αυτήν την εξέλιξη. Αυτά τα μηχανήματα μπορούν να εκτελέσουν αυτόματα πολλές εργασίες σε διάφορους τομείς δραστηριότητας, όπως στη χάραξη και διάτρηση τυπωμένων κυκλωμάτων, στην παραγωγή μικρών μηχανικών εξαρτημάτων, στον εντοπισμό και την κοπή των διαφόρων εξαρτημάτων των μοντέλων κλίμακας και πολλά άλλα [43].

Ένας αυξανόμενος αριθμός κατασκευαστών μοντέλων, ηλεκτρονικών μηχανικών και άλλων χρησιμοποιούν ψηφιακά ελεγχόμενες εργαλειομηχανές. Οι περισσότερες μηχανές CNC έχουν τρεις άξονες, αλλά υπάρχουν και μοντέλα με τέσσερις ή και πέντε άξονες. Τα μοντέλα τριών αξόνων είναι συχνά επαρκή στην πλειονότητα των εφαρμογών. Σήμερα, οι μηχανές υπολογιστικού αριθμητικού ελέγχου (CNC) επιτρέπουν μεγάλη ευελιξία στη βιομηχανική παραγωγή και τα τελευταία χρόνια ο έλεγχος των ηλεκτρικών μηχανών έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, χάρη στην τεχνολογική επανάσταση και την επιστήμη των υπολογιστών [44].

Όσον αφορά στα μηχανήματα κατεργασίας 5 αξόνων, έχουν τεράστιες δυνατότητες στα μεγέθη των εξαρτημάτων και τα σχήματα που μπορούν να κατεργαστούν. Η έκφραση "5-άξονες" δηλώνει την ποσότητα των αξόνων μέσα στον οποίο το εργαλείο ή το εργοτεμάχιο θα κινηθεί. Στο χώρο μηχανικής κατεργασίας 5 αξόνων, το εργαλείο κινείται πάνω από τους άξονες X, Y και Z και το ίδιο ή το εργοτεμάχιο μπορεί να γυρίζει στον άξονα 4° (A ή B) και 5° (C) για να πραγματοποιηθεί η οποιαδήποτε κίνηση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Με άλλα λόγια, με τους 5 άξονες μπορεί το μηχάνημα να επεξεργαστεί τις 5 πλευρές μιας περιοχής, όταν αυτό απαιτείται. Τα προγράμματα (CAD - CAM) δίνουν τη δυνατότητα σχεδιασμού και προγραμματισμού σε εξαιρετικά πολύπλοκες μορφές επιφάνειας [53]. Λόγω του διευρυμένου ενδιαφέροντος για μεγαλύτερη ακρίβεια και μειωμένο χρόνο κατεργασίας, πολλοί ειδικοί έχουν ερευνήσει την επίδραση της γωνίας εισαγωγής του εργαλείου κοπής στην επιφάνεια του εργοτεμαχίου [45]. Παρόμοια έρευνα επεξεργασίας σε διάφορες γωνίες, συμπέραναν ότι η ανακλινόμενη επεξεργασία εντός του εύρους 10-20 μοιρών αποτελεί την ιδανική τεχνική μηχανικής κατεργασίας [46], [47].

Με την ανάπτυξη και την εφαρμογή εργαλειομηχανών CNC έχει επιτευχθεί μεγάλη πρόοδος, με αποτελεσματικότητα στην προετοιμασία, οργάνωση και απόδοση της παραγωγής. Οι εργαλειομηχανές CNC ελέγχονται από μονάδα υπολογιστή που τοποθετείται στο μηχάνημα. Καθώς η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει έναν υπολογιστή, τα προγράμματα μπορούν να αποθηκευτούν, να τροποποιηθούν και να αναβαθμιστούν, και τα αποτελέσματα αυτής της παρέμβασης μπορεί να προσομοιώνονται και να επαληθεύονται άμεσα στο μηχάνημα, πριν ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής.

Η εργαλειομηχανή CNC προγραμματίζεται μέσω υπολογιστή και το πρόγραμμα μεταφέρεται συχνότερα με USB συσκευή αποθήκευσης ή μέσω δικτύου υπολογιστών. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα απευθείας προγραμματισμού του μηχανήματος χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο και την οθόνη. Η δομή της μηχανής CNC αποτελείται από τα ακόλουθα συστήματα: μηχανικό σύστημα, σύστημα

κίνησης, σύστημα μέτρησης και σύστημα ελέγχου. Η σπονδυλωτή προσέγγιση είναι το θεμέλιο του σχεδιασμού στις σύγχρονες εργαλειομηχανές. Οι ενότητες είναι συστατικά μέρη της εργαλειομηχανής. Οι κινηματικές μονάδες – μια ενότητα της βασικής κίνησης (μονάδα της κύριας ατράκτου) και μια ενότητα της γραμμικής κίνησης των αξόνων στη κατεύθυνση των συντεταγμένων NC παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο. Αυτές οι δύο ενότητες επιτρέπουν την υλοποίηση της βασικής λειτουργίας της εργαλειομηχανής, δηλαδή την σχετική κίνηση μεταξύ των εργαλείων και του τεμαχίου εργασίας και την υλοποίηση της διαδικασίας. Στις κινηματικές μονάδες τα λειτουργικά συστήματα είναι ενσωματωμένα: συστήματα μετάδοσης κίνησης, το σύστημα οδήγησης καθώς και συστήματα μέτρησης για κυκλική και γραμμική κίνηση. Τα περισσότερα από τα λειτουργικά συστήματα βρίσκονται έτοιμα προς πώληση και μπορούν να προσαρμοστούν γρήγορα, με κάποια τροποποίηση, στις απαιτήσεις του προβλεπόμενου συστήματος μηχανικής κατεργασίας. Σερβοκινητήρες με περιστροφική κίνηση με επακριβώς καθορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη γραμμικής κίνησης. Η μονάδα της ατράκτου αποτελείται από πολλά βασικά λειτουργικά μέρη: περίβλημα, άξονας, ρουλεμάν, ηλεκτροκινητήρας, σύστημα για εργαλεία σύσφιξης και απελευθέρωσης και εσωτερικό σύστημα ψύξης [48].

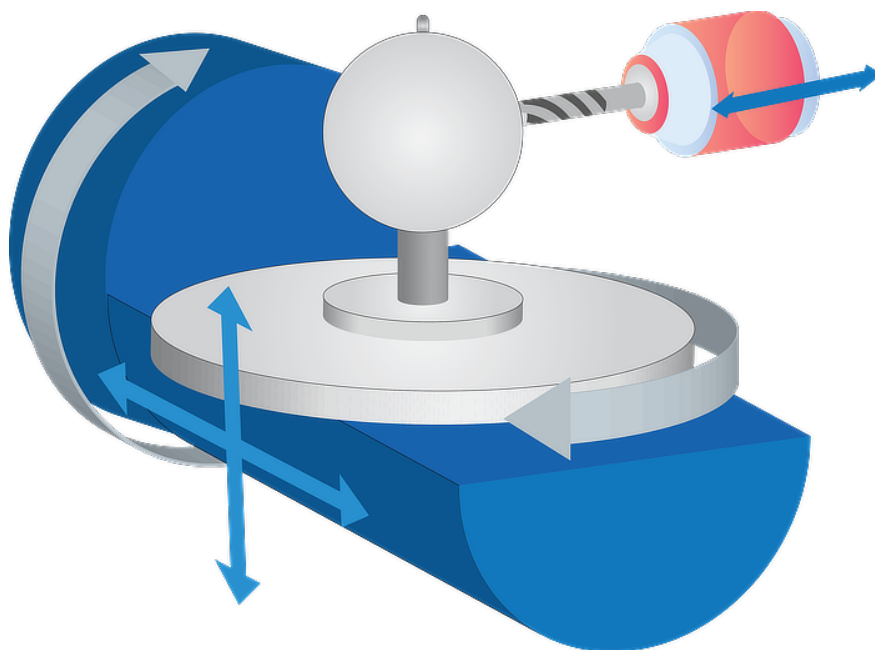
Η τεχνολογική καινοτομία της κατεργασίας CNC πέντε αξόνων έχει προσελκύσει όλο και περισσότερη προσοχή τα τελευταία χρόνια [49]. Τα ενσωματωμένα πτερύγια μιας πτερωτής συνήθως σχηματίζονται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής, CNC πέντε αξόνων. Η κατεργασία αυτή είναι μια από τις πιο προηγμένες μεθόδους για εξαρτήματα με ελεύθερες καμπύλες στις επιφάνειες [50].

Ο σχεδιασμός διαδρομής κοπής (toolpath) είναι ένα κρίσιμο βήμα στην κατεργασία σύνθετων επιφανειών όπως αυτές είναι των πτερωτών, η οποία έχει διερευνηθεί εκτενώς. Ο Ζου το έτος 2015, μελέτησε τον σχεδιασμό διαδρομής κοπής της πτερωτής κατά την κατεργασία πέντε αξόνων με βάση την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων, και διαπίστωσε ότι η ποιότητα φινιρίσματος της επιφάνειας βελτιώθηκε σημαντικά [51]. Ο Li το έτος 2012, μελέτησε τη δημιουργία διαδρομής κοπής του φινιρίσματος με βάση το ίσο ύψος υπολειμμάτων, τη γωνία θέσης κοπής και τον αλγόριθμο διαστήματος διαδρομής [52]. Αντίστοιχα ο Wang το έτος 2014, ανέπτυξε ειδική μονάδα προγραμματισμού που θα μπορούσε να δημιουργήσει αυτόματα διαδρομή κοπής και να πραγματοποιήσει προγραμματισμό με τη βοήθεια υπολογιστή [54]. Ο Lim το έτος (2009) βελτιστοποίησε τις ενσωματωμένες παραμέτρους πρόχειρης κοπής σε πενταξονική κατεργασία, με τη μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης για τη σημαντική βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής [49]. Γίνεται σαφές από τα παραπάνω ότι πολλοί μελετητές, έχουν διερευνήσει τη δημιουργία διαδρομής κοπής από διαφορετικές γωνίες και έχουν βρει ευεργετικές αναφορές για τον σχεδιασμό διαδρομής εργαλείου σε σύνθετες επιφάνειες.

Έτσι λοιπόν σήμερα, υπάρχουν πολλές επιλογές όσον αφορά τη μηχανική κατεργασία πολλαπλών αξόνων, από κατεργασία 3 αξόνων σε 5 άξονες έως και 9 άξονες. Αφού ο χειριστής εισαγάγει οδηγίες φρεζαρίσματος σε έναν υπολογιστή, το μηχάνημα CNC 3 αξόνων θα ολοκληρώσει αυτόματα την εργασία χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο για την κοπή κατά μήκος τριών αξόνων — X, Y και Z, ή από αριστερά προς τα δεξιά, από μπροστά προς τα πίσω, και πάνω-κάτω. Τόσο το φρεζάρισμα όσο και η περιστροφή των εργαλείου εμπίπτουν στην ομπρέλα της κατεργασίας 3 αξόνων. Ωστόσο, λειτουργούν ελαφρώς διαφορετικά. Όταν χρησιμοποιείτε φρέζα CNC 3 αξόνων, το εργοτεμάχιο παραμένει στερεωμένο στο τραπέζι και τα περιστρεφόμενα

εργαλεια κοπής (τρυπάνια, κοντύλια, φρεζοκεφαλές κλπ.) συνδέονται σε έναν άξονα και κινούνται κατά μήκος των αξόνων X, Y και Z, αφαιρώντας τα ρινίσματα για να σχηματίσουν με ακρίβεια το τελικό εξάρτημα. Οι φρέζες CNC 3 αξόνων είναι εξαιρετικές για την παραγωγή των περισσότερων γεωμετριών και απλών εξαρτημάτων.

Δεδομένου ότι ένα μηχάνημα CNC 3 αξόνων μπορεί να κόψει μόνο κατά μήκος τριών αξόνων, μπορεί να αντιμετωπίσει μη συμβατικά σχήματα ή σχέδια με βαθιές, στενές κοιλότητες που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν. Κατά την επεξεργασία εξαρτημάτων με πολύπλοκες γεωμετρίες, οι χειριστές μπορεί να χρειαστεί να επανατοποθετήσουν χειροκίνητα το τεμάχιο εργασίας, γεγονός που μπορεί να επιβραδύνει την ταχύτητα επεξεργασίας, να αυξήσει τα έξοδα εργασίας και κατεργασίας και να οδηγήσει σε ένα λιγότερο ακριβές τελικό προϊόν. Αντίθετα, οι μηχανές 5 αξόνων βασίζονται σε ένα εργαλείο που κινείται προς πέντε διαφορετικές κατευθύνσεις — X, Y και Z, καθώς και A ή B και C, γύρω από το οποίο περιστρέφεται το εργαλείο. Η χρήση μιας μηχανής CNC 5 αξόνων επιτρέπει στους χειριστές να προσεγγίσουν ένα εξάρτημα από όλες τις κατευθύνσεις σε μία μόνο λειτουργία, εξοικονομώντας την ανάγκη χειροκίνητης επανατοποθέτησης του τεμαχίου εργασίας μεταξύ των λειτουργιών. Η μηχανική κατεργασία CNC 5 αξόνων εξοικονομεί χρόνο και είναι ιδανική για τη δημιουργία πολύπλοκων και ακριβών εξαρτημάτων όπως αυτά που υπάρχουν στην ιατρική, τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου και την αεροδιαστημική βιομηχανία.



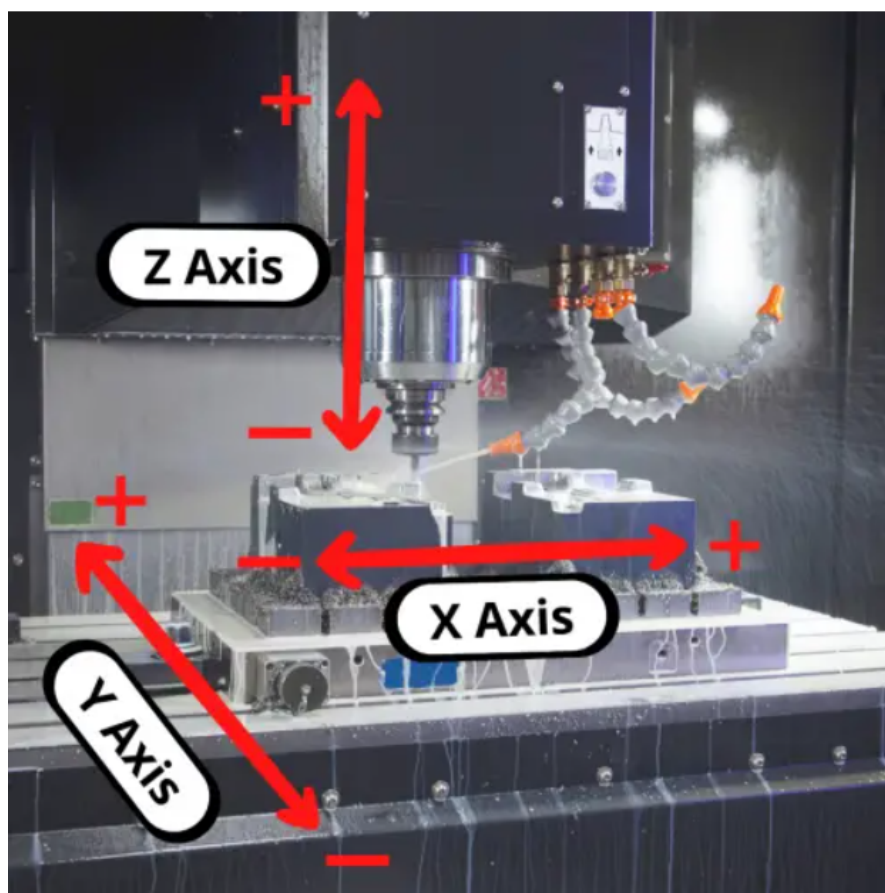
Εικόνα 5 . Κίνηση 5 αξόνων⁴

Στη συνεχή κατεργασία CNC 5 αξόνων, το εργαλείο κοπής και το τεμάχιο εργασίας μπορούν να περιστρέφονται και να κινούνται ταυτόχρονα κατά τη λειτουργία, εξοικονομώντας χρόνο και επιτρέποντας στους χειριστές να

⁴ <https://www.weerg.com/guides/what-is-5-axis-machining>

κατασκευάζουν περίπλοκες γεωμετρίες με σύνθετες επιφάνειες. Η συνεχής κατεργασία CNC 5 αξόνων προσφέρει βελτιωμένο φινίρισμα επιφάνειας, ταχύτητα και σταθερότητα διαστάσεων, αλλά έχει και το υψηλότερο κόστος ανά εξάρτημα.

