



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ & ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ



Διπλωματική Εργασία

**Κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας με χρήση
εργαλειομηχανής αριθμητικού ελέγχου**

Κωνσταντίνος Δ. Σιάμπαλης

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η διπλωματική εργασία πραγματοποιείται (στα πλαίσια πρακτικής άσκησης) στο μηχανουργείο της εταιρίας ΑΦΟΙ Ν. ΑΞΑΚΑΛΗ ΚΑΙ ΣΙΑ. Περιέχονται όλα τα στάδια κατασκευής τεσσάρων διαφορετικών τεμαχίων σε εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου (CNC), από την επιλογή της πρώτης ύλης, από την οποία θα κατασκευαστούν έως τον ποιοτικό τους έλεγχο με πιστοποιημένα μετρητικά όργανα. Τα μηχανολογικά σχέδια αυτών των τεμαχίων διαθέτουν διαστάσεις ακριβείας, οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, τόσο κατά την ανάπτυξη του G κώδικα, μέσω της ψηφιακής καθοδήγησης της εργαλειομηχανής (CAM), όσο και κατά την κατεργασία. Ενδεικτικά, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στο τι σύστημα συγκράτησης θα χρησιμοποιηθεί κατά την κατεργασία, προς ποιά διεύθυνση θα συγκρατηθεί η πρώτη ύλη, τι κοπτικά εργαλεία θα χρησιμοποιηθούν, με πόσες στροφές ανά λεπτό θα περιστρέφονται και τι πρόωση θα έχουν τα εργαλεία, ανάλογα με την κατεργασία που εκτελούν, ποιά αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου θα επιλεγεί (για να επιτευχθούν οι επιθυμητές ανοχές των διαστάσεων) και πώς θα μετρηθούν οι διαστάσεις στο τελικό προϊόν. Τέλος, η κατασκευή κάθε τεμαχίου γίνεται με γνώμονα την ασφάλεια του χειριστή, την ασφάλεια του εξοπλισμού, που χρησιμοποιείται και την επίτευξη της ακρίβειας που απαιτεί ο πελάτης με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την ΝΑΧ και ιδιαίτερα τον Νικόλαο Αξακάλη για την εξαιρετική συνεργασία, τη βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφεραν, κατά το διάστημα που εργαζόμουν εκεί. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ιωάννη Νικολό για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε και για την θετική επιρροή που μου έχει ασκήσει το διάστημα που συνεργαζόμαστε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

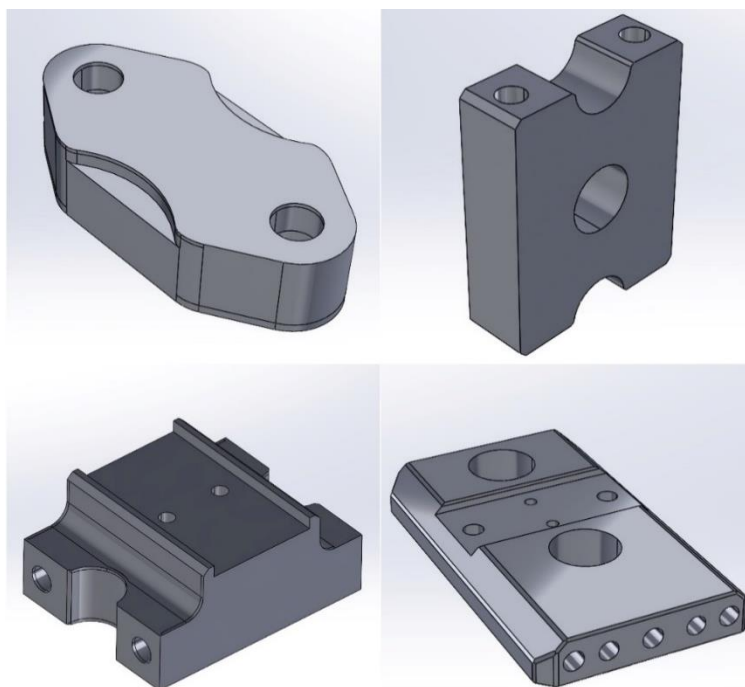
| | |
|---|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 3 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 4 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 5 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή στις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC) | 8 |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή των εργαλειομηχανών CNC..... | 8 |
| 1.2 Περιγραφή των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου | 9 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Ο εξοπλισμός και το υλικό που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατεργασία των τεμαχίων..... | 11 |
| 2.1 Η εργαλειομηχανή DMG MORI CMX 50U | 11 |
| 2.2 Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή..... | 14 |
| 2.3 Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε | 18 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Προετοιμασία και κατεργασία των τεμαχίων σε εργαλειομηχανή CNC | 20 |
| 3.1 Κατασκευή 1 ^{ου} τεμαχίου | 20 |
| 3.2 Κατασκευή 2 ^{ου} τεμαχίου | 30 |
| 3.3 Κατασκευή 3 ^{ου} τεμαχίου | 42 |
| 3.4 Κατασκευή 4 ^{ου} τεμαχίου | 54 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 67 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 68 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται (στα πλαίσια πρακτικής άσκησης) στο μηχανουργείο της εταιρίας ΑΦΟΙ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΞΑΚΑΛΗ ΚΑΙ ΣΙΑ ([NAX](#)), το οποίο βρίσκεται στο Πέραμα - Νέο Ικόνιο Αττικής. Η εταιρία NAX εξειδικεύεται στην κατασκευή μεγάλου αριθμού τυποποιημένων προϊόντων, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα (DIN, MIL-STD., κ.λπ.), καθώς και σημαντικής ποσότητας μηχανολογικών εξαρτημάτων ακριβείας, σύμφωνα με σχέδια, δείγματα, ή ειδικές απαιτήσεις πελατών. Η εταιρία εξειδικεύεται στην παραγωγή ευρείας ποικιλίας σύνθετων εξαρτημάτων, για μηχανολογικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές, ενώ επικεντρώνεται στην εξυπηρέτηση της αμυντικής βιομηχανίας και άλλων πελατών στην εγχώρια αγορά. Οι δυνατότητες κατασκευής περιλαμβάνουν τη χρήση εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου έως και πέντε αξόνων (5 - axis CNC), καθώς και τη χρήση συμβατικών εργαλειομηχανών. Επιπλέον, η εταιρία διαθέτει αυστηρό ποιοτικό έλεγχο, ο οποίος αποτελεί τον πυλώνα πάνω στον οποίο στηρίζεται η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η επιτυχία των εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας, καθώς και η εξέλιξη της επιχείρησης σε έναν ανταγωνιστικό κλάδο.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά τεμάχια, με διαστάσεις που περιέχουν υψηλή ακρίβεια. Για να επιτευχθούν αυτές, χρησιμοποιήθηκε εργαλειομηχανή CNC. Κάθε ένα από αυτά τα τεμάχια απαιτεί διαφορετική προσέγγιση για το πως θα κατασκευαστεί, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι διαστάσεις της πρώτης ύλης, τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν, ο τρόπος συγκράτησης στην εργαλειομηχανή, η σειρά με την οποία θα πραγματοποιηθούν οι κατεργασίες, καθώς και οι αλλαγές στις αντισταθμίσεις των κοπτικών εργαλείων ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις.

Κατά την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας στην εταιρία, δόθηκαν τα μηχανολογικά σχέδια καθώς και τα αρχεία CAD, με τα τρισδιάστατα σχέδια των τεμαχίων, από τον πελάτη. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ο G κώδικας μέσω λογισμικού CAM (TopSolid'CAM) για την κατασκευή τους με κοπή στην CNC φρέζα, DMG Mori CMX 50U.



Εικόνα 0.1: Ψηφιακά μοντέλα των τεμαχίων που κατασκευάστηκαν.



Εικόνα 0.2: Τελική μορφή των τεμαχίων που κατασκευάστηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή στις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC)

1.1 Ιστορική αναδρομή των εργαλειομηχανών CNC

Η ιστορία των μηχανών CNC (Computer Numerical Control) ξεκίνησε στα μέσα του 20ου αιώνα με την ανάπτυξη των πρώιμων συστημάτων αριθμητικού ελέγχου.

Η έννοια του αριθμητικού ελέγχου, που αργότερα θα εξελιχθεί σε CNC, μπορεί να εντοπιστεί στη δεκαετία του 1940. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, ο στρατός των ΗΠΑ, ιδιαίτερα η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ, είχε ανάγκη για ακριβή, αξιόπιστα και πολύπλοκα εξαρτήματα για αεροσκάφη και όπλα. Μηχανικοί και επιστήμονες άρχισαν να εξερευνούν τρόπους αυτοματοποίησης εργαλειομηχανών για παραγωγή ακριβείας.

Τα πρώτα συστήματα NC χρησιμοποιούσαν διάτρητες κάρτες και ταινίες για τον έλεγχο της κίνησης των εργαλειομηχανών. Κάθε τρύπα ή σχέδιο σε αυτές τις κάρτες αντιπροσώπευε συγκεκριμένες οδηγίες μηχανικής κατεργασίας. Αυτά τα πρώιμα συστήματα ήταν περιορισμένα στις δυνατότητές τους και δεν βασίζονταν ακόμη σε υπολογιστή.

Ο John T. Parsons, ένας Αμερικανός μηχανικός και επιχειρηματίας, πιστώνεται με τη δημιουργία του όρου "Computer Numerical Control" (CNC) στα τέλη της δεκαετίας του 1940. Οραματίστηκε ένα πιο προηγμένο σύστημα όπου ένας υπολογιστής θα μπορούσε να ελέγχει τις κινήσεις των εργαλειομηχανών με βάση μαθηματικές συντεταγμένες.

Μία από τις πρώτες επιτυχημένες εφαρμογές της τεχνολογίας CNC σημειώθηκε στην αεροπορική βάση Wright-Patterson της Πολεμικής Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν μια πρωτότυπη μηχανή φρεζαρίσματος με υπολογιστή για την κατεργασία εξαρτημάτων.