Στις κάθετες φρέζες 3 αξόνων και 5 αξόνων υπάρχουν διάφορες κινηματικές αλυσίδες ανάλογα την κατασκευή τους. Στις πρώτες συνήθως το τραπέζι και κατά συνέπεια το εργοτεμάχιο κινείται αριστερά - δεξιά ως X άξονας και μπρος – πίσω ως Y άξονας. Η άτρακτος που φέρει το εργαλείο κοπής πραγματοποιεί την πάνω – κάτω κίνηση ως Z άξονας κάθετα ως προς το τραπέζι.



Εικόνα 6: CNC φρέζα με X & Y άξονες στο τραπέζι και Z άξονα στην άτρακτο⁵

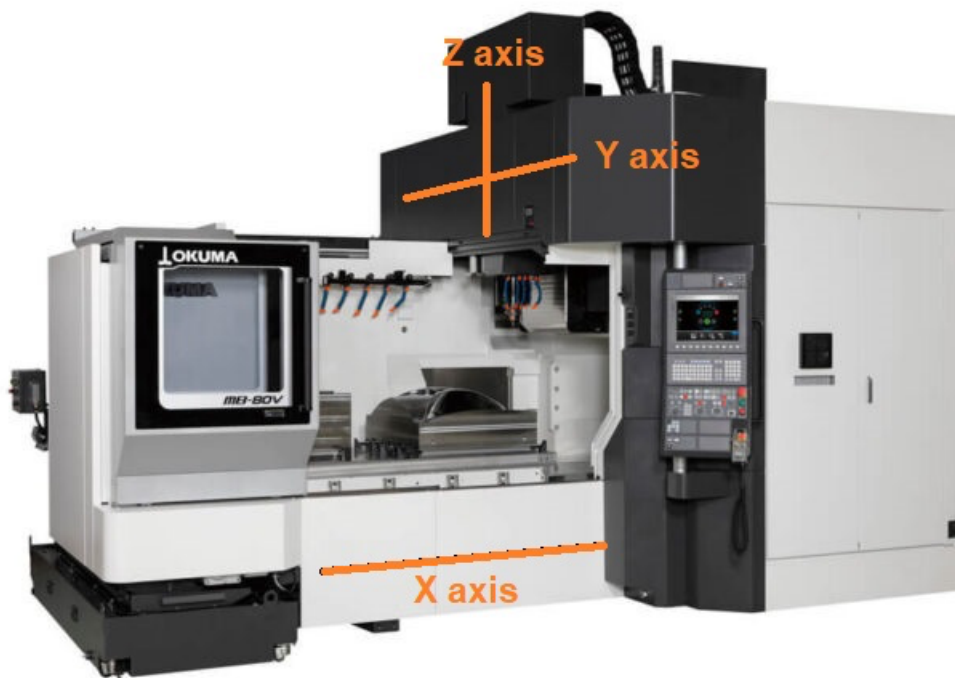
Βέβαια υπάρχουν κατασκευές με διαφορετικές κινηματικές αλυσίδες οι οποίες αναλύονται παρακάτω διατηρώντας βέβαια τον ίδιο προσανατολισμό:

- X άξονας και Z άξονας στην άτρακτο και Y άξονας στο τραπέζι.
- Y άξονας και Z άξονας στην άτρακτο και X άξονας στο τραπέζι.
- X άξονας, Y άξονας και Z άξονας στην άτρακτο και το τραπέζι σταθερό.

⁵ https://www.machinistguides.com/xyz-codes/#google_vignette



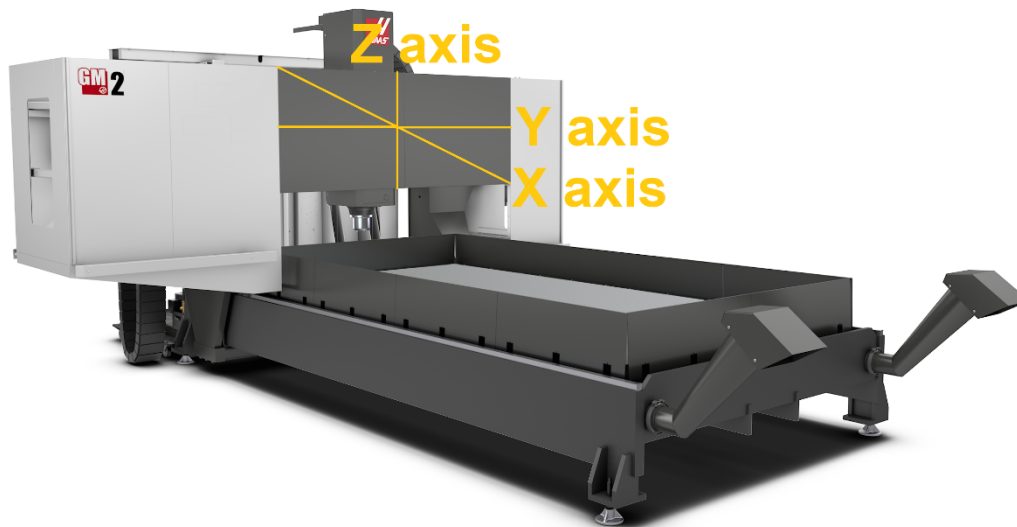
Εικόνα 7: CNC φρέζα με Z & X άξονες στην άτρακτο και Y άξονα στο τραπέζι⁶



Εικόνα 8: CNC φρέζα με Z & Y άξονες στην άτρακτο και X άξονα στο τραπέζι⁷

⁶ <https://www.okuma.co.jp/english/product/vmc/genosm.html>

⁷ <https://www.okuma.com/blog/what-is-a-bridge-mill>

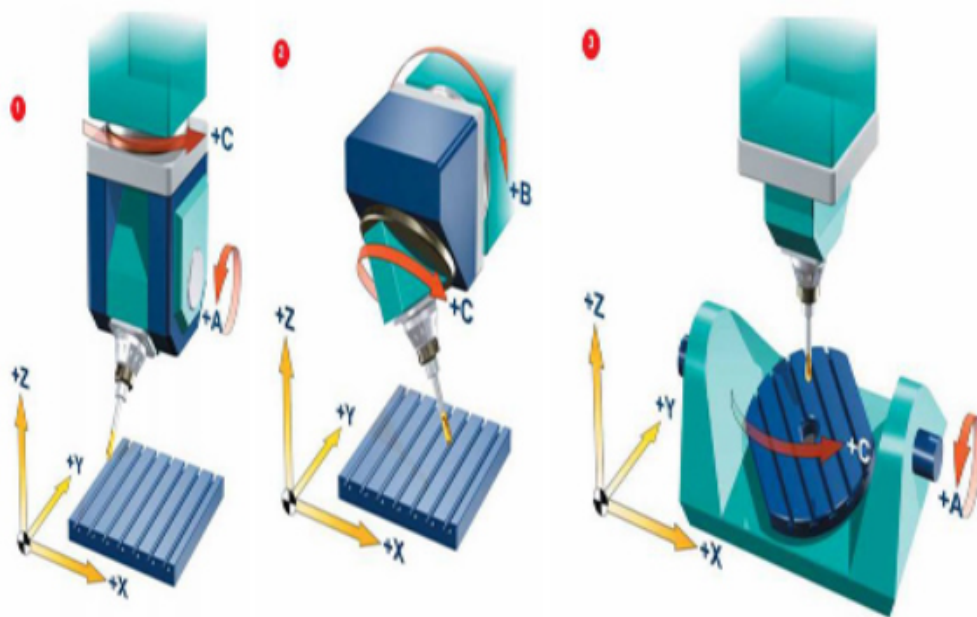


Εικόνα 9: CNC φρέζα με X & Y & Z άξονες στην άτρακτο⁸

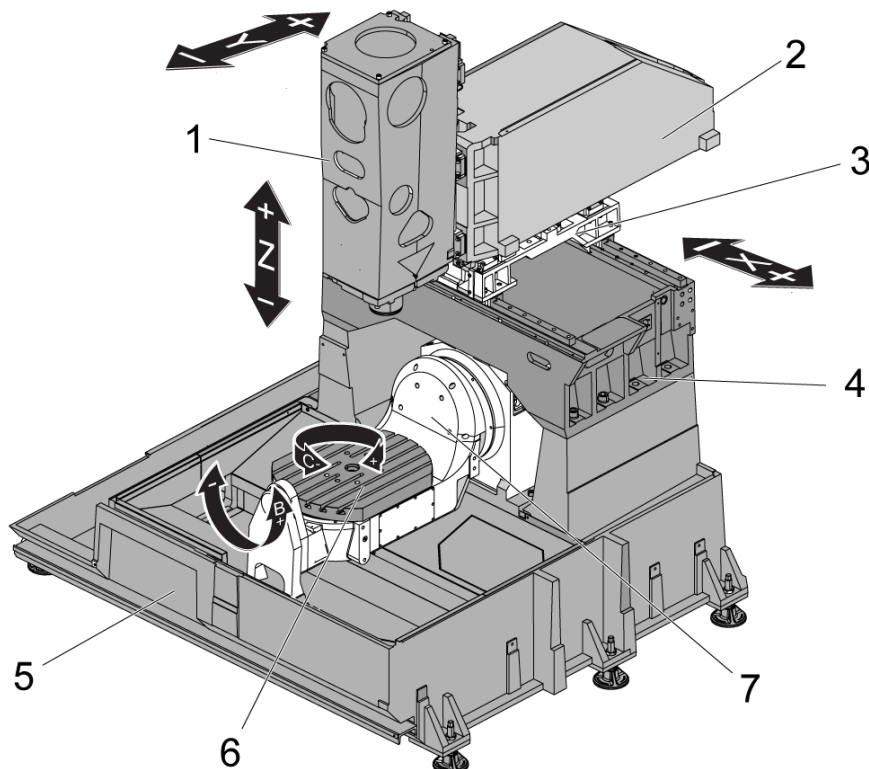
Στις φρέζες πέντε αξόνων οι κινηματικές αλυσίδες παραμένουν παρόμοιες με αυτές των τριών αξόνων προσθέτοντας τους δυο επιπλέον άξονες. Η κατασκευή του μηχανήματος είναι αυτή που θα δώσει τη μορφή της κινηματικής αλυσίδας αλλά και την ονομασία των δυο επιπλέον αξόνων. Με άλλα λόγια αν η μηχανή κατασκευαστεί και το κέντρο περιστροφής του τέταρτου άξονα είναι παράλληλο με τον X άξονα τότε αυτός ο άξονας θα ονομαστεί A. Σε διαφορετική περίπτωση αν το κέντρο του τέταρτου άξονα είναι παράλληλο με τον Y άξονα θα ονομαστεί B. Ο πέμπτος άξονας ονομάζεται C. Οι κινηματικές αλυσίδες που προκύπτουν είναι ποικίλες αλλά πάντα με τον ίδιο προσανατολισμό. Κάποιες από αυτές είναι οι παρακάτω:

- A άξονας και C άξονας στο τραπέζι και X & Y & Z άξονες στην άτρακτο.
- B άξονας και C άξονας στο τραπέζι και X & Y & Z άξονες στην άτρακτο.
- Y & A & C άξονες στο τραπέζι και X & Z άξονες στην άτρακτο.
- X & Y & C άξονες στο τραπέζι και B & Z άξονες στην άτρακτο.
- X & Y & A & C άξονες στο τραπέζι και Z άξονας στην άτρακτο.

⁸ <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/gantry/models/gm-2.html>

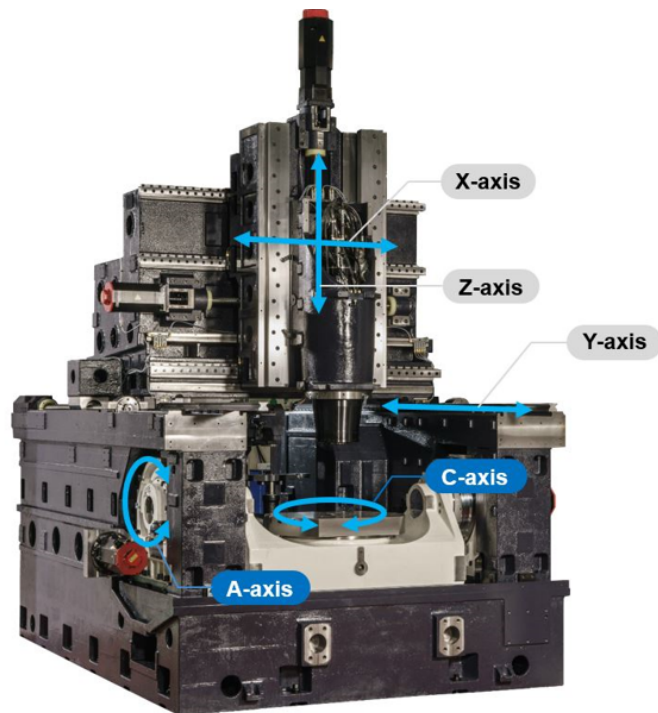


Εικόνα 10: Διάφορες κινηματικές αλυσίδες ανάλογα την κατασκευή.⁹

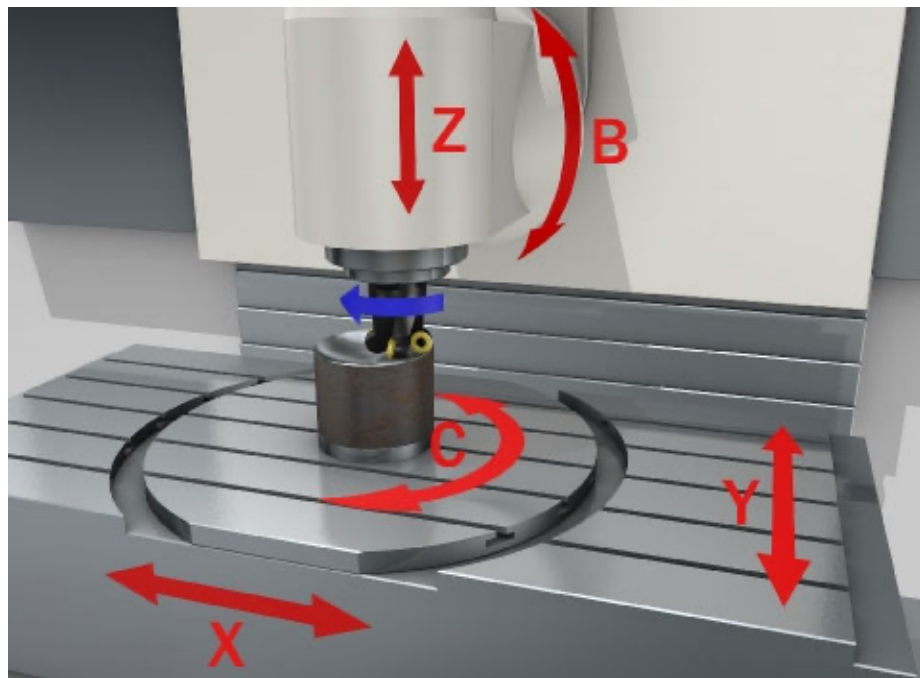


Εικόνα 11: B άξονας και C άξονας στο τραπέζι και X & Y & Z άξονες στην άτρακτο.¹⁰

⁹ <https://waykenrm.com/blogs/5-axis-cnc-machining/>



Εικόνα 12: Α άξονας και C άξονας στο τραπέζι και X & Y & Z άξονες στην άτρακτο.¹¹



Εικόνα 13: X & Y & C άξονες στο τραπέζι και B & Z άξονες στην άτρακτο¹²

¹⁰ <https://www.haascnc.com/fr/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/umc-750-ss-geometry-guide.html>

¹¹ <https://hwacheonasia.com/the-essential-guide-to-5-axis-cnc-machining/>

¹² <https://www.sansmachining.com/cnc-machining-3-axis-vs-4-axis-vs-5-axis/>

Συμπερασματικά, η κύρια διαφορά μεταξύ των μηχανών φρεζαρίσματος 3 αξόνων και 5 αξόνων είναι ότι το τεμάχιο εργασίας μπορεί να επεξεργαστεί από τρεις άξονες με τις πρώτες και πέντε άξονες με τις δεύτερες. Και οι δύο είναι εξαιρετικά ευέλικτες, αυτοματοποιημένες και αναπαραγόμενες διαδικασίες παραγωγής που επιτρέπουν τη γρήγορη και οικονομική παραγωγή προϊόντων ακριβείας. Ωστόσο στις περιπτώσεις χαμηλού προϋπολογισμού ή όταν χρειάζεται μόνο κοπή μιας επίπεδης επιφάνειας, τα μηχανήματα 3 αξόνων είναι καλύτερη επιλογή. Εκτός από το ότι είναι πιο προσιτές από εκείνες με πέντε άξονες, οι μηχανές 3 αξόνων είναι πιο απλές στον προγραμματισμό, επομένως δεν θα επιβαρύνεται με το κόστος εργασίας με εξειδικευμένους προγραμματιστές και χειριστές. Επιπλέον, ο χρόνος προετοιμασίας είναι μικρότερος με την κατεργασία 3 αξόνων. Όμως εάν πρέπει να δημιουργηθεί ένα βαθύτερο εξάρτημα ή ένα εξάρτημα με πολύπλοκη γεωμετρία, τότε επιλέγεται η κατεργασία 5 αξόνων. Η χρήση μηχανών 5 αξόνων επιτρέπει την επεξεργασία του υλικού εργασίας από όλες τις πλευρές και έτσι δεν απαιτείται χειροκίνητη περιστροφή. Με την κατεργασία 5 αξόνων, επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις, μεγαλύτερη ακρίβεια και αυξημένη ελευθερία κινήσεων¹³.

Από όλα τα παραπάνω, έγινε σαφές ότι υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα με τη χρήση της κατεργασίας CNC 5 αξόνων, με βασικότερο το γεγονός ότι μπορεί να δημιουργεί πολύπλοκα εξαρτήματα ή σχέδια που κάποτε δεν ήταν εφικτό να δημιουργηθούν με αυτόν τον τρόπο. Με τις εργαλειομηχανές 5 αξόνων, εξοικονομείται χρόνος και χρήμα μακροπρόθεσμα λόγω των μεγαλύτερων δυνατοτήτων ακρίβειας. Μερικά άλλα αξιοσημείωτα οφέλη των 5 αξόνων είναι οι μονές ρυθμίσεις, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο ανθρωπογενών σφαλμάτων ευθυγράμμισης που μπορεί να είναι δαπανηρές. Με μία ρύθμιση, μπορεί κάποιος να ξεκινήσει και να ολοκληρώσει τους στόχους μηχανικής επεξεργασίας με τη σιγουριά ότι η πρόληψη σφαλμάτων είναι στο ελάχιστο. Επιπρόσθετα, η κατεργασία 5 αξόνων διαθέτει πιο κοντά εργαλεία κοπής, που επιτρέπουν το χαμήλωμα της κεφαλής και τον καλό προσανατολισμό τους. Αυτό μειώνει δραστικά τους κραδασμούς, μειώνει την πίεση στον ίδιο το εργαλείο και παρέχει ένα πιο κομψό, λείο φινίρισμα στις επιφάνειες.

¹³ <https://www.fastradius.com/resources/3-axis-vs-5-axis-cnc-machining/>

4. Περιπτώσιολογική μελέτη της CNC φρέζας του εργαστηρίου.

Στον εξοπλισμό του εργαστηρίου της μηχανολογίας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής προστέθηκε κατά το έτος 2018 μια κάθετη CNC φρέζα του Αμερικάνικου οίκου HAAS με ονομασία μοντέλου MINI-MILL EDU και serial number 1146919.



Εικόνα 14 : Haas Mini Mill Edu ¹⁴

Τα χαρακτηριστικά της μηχανής αναγράφονται αναλυτικά στον πίνακα 2:

ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ	S.A.E	METRIC
Άξονας X	16.0 in	406 mm
Άξονας Y	12.0 in	305 mm
Άξονας Z	10.0 in	254 mm
Απόσταση ατράκτου έως το τραπέζι (~ μέγ.)	14.0 in	356 mm
Απόσταση ατράκτου έως τραπέζι (~ ελάχ.)	4.0 in	102 mm
ΑΤΡΑΚΤΟΣ	S.A.E	METRIC

¹⁴ <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/mini-mills/models/minimill-edu.html>

Μέγιστη ισχύ λειτουργίας	7.5 hp	5.6 kW
Μέγιστη ταχύτητα	4000 rpm	4000 rpm
Μέγιστη ροπή	33.0 ft-lbf @ 1200 rpm	45.0 Nm @ 1200 rpm
Σύστημα μονάδας οδήγησης	Direct Speed, Belt Drive	Direct Speed, Belt Drive
Κώνος	CT or BT 40	CT or BT 40
ΤΡΑΠΕΖΙ	S.A.E	METRIC
Μήκος	36.0 in	914 mm
Μήκος (περιοχή εργασίας)	28.75 in	730 mm
Πλάτος	12.0 in	305 mm
Πλάτος υποδοχής T	0.626 in to 0.630 in	15.90 mm to 16.00 mm
Απόσταση κέντρου υποδοχής T	4.33 in	110 mm
Αριθμός πρότυπων υποδοχών T	3	3
Μέγιστο βάρος στο τραπέζι (ισοκατανεμημένο)	500 lb	227 kg
ΠΡΟΩΣΕΙΣ	S.A.E	METRIC
Μέγιστη κοπή	300 ipm	7.6 m/min
Ταχείες κινήσεις στον X	300 ipm	7.6 m/min
Ταχείες κινήσεις στον Y	300 ipm	7.6 m/min
Ταχείες κινήσεις στον Z	300 ipm	7.6 m/min
ΜΟΤΕΡ ΑΞΟΝΩΝ	S.A.E	METRIC
Μέγιστη ώση X	2000 lbf	8896 N
Μέγιστη ώση Y	2000 lbf	8896 N
Μέγιστη ώση Z	2000 lbf	8896 N
ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΕΡΑ	S.A.E	METRIC
Απαιτείται αέρας	4 scfm @ 100 psi	113 L/min @ 6.9 bar
ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ	S.A.E	METRIC
Ταχύτητα ατράκτου	4000 rpm	4000 rpm
Σύστημα μονάδας οδήγησης	Direct Speed, Belt Drive	Direct Speed, Belt Drive
Ισχύς ατράκτου	7.5 hp	5.6 kW
Τάση εισόδου AC (μονοφασική)	220 VAC	220 VAC

Ένταση πλήρους φορτίου (μονοφασική)	40 A	40 A
Τάση εισόδου AC (3φασική) - Χαμηλή	220 VAC	220 VAC
Ένταση πλήρους φορτίου (3φασική) - Χαμηλή	25 A	25 A
Input AC Voltage (3 Phase) - High*	440 VAC	440 VAC
Full Load Amps (3 Phase) - High*	13 A	13 A

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Haas Mini Mill Edu¹⁴

Το μοντέλο Haas Mini Mill EDU είναι ένας υψηλής ποιότητας, μικρός και ευέλικτος CNC εργοστασιακός εξοπλισμός, ο οποίος προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα.

Ένα από αυτά είναι η απλότητα χρήσης δηλαδή είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να είναι πολύ εύκολο σε κάποιον να το χρησιμοποιήσει χωρίς προηγούμενη εμπειρία σε μηχανήματα CNC. Επίσης, το Haas Mini Mill EDU διαθέτει λειτουργία εκμάθησης που βοηθά τους χρήστες να εξοικειωθούν με το μηχάνημα.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευελιξία του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή διαφόρων ειδών εξαρτημάτων και προϊόντων, καθώς έχει τη δυνατότητα να κόβει και να διαμορφώνει μεταλλικά εξαρτήματα, πλαστικά, καθώς και άλλα υλικά. Οπότε είναι ιδανικό για τους μικρούς επιχειρηματίες, εκπαιδευτικά ιδρύματα και επιστήμονες, οι οποίοι χρειάζονται μια αξιόπιστη μηχανή CNC.

Εκτός από την ευκολία χρήσης, το Haas Mini Mill Edu είναι επίσης γνωστό για την αντοχή και την αξιοπιστία του. Η μηχανή κατασκευάζεται με υψηλής ποιότητας εξαρτήματα και είναι σχεδιασμένη για να αντέχει στις απαιτήσεις της καθημερινής χρήσης σε μια αίθουσα μαθημάτων.

Επιπλέον, η μηχανή διαθέτει κλειστό πλαίσιο που την καθιστά μεν ασφαλή και όπως προαναφέρθηκε με εύκολη χρήση για τους μαθητές και τους εκπαιδευτικούς. Αξιοσημείωτο δε είναι ότι η μηχανή είναι πολύ αξιόπιστη και ανθεκτική και για έναν άλλο λόγο που σχετίζεται με την υψηλή ποιότητα κατασκευή της από τη Haas Automation. Τέλος, η μηχανή είναι πολύ προσιτή οικονομικά σε σχέση με άλλες παρόμοιες μηχανές CNC που χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση, όποτε την καθιστά ιδανική επιλογή για σχολεία και εκπαιδευτικά ιδρύματα με περιορισμένο προϋπολογισμό.

Συνολικά, το Haas Mini Mill EDU είναι μια εξαιρετική επιλογή για την εκπαίδευση μαθητών στον τομέα της CNC μηχανικής. Με τις προηγμένες δυνατότητές του την ασφάλεια την αξιοπιστία του το μηχάνημα αυτό μπορεί να βοηθήσει τους μαθητές να αποκτήσουν τις απαραίτητες δεξιότητες και γνώσεις για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του μελλοντικού τους επαγγέλματος.

Παρόλα αυτά δυστυχώς δεν μπορεί να θεωρηθεί μηχάνημα υψηλής παραγωγικότητας λόγω βασικών μειονεκτημάτων τα οποία είναι:

1) Η έλλειψη συστήματος αυτόματης αλλαγής εργαλείων σημαίνει ότι ο χειριστής πρέπει να αλλάξει τα εργαλεία με το χέρι. Το γεγονός αυτό αυξάνει τον χρόνο αλλαγής εργαλείων και μειώνει τον χρόνο παραγωγής, καθώς ο χρόνος αλλαγής εργαλείων προστίθεται στον συνολικό χρόνο παραγωγής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά εργαλεία για την κατεργασία του εργοτεμαχίου.

2) Η έλλειψη συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα της μηχανής. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, οι εργαλειομηχανές παράγουν θερμότητα λόγω της τριβής και της κοπής του υλικού. Αν δεν υπάρχει σύστημα ψύξης για να απομακρύνει αυτήν τη θερμότητα, το εργαλείο μπορεί να υπερθερμανθεί, προκαλώντας φθορά και μείωση της διάρκειας ζωής του. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες θα χρειαστεί να αντικαταστήσουν τα εργαλεία πιο συχνά, μειώνοντας τον χρόνο παραγωγικής λειτουργίας της μηχανής. Επιπλέον, η υπερθέρμανση των εργαλείων μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της επεξεργασίας και να αυξήσει την πιθανότητα αποτυχίας ή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων.

Εν κατακλείδι, η έλλειψη συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής μπορεί να περιορίσει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα της μηχανής, επηρεάζοντας τη συνολική παραγωγικότητα της.

3) Οι μέγιστες στροφές της ατράκτου, που είναι μόνο 4000 rpm, επηρεάζουν σημαντικά την παραγωγικότητα της μηχανής. Οι υψηλότερες στροφές επιτρέπουν στη μηχανή να επεξεργαστεί το υλικό με μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη παραγωγικότητα και μείωση του χρόνου κατεργασίας. Αντίθετα, οι περιορισμένες στροφές της ατράκτου σημαίνουν ότι η μηχανή θα επεξεργάζεται το υλικό με χαμηλότερη ταχύτητα κοπής, περιορίζοντας έτσι την παραγωγικότητα. Αυτό σημαίνει ότι η μηχανή θα χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να ολοκληρώσει μια εργασία, μειώνοντας τη συνολική απόδοση και αυξάνοντας τον χρόνο παραγωγής. Συνεπώς, οι περιορισμένες μέγιστες στροφές της ατράκτου στο Haas Mini Mill Edu επηρεάζουν την παραγωγικότητα της μηχανής, περιορίζοντας την αποδοτικότητα και την ταχύτητα κατεργασίας.

4) Λόγω ότι η μηχανή είναι τριών αξόνων υπάρχει μεγάλος περιορισμός κατεργασίας κομματιών που απαιτούν επεξεργασία σε όλες τις πλευρές επηρεάζοντας σημαντικά την παραγωγικότητα της μηχανής. Κατά την επεξεργασία τέτοιων κομματιών, απαιτείται η αλλαγή της θέσης του κομματιού ή της θέσης του εργαλείου για την πρόσβαση σε διάφορες πλευρές του. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης πρέπει να αντιμετωπίσει την ανάγκη για χειροκίνητη παρέμβαση, αφαίρεση και επανατοποθέτηση του κομματιού ή του εργαλείου κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Αυτό απορροφά χρόνο, προσθέτει στη διάρκεια του κύκλου εργασίας και μειώνει την αυτονομία της μηχανής. Επιπλέον, η ανάγκη για κατεργασία σε όλες τις πλευρές ενός κομματιού μπορεί να απαιτεί επιπλέον σετ αναδιατάξεων και προσαρμογών του εργαλείου, καθώς και πιθανές αλλαγές στην προγραμματιστική λογική. Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει διακοπές στην παραγωγή, αυξάνοντας τον χρόνο παραγωγής ανά κομμάτι και μειώνοντας την συνολική παραγωγικότητα της μηχανής. Επιπλέον, η απαιτούμενη χειροκίνητη παρέμβαση αυξάνει τον κίνδυνο ανθρώπινων λαθών και αυξάνει την πιθανότητα αποτυχίας ή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων.

5. Πρόταση αναβάθμισης

5.1 Αναβάθμιση από τρεις άξονες σε πέντε άξονες

Με βάση των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα εξάγεται το συμπέρασμα, πως η μηχανή Haas Mini Mill Edu μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη ως προς την λειτουργία της αλλά επίσης και χαμηλής παραγωγικότητας λόγω των περιορισμών της, όπως η έλλειψη συστήματος αυτόματης αλλαγής εργαλείων, η έλλειψη συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής, ο χαμηλός αριθμός στροφών της ατράκτου καθώς και οι περιορισμοί που υπάρχουν στις κατεργασίες τριών αξόνων. Ωστόσο, με τις κατάλληλες αναβαθμίσεις, η παραγωγικότητα της μηχανής μπορεί να αυξηθεί σημαντικά.