Η εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας CNC ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1950, όταν η Merrill Tool & Machine Company παρουσίασε μια από τις πρώτες εμπορικά διαθέσιμες μηχανές CNC, την Teletype-Model 2000. Αυτό σηματοδότησε ένα σημαντικό βήμα στην εισαγωγή της τεχνολογίας CNC στη βιομηχανία κατασκευής. Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1960 και του 1970, μηχανικοί και εταιρείες συνέχισαν να βελτιώνουν και να προωθούν την τεχνολογία CNC. Αυτή η περίοδος είδε την ενσωμάτωση των υπολογιστών, την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου και την τυποποίηση γλωσσών προγραμματισμού, όπως ο κώδικας G. Η τεχνολογία CNC άρχισε να γίνεται ευρέως διαδεδομένη σε βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η μεταλλουργία, κατά τις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Τα πλεονεκτήματα της αυξημένης ακρίβειας, επαναληψιμότητας και αυτοματισμού έγιναν όλο και πιο εμφανή ([1] [2] [3]).

Η τεχνολογία CNC συνεχίζει να εξελίσσεται στην ακρίβεια και την ταχύτητα. Οι σύγχρονες μηχανές CNC διαθέτουν συχνά προηγμένους αισθητήρες, παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και δυνατότητες δικτύωσης. Επέτρεψε την αυτοματοποίηση των διαδικασιών κατεργασίας, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ακρίβεια, αποτελεσματικότητα και ευελιξία σε διάφορες βιομηχανίες. Σήμερα, οι μηχανές CNC αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης κατασκευής, επιτρέποντας την παραγωγή πολύπλοκων εξαρτημάτων ακριβείας.

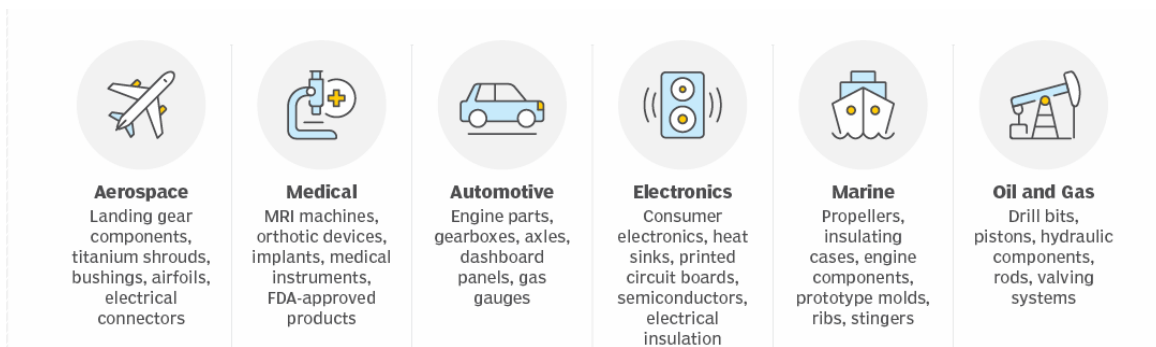
1.2 Περιγραφή των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου

Με τη χρήση εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC) αυτοματοποιούνται οι κατεργασίες κοπής. Οι κατεργασίες με παραδοσιακές εργαλειομηχανές, όπως φρέζες και τόρνοι, αυτοματοποιούνται και γίνονται πιο αποδοτικές και ασφαλείς για τους χειριστές. Η γλώσσα που χρησιμοποιείται από αυτές τις εργαλειομηχανές ονομάζεται G-Code και ουσιαστικά ο σκοπός της είναι η ψηφιακή καθοδήγηση του κέντρου κατεργασίας για να ολοκληρωθεί η κοπή της ακατέργαστης πρώτης ύλης και τελικά να κατασκευαστεί το τεμάχιο. Ο G-Code είτε κατασκευάζεται βήμα-βήμα από τον χειριστή, όπως σε μια οποιαδήποτε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, είτε μέσω του λογισμικού ψηφιακής καθοδήγησης (CAM).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο G-Code κατασκευάζεται μέσω του CAM, επειδή είναι πιο ασφαλές και πιο αποδοτικό. Θα πρέπει πρώτα όμως να υπάρχει το ψηφιακό μοντέλο του προς κατεργασία τεμαχίου, έτσι ώστε το λογισμικό να αναγνωρίσει την γεωμετρία του και με τις κατάλληλες εντολές του χρήστη να πραγματοποιήσει την κατεργασία λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως: το ως προς ποιά διεύθυνση θα συγκρατηθεί η πρώτη ύλη, τι κοπτικά εργαλεία θα χρησιμοποιηθούν, με πόσες στροφές ανά λεπτό θα περιστρέφονται και τι πρόωση θα έχουν τα εργαλεία, το πώς θα αποφευχθεί η σύγκρουση του κοπτικού εργαλείου με το τεμάχιο, το σύστημα συγκράτησης ή ακόμη και το ίδιο το μηχάνημα.

Υπάρχει, ωστόσο, και η δυνατότητα ενσωμάτωσης μιας πιστής αναπαράστασης (με τη μορφή σχεδίου) του κέντρου κατεργασίας και του συστήματος συγκράτησης που θα χρησιμοποιηθεί, στο λογισμικό CAM. Τρέχοντας, λοιπόν, μια προσομοίωση της κοπής, μπορεί αν αποφευχθεί έγκαιρα κάποιο ατύχημα στον χώρο κοπής. Όταν ο χειριστής βεβαιωθεί ότι η προσομοίωση είναι η επιθυμητή, ο κώδικας (G-Code) αντιγράφεται στη μηχανή είτε ενσύρματα είτε ασύρματα και το πρόγραμμα ολοκληρώνει τις εργασίες σύμφωνα με τις εντολές που δόθηκαν.

Η χρήση των CNC είναι απαραίτητη για όλες τις σχετικές βιομηχανίες παραγωγής. Από την κατασκευή συστημάτων προσγείωσης και αεροτομές από τιτάνιο για την αεροδιαστημική βιομηχανία, μέχρι εμφυτεύματα για ιατρική χρήση. Ευρεία χρήση τους συναντάται επίσης στα ηλεκτρονικά, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυτιλιακή βιομηχανία κ.α.



Εικόνα 1.1: Παραδείγματα βιομηχανιών όπου αξιοποιούνται CNC εργαλειομηχανές.
([Πηγή](#))

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Ο εξοπλισμός και το υλικό που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατεργασία των τεμαχίων

2.1 Η εργαλειομηχανή DMG MORI CMX 50U



Εικόνα 2.1.1: Η εργαλειομηχανή DMG MORI CMX 50U. ([Πηγή](#))

Η CNC εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε, είναι η CMX 50U της εταιρίας DMG MORI και διαθέτει πέντε άξονες κίνησης. Ωστόσο, δεν εκτελεί κινήσεις και στους πέντε άξονες ταυτοχρόνως. Οι κατεργασίες που γίνονται με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται «3 + 2» (positioning machining). Η μηχανή έχει τρεις κύριους άξονες: X, Y και Z, οι οποίοι ελέγχουν τη γραμμική κίνηση σε τρεις αντίστοιχες διευθύνσεις. Επιπλέον, υπάρχουν δύο περιστροφικοί άξονες B και C. Αυτοί οι περιστροφικοί άξονες είναι προσανατολισμένοι σε μια σταθερή θέση σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας. Ο όρος « 3+2 » υπονοεί ότι το μηχανήμα μπορεί να κινηθεί σε τρεις γραμμικούς άξονες και να χρησιμοποιήσει τους δύο περιστροφικούς άξονες για να επανατοποθετήσει το τεμάχιο εργασίας ή το εργαλείο κοπής σε συγκεκριμένες γωνίες ή προσανατολισμούς.

Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατεργασία σύνθετων εξαρτημάτων που απαιτούν πολλαπλές ρυθμίσεις ή προσανατολισμούς. Παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία από την τυπική κατεργασία 3 αξόνων αλλά λιγότερη από την πλήρη κατεργασία 5 αξόνων (full 5-axis machining).

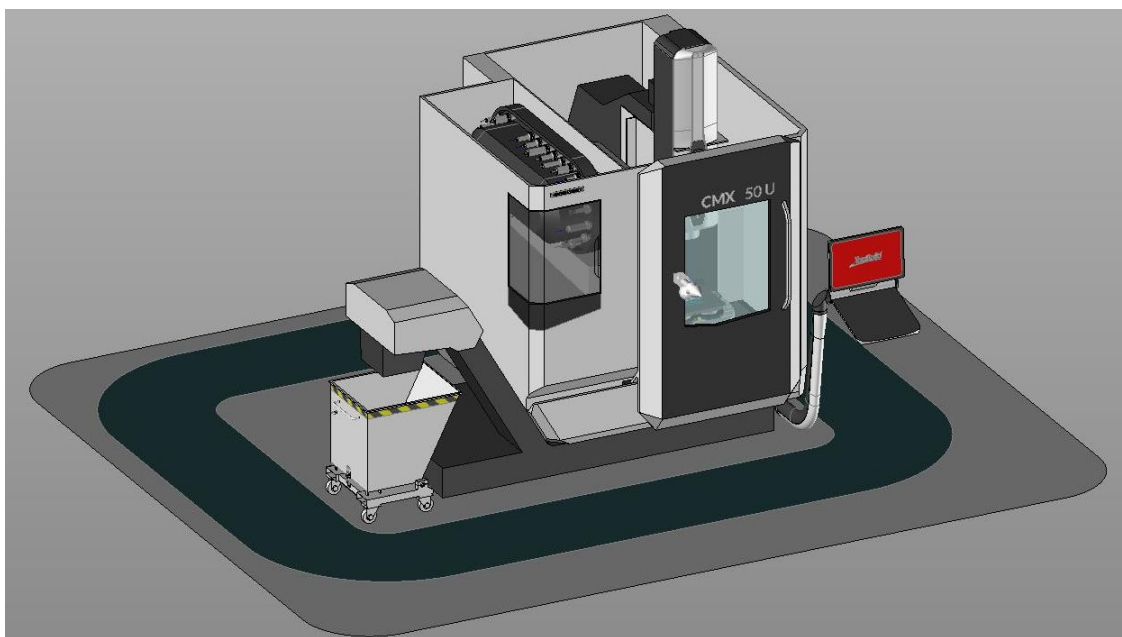
Μερικά από τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής αναφέρονται παρακάτω:

- Μέγιστη διαδρομή στον άξονα X, Y, Z: 500 , 450, 400 mm αντίστοιχα.

- Μέγιστο βάρος κατεργαζόμενου τεμαχίου: 200 kg.
- Rapid Traverse 30 m/min στους γραμμικούς άξονες.
- Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 12.000 rpm.
- Χειριστήριο (Control) αφής της εταιρίας SIEMENS.

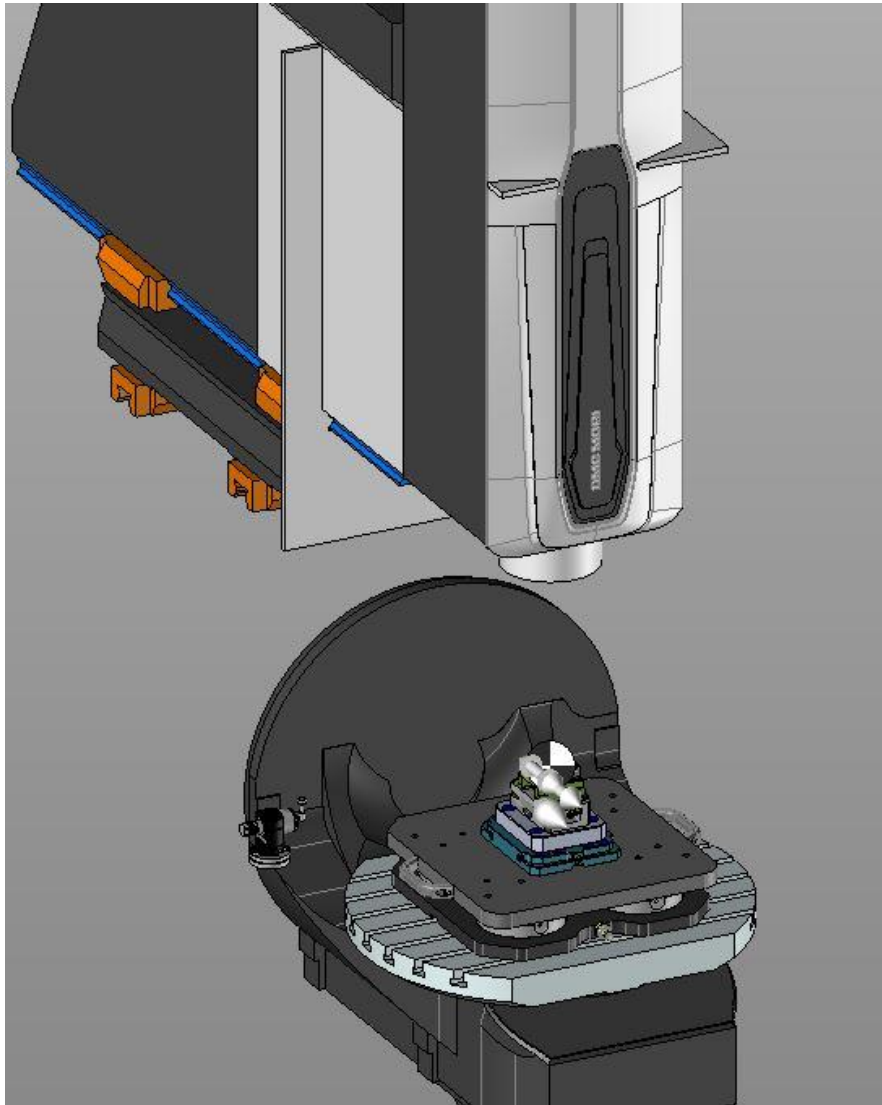
Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο λογισμικό CAD/CAM της εταιρίας υπάρχει πλήρως σχεδιασμένη η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται και το σύστημα συγκράτησης, έτσι ώστε η προσομοίωση της κοπής να είναι ακριβής.

Μια ακριβής προσομοίωση, μέσω λογισμικού CAM, βοηθά στη διασφάλιση της ακρίβειας, της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας της κατεργασίας, οδηγώντας τελικά σε τεμάχια υψηλότερης ποιότητας, μειωμένο κόστος παραγωγής και βελτιωμένη παραγωγικότητα. Πιο συγκεκριμένα, τα προγράμματα που δημιουργούνται από το λογισμικό CAM περιλαμβάνουν διαδρομές εργαλείων που υπαγορεύουν την κίνηση του εργαλείου κοπής. Οι προσομοιώσεις επιτρέπουν στους χειριστές να επαληθεύουν αυτές τις διαδρομές εργαλείων για ακρίβεια και ορθότητα πριν εκτελεστούν στην πραγματική μηχανή CNC. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να εντοπίσουν και να τονίσουν πιθανές συγκρούσεις ή παρεμβολές μεταξύ του κοπτικού εργαλείου, της βάσης εργαλείων, του τεμαχίου εργασίας και άλλων εξαρτημάτων του μηχανήματος, βοηθώντας έτσι στην αποφυγή πιθανών σφαλμάτων, ατυχημάτων ή συγκρούσεων, που θα μπορούσαν να βλάψουν το μηχάνημα ή το τεμάχιο εργασίας. Με την ανίχνευση συγκρούσεων στο εικονικό περιβάλλον, οι προσομοιώσεις επιτρέπουν την πραγματοποίηση προσαρμογών στο πρόγραμμα για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων κατά την πραγματική κατεργασία.

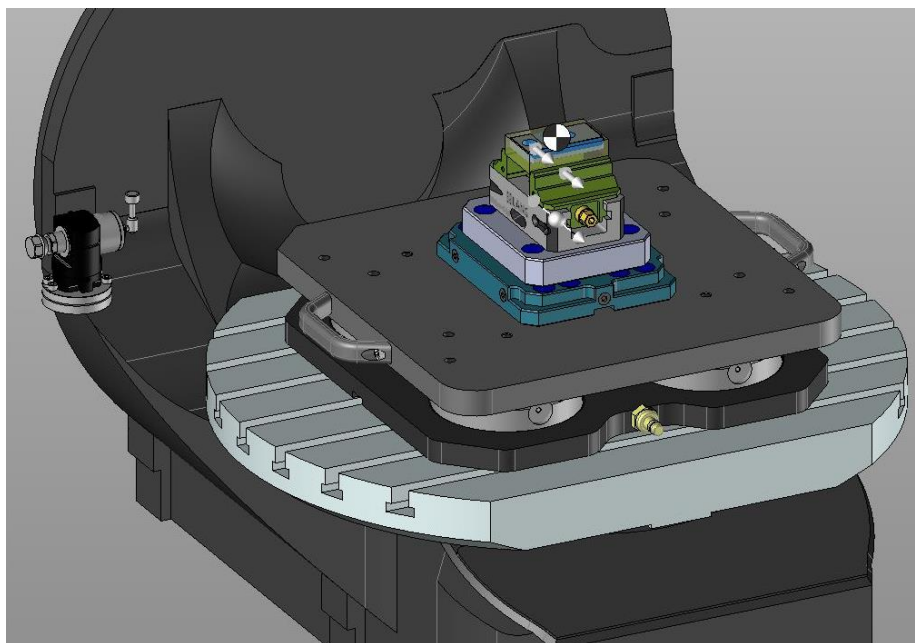


Εικόνα 2.1.2: Το πλήρες ψηφιακό μοντέλο της εργαλειομηχανής.

Όταν γίνεται μια προσομοίωση, τα περισσότερα κομμάτια της μηχανής «κρύβονται» από το περιβάλλον του CAM και παραμένουν μόνο τα πιο κρίσιμα, όσον αφορά στην κατεργασία. Αυτό γίνεται για να μειωθεί η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς.



Εικόνα 2.1.3: Το ψηφιακό μοντέλο της ατράκτου και του συστήματος συγκράτησης.



Εικόνα 2.1.4: Το ψηφιακό μοντέλο του συστήματος συγκράτησης.

2.2 Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή

Κατά την ολοκλήρωση των κατεργασιών, όπου σχηματίζονται γεωμετρίες που περιέχουν διαστάσεις ακριβείας, είναι απαραίτητο να γίνουν μετρήσεις με τα κατάλληλα μετρητικά όργανα, έτσι ώστε να μειωθεί όσο απαιτείται η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου και να επιτευχθούν οι επιθυμητές ακριβείς διαστάσεις. Ο όρος «αντιστάθμιση» αναφέρεται στη ρύθμιση ή τη διόρθωση που γίνεται στη θέση ενός κοπτικού εργαλείου για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων κατεργασίας. Η αλλαγή της αντιστάθμισης μπορεί να αναφέρεται είτε στην ακτίνα του, είτε στο μήκος του, ενώ όσο περισσότερο μειώνεται τόσο περισσότερο υλικό αφαιρεί από το τεμάχιο.

Τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή είναι:

- Ψηφιακό παχύμετρο της Mitutoyo 0-150 mm



Εικόνα 2.2.1: Το Ψηφιακό παχύμετρο της Mitutoyo 0-150 mm. ([Πηγή](#))

Εύρος μετρήσεων: 0 – 150 mm.

Βήμα μετρήσεων: 0.01 mm.

Δείκτης στεγανότητας IP67 (προστασία από σκόνη 6/6 και προστασία από υγρά 7/8), ο οποίος επιτρέπει στο μικρόμετρο να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με σαπουνέλαιο.

- **Ψηφιακό μικρόμετρο QuantuMike της Mitutoyo**



Εικόνα 2.2.2: Το Ψηφιακό μικρόμετρο QuantuMike της Mitutoyo. ([Πηγή](#))

Βήμα μετρήσεων: 0.001 mm.