Η προσθήκη ενός συστήματος αυτόματης αλλαγής εργαλείου σε μια μηχανή, όπως η Haas Mini Mill Edu, μπορεί να αποτελέσει μια ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία. Τέτοια συστήματα περιλαμβάνουν εξειδικευμένα μηχανικά μέρη, αισθητήρες και προγραμματιζόμενα συστήματα ελέγχου, τα οποία αυξάνουν το συνολικό κόστος. Επιπλέον, η εγκατάσταση του συστήματος απαιτεί την προσαρμογή της μηχανής και την ενσωμάτωση νέων συνδέσεων και περιφερειακών μονάδων, κάτι που μπορεί να απαιτήσει πολλές ώρες εργασίας από έμπειρους τεχνικούς.

Η αύξηση των στροφών της ατράκτου σε μια μηχανή, όπως η Haas Mini Mill Edu, μπορεί να είναι μια δαπανηρή και περίπλοκη διαδικασία. Για την αύξηση αυτή απαιτείται η αντικατάσταση της ίδιας της ατράκτου και του ηλεκτροκινητήρα που την κινεί. Κατά συνέπεια δημιουργούνται προϋποθέσεις σημαντικών δαπανών για την αγορά των νέων μηχανικών μερών και την εγκατάστασή τους.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και τους περιορισμούς που αντικειμενικά υπάρχουν, δεν είναι προσιτό να γίνει προσθήκη του συστήματος αυτόματης αλλαγής εργαλείων και αύξηση των στροφών της ατράκτου στην αναβάθμιση που είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί. Οι δαπανηρές και χρονοβόρες αλλαγές που απαιτούνται για την εφαρμογή αυτών των αναβαθμίσεων, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο προϋπολογισμό και τον περιορισμένο χρόνο, καθιστούν αυτές τις επιλογές μη βιώσιμες. Επομένως, θα πρέπει οι επιλογές αναβάθμισης να είναι πιο φιλικές προς τον προϋπολογισμό και να μπορούν να επιτύχουν βελτιώσεις στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα της μηχανής.

Η τοποθέτηση ενός ανακλινόμενου περιστροφικού διαξονικού τραπεζιού θα μετατρέψει τη μηχανή μας σε πενταξονική. Αυτή η αναβάθμιση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα και επεκτείνει τις δυνατότητες της μηχανής .

Με την προσθήκη του ανακλινόμενου περιστροφικού διαξονικού τραπεζιού, δίνεται η δυνατότητα να εκτελεστούν εργασίες σε πολλαπλές γωνίες και να περιστραφεί το κομμάτι γύρω από διάφορους άξονες. Επίσης με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιείται επεξεργασία σε κομμάτια με περίπλοκα σχήματα και γεωμετρίες, επιτυγχάνοντας έτσι ακριβείς κοπές και τρύπες σε όλες τις πλευρές τους. Μετατρέποντας τη μηχανή σε πενταξονική, αυξάνεται η ευελιξία και η ακρίβεια των εργασιών. Συνεπώς μπορεί να επιτευχθεί μείωση του χρόνου επεξεργασίας σε συνδυασμό με την αύξηση της παραγωγικότητας και τη βελτιωμένη ποιότητα των τελικών προϊόντων.

Στο πλαίσιο του σχεδιασμού αναβάθμισης της μηχανής, γίνεται συνδυαστικά και η εγκατάσταση του Haas TRT70, που είναι ένα ανακλινόμενο περιστροφικό διαξονικό τραπέζι, με τις λειτουργίες που προαναφέρθηκαν. Η προσθήκη του θα προσφέρει στη μηχανή ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητες.

Αναλυτικότερα τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναγράφονται στον πίνακα 3:

ΠΛΑΤΟ	S.A.E	ΜΕΤΡΙΚΟ
Διάμετρος πλατού	2,76 in	70 mm
Μέγιστο βάρος πάνω στο πλατό	3 lb	1.4 kg
Μέγιστο μήκος κομματιού.	4,0 in	102 mm
Μεγαλύτερο κομμάτι για πενταξονική κατεργασία	Ø 1 in x 1 in x 1 lb	Ø 25.4 mm x 25.4 mm x 0.5 kg
ΑΤΤΡΑΚΤΟΣ - A (ΚΟΥΝΙΑΣ)	S.A.E	ΜΕΤΡΙΚΟ
Μέγιστη ταχύτητα.	410 °/sec	410 °/sec
Μέγιστη ροπή.	60 ft-lbf	81 Nm
Σχέση μετάδοσης	60:1	60:1
ΑΤΤΡΑΚΤΟΣ - C (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ)	S.A.E	ΜΕΤΡΙΚΟ
Μέγιστη ταχύτητα.	410 °/sec	410 °/sec
Μέγιστη ροπή.	40 ft-lbf	54 Nm
Σχέση μετάδοσης	40:1	40:1
ΚΙΝΗΣΕΙΣ - A (ΚΟΥΝΙΑΣ)	S.A.E	ΜΕΤΡΙΚΟ
Διαδρομή	120 ° to 35- °	120 ° to 35- °
Ανάλυση	0.001 °	0.001 °
Ακρίβεια (±)	± 30 arc-sec	± 30 arc-sec
Επαναληψιμότητα	10 arc-sec	10 arc-sec
ΚΙΝΗΣΕΙΣ - C (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ)	S.A.E	ΜΕΤΡΙΚΟ
Διαδρομή	360 °	360 °
Ανάλυση	0.001 °	0.001 °
Ακρίβεια (±)	± 60 arc-sec	± 60 arc-sec
Επαναληψιμότητα	10 arc-sec	10 arc-sec
ΒΑΡΟΣ	105 lb	48.0 kg



Εικόνα 15: Haas TRT70¹⁵

Επιπλέον, η προσθήκη του Haas TRT70 θα αναβαθμίσει σημαντικά τις εκπαιδευτικές ικανότητες. Με τη δυνατότητα πενταξονικής επεξεργασίας, οι φοιτητές θα έχουν την ευκαιρία να εξασκηθούν σε πιο προηγμένες και πολύπλοκες τεχνικές κοπής και φρεζαρίσματος. Αυτό θα τους επιτρέψει να αναπτύξουν τις δεξιότητές τους στον τομέα της μηχανουργίας και να αποκτήσουν πρακτική εμπειρία με πιο προηγμένες εργασίες.

Επιπλέον, η πενταξονική λειτουργία του TRT70 θα επιτρέψει στους εκπαιδευόμενους να αναπτύξουν περισσότερο την κριτική σκέψη και τη δημιουργικότητά τους, επιλύοντας προβλήματα και προσαρμόζοντας τις εργασίες σε πιο περίπλοκες γεωμετρίες. Αυτό θα τους παράσχει ένα πλούσιο πεδίο για εξερεύνηση και ανάπτυξη των δεξιοτήτων τους.

Με την ενίσχυση των εκπαιδευτικών ικανοτήτων που προσφέρει το Haas TRT70, οι μαθητές θα αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στον τομέα της μηχανουργίας και θα είναι καλύτερα προετοιμασμένοι για την εισαγωγή τους στην επαγγελματική σφαίρα. Η απόκτηση εμπειρίας με πιο προηγμένες τεχνολογίες και

¹⁵<https://www.haascnc.com/machines/rotaries-indexers/5-axis-rotaries/models/trt70.html>

διαδικασίες θα τους επιτρέψει να είναι ευέλικτοι και να ανταποκρίνονται άμεσα στις απαιτήσεις της βιομηχανίας.

5.2 Προσθήκη συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής.

Μια αναγκαία αναβάθμιση για την αύξηση της παραγωγικής ικανότητας της CNC φρέζας του εργαστηρίου μας είναι η προσθήκη συστήματος ψύξης των εργαλείων κοπής. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, τα εργαλεία κοπής δημιουργούν θερμότητα που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοσή τους και τη διάρκεια ζωής τους. Η υπερβολική θερμότητα μπορεί να οδηγήσει σε φθορά, απώλεια ακρίβειας και μειωμένη παραγωγικότητα.

Με την τοποθέτηση ενός συστήματος ψύξης, το οποίο μπορεί να είναι βασισμένο σε αέρα ή υγρό ψυκτικό μέσο (σαπουνέλαιο), υπάρχει η δυνατότητα να απομακρυνθεί η θερμότητα από το εργαλείο και το εργοτεμάχιο κατά τη διάρκεια της κοπής. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, μειώνοντας τη φθορά και την τριβή, και συνεπώς αυξάνει την απόδοση του εργαλείου και τη διάρκεια ζωής του.

Επιπλέον, το σύστημα ψύξης εργαλείων βοηθάει στη διατήρηση της ακρίβειας της μηχανής, καθώς μειώνει την επίδραση της θερμότητας στην επιφάνεια εργασίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για απαιτητικές εργασίες που απαιτούν υψηλή ακρίβεια.

Αναλυτικότερα ένα σύστημα παροχής υγρού ψυκτικού μέσου (σαπουνέλαιο) κατά την διάρκεια της κατεργασίας παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Λιπαντική δράση: Το σαπουνέλαιο λιπαίνει τα εργαλεία κοπής και το εργοτεμάχιο, μειώνοντας την τριβή και τη φθορά τους, καθώς και την παραγωγή θερμότητας.

2. Ψύξη και απομάκρυνση των ρινισμάτων: Το σαπουνέλαιο ψύχει τα εργαλεία κοπής και απομακρύνει τα ρινίσματα, παρέχοντας αξιόπιστη προστασία κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.

3. Βελτιωμένη απόδοση: Η χρήση σαπουνελαίου επιτρέπει μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής, αυξάνοντας την απόδοση της μηχανής και επιτρέποντας την επεξεργασία πιο απαιτητικών υλικών.

Από την άλλη πλευρά ένα σύστημα με παροχή αέρα στα εργαλεία κοπής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα :

1. Απλότητα και ευκολία χρήσης: Η εγκατάσταση και η χρήση του συστήματος είναι απλές και δεν απαιτούν εξειδικευμένες δεξιότητες.

2. Οικονομία: Η χρήση αέρα ως μέσου ψύξης είναι οικονομική, καθώς δεν απαιτεί επιπλέον υλικά ή χημικά πρόσθετα.

3. Αποτροπή θερμοκρασιακών αυξήσεων: Ο αέρας ψύχει τα εργαλεία κοπής, προστατεύοντάς τα από υψηλές θερμοκρασίες και μειώνοντας τη φθορά τους.

4. Απομάκρυνση ρινισμάτων: Ο αέρας απομακρύνει τα ρινίσματα που παράγονται κατά την επεξεργασία, διατηρώντας την καθαρότητα και την ακρίβεια του εργαλείου.

5. Εφαρμογές που απαιτούν ξηρή επεξεργασία: Σε περιπτώσεις όπου η επεξεργασία πρέπει να είναι σε ξηρή μορφή, ο αέρας μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή. Αυτό ισχύει για παραδείγματα σε εφαρμογές όπως η ηλεκτρονική ή η οπτική βιομηχανία, όπου η παρουσία υγρών μέσων, όπως το σαπουνέλαιο, είναι απαγορευτική.

Τα δύο αυτά συστήματα προσφέρουν σημαντικά οφέλη για την επεξεργασία υλικών, αλλά η μεταξύ τους επιλογή εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής, τον τύπο του υλικού και τις προτιμήσεις του χρήστη.

Συνολικά, η τοποθέτηση των συστημάτων ψύξης εργαλείων κοπής είναι αναγκαία για τη βελτίωση της απόδοσης τους, την προστασία της μηχανής και την αύξηση της παραγωγικότητας. Η εγκατάστασή τους μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλό οικονομικό κόστος και αποτελεί μια αποτελεσματική λύση για να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που προκαλεί η υπερβολική θερμότητα πετυχαίνοντας καλύτερα αποτελέσματα συνολικά στις εργασίες και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων.

6. Διαδικασία αναβάθμισης και περιγραφή

6.1 Διαδικασία εγκατάστασης του TRT70

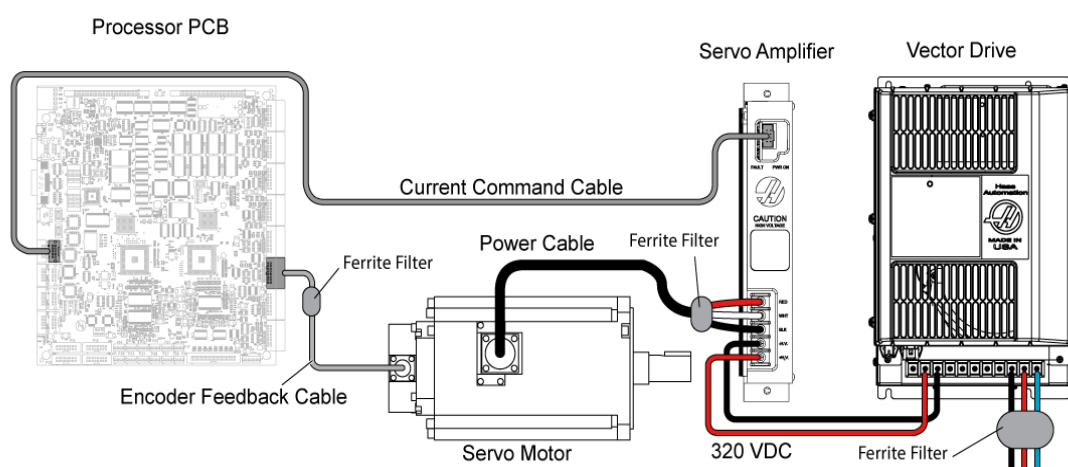
Η διαδικασία εγκατάστασης του Haas TRT70 στο Haas Mini Mill Edu είναι μια διαδικασία που απαιτεί προσοχή, γνώση και μεθοδικότητα και η περιγραφή της θα γίνει αναλυτικά στα παρακάτω βήματα¹⁶:

1) Εγκατάσταση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων που απαιτούνται για την σύνδεση του ανακλινόμενου περιστροφικού τραπεζιού στην CNC φρέζα: Τα εξαρτήματα αυτά αποτελούνται από τα δυο servo amplifiers και τις καλωδιώσεις που χρειάζονται για την δημιουργία ηλεκτρικών συνδέσμων (φίσες) με σκοπό την τροφοδοσία ελεγχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος προς τους δυο σερβοκινητήρες του TRT70 καθώς και τον αριθμητικό έλεγχο τους. Αναλυτικά οι απαιτούμενες συνδέσεις είναι οι ακόλουθες :

□ Σύνδεση μεταξύ του κεντρικού τροφοδοτικού της CNC φρέζας και των servo amplifiers.

□ Σύνδεση μεταξύ των servo amplifiers και του κεντρικού επεξεργαστή της CNC φρέζας.

□ Εγκατάσταση των ηλεκτρικών συνδέσμων (φίσες) και σύνδεση τους με τα servo amplifiers και τον κεντρικό επεξεργαστή.



Εικόνα 16: Διάγραμμα σύνδεσης servo amplifiers - επεξεργαστή¹⁷

¹⁶<https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/fourth-and-fifth-drive---installation---mill---ngc.html>

¹⁷<https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/troubleshooting/servo-amplifier---troubleshooting-guide---ngc.html>

2) Προετοιμασία του τραπεζιού της CNC φρέζας με σκοπό την σωστή τοποθέτηση του TRT70: Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον καλό καθαρισμό από ρινίσματα και σκόνες και την χρήση πέτρας λείανσης έτσι ώστε η επιφάνεια του τραπεζιού να γίνει λεία από πιθανές χαράξεις που είχαν προκαλέσει παραμόρφωση στην επιφάνεια του.

3) Τοποθέτηση του TRT70 στο τραπέζι της CNC φρέζας και την προσωρινή συγκράτησή του: Ο προσανατολισμός θέσης είναι τέτοιος ώστε το κέντρο περιστροφής του ανακλιόμενου άξονα να είναι στην ίδια ευθεία με τον X άξονα και να καθοριστεί ως A άξονας και το κέντρο περιστροφής του περιστροφικού άξονα να είναι στην ίδια ευθεία με τον Z άξονα και να καθοριστεί ως C άξονας.