Ακρίβεια: $\pm 1 \mu\text{m}$.

Επιπεδότητα: $0,3 \mu\text{m}$.

Παραλληλότητα: $1 \mu\text{m}$.

Δείκτης στεγανότητας IP65 (προστασία από σκόνη 6/6 και προστασία από υγρά 5/8), ο οποίος επιτρέπει στο μικρόμετρο να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με σαπουνέλαιο.

- **Ψηφιακό μικρόμετρο οπής τριών σημείων της Mitutoyo**



Εικόνα 2.2.3: Το Ψηφιακό μικρόμετρο της Mitutoyo. ([Πηγή](#))

Βήμα μετρήσεων: 0.001 mm.

Ακρίβεια: $\pm 2 \mu\text{m}$.

Δείκτης στεγανότητας IP65 (προστασία από σκόνη 6/6 και προστασία από υγρά 5/8), ο οποίος επιτρέπει στο μικρόμετρο να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με σαπουνέλαιο.

- **Πρότυποι ελεγκτήρες οπών και σπειρωμάτων (καλίμπρες) Go – No Go**

Αυτοί οι ελεγκτήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για απλές επιθεωρήσεις διέλευσης/αστοχίας, καθιστώντας τους πολύτιμα εργαλεία για τον γρήγορο προσδιορισμό του εάν ένα εξάρτημα είναι εντός των αποδεκτών ορίων ή όχι. Για να είναι το τεμάχιο εντός των επιτρεπτών ανοχών θα πρέπει να εισέρχεται η πλευρά “Go” και να μην εισέρχεται η πλευρά “No Go”.

Παραδείγματα αντίστοιχων ελεγκτήρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια:



Εικόνα 2.2.4: Ελεγκτήρας οπής Go - No Go με ανοχή H7. ([Πηγή](#))



Εικόνα 2.2.5: Ελεγκτήρας σπειρώματος Go - No Go με ανοχή 6H. ([Πηγή](#))

- **Touch Probe: DMG MORI PowerProbe 40 Optical**

Οι αισθητήρες αφής (touch probes) χρησιμοποιούνται σε μηχανές CNC και φέρουν μια σφαίρα που έρχεται σε φυσική επαφή με την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας. Όταν η σφαίρα αγγίζει την επιφάνεια, στέλνει σήματα στη μονάδα ελέγχου του μηχανήματος, η οποία στη συνέχεια μετρά με ακρίβεια τη θέση, το μέγεθος και το σχήμα του τεμαχίου εργασίας με βάση τα σημεία επαφής της σφαίρας.



Εικόνα 2.2.6: Touch probe DMG MORI PowerProbe 40 Optical.

Οι διαστάσεις και οι ανοχές του τελικού τεμαχίου αναγράφονται στα μηχανολογικά σχέδια. Όσες ανοχές δεν αναγράφονται στα μηχανολογικά σχέδια ονομάζονται «γενικές ανοχές» και ορίζονται σύμφωνα με κάποιο πρότυπο προτυποποίησης (ISO, DIN κ.α.). Για τα συγκεκριμένα τεμάχια, οι ανοχές ορίζονται από το DIN 7168 f (fine).

Table 1. Permissible deviations for linear dimensions, except for external radii and chamfer heights

| Tolerance class | Permissible deviations, in mm, for nominal sizes, in mm. | | | | | | | | | | | |
|------------------|--|----------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | from 0,5 ¹⁾ to 3 | over 3 up to 6 | over 6 up to 30 | over 30 up to 120 | over 120 up to 400 | over 400 up to 1000 | over 1000 up to 2000 | over 2000 up to 4000 | over 4000 up to 8000 | over 8000 up to 12 000 | over 12 000 up to 16 000 | over 16 000 up to 20 000 |
| f (fine) | ± 0,05 | ± 0,05 | ± 0,1 | ± 0,15 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 0,8 | - | - | - | - |
| m (medium) | ± 0,1 | ± 0,1 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 0,8 | ± 1,2 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 5 | ± 6 |
| g (coarse) | ± 0,15 | ± 0,2 | ± 0,5 | ± 0,8 | ± 1,2 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 5 | ± 6 | ± 7 | ± 8 |
| sg (very coarse) | - | ± 0,5 | ± 1 | ± 1,5 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 6 | ± 8 | ± 10 | ± 12 | ± 12 |

¹⁾ For nominal sizes below 0,5 mm, the deviations shall be indicated adjacent to the relevant nominal size.

Table 2. Permissible deviations for external radii, r (cf. figure 1 for example), and chamfer heights, h (cf. figure 2 for example)

| Tolerance class | Permissible deviations, in mm, for nominal sizes, in mm. | | | | |
|------------------|--|----------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| | from 0,5 ¹⁾ to 3 | over 3 up to 6 | over 6 up to 30 | over 30 up to 120 | over 120 up to 400 |
| f (fine) | ± 0,2 | ± 0,5 | ± 1 | ± 2 | ± 4 |
| m (medium) | ± 0,2 | ± 0,5 | ± 1 | ± 2 | ± 4 |
| g (coarse) | ± 0,2 | ± 1 | ± 2 | ± 4 | ± 8 |
| sg (very coarse) | ± 0,2 | ± 1 | ± 2 | ± 4 | ± 8 |

¹⁾ For nominal sizes below 0,5 mm, the deviations shall be indicated adjacent to the relevant nominal size.

Table 3. Permissible deviations for angular dimensions

| Tolerance class | Permissible deviations, in units of angle, for nominal sizes of the shorter leg, in mm. | | | | |
|------------------|---|------------------|-------------------|--------------------|----------|
| | over 10 | over 10 up to 50 | over 50 up to 120 | over 120 up to 400 | over 400 |
| f (fine) | ± 1° | ± 30' | ± 20' | ± 10' | ± 5' |
| m (medium) | ± 1° | ± 30' | ± 20' | ± 10' | ± 5' |
| g (coarse) | ± 1° 30' | ± 50' | ± 25' | ± 15' | ± 10' |
| sg (very coarse) | ± 3° | ± 2° | ± 1° | ± 30' | ± 20' |

Εικόνα 2.2.7: Γενικές ανοχές διαστάσεων κατά DIN 7168. (Πηγή)

2.3 Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε

Τα τεμάχια κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τα σχέδια του πελάτη από κράμα αλουμινίου 7075. Το κράμα αλουμινίου 7075 έχει πολύ υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, είναι ικανό για περεταίρω βελτίωση της αντοχής του μέσω θερμικών επεξεργασιών, είναι εύκολα κατεργάσιμο σε εργαλειομηχανές κοπής και παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε επαναλαμβανόμενη κόπωση.

Πριν την κατασκευή όλων των τεμαχίων, τα κομμάτια της πρώτης ύλης (stock) κόπηκαν με ηλεκτρικό πριόνι ταινίας, σε διαστάσεις ένα έως δύο χιλιοστά μεγαλύτερες σε κάθε πλευρά σε σχέση με εκείνες που ορίστηκαν στο CAM.



Εικόνα 2.3.1: Εύρεση σημείου κοπής της πρώτης ύλης για ένα τεμάχιο, με χρήση παχυμέτρου.



Εικόνα 2.3.2: Φωτογραφία κατά την κοπή της πρώτης ύλης στο ηλεκτρικό πριόνι.



Εικόνα 2.3.3: Φωτογραφία μετά την κοπή της πρώτης ύλης στο ηλεκτρικό πριόνι.

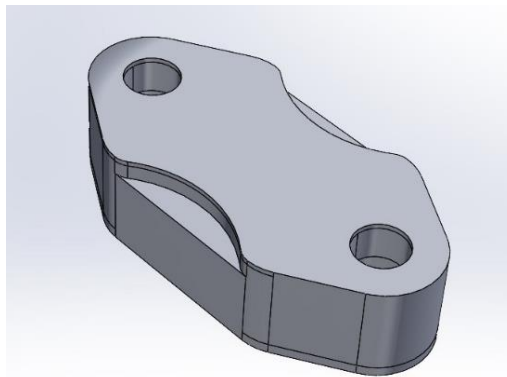
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Προετοιμασία και κατεργασία των τεμαχίων σε εργαλειομηχανή CNC

Η διαδικασία προετοιμασίας περιλαμβάνει την επιλογή των κοπτικών εργαλείων και την ψηφιακή καθοδήγηση μέσω λογισμικού CAM, ενώ η διαδικασία που ακολουθείται κατά την κοπή είναι προσαρμοσμένη σε κάθε τεμάχιο, αναλόγως με τις ακρίβειες που περιέχονται στις διαστάσεις του.