4) Την σύνδεση των καλωδίων του TRT70 στους ηλεκτρικούς συνδέσμους (φίσεις) που εγκαταστάθηκαν στην CNC φρέζα προηγουμένως.

5) Την ενεργοποίηση και την απαιτούμενη παραμετροποίηση του control της CNC φρέζας για την σωστή και ομαλή λειτουργία του TRT70: Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει αναβάθμιση του λογισμικού του control και τη ρύθμιση των παραμέτρων για να μην υπάρχουν σφάλματα κατά τον αριθμητικό έλεγχο της μηχανής ως προς τον TRT70. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε αναβάθμιση λογισμικού του NGC control από έκδοση 100.18.000.1002 σε 100.22.000.1021, σε συνδυασμό με την φόρτωση ενός διαμορφωτικού αρχείου που έχει παραχωρηθεί από την Haas Automation που περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους.

6) Τελική γεωμετρική ρύθμιση και τοποθέτηση του TRT70 πάνω στο τραπέζι της CNC φρέζας:

α) Ρύθμιση της θέσης του A άξονα = 0 deg έτσι ώστε η επιφάνεια του πλατό να είναι παράλληλη με την επιφάνεια του τραπεζιού. Ρυθμίστηκε στα 0,002mm / 65mm παραλληλότητα.



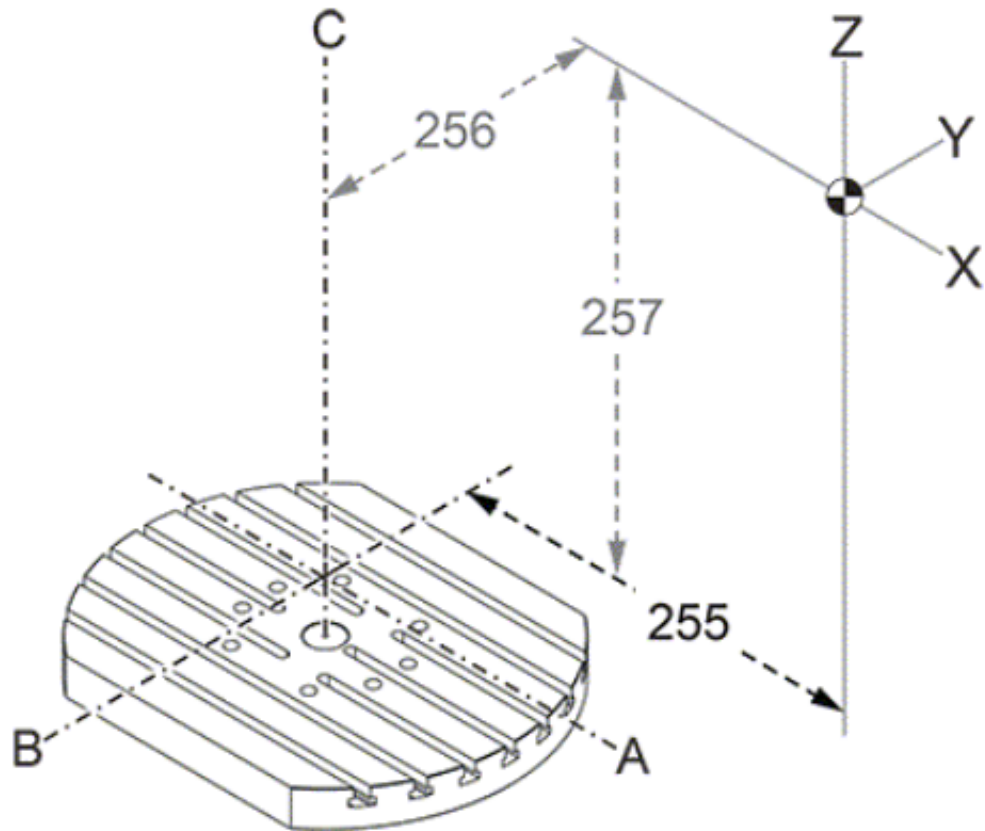
Εικόνα 17: Ρύθμιση θέσης A άξονα = 0 deg

β) Ρύθμιση της θέσης του TRT70 έτσι ώστε όταν ο άξονας $A = 90 \text{ deg}$ η επιφάνεια του πλατό να είναι παράλληλη με τον X άξονα. Ρυθμίστηκε στα $0,003\text{mm} / 65\text{mm}$ παραλληλότητα.



Εικόνα 18: Ρύθμιση θέσης A άξονα = 90 deg

7) Τελική παραμετρική ρύθμιση για την σωστή λειτουργία του DWO/TCPC (Dynamic Work Offsets / Tool Center Point Control): Μία προηγμένη λειτουργία του λογισμικού της μηχανής με σκοπό τη διευκόλυνση της ρύθμισης τετραξονικών και πενταξονικών εργασιών. Δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα στον χειριστή να τοποθετήσει το κομμάτι οπουδήποτε στο πλατό του TRT70 χωρίς αυτό απαραίτητα να συμβαδίζει με την τοποθεσία που έχει ρυθμιστεί στο CAM. Το DWO/TCPC καθορίζει τη διαφορά μεταξύ των κέντρων περιστροφής που έχουν προγραμματιστεί στο σύστημα CAM και των κέντρων περιστροφής μέσα στη μηχανή και εφαρμόζουν τις αντίστοιχες ρυθμίσεις αντιστάθμισης. Οι παραμετρικές ρυθμίσεις (255, 256, 257) αφορούν τη δήλωση θέσης του κέντρου περιστροφής του C άξονα ως προς τον X και Y άξονα, τη δήλωση θέσης του κέντρου περιστροφής του A άξονα ως προς τον Y και Z άξονα.



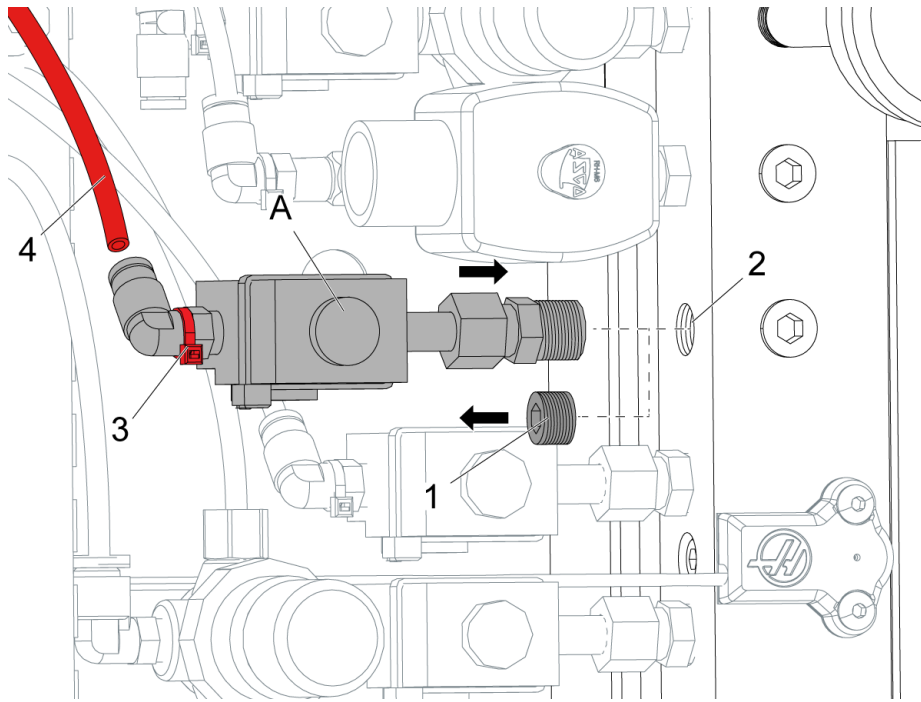
Εικόνα 19: Ρυθμίσεις 255, 256, 257¹⁸

6.2 Διαδικασία εγκατάστασης συστημάτων ψύξης εργαλείων κοπής.

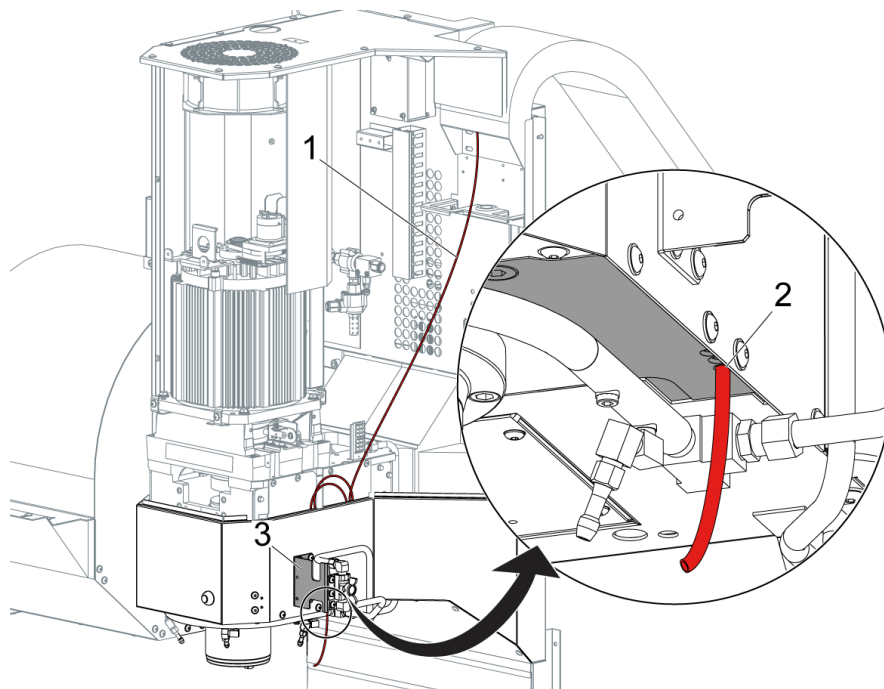
Η διαδικασία εγκατάστασης των συστημάτων ψύξης χωρίζεται σε δυο μέρη, σε αυτή που το μέσο ψύξης είναι ο αέρας και σε αυτή που το μέσο ψύξης είναι ψυκτικό υγρό που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι σαπουνέλαιο.

Για το σύστημα ψύξης με αέρα χρησιμοποιήθηκε μια ηλεκτροβαλβίδα που συνδέθηκε στο κεντρικό μπλοκ αέρα της CNC φρέζας και στη συνέχεια ένας ελαστικός πλαστικός σωλήνας διαμέτρου 6mm, ο οποίος συνδέθηκε στην πρώτη μέσω της κεντρικής ερπύστριας του Z άξονα που καταλήγει σε ένα πλαστικό ακροφύσιο δίπλα από την άτρακτο, με την ικανότητα να δέχεται οποιαδήποτε μεταβολή από τον χειριστή, χειροκίνητα για τον επιθυμητό προσανατολισμό εκροής του αέρα.

¹⁸ <https://www.haascnc.com/service/codes-settings.type=setting.machine=mill.value=S255.html>



Εικόνα 20: Σύνδεση ηλεκτροβαλβίδας στο μπλοκ αέρα¹⁹



Εικόνα 21: Διάγραμμα εγκατάστασης πλαστικής σωλήνας¹⁹

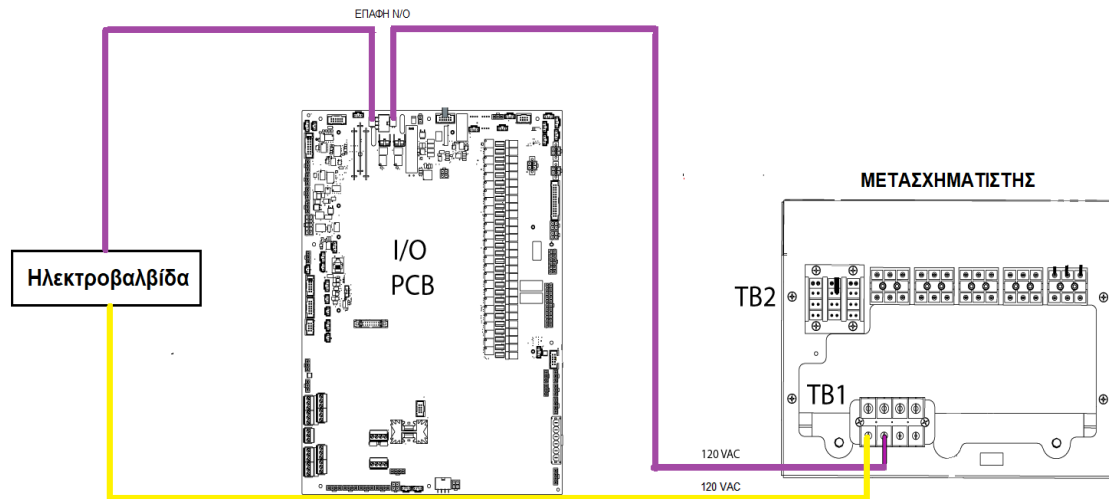
¹⁹ <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/auto-air-gun--installation---vmc.html>



Εικόνα 22: Ακροφύσιο αέρα

Για την ηλεκτρική σύνδεση της ηλεκτροβαλβίδας η οποία για τη λειτουργία της απαιτεί τάση 110V AC και για τον αυτόματο έλεγχό της χρησιμοποιήσαμε μια διαθέσιμη επαφή N/O (normal open) από την κάρτα I/O (input / output) της CNC φρέζας. Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω συνδέσεις:

- Σύνδεση της μιας φάσης από τον κεντρικό μετασχηματιστή στην ηλεκτροβαλβίδα.
- Σύνδεση της άλλης φάσης από τον μετασχηματιστή στην κάρτα I/O στη θέση COM της επαφής.
- Σύνδεση της ίδιας φάσης από την I/O στη θέση N/O της επαφής στην ηλεκτροβαλβίδα.



Εικόνα 23: Ηλεκτρικό διάγραμμα ηλεκτροβαλβίδας

Με αυτό το τρόπο επιτεύχθηκε μια συνδεσμολογία που χαρίζει στον χειριστή την δυνατότητα να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί το σύστημα αυτόματα με τη χρήση των εξής Μ κωδικών στο εκάστοτε πρόγραμμα κοπής :

- M51 για την ενεργοποίηση.
- M61 για την απενεργοποίηση.

Τέλος εγκαταστάθηκε και μια βάνα δίπλα στο control της μηχανής που μεσολαβεί στον σωλήνα παροχής αέρα στο ακροφύσιο για να υπάρχει η ευκαιρία της άμεσης διακοπής η έναρξης του συστήματος.



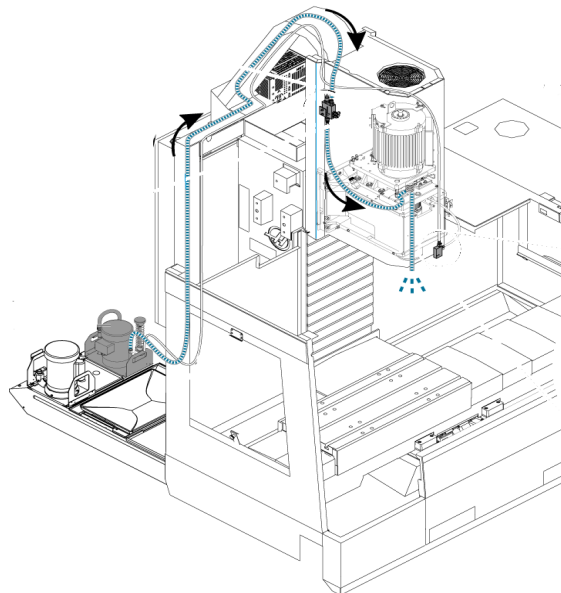
Εικόνα 24: Βάνα παροχής αέρα

Για την εγκατάσταση του συστήματος ψύξης με την χρήση ψυκτικού υγρού χρησιμοποιήθηκε μια περιστροφική αντλία με ηλεκτροκινητήρα μονοφασικό 220V και ισχύ 1/8 HP, η οποία εγκαταστάθηκε στην δεξαμενή του ψυκτικού υγρού που διαθέτει η CNC φρέζα.