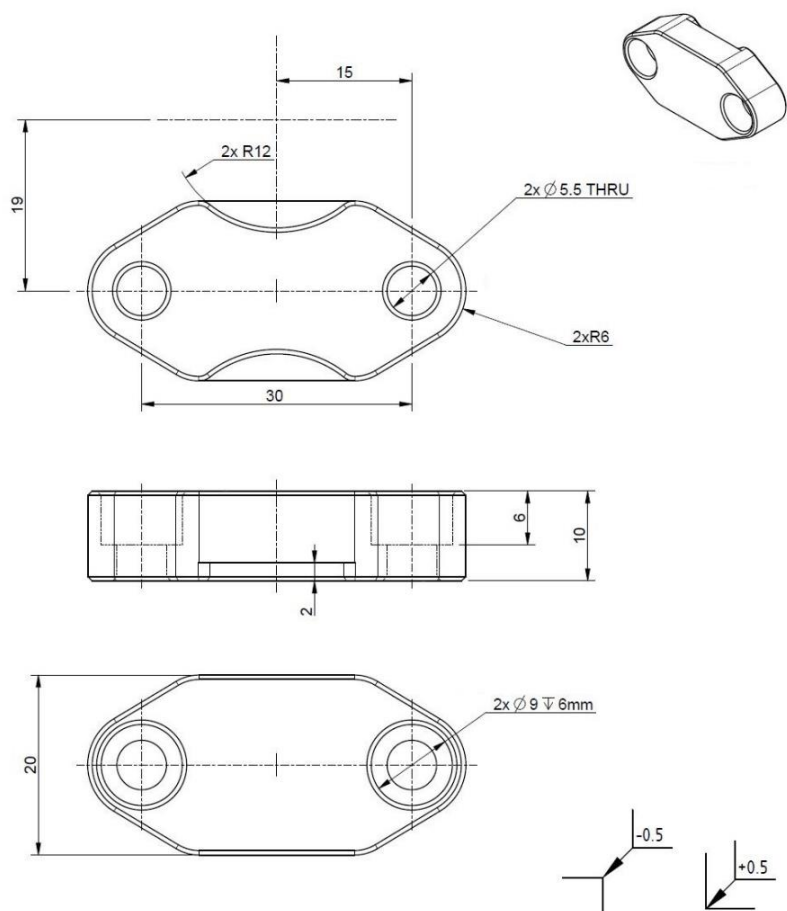
Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τον προγραμματισμό της εργαλειομηχανής πριν κάθε κατεργασία είναι η εξής: αρχικά, ορίζονται οι διαστάσεις της πρώτης ύλης και ανάλογα με το μέγεθος του κατεργαζόμενου τεμαχίου, επιλέγεται το σύστημα συγκράτησης (μέγγενη ή / και αποστάτες) που θα χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, επιλέγεται ο βέλτιστος προσανατολισμός τοποθέτησης της πρώτης ύλης στην μέγγενη. Κατά τον προγραμματισμό του CAM, επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ποιός είναι ο κατάλληλος κώνος συγκράτησης για κάθε κατεργασία και πόσο θα εξέχουν τα εργαλεία από αυτόν. Αν τα εργαλεία εξέχουν πολύ από τον κώνο, υπάρχει ο κίνδυνος παρουσίασης κωνικότητας, γεγονός που θα αποτελέσει σε ένα τελικό τεμάχιο κακής επιφάνειας και σε ειδικές περιπτώσεις, που απαιτείται ακρίβεια, σε ένα τεμάχιο εκτός προδιαγραφών. Από την άλλη, αν το κοπτικό εργαλείο δεν εξέχει αρκετά από τον κώνο, υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης του κώνου με το τεμάχιο ή τη μέγγενη.

Σε επόμενο βήμα, μέσω του CAM, εξάγεται ο G κώδικας για την συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, αντιγράφεται σε αυτή μέσω του server της εταιρίας και τέλος, τα επιλεγμένα εργαλεία φορτώνονται στην εργαλειομηχανή.

3.1 Κατασκευή 1^{ου} τεμαχίου



Εικόνα 3.1.1: Ψηφιακό μοντέλο του 1^{ου} τεμαχίου.



Εικόνα 3.1.2: Μηχανολογικό σχέδιο του 1^{ου} τεμαχίου.

Πρώτη (Α') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων

Η κατασκευή του τεμαχίου γίνεται σε δύο φάσεις. Για την Α' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- δύο κοντύλια (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)
- ένα τρυπάνι (Twisted Drill)

| | Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------------------------|--------|------|-----|------|-----|---|
| <input type="checkbox"/> | T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| <input type="checkbox"/> | T 2 | | 3mm | 10mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H38-CP16-BTB40-A=120 |
| <input type="checkbox"/> | T 3 | | 5mm | 44mm | 0mm | Twisted Drill-D5-A140-L44-H82-MS0500-SLA-CP1... |
| <input type="checkbox"/> | T 4 | | 4mm | 12mm | 0mm | Side End Mill-D4-L12-H50-SD6-FL3-KORLOY-APF... |

Εικόνα 3.1.3: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Α' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου

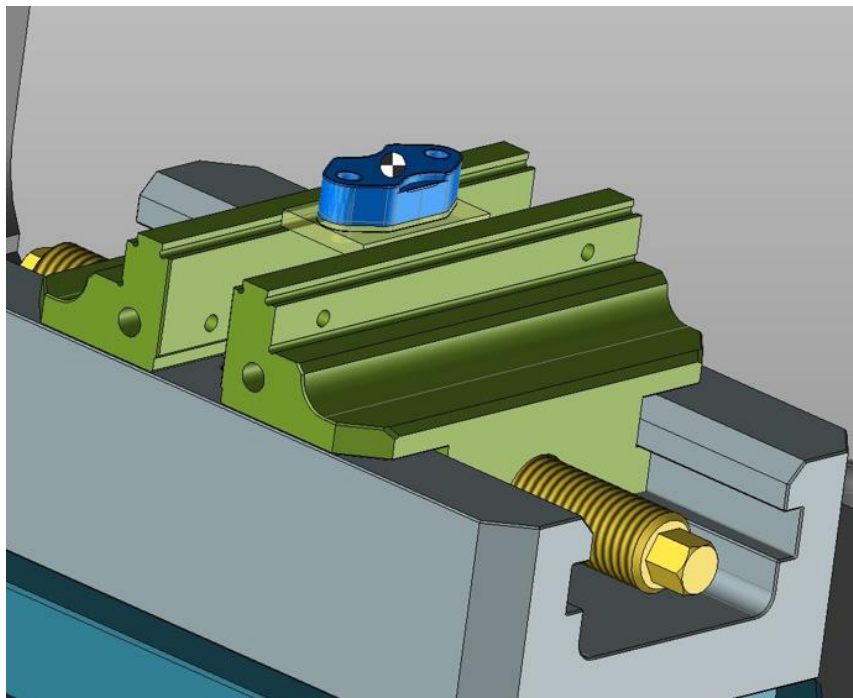
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου

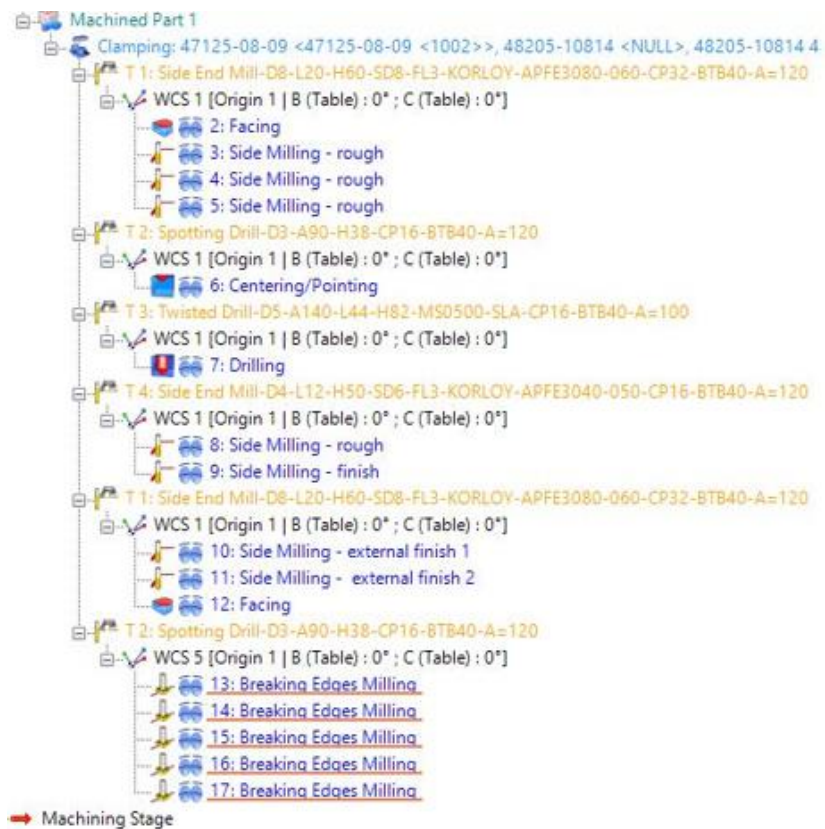
Ψηφιακή καθοδήγηση της εργαλειομηχανής (CAM)

Η κατεργασία απαιτεί την χρήση μόνο των τριών αξόνων της εργαλειομηχανής.

Στην προκειμένη περίπτωση, η κατεργαζόμενη πρώτη ύλη συγκρατείται στα «δόντια» της μέγγενης, δηλαδή στις εσοχές που υπάρχουν στο πάνω τμήμα της. Τα «δόντια» αυτά εισχωρούν στην πρώτη ύλη, παρέχοντας βέλτιστη σύσφιξη.



Εικόνα 3.1.4: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.



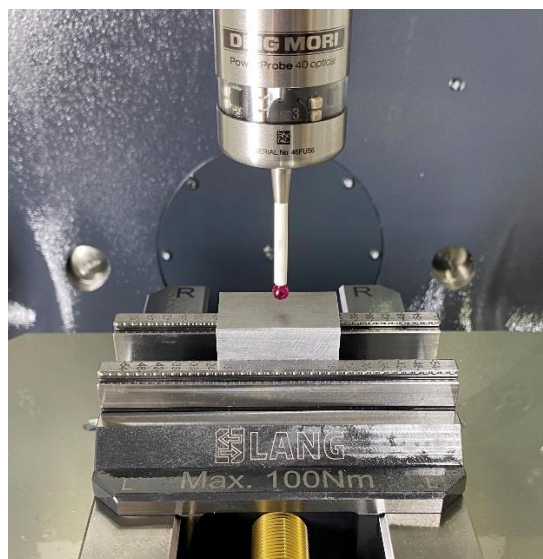
Εικόνα 3.1.5: Το «δέντρο» κατεργασιών του CAM Α' Φάσης.

Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της διαδικασίας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.5:

Αρχικά, με το κοντύλι T1 γίνεται το ξεχόνδρισμα στην πάνω επιφάνεια και περιφερειακά της πρώτης ύλης. Ύστερα, ο κεντραδόρος T2 δημιουργεί τα κέντρα για τις δύο οπές που θα διατρήσει στη συνέχεια το τρυπάνι T3. Το επόμενο βήμα είναι να γίνει το ξεχόνδρισμα και το φινίρισμα των οπών από το κοντύλι T4, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή διάστασή τους. Τέλος, ο κεντραδόρος T2 κάνει το σπάσιμο γωνιών (Breaking Edges) 0.5 mm, περιφερειακά του τεμαχίου και των οπών.

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:

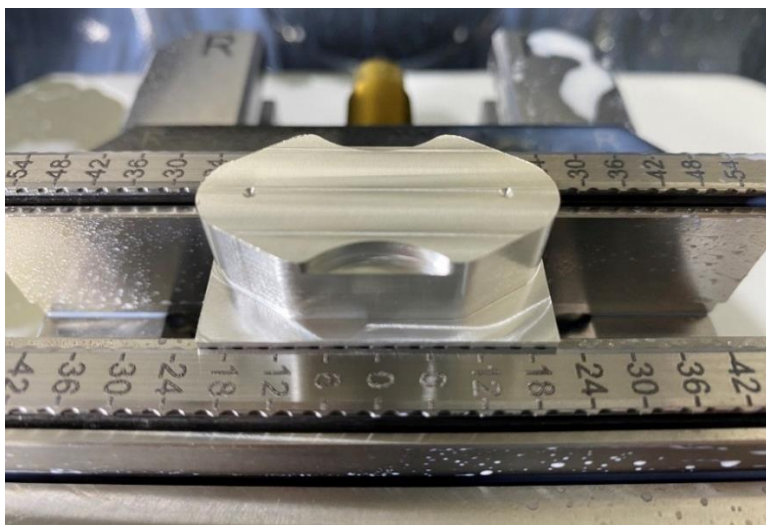
Αρχικά, μέσω του tool setting probe της μηχανής, γίνεται η μέτρηση του μήκους και της ακτίνας των κοπτικών εργαλείων με ακρίβεια 1 μm . Ύστερα, η πρώτη ύλη τοποθετείται στη μέγγενη και μέσω του touch probe γίνεται ο μηδενισμός του συστήματος συντεταγμένων. Το μηδέν του συστήματος συντεταγμένων στη μηχανή πρέπει να είναι το ίδιο με αυτό που ορίστηκε στο CAM. Στην προκειμένη περίπτωση, το μηδέν των XYZ βρίσκεται στο κέντρο του τεμαχίου όσον αφορά στο X και στο Y και στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου όσον αφορά στο Z.



Εικόνα 3.1.6: Το touch probe βρίσκεται στη θέση $(X\ Y\ Z) = (0\ 0\ 10)$.



Εικόνα 3.1.7: Ξεχόνδρισμα μέσω του κοντυλιού T1 στην πάνω επιφάνεια και περιφερειακά της πρώτης ύλης.



Εικόνα 3.1.8: Τα κέντρα των οπών που δημιουργούνται από τον κεντραδόρο.



Εικόνα 3.1.9: Μέτρηση του συνολικού μήκους και των διαμέτρων των οπών.

Σε αυτό το σημείο, γίνεται παύση του προγράμματος, έτσι ώστε να μειωθεί η αντιστάθμιση των κοπτικών εργαλείων και να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η επιθυμητή διάμετρος των οπών είναι 5,50 mm, ενώ η μετρούμενη διάμετρος είναι 5,46 mm. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος, μειώνεται η αντιστάθμιση της ακτίνας του εργαλείου T4 κατά 0,020 mm, μέσω του ψηφιακού χειριστηρίου της μηχανής (control). Αντίστοιχα, για να διορθωθεί η διάσταση του μήκους, η οποία μετρήθηκε 42,03 mm, μειώνεται η αντιστάθμιση στις ακτίνας του εργαλείου T1 κατά 0,015 mm. Μετά από αυτές τις αλλαγές των αντισταθμίσεων, το πρόγραμμα επανεκκινείται από τη διαδικασία «9» (βλέπε Εικόνα 3.1.5), όπου γίνεται το φινιρίσμα των οπών και η Φάση Α' ολοκληρώνεται.



Εικόνα 3.1.10: Μέτρηση του συνολικού μήκους και των διαμέτρων των οπών μετά τις αλλαγές των αντισταθμίσεων.

Δεύτερη (Β') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων

Για την Β' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- ένα κοντύλι (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)

| | Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------------------------|--------|------|-----|------|-----|--|
| <input type="checkbox"/> | T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| <input type="checkbox"/> | T 2 | | 3mm | 10mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H38-CP16-BTB40-A=120 |

Εικόνα 3.1.11: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Β' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου

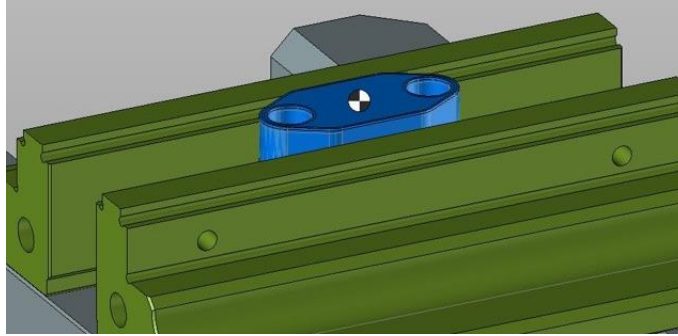
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου

Ψηφιακή καθοδήγηση στις εργαλειομηχανές (CAM)

Η κατεργασία απαιτεί την χρήση μόνο των τριών αξόνων στις εργαλειομηχανές.

Στην προκειμένη περίπτωση, το τεμάχιο τοποθετείται με την ακατέργαστη επιφάνεια προς τα πάνω και συγκρατείται από την ήδη κατεργασμένη επιφάνεια, στο εσωτερικό των σιαγόνων της μέγγενης.



Εικόνα 3.1.12: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.



Εικόνα 3.1.13: Το «δέντρο» κατεργασιών του CAM Β' Φάσης.

Περιγραφή στις διαδικασίες που φαίνεται στην Εικόνα 3.1.13:

Αρχικά, με το κοντύλι T1 γίνεται το ξεχόνδρισμα στην πάνω επιφάνεια, έτσι ώστε να γίνει επίπεδη. Η επιπεδότητα αυτή είναι σημαντική για τον αξιόπιστο μηδενισμό του συστήματος συντεταγμένων. Στη συνέχεια, με το ίδιο εργαλείο, γίνεται το ξεχόνδρισμα και το φινίρισμα των C – Bore (πατούρες) στις οπές που έχουν γίνει κατά την Φάση Α'. Ακολουθεί η ολοκλήρωση του τελικού ύψους του τεμαχίου (10 mm) με κατεργασία στην πάνω επιφάνεια (facing) και τέλος, ο κεντραδόρος T2 δημιουργεί το σπάσιμο γωνιών 0.5 mm περιφερειακά του τεμαχίου και των οπών.

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:

Αρχικά, χρησιμοποιούνται πρότυπα πλακίδια ως αποστάτες για να εξασφαλιστεί το ύψος του τεμαχίου που θα γίνει η κατεργασία. Πριν από κάθε χρήση πρότυπων πλακιδίων, πρέπει να μετρώνται οι τυχόν αποκλίσεις στην επιπεδότητά τους. Η μέτρηση αυτή γίνεται σε ένα από τα υψομετρικά όργανα του ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας και στη συγκεκριμένη περίπτωση βρέθηκε 4 μm , το οποίο είναι αποδεκτό από τις ορισμένες ανοχές του τεμαχίου.

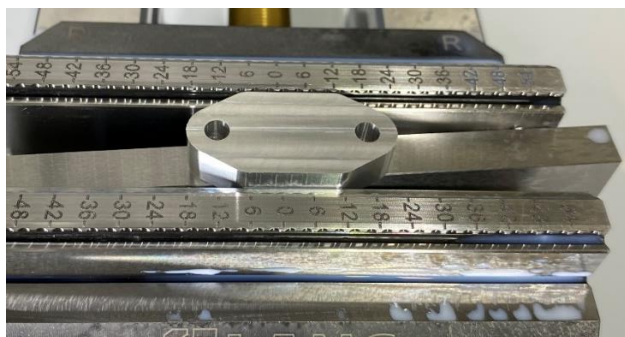


Εικόνα 3.1.14: Μέτρηση της επιπεδότητας του πρότυπου πλακιδίου με υψομετρικό όργανο.



Εικόνα 3.1.15: Το τεμάχιο τοποθετημένο στη μέγγενη για την Β' Φάση.

Αρχικά, έγινε ο μηδενισμός του συστήματος συντεταγμένων με το touch probe. Το μηδέν των XYZ βρίσκεται στο κέντρο του τεμαχίου όσον αφορά το X και το Y και στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου όσον αφορά το Z. Μετά το ξεχόνδρισμα την πρώτης ύλης από την πάνω επιφάνεια του τεμαχίου, το σύστημα συντεταγμένων μηδενίζεται ξανά. Αυτό γίνεται, επειδή η πρώτη ύλη δεν είναι επίπεδη, άρα το σύστημα συντεταγμένων από την μέτρηση του touch probe δεν θα ήταν η ίδια με του CAM.



Εικόνα 3.1.16: Το τεμάχιο μετά την αφαίρεση της πρώτης ύλης της πάνω επιφάνειας.

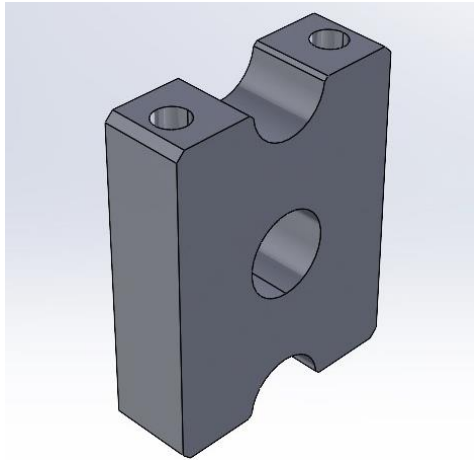


Εικόνα 3.1.17: Το τεμάχιο μετά την ολοκλήρωση της Β' Φάσης.