Στη συνέχεια συνδέθηκε ένας ελαστικός πλαστικός σωλήνας διαμέτρου 16mm και μέσω της κεντρικής ερπύστριας του Z άξονα συνδέθηκε σε ένα μπλοκ που ήταν εγκαταστημένο δίπλα από την άτρακτο, με τη δυνατότητα την έξοδο του ψυκτικού υγρού από δυο ακροφύσια, επίσης ικανά να δέχονται οποιαδήποτε μεταβολή ως προς την κατεύθυνση ροής του ψυκτικού υγρού.

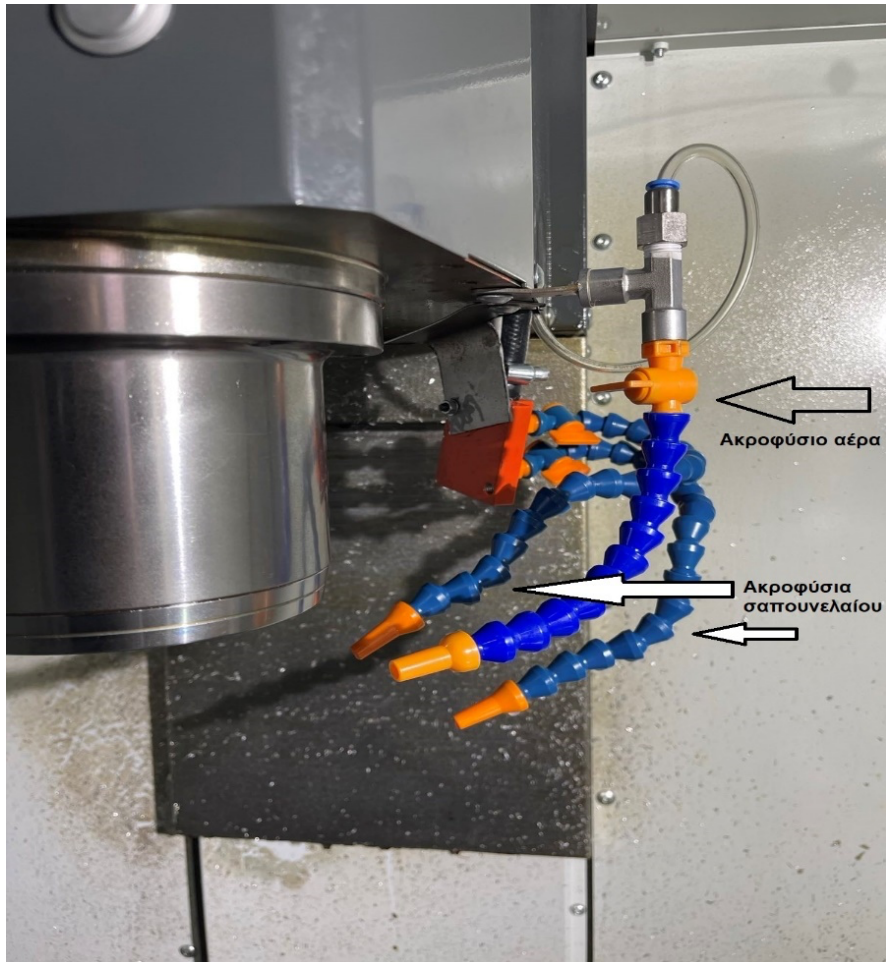


Εικόνα 25: Αντλία συνδεδεμένη με την πλαστική σωλήνα



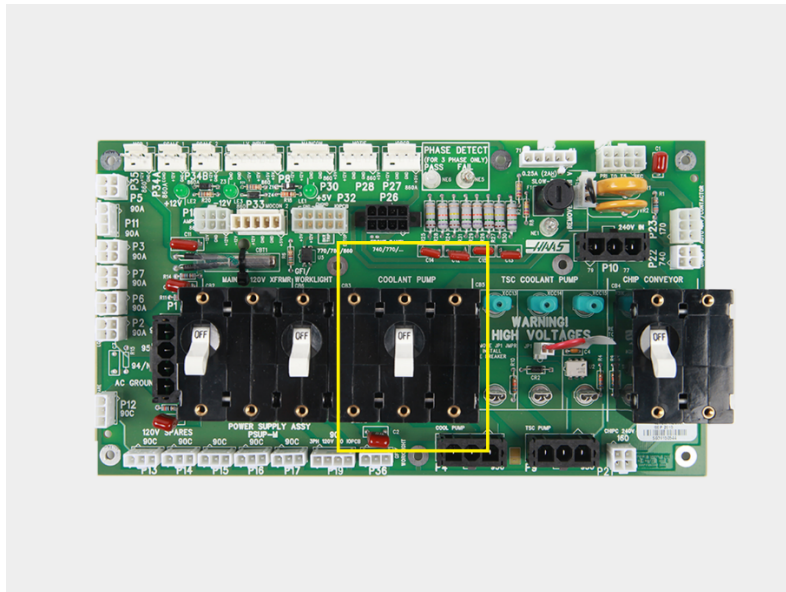
Εικόνα 26: Διάγραμμα εγκατάστασης πλαστικής σωλήνας²⁰

²⁰ <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/40-taper---belt-drive---tsc-ready---tsc---300-and-1k-psi---insta0.html>

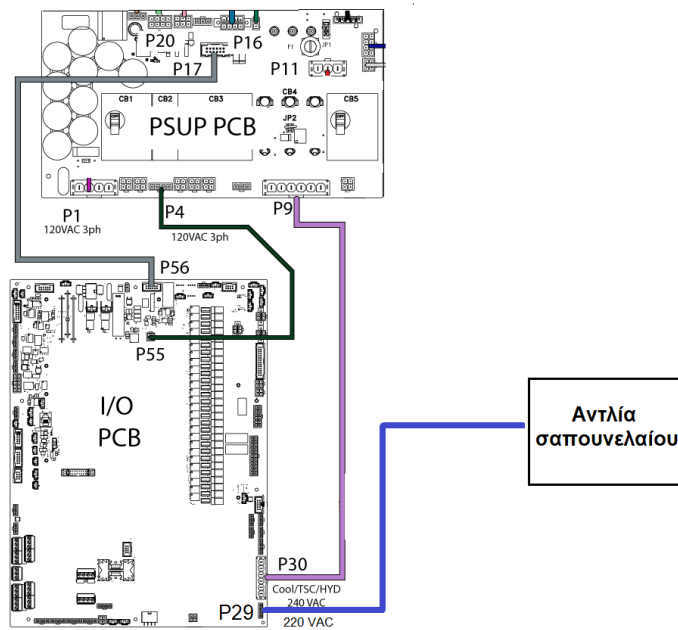


Εικόνα 27: Ακροφύσιο ψυκτικού υγρού

Για την ηλεκτρική εγκατάσταση της αντλίας αξιοποιήθηκε το υπάρχον εγκαταστημένο από το εργοστάσιο ηλεκτρικό κύκλωμα της μηχανής το οποίο δεν ήταν ολοκληρωμένο. Αναλυτικότερα προστέθηκε μια ασφάλεια 10A στην κάρτα PSUP με σκοπό την προστασία του συστήματος από τυχόν βραχυκυκλώματα και στη συνέχεια έγινε η διαμόρφωση ενός καλωδίου που στην μια άκρη φέρει κονέκτορα, κατάλληλο για τη σύνδεση του στην έξοδο της I/O που αφορά την αντλία και στην άλλη μια βιομηχανική θηλυκή πρίζα τύπου Schuko η οποία στηρίχτηκε κατάλληλα κάτω από το εξωτερικό πλαίσιο του ηλεκτρικού πίνακα. Στη συνέχεια διαμορφώθηκε το καλώδιο που η μια άκρη συνδέθηκε με τον ηλεκτροκινητήρα της αντλίας και στην άλλη άκρη προσαρμόστηκε μια βιομηχανική αρσενική πρίζα τύπου Shuko με σκοπό τη εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση της αντλίας από την CNC φρέζα.



Εικόνα 28: Η ασφάλεια 10Α συνδεδεμένη στην PSUP²¹



Εικόνα 29: Ηλεκτρικό διάγραμμα αντλίας σαπουνελαίου²¹

Κατά αυτόν τον τρόπο συνδεσμολογίας της αντλίας εξασφαλίστηκε ο χειρισμός του συστήματος με τη χρήση των τυποποιημένων M κωδικών στο πρόγραμμα κοπής, M8 για την ενεργοποίηση και M9 για την απενεργοποίηση.

²¹ <https://www.hascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/troubleshooting/next-generation-control---power-distribution-pcb-and-pfdm---trou.html>

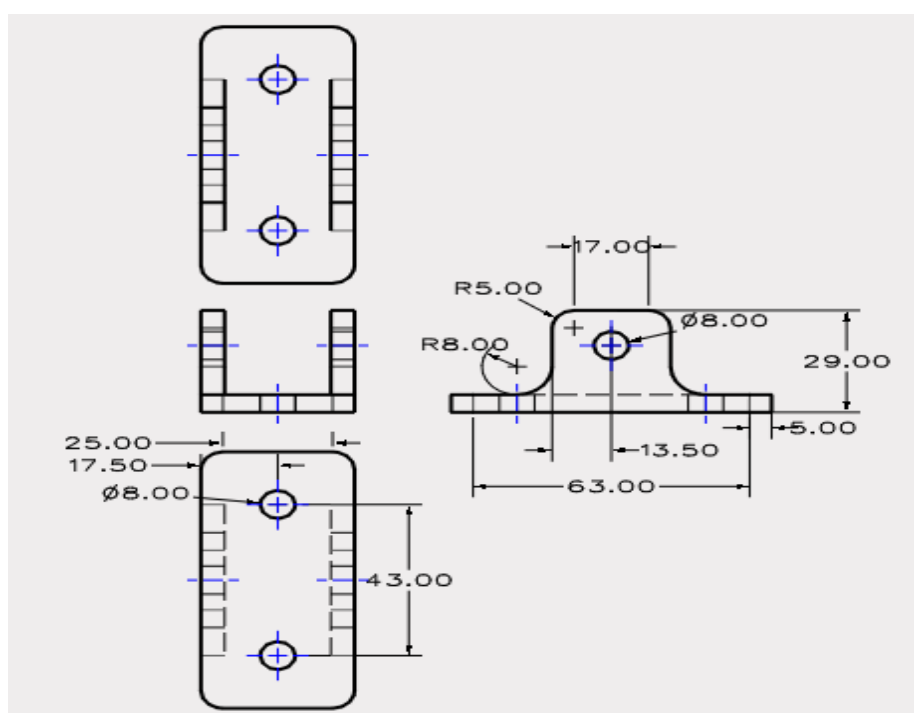
Τέλος προστέθηκε στη δεξαμενή της CNC φρέζας 130L μείγματος ψυκτικού υγρού με περιεκτικότητα 6% και 94% νερό. Το επιλεγμένο ψυκτικό υγρό είναι το Castrol Hysol MB 50, ένα σαπουνέλαιο υψηλής απόδοσης. Σχεδιασμένο για να παρέχει αξιόπιστη και αποτελεσματική ψύξη κατά τη διάρκεια των κατεργασιών. Το συγκεκριμένο σαπουνέλαιο διαθέτει εξαιρετικές ιδιότητες λίπανσης και ψύξης που βοηθούν στην επίτευξη υψηλής απόδοσης εργαλείων κοπής και βελτιωμένης ποιότητας επιφάνειας στις επεξεργασίες αλουμινίου, χάλυβα ακόμα και εξαιρετικά σκληρών μετάλλων όπως το τιτάνιο.

7. Αποτελέσματα

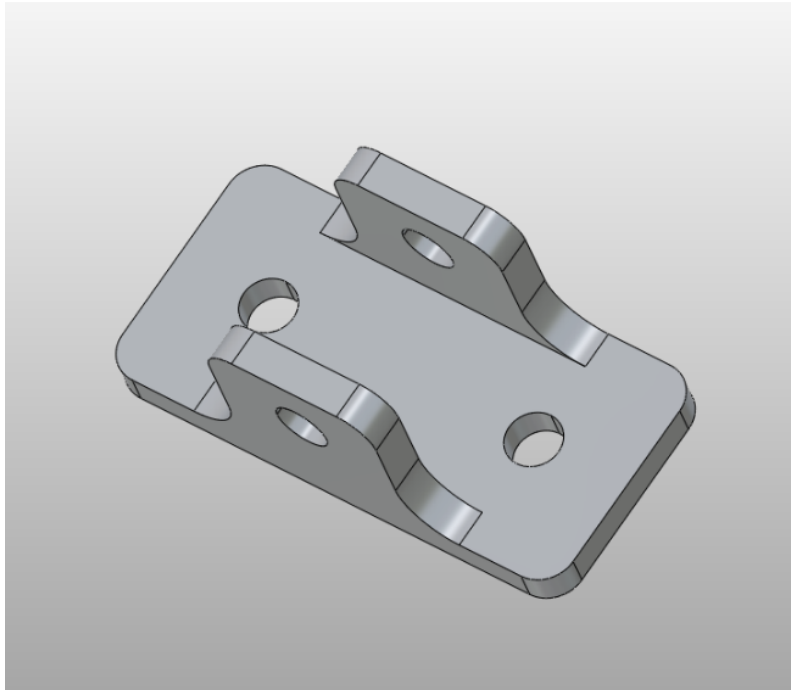
Με την αναβάθμιση του Haas Mini Mill edu του εργαστήριου με την προσθήκη ενός ανακλινόμενου – περιστροφικού πλατό (TRT70) και συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής με αέρα και σαπουνέλαιο μπορεί να διαπιστωθεί πως οι ικανότητες της μηχανής αυξήθηκαν, συνεπώς και η παραγωγικότητα της.

Αναλυτικότερα έχουμε τα εξής αποτελέσματα :

1) Αυξημένη παραγωγικότητα: Στις παρακάτω φωτογραφίες εμφανίζεται ένα εξάρτημα που χρησιμοποιείται στο σύστημα πεταλιέρας του αυτοκινήτου που κατασκευάζει η POSIDON RACING TEAM του ΠΑΔΑ και το υλικό είναι αλουμίνιο 7075.



Εικόνα 30: 2D σχέδιο πεταλιέρας



Εικόνα 31: 3D σχέδιο πεταλιέρας



Εικόνα 32: Πραγματική απεικόνιση του τεμαχίου

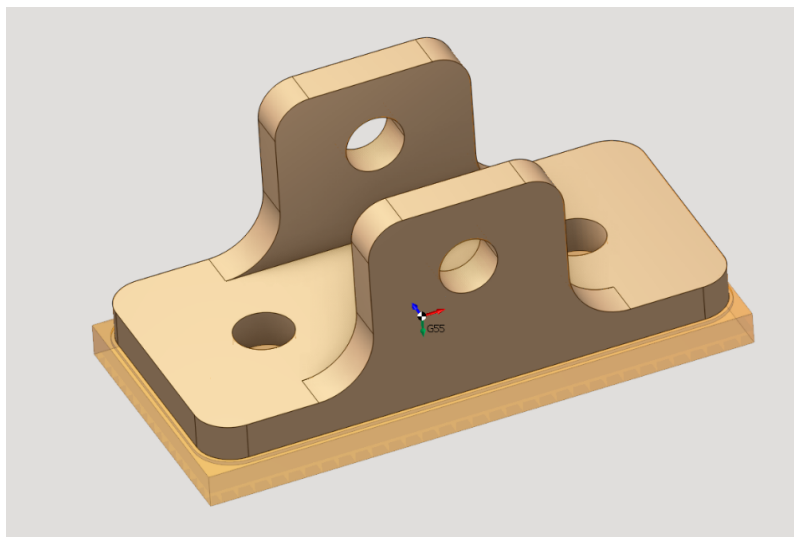
Για την κατασκευή του εξαρτήματος χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαλεία:

- 3D tester (εργαλείο 1).
- Κοντόλι HSS με διάμετρο 20mm και ωφέλιμο μήκος 40mm (εργαλείο 2).
- Τρυπάνι HSS με διάμετρο 8mm και ωφέλιμο μήκος 60 mm (εργαλείο 3).
- Κοντόλι HSS με διάμετρο 16mm και ωφέλιμο μήκος 40mm (εργαλείο 4).

Με την χρήση του TRT70 και τη δυνατότητα πενταξονικής κατεργασίας ο χρόνος κατασκευής είναι περίπου 19 λεπτά και 30 δευτερόλεπτα, χωρίζεται αναλυτικά στα εξής:

- α) Τοποθέτηση ενός μπλοκ αλουμίνιου 7075 73mm X 37mm X 35 mm σε μια μέγγενη που βρίσκεται πάνω στο πλατό του TRT70. Χρόνος \approx 1.5 λεπτά.
- β) Τοποθέτηση του 3D Tester στην άτρακτο και ρύθμιση των WORK OFFSETS του κομματιού. Χρόνος \approx 3 λεπτά.
- γ) Αφαίρεση του 3D Tester από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 2. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- δ) Εκτέλεση του κύκλου ξεχοδρίσματος. Χρόνος \approx 3 λεπτά
- ε) Αφαίρεση του εργαλείου 2 από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 3. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- στ) Εκτέλεση του κύκλου διάνοιξης σπών. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ζ) Αφαίρεση του εργαλείου 3 από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 4. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- η) Εκτέλεση του κύκλου φινιρίσματος. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών το κατεργασμένο κομμάτι φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 33: Απεικόνιση κομματιού μετά την ολοκλήρωση της 1ης φάσης σε 5αξονική κατεργασία

- θ) Ανατοποθέτηση του κομματιού στην μέγγενη έτσι ώστε να αφαιρεθεί το υλικό που βρισκόταν σε επαφή μαζί της. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ι) Αφαίρεση του εργαλείου 4 από την άτρακτο και προσθήκη του 3D tester. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ια) Ρύθμιση των νέων WORK OFFSETS. Χρόνος \approx 2 λεπτά.
- ιβ) Αφαίρεση του 3D Tester από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 2. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ιγ) Εκτέλεση του κύκλου ξεχοδρίσματος και φινιρίσματος. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

ιδ) Αφαίρεση του ολοκληρωμένου κομματιού από την μέγγενη. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

Γίνεται αντιληπτό πως η παραπάνω κατεργασία χωρίστηκε σε 2 φάσεις. Αν η διαδικασία δε συμπεριλάμβανε τον TRT70 οι συνθήκες θα ήταν πολύ διαφορετικές, θα χρειαζόνταν παραπάνω φάσεις, διαφορετική στρατηγική κοπής και περισσότερες αλλαγές εργαλείων, συνεπώς ο χρόνος ολοκλήρωσης θα αυξανόταν.

Αναλυτικότερα περιγράφονται τα βήματα μαζί με τους απαιτούμενους χρόνους ως εξής:

α) Τοποθέτηση ενός μπλοκ αλουμίνιου 7075 73mm X 37mm X 35 mm σε μια μέγγενη που βρίσκεται πάνω στο τραπέζι της CNC φρέζας. Χρόνος \approx 1.5 λεπτά.

β) Τοποθέτηση του 3D Tester στην άτρακτο και ρύθμιση των WORK OFFSETS του κομματιού. Χρόνος \approx 3 λεπτά.

γ) Αφαίρεση του 3D Tester από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 2. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

δ) Εκτέλεση του κύκλου ξεχοδρίσματος. Χρόνος \approx 3 λεπτά

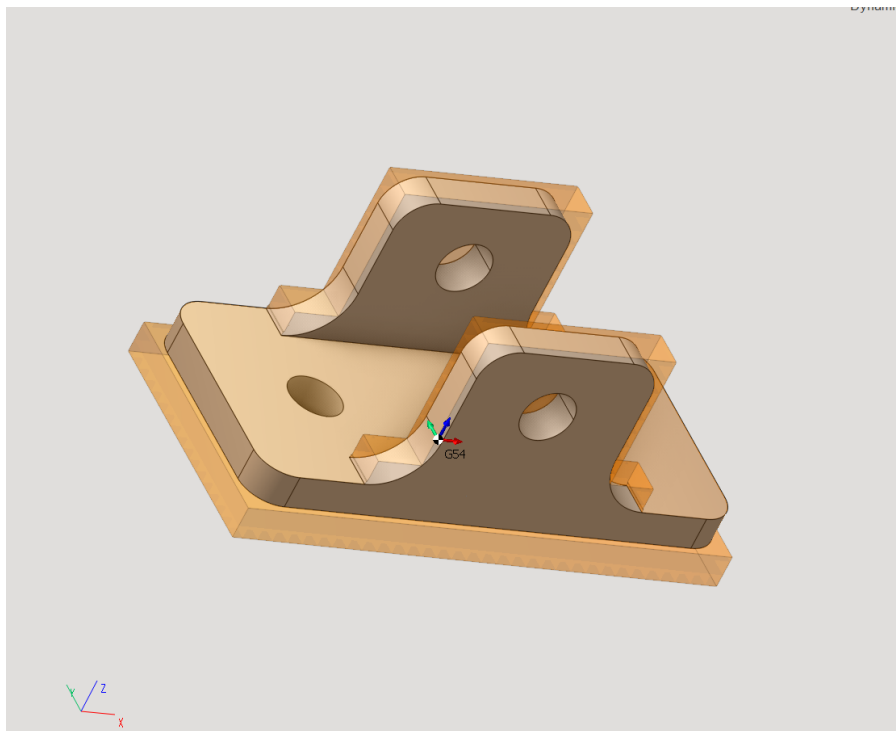
ε) Αφαίρεση του εργαλείου 2 από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 3. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

στ) Εκτέλεση του κύκλου διάνοιξης οπών. Χρόνος \approx 0.5 λεπτά.

ζ) Αφαίρεση του εργαλείου 3 από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 4. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

η) Εκτέλεση του κύκλου φινιρίσματος. Χρόνος \approx 0.5 λεπτά.

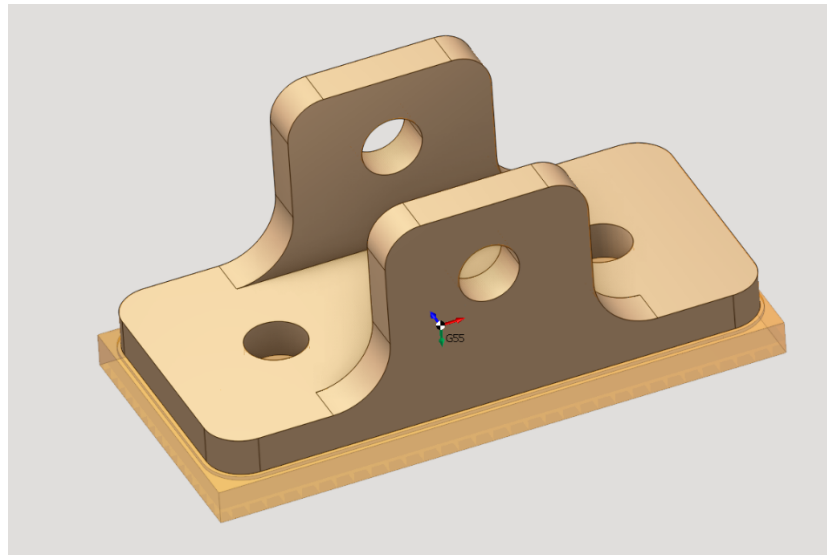
Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών το κατεργασμένο κομμάτι φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 34: Απεικόνιση κομματιού μετά την ολοκλήρωση της 1ης φάσης σε 3αξονική κατεργασία

- θ) Ανατοποθέτηση του κομματιού στην μέγγενη με διαφορετικό προσανατολισμό κατάλληλο για την πρόσβαση του εργαλείου και την κατεργασία των επιφανειών και την διάνοιξη των οπών. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ι) Αφαίρεση του εργαλείου 4 από την άτρακτο και προσθήκη του 3D tester. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ια) Ρύθμιση των νέων WORK OFFSETS. Χρόνος \approx 2 λεπτά.
- ιβ) Αφαίρεση του 3D Tester από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 4. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ιγ) Εκτέλεση του κύκλου φινιρίσματος και ξεχοδρίσματος. Χρόνος \approx 0.5 λεπτά.
- ιδ) Αφαίρεση του εργαλείου 4 από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 3. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ιε) Εκτέλεση του κύκλου διάνοιξης οπών. Χρόνος \approx 0.5 λεπτά.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών το κατεργασμένο κομμάτι φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 35: Απεικόνιση κομματιού μετά την ολοκλήρωση της 2ης φάσης σε 3αξονική κατεργασία

- ιστ) Ανατοποθέτηση του κομματιού στην μέγγενη έτσι ώστε να αφαιρεθεί το υλικό που βρισκόταν σε επαφή μαζί της. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ιζ) Αφαίρεση του εργαλείου 4 από την άτρακτο και προσθήκη του 3D tester. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- ιη) Ρύθμιση των νέων WORK OFFSETS. Χρόνος \approx 2 λεπτά.
- ιθ) Αφαίρεση του 3D Tester από την άτρακτο και προσθήκη του εργαλείου 2. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- κ) Εκτέλεση του κύκλου ξεχοδρίσματος και φινιρίσματος. Χρόνος \approx 1 λεπτό.
- κα) Αφαίρεση του ολοκληρωμένου κομματιού από την μέγγενη. Χρόνος \approx 1 λεπτό.

Με βάση τις παραπάνω διαδικασίες συμπεραίνουμε ότι ο χρόνος που χρειάζεται να κατασκευαστεί το ίδιο κομμάτι με τη χρήση τριαξονικής κατεργασίας αυτόματα αυξάνεται περίπου στα 25 λεπτά και 30 δευτερόλεπτα.

Μιλώντας πρακτικά σε μια βάρδια των 8 ωρών με τη χρήση του TRT70 παράγονται 24 κομμάτια ενώ με τη μη χρήση του, 18 κομμάτια. Δηλαδή υπάρχει μια αύξηση στην παραγωγή 33%.

Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ο κίνδυνος εμφάνισης σφαλμάτων κατά τη χειροκίνητη τοποθέτηση του κομματιού στη μέγγενη συγχρόνως με την αλλαγή φάσεων, με αποτέλεσμα λανθασμένες τελικές διαστάσεις. Ο χειριστής πρέπει να διασφαλίζει την άρτια τοποθέτηση του κομματιού χωρίς να υπάρχουν αποκλίσεις. Χρησιμοποιώντας το TRT70 και τη δυνατότητα πενταξονικής κατεργασίας μειώνεται σημαντικά ο κίνδυνος σφαλμάτων λόγω λιγότερων φάσεων, άρα και λιγότερων ανατοποθετήσεων των κομματιών στα συστήματα συγκράτησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παραπάνω διαδικασία δεν συμπεριλαμβάνονται ο χρόνος που χρειάζεται για να ρυθμιστούν τα TOOL OFFSETS των εργαλείων και η ρύθμιση την μέγγενης έτσι ώστε η επιφάνεια συγκράτησης των εργοτεμαχίων να είναι παράλληλη με τον X άξονα όταν ο άξονας A = 0 deg και ο άξονας C = 0 deg, διότι αποτελεί μια διαδικασία που χρειάζεται να γίνει μόνο μια φορά όταν εγκατασταθεί η μέγγενη και δεν απαιτείται να επαναλαμβάνεται με την αλλαγή των κομματιών.

2) Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εργαλείων κοπής και καλύτερη ποιότητα επιφάνειας: Οι παραπάνω κύκλοι κατεργασίας πραγματοποιήθηκαν με τις εξής συνθήκες κοπής και με τη χρήση του συστήματος ψύξης με σαπουνέλαιο :

- Κύκλος ξεχοδρίσματος: Στροφές 4000 rpm, πρόωση: 3000 mm/min, Ap: 20mm και Ae: 0.5mm
- Κύκλος φινιρίσματος: Στροφές 4000 rpm, πρόωση: 1000mm/min, Ap: 0.5mm και Ae: 0.5mm
- Κύκλος διάνοιξης οπών: Στροφές 2000 rpm, πρόωση: 500mm/min.

Πραγματοποιήθηκε παραγωγή 15 κομματιών με μέγιστο σφάλμα στην τελική διαστασιολόγηση τα 0,04mm. Η ποιότητα επιφάνειας είναι εξαιρετικά ικανοποιητική με τραχύτητα $Ra \approx 1,6 \mu m$. Σε προηγούμενη παραγωγή κοπής σε ίδιο υλικό αλλά μη χρησιμοποίησης συστήματος ψύξης παρατηρήθηκε η άμεση φθορά των εργαλείων ακόμα και η θραύση τους έπειτα από την κατεργασία 3 κομματιών. Η μείωση της πρόωσης ήταν απαραίτητη αυξάνοντας έτσι τον χρόνο κατεργασίας συνδυαστικά με την τραχύτητα της επιφάνειας να μην είναι λιγότερη από $Ra \approx 6,3 \mu m$. Συνεπώς παρατηρήθηκε μια αύξηση ζωής και λειτουργικότητας των εργαλείων κατά 400% πριν διαπιστωθούν φαινόμενα φθοράς.

Συμπεράσματα

Η αναβάθμιση που πραγματοποιήθηκε στο HAAS MINI MILL EDU, με την προσθήκη του TRT70 και του συστήματος ψύξης εργαλείων κοπής με αέρα και σαπουνέλαιο, είχε θετικά αποτελέσματα και επέφερε πολλά οφέλη.

Πρώτον, επιτεύχθηκε αύξηση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας, αφού υπάρχει η δυνατότητα της επεξεργασίας μεγαλύτερου αριθμού κομματιών με λιγότερες αλλαγές εργαλείων και διακοπές.

Δεύτερον, η ψύξη εργαλείων κοπής με αέρα και σαπουνέλαιο βελτίωσε την απόδοση των εργαλείων και την ποιότητα των επιφανειών των κομματιών. Τα εργαλεία κοπής παραμένουν στη σωστή θερμοκρασία, μειώνοντας έτσι τη φθορά και εξασφαλίζοντας την καλύτερη επιφάνεια των κομματιών. Επιπλέον, η καλή ψύξη συμβάλλει στη διατήρηση της καθαρότητας των μηχανημάτων και της αποτελεσματικότητάς τους.

Συνολικά, η αναβάθμιση ενίσχυσε την ικανότητά της CNC φρέζας να ανταποκριθεί σε αυξημένες απαιτήσεις παραγωγής με υψηλής ποιότητας κομμάτια με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Η επένδυση στην αναβάθμιση αυτή αποδείχθηκε επιτυχημένη, προσφέροντας απτά οφέλη από τις σημαντικές βελτιώσεις της μηχανής.

Τελειώνοντας υπάρχει μεγάλη ικανοποίηση από τα αποτελέσματα και συγχρόνως και ανυπομονησία να φανούν στην πράξη, στην καθημερινή λειτουργία του Haas Mini Mill Edu, τα οφέλη από τις προαναφερόμενες βελτιώσεις του, συντελώντας εκ των άλλων και στην καλύτερη παραγωγική διαδικασία αναφορικά με τον τομέα της μηχανουργίας στην χώρα μας, παράλληλα και με την καλύτερη και πιο σωστή εκπαίδευση των νέων μηχανολόγων.