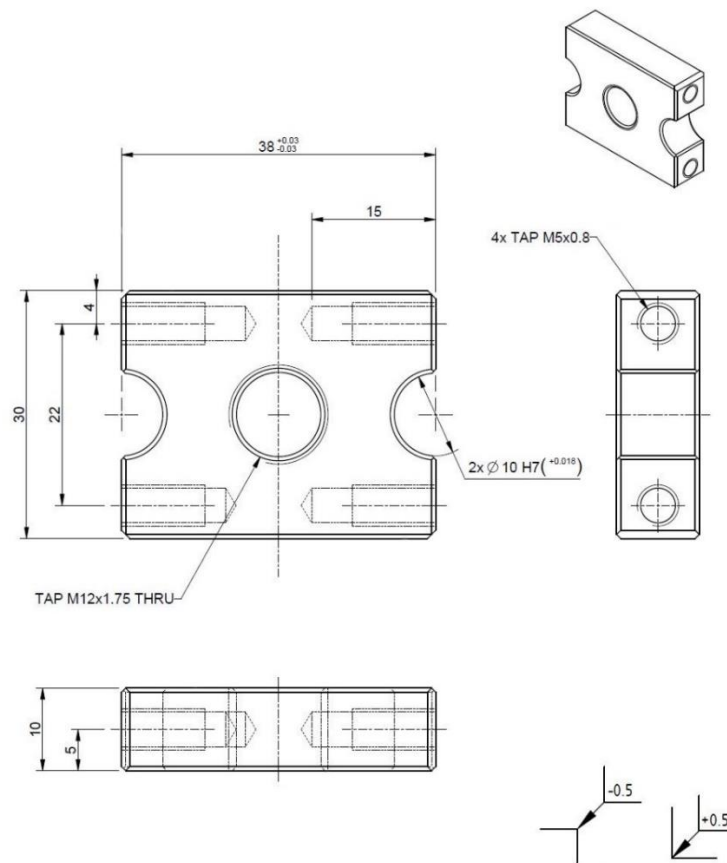


Εικόνα 3.1.18: Το τελικό τεμάχιο.

3.2 Κατασκευή 2^{ου} τεμαχίου



Εικόνα 3.2.1: Ψηφιακό μοντέλο του 2^{ου} τεμαχίου.



Εικόνα 3.2.2: Μηχανολογικό σχέδιο του 2^{ου} τεμαχίου.

Πρώτη (Α') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων:

Η κατασκευή του τεμαχίου γίνεται σε δύο φάσεις. Για την Α' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- δύο κοντύλια (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)
- δύο τρυπάνια (Twisted Drill)
- δύο εσωτερικούς σπειροτόμους (Tap)

| Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------|------|-------|------|-----|---|
| T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 2 | | 3mm | 10mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H38-CP16-BTB40-A=120 |
| T 5 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 10 | | 4.7mm | 36mm | 0mm | Twisted Drill-D4.7-A140-L36-H74-MPS0470-L-CP... |
| T 11 | | 5mm | 8mm | 0mm | Tap-M5x0.8-TC115-M5-C0-WY80AA-CP16M-BTP... |
| T 16 | | 12mm | 17mm | 0mm | Tap-M12x1.75-EP2056302-CP32-BTB40-A=120 |
| T 19 | | 9mm | 60mm | 0mm | Twisted Drill-D9-A140-L60-H100-CP16-BTB40-A=... |

Εικόνα 3.2.3: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Α' Φάση.

όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου

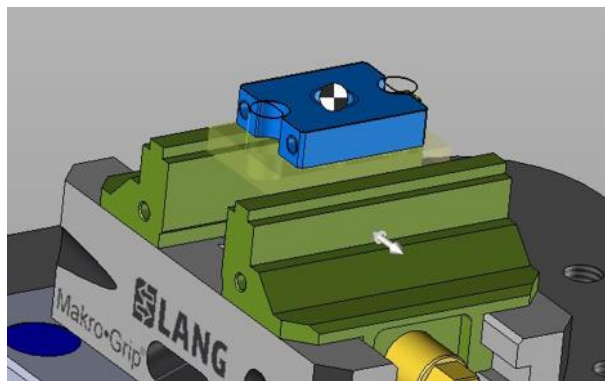
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου

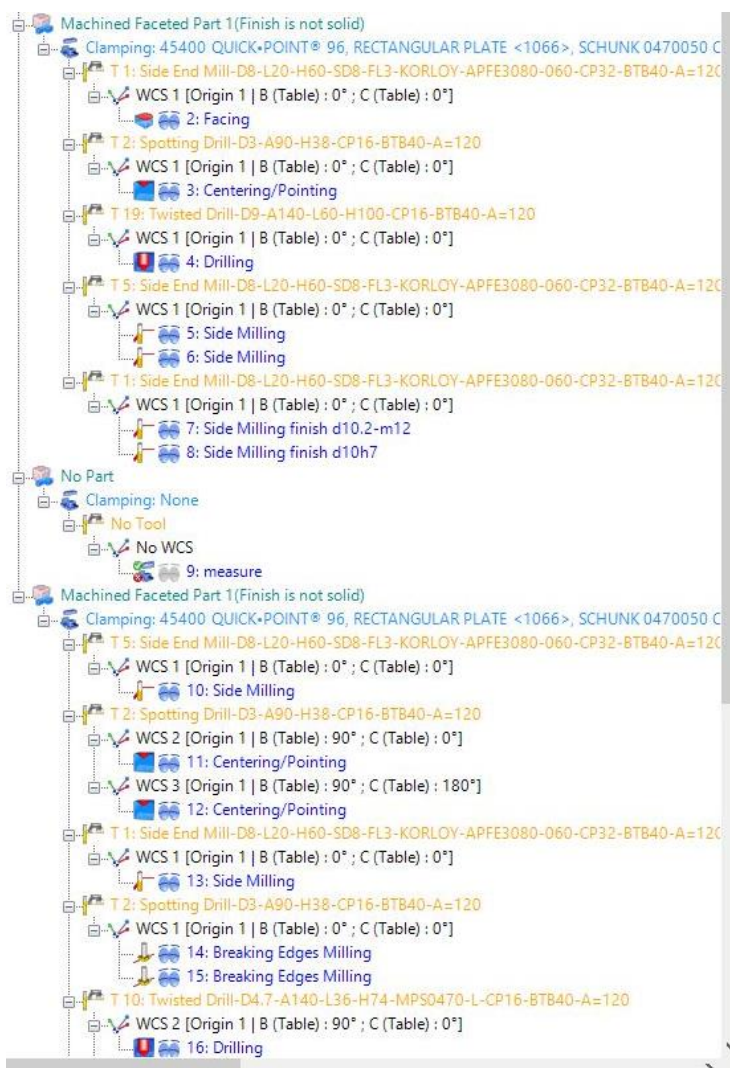
Ψηφιακή καθοδήγηση της εργαλειομηχανής (CAM):

Η κατεργασία απαιτεί την χρήση και των πέντε αξόνων της εργαλειομηχανής.

Η κατεργαζόμενη πρώτη ύλη συγκρατείται στα «δόντια» της μέγγενης.



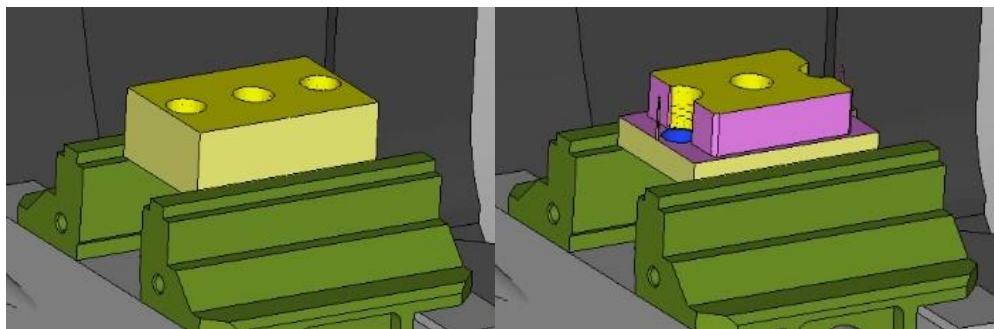
Εικόνα 3.2.4: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.





Εικόνα 3.2.5: Το «δέντρο» κατεργασιών του CAM Α' Φάσης.

Η γεωμετρία του τεμαχίου περιέχει δύο ημικύκλια, των οποίων οι διαστάσεις έχουν ανοχή H7 (0 / + 0,018 mm). Για να μπορέσουν να μετρηθούν με ακρίβεια, χρησιμοποιείται η εξής στρατηγική: το τεμάχιο αρχικά κατασκευάζεται με οπές στη θέση των ημικυκλίων, οι οποίες θα μπορούν να μετρηθούν με έναν ελεγκτήρα οπής. Μετά τον έλεγχο τους, αφαιρείται υλικό από αυτά και φτάνουν στην τελική τους μορφή μέσω μιας περιφερειακής κατεργασίας (side milling).



Εικόνα 3.2.6: Η μορφή του τεμαχίου για να ελεγχθούν οι διάμετροι ακριβείας με ελεγκτήρα οπής (αριστερά) και η τελική γεωμετρία (δεξιά).

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες κατασκευής σπειρωμάτων, για κάθε διάμετρο εσωτερικού σπειροτόμου χρειάζεται να έχει γίνει μια οπή συγκεκριμένης διαμέτρου. Για παράδειγμα, για να γίνει ένα σπείρωμα M12, χρειάζεται να έχει γίνει οπή διαμέτρου 10,2 mm.