Βιβλιογραφία

- 1) Gopalakrishnan, B., Yoshii, T., Dappili, S.M., 2004. Decision support system for machining center selection. *J. Manuf. Technol. Manag.* 15 (2), 144–154.
- 2) Arslan, M.C., Catay, B., Budak, E., 2004. A decision support system for machine tool selection. *J. Manuf. Technol. Manag.* 15 (1), 101–109.
- 3) Quintana, G., Ciurana, J., 2011. Cost estimation support tool for vertical high speed machines based on product characteristics and productivity requirements. *Int. J. Prod. Econ.* 134 (1), 188–195.
- 4) Wei, Z.C., Wang, M.J., Zhu, J.N., Gu, L.Y., 2011. Cutting force prediction in ball end milling of sculptured surface with Z-level contouring path. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 51 (5), 428–432.
- 5) Kovac, P., Sidjanin, L., 1997. Investigation of chip formation during milling. *Int. J. Prod. Econ.* 51 (1–2), 149–153.
- 6) Bouzakis, K.D., Aichouh, P., Efstathiou, K., 2003. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surface milling with ball end tools. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43 (5), 499–514.
- 7) Fontaine, M., Devillez, A., Moufki, A., Dudzinski, D., 2006. Predictive force model for ball end milling and experimental validation with a wavelike machining test. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46 (3–4), 367–380.
- 8) Daymi, A., Boujelbene, M., Linares, J.M., Bayraktar, E., Ben Amara, A., 2009. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti–6Al–4V. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 35 (1), 79–86.
- 9) Kline, W.A., Shareef, I.A., DeVor, R.E., 1982. The prediction of surface accuracy in end milling. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 104 (3), 272–278.
- 10) Li, Z.Z., Zhang, Z.H., Zheng, L., 2004. Feedrate optimization for variant milling process based on cutting force prediction. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 24 (7–8), 541–552.
- 11) Baskar, N., Asokan, P., Saravanan, R., Prabhakaran, G., 2005. Optimization of machining parameters for multi-tool milling operations using nonconventional methods. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 25 (11–12), 1078–1088.
- 12) Seguy, S., Dessein, G., Arnould, L., 2008. Surface roughness variation of thin wall milling related to modal interactions. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 48 (3–4), 261–274.

- 13) Wang, L., Ding, H., Feng, J., Wang, S., Xiao, A., Koch, D., 2010. Implementation of integrated manufacturing of free-form surfaces. In: Proceedings of the International Conference on Digital Manufacturing & Automation, vol. 1 IEEE Computer Society, Changsha, Hunan, China, . pp. 830–833.
- 14) Fontaine, M., Devillez, A., Moufki, A., Dudzinski, D., 2007. Modeling of cutting forces in ball end milling with tool surface inclination. Part II. Influence of cutting conditions, run-out, ploughing and inclination angle. *J. Mater. Process. Technol.* 189 (1–3), 85–89.
- 15) Lopez de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Sanchez, J.A., Salgado, M.A., 2007. Toolpath selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surface milling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47 (2), 388–400.
- 16) Layegh, K.S.E., Erdim, H., Lazoglu, I., 2012. Offline force control and federate scheduling for complex free form surface in 5-axis milling. *Procedia CIRP* 1, 96–101.
- 17) Wagoner, Harless D. *The US Machine Tool Industry*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1966.
- 18) Harrop, Jeffrey. "Crisis in the Machine Tool Industry: A Policy Dilemma for the European Community." *Journal of Common Market Studies* 24, no. 1 (1985): 61 - 76.
- 19) Kawakami, Keiichi, and Shinshichi Abe. "Machine Tools Build Prosperity for Related Industries/ Machine Tool Industry in Japan Today." *Business Japan* 30, no. 8 (1985): 89 - 97.
- 20) Marx, Thomas G. "Technological Change in the Structure of the Machine Tool Industry." *MSU Business Topics* 27, no. 1 (1979): 41-47
- 21) Fleischer, Manfred. *The Inefficiency Trap: Strategy Failure in the German Machine Tool Industry*. Edited by Edition Sigma. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung - WZB, 1997.
- 22) Rendeiro, Joao O. "How the Japanese Came to Dominate the Machine Tool Business." *Long Range Planning* 18, no. 3 (1985): 62-67.
- 23) Arnold, Heinrich M. "Can great companies survive technology shocks? - A literature overview." *Munich School of Management, Electronic Working Paper Series*, no. 1/2001 (2001).
- 24) Daly, Anne, and Daniel T. Jones. "The Machine Tool Industry in Britain, Germany, and the United States." *National Institute Economic Review*, no. 92 (1980): 53.

- 25) Ceruzzi, Paul. "From Scientific Instrument to Everyday Appliance: The Emergence of Personal Computers, 1970 - 77." *History and Technology* 13 (1996): 1-31.
- 26) Chalmers, Raymond E. "A Journey to Japan." *Manufacturing Engineering* 121, no. 3 (1998): 80 - 85.
- 27) Klepper, Steven. "Entry, Exit, Growth, and Innovation over the Product Life Cycle." *American Economic Review* 86, no. 3 (1996): 562-583.
- 28) Reintjes, Francis J. *Numerical Control: Making a New Technology*. Edited by J.R. Crookall, Milton C. Shaw and Nam P. Suh. Vol. 9, *Oxford Series on Advanced Manufacturing*. New York, Oxford: Oxford University Press, 1991.
- 29) Teresko, John. "Emerging Technologies." *Industry Week*, Mar 5, 2001 2001, 17 - 19.
- 30) Ehrnberg, Ellinor, and Staffan Jacobsson. "Indicators of Discontinuous Technological Change: An Exploratory Study of two Discontinuities in the Machine Tool Industry." *R & D Management* 27, no. 2 (1997): 107-126.
- 31) Archibugi, Daniele, and Roberto Simonetti. "Objects and Subjects in Technological Interdependence. Towards a framework to monitor innovation." *International Journal of the Economics of Business* 5, no. 3 (1998): 295 - 309.
- 32) Fawcett, Clifford W., and Dan Roman. "Industry Overview for the Purchaser of Machine Tools." *Journal of Purchasing and Materials Management, Fall 1976* (1976): 8-14.
- 33) Ackermann, Charbel, and Jeffrey Harrop. "The Management of Technological Innovation in the Machine Tool Industry: a Cross-national regional survey of Britain and Switzerland." *R&D Management* 15, no. 3 (1985): 207 - 218.
- 34) Steeds, W. *A History of Machine Tools 1700 - 1910*. Oxford: The Clarendon Press, 1969.
- 35) Merchant, Eugene M. "Manufacturing - Yesterday, Today and Tomorrow." *Working Paper - Institute of Advanced Manufacturing Sciences* (2000).
- 36) The Next Manufacturing Revolution: The Future of CNC Technology (no date) *The Next Manufacturing Revolution: The Future of CNC Technology*.
- 37) Smid, P., 2003. *CNC Programming Handbook*. New York: Industrial Press Inc.. Superior Electric, . *SLO-SYN Motion Control Products*.
- 38) Suh, S.-H. *et al.* (2008) *Theory and Design of CNC Systems*. Springer Science & Business Media.

- 39) Σκιττίδης, Φ. Χ., 2000. *Βασικές Αρχές Αριθμητικού Ελέγχου και Προγραμματισμός Εργαλειομηχανών CNC Τόμος Α'*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική.
- 40) Golnabi, H., Asadpour, A. (2007). Design and application of industrial machine vision systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6), 630-637.
- 41) Li, J., Weng, J., Xu, H., Zhou, C., Zhang, D., Lu, G. (2019) Design of robotic mannequin formed by flexible belt net. *Computer-Aided Design*, 110(2019), 1-10.
- 42) Khechekhouche, A., Elsharif, N., Kermerchou, I., Sadoun, A. (2019). Construction and performance evaluation of a conventional solar distiller. *Heritage and Sustainable Development*, 1(2), 74-77.
- 43) Ye, Y., Hu, T., Zhang, C. (2018). Design and development of a CNC machining process knowledge base using cloud technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(2018), 3413–3425.
- 44) Keefe, Jeffrey H. (1991). Numerically controlled machine tools and worker skills. *Industrial and Labor Relations Review*, 44(3), 503–519.
- 45) Boujelbane, M. A., Moisan ,W. Bouzid, S. Torbaty, (2007). —Variation cutting speed on the five axis milling,|| *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. France, vol. 21,pp. 7-14.
- 46) Moriwaki, T. (2008). —Multi-functional machine tool,|| *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 736–749.
- 47) Dewes, R.C., D.K. Aspinwall, A review of ultra high speed milling of hardened steels, *Journal of Materials Processing Technologies* 69 (1997) 1–17.
- 48) GLOBOCKI-LAKIC G.: Obrada metala rezanjem, teorija, modeliranje i simulacija (Processing of the metal by cutting, the theory, molding and simulation), University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 2010.
- 49) Han Ding, Qingzhen Bi, Limin Zhu. *Chinese Science Bulletin*, 2010,10, 55(30):3408-3418.
- 50) Lin Than, Lee Jae-Woo, Bohez Erik L.J. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 10, 23(10): 2624-2634.
- 51) Qixiao Zou. Research in tool path planning method based on the least squares principle of impeller machining[D]. Dalian Science&Engineering University,2015.
- 52) Xianyi Li. Research in tool path planning and implementation technology without interference for five-axis machining of impeller[D]. Zhejiang university, 2012. In Chinese.

- 53) Bang, Y. K., Lee, S. Oh, (2005). —5-axis micro milling machine for machining micro parts, International journal Advance manufacturing Technology. 25:888-894.
- 54) Shengfu Wang. Research in NC plunge-milling machining tool path planning of half open integrate impeller[D]. Dalian Science & Engineering University, 2014. In Chinese Pyo Lim. Int J Adv Manuf Technol, 2009(45): 821-829.
- 55) AMT. *The Economic Handbook of the Machine Tool Industry*. McLean, Virginia: AMT -The Association for Manufacturing Technology, 1990.
- 56) Στεργίου, Κ., 2004. *Σχεδιασμός των Κατασκευών*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική
- 57) Layer, A., Brinke, E.T., Van Houten, F., Kals, H., Haasis, S., 2002. Recent and future trends in cost estimation. Int. J. Comput. Integr. Manuf. 15 (6), 499–510.
- 58) Fang, B., DeVor, R., Kapoor, S. Influence of friction damping on workpiece-fixtured system dynamics and machining stability, Journal of Manufacturing Science and Engineering 124 (2002) 226–233.
- 59) Gough V.E. Universal tire test machine, Proc. 9th International Automobile Technical Congress FISITA, IMechE, London, 1962, pp. 117–137.
- 60) Gray, P., S. Bedi, F. Ismail, N. Rao, G. Morphy, Comparison of 5-axis and 3-axis machining of hydro-forming die inserts, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17 (8) (2001) 562–569.
- 61) Kieckhafer, L., P. Sheldon, M. McGuire, A revolutionary new machining center, European Production Engineering 19 (1-2) (1995) 44–46.
- 62) Li, Y., J. Wang, L. Wang, Stiffness analysis of a Stewart platform based parallel kinematic machine, Proc 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4, 2002, pp. 3672–3677.
- 63) Munz, W.D., I.J. Smith, L.A. Donohue, A.P. Deeming, P. Halstead, PVD coated cemented carbide tools designed for dry high speed cutting applications, in: Proceedings of the 1st French and German Conference on High Speed Machining, Metz, France, 1997, pp. 173–183.
- 64) Rajasekaran, A., S. P. Sundar Singh Sivam, S. RajendraKumar and K. Saravanan Influence of setting variables in conventional super plastic forming process using Grey relation Analysis in Taguchi method. ARPN 49) Journal of Engineering and Applied Sciences. ISSN 1819-6608, Vol. 12, No. 15, August 2017, (PP.No 4648-4655).
- 65) Ramouldie, Rapid and accurate manufacture of moulds and dies using pre-hardened materials and innovative hexapod machine tools, BRITE/CRAFT Project No: BE-S2-5451.

- 66) AMT. *The Economic Handbook of the Machine Tool Industry*. McLean, Virginia: AMT -The Association for Manufacturing Technology, 1990.
- 67) Shafieifar, M., Farzad, M., and Azizinamini, A. (2017). Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 156(2017), 402-411.
- 68) Stewart, D., A platform with six degrees of freedom, *Proc. Institute of Mechanical Engineering* 180 (1965) 371–386.
- 69) Tonshoff, H.K. A systematic comparison of parallel kinematics, 1st European American Forum on Parallel Kinematic Machines, Milan, Italy, 1998.
- 70) Webb, P., M. Geldart, N. Gindy, An evaluation of the machining performance of the giddings and lewis variax for hard and difficult materials, *Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics*, ISBN 3-928921-76-2, 2002, pp. 817–832.
- 71) 40-Taper - Belt-Drive - TSC-Ready - TSC - 300 and 1K PSI - Installation - VMC - NGC - AD0292 (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/40-taper---belt-drive---tsc-ready---tsc---300-and-1k-psi---insta0.html> (Accessed: 28 June 2023).
- 72) 255 - MRZP X Offset (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/service/codes-settings.type=setting.machine=mill.value=S255.html> (Accessed: 28 June 2023).
- 73) Asia, H. (2019) ‘The Essential Guide To 5-Axis CNC Machining - Hwacheon Asia Pacific Pte. Ltd.’, 6 June. Available at: <https://hwacheonasia.com/the-essential-guide-to-5-axis-cnc-machining/> (Accessed: 28 June 2023).
- 74) Auto Air Gun - Installation - VMC - AD0116 (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/auto-air-gun---installation---vmc.html> (Accessed: 28 June 2023).
- 75) Fourth and Fifth Axis Drive - Installation - Mill - NGC (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/fourth-and-fifth-drive---installation---mill---ngc.html> (Accessed: 28 June 2023).
- 76) Fowler, B. (2022) Quick Guide to the X, Y, & Z CNC Codes [Coordinates], *Machinist Guides*. Available at: <https://www.machinistguides.com/xyz-codes/> (Accessed: 28 June 2023).
- 77) Geometry Guide - UMC-750/SS (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/fr/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/umc-750-ss-geometry-guide.html> (Accessed: 28 June 2023).

78) GM-2 | 40-Taper Mill | Large- Platform Gantry Mill | Vertical Mills – Haas CNC Machines (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/gantry/models/gm-2.html> (Accessed: 28 June 2023).

79) Mini Mill – EDU | 40-Taper Mill | Vertical Mills – Haas CNC Machines (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/mini-mills/models/minimill-edu.html> (Accessed: 27 June 2023).

80) sansmachining (2020) ‘CNC Machining: 3 Axis VS 4 Axis VS 5 Axis’, SANS, 7 September. Available at: <https://www.sansmachining.com/cnc-machining-3-axis-vs-4-axis-vs-5-axis/> (Accessed: 28 June 2023).

81) Servo Amplifier - Troubleshooting Guide - CHC (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/troubleshooting/servo-amplifier---troubleshooting-guide.html> (Accessed: 28 June 2023).

82) ‘The Essential Guide To CNC Milling Machines - Hwacheon Asia Pacific Pte. Ltd.’ (2020), 12 June. Available at: <https://hwacheonasia.com/cnc-milling-machines/> (Accessed: 28 June 2023).

83) TRT70 | Tilting Rotary | 5-Axis Rotaries | Rotaries and Indexers – Haas CNC Machines (no date). Available at: <https://www.haascnc.com/machines/rotaries-indexers/5-axis-rotaries/models/trt70.html> (Accessed: 28 June 2023).

84) Vertical Machining Centers GENOS M series (no date) OKUMA CORPORATION. Available at: <https://www.okuma.co.jp/english/product/vmc/genosm.html> (Accessed: 28 June 2023).

85) ‘What is 5-Axis Machining? Working Principles, Types, Benefits - WayKen’ (2023) Rapid Prototype Manufacturing in China - WayKen, 7 February. Available at: <https://waykenrm.com/blogs/5-axis-cnc-machining/> (Accessed: 28 June 2023).

86) What is A Bridge Mill? (no date). Available at: <https://www.okuma.com/blog/what-is-a-bridge-mill> (Accessed: 28 June 2023).