Περιγραφή της διαδικασίας που φαίνεται στην Εικόνα 3.2.5:

Αρχικά, με το κοντύλι T1 γίνεται το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης στην πάνω επιφάνεια (facing). Δημιουργούνται τα κέντρα των οπών από τον κεντραδόρο T2, ακολουθεί το τρυπάνι T19 για τη δημιουργία των οπών και ύστερα τα κοντύλια T5 και T1 για το ξεχόνδρισμα και το φινίρισμα των οπών αντίστοιχα. Στη συνέχεια, με το κοντύλι T5 ξεχονδρίζεται η περιφερειακή γεωμετρία του τεμαχίου και με το T1 ολοκληρώνεται (φινίρισμα). Επίσης, ο κεντραδόρος T2 δημιουργεί τα σπασίματα γωνιών περιφερειακά του τεμαχίου και τα κέντρα για τα εσωτερικά σπειρώματα. Το τρυπάνι T10 ανοίγει τις οπές και ο εσωτερικός σπειροτόμος δημιουργεί τα σπειρώματα M5. Αντίστοιχα, το κοντύλι T1 φτάνει την διάμετρο της οπής στα 10,2 mm και ο εσωτερικός σπειροτόμος δημιουργεί το σπείρωμα M12.

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:



Εικόνα 3.2.7: Η πρώτη ύλη τοποθετημένη στη μέγγενη για την Α' Φάση.

Γίνεται ο μηδενισμός του συστήματος συντεταγμένων με το touch probe. Το μηδέν των XYZ βρίσκεται στο κέντρο του τεμαχίου όσον αφορά στο X και στο Y και στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου, όσον αφορά στο Z.



Εικόνα 3.2.8: Η γεωμετρία του τεμαχίου για να μετρηθούν οι διάμετροι ακριβείας.

Αρχικά, το μικρόμετρο οπής μηδενίζεται σε πρότυπη καλίμπρα διαμέτρου 10,000 mm, οπότε όταν μετρηθεί μια οπή διαμέτρου 10mm, η ένδειξη θα είναι 0.



Εικόνα 3.2.9: Μηδενισμός μικρομέτρου οπής με καλίμπρα διαμέτρου 10mm.

Η αντιστάθμιση του κοντυλιού T1, το οποίο τελειοποιεί τις οπές διάστασης $\varnothing 10H7$ ($0 / +0,018$ mm), αρχικά είναι $+0,02$ και η ένδειξη του μικρομέτρου κατά την μέτρηση είναι $-0,060$ mm. Όταν πρόκειται για διαστάσεις ακριβείας πρέπει να γίνονται σταδιακές μειώσεις των αντισταθμίσεων, έτσι ώστε να εξλειφθεί ο κίνδυνος υπερβολικής μείωσης της διάστασης. Η αντιστάθμιση επομένως μειώνεται στο $-0,010$ mm, το πρόγραμμα επανεκκινείται και η ένδειξη του μικρομέτρου τώρα είναι $0,004$ mm.



Εικόνα 3.2.10: Μέτρηση της οπής μετά την πρώτη αλλαγή στην αντιστάθμιση.

Προτιμάται η τελική διάσταση να βρίσκεται στα μέσα της ανοχής, οπότε στην προκειμένη περίπτωση να βρίσκεται στα μέσα του $0 / + 0,018 \text{ mm}$. Για αυτό το λόγο η αντιστάθμιση μειώνεται στα $-0,013 \text{ mm}$, γίνεται επανεκκίνηση του προγράμματος και η τελική ένδειξη της διαμέτρου είναι $0,010 \text{ mm}$.



Εικόνα 3.2.11: Έλεγχος της οπής με ελεγκτήρα Go και μέτρηση τελικής διάστασης με μικρόμετρο.

Μετά την κατεργασία 13 (βλέπε Εικόνα 3.2.5), γίνεται παύση του προγράμματος για να μετρηθεί το μήκος του τεμαχίου που ολοκληρώθηκε από το εργαλείο T1. Εκ των προτέρων είναι γνωστό ότι αφού το ίδιο εργαλείο κάνει τις οπές ακριβείας, και η διάσταση του

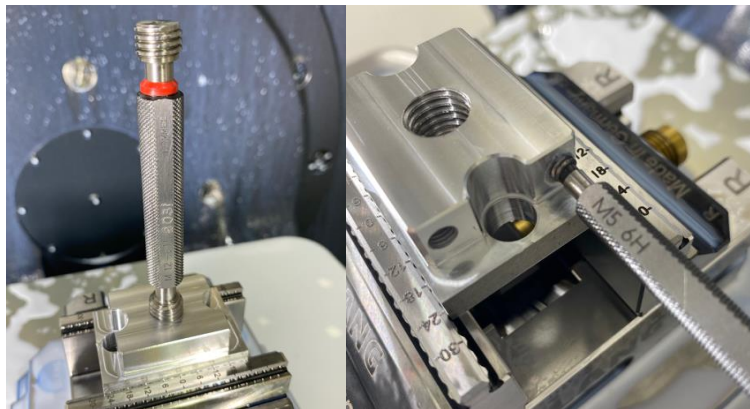
μήκους του τεμαχίου θα είναι ίση με την ονομαστική, δεδομένου ότι δεν έχει αλλάξει η αντιστάθμιση. Πρόκειται δηλαδή, για την ακρίβεια που έχει η εργαλειομηχανή.

Η μέτρηση του μήκους του τεμαχίου γίνεται με χρήση μικρομέτρου εύρους 25 – 50 mm. Αυτό σημαίνει ότι η ένδειξη πρέπει να προστεθεί στο 25 mm για να υπολογιστεί η πραγματική διάσταση. Στην προκειμένη περίπτωση, η πραγματική διάσταση υπολογίζεται ως εξής: 13,001 mm από την μέτρηση συν 25,000 mm, άρα 38,001 mm.



Εικόνα 3.2.12: Μέτρηση μήκους με μικρόμετρο εύρους 25 – 50 mm.

Στο τέλος ελέγχονται τα σπειρώματα M12 x 1,75 και M5 x 0,8 με πρότυπους ελεγκτήρες σπειρωμάτων.



Εικόνα 3.2.13: Έλεγχος σπειρωμάτων με ελεγκτήρες σπειρωμάτων.

Δεύτερη (Β') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων

Για την Β' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- δύο κοντύλια (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)

| Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------|------|-----|------|-----|--|
| T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 2 | | 3mm | 10mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H38-CP16-BTB40-A=120 |
| T 5 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |

Εικόνα 3.2.14: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Β' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου,

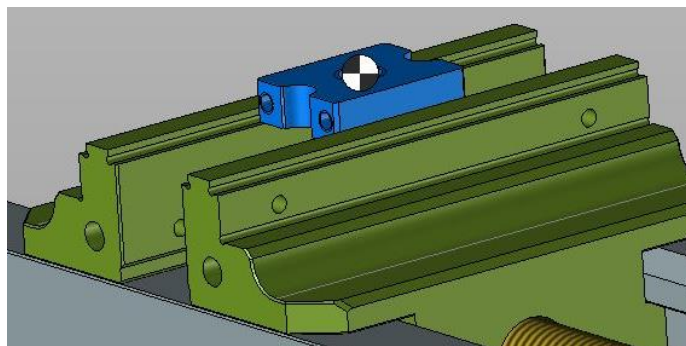
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου,

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου.

Ψηφιακή καθοδήγηση στις εργαλειομηχανές (CAM):

Η κατεργασία απαιτεί την χρήση μόνο των τριών αξόνων στις εργαλειομηχανές.

Στην προκειμένη περίπτωση, το τεμάχιο τοποθετείται με την ακατέργαστη επιφάνεια προς τα πάνω και συγκρατείται από την ήδη κατεργασμένη επιφάνεια, στο εσωτερικό των σιαγόνων της μέγγενης.



Εικόνα 3.2.15: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.



Εικόνα 3.2.16: Το δέντρο κατεργασιών του CAM της Β΄ Φάσης.

Περιγραφή της διαδικασίας που φαίνεται στην Εικόνα 3.2.16:

Αρχικά, με το κοντύλι T5 γίνεται το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης. Ύστερα, το πρόγραμμα διακόπτεται για να «μηδενιστούν» οι άξονες X και Y με το touch probe. Το πρόγραμμα επανεκκινείται, ο κεντραδόρος T2 κάνει τα σπασίματα των γωνιών και τέλος, το κοντύλι T1 ολοκληρώνει το συνολικό ύψος του τεμαχίου (facing).

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:

Για να είναι εφικτή η κατεργασία, χρησιμοποιούνται πρότυπα πλακίδια ως αποστάτες. Τα πλακίδια αυτά μετρώνται ως προς την επιπεδότητά τους σε υψομετρικό όργανο του ποιοτικού ελέγχου και τοποθετούνται κάτω από το τεμάχιο. Γίνεται ο πρώτος μηδενισμός των XYZ με το touch probe και εκκινεί το πρόγραμμα. Ακολουθεί το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου και μετά ο δεύτερος μηδενισμός των αξόνων X και Y. Τέλος, σύμφωνα με το CAM, γίνονται τα σπασίματα των γωνιών και ολοκληρώνεται το τελικό ύψος του τεμαχίου.



Εικόνα 3.2.17: Τα πλακίδια και το τεμάχιο τοποθετημένα στο σύστημα συγκράτησης.



Εικόνα 3.2.18: Έλεγχος πλήρους επαφής πλακιδίου και τεμαχίου με φύλλερ 0,02 mm. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί η επιτεδότητα στο τελικό τεμάχιο.

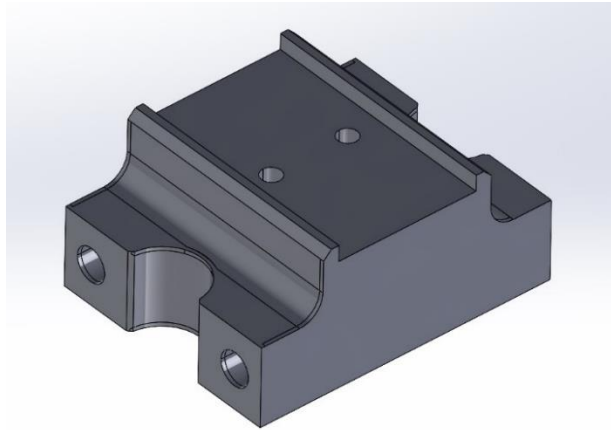


Εικόνα 3.2.19: Μηδενισμός των αξόνων X και Y μετά την αφαίρεση της πρώτης ύλης της πάνω επιφάνειας.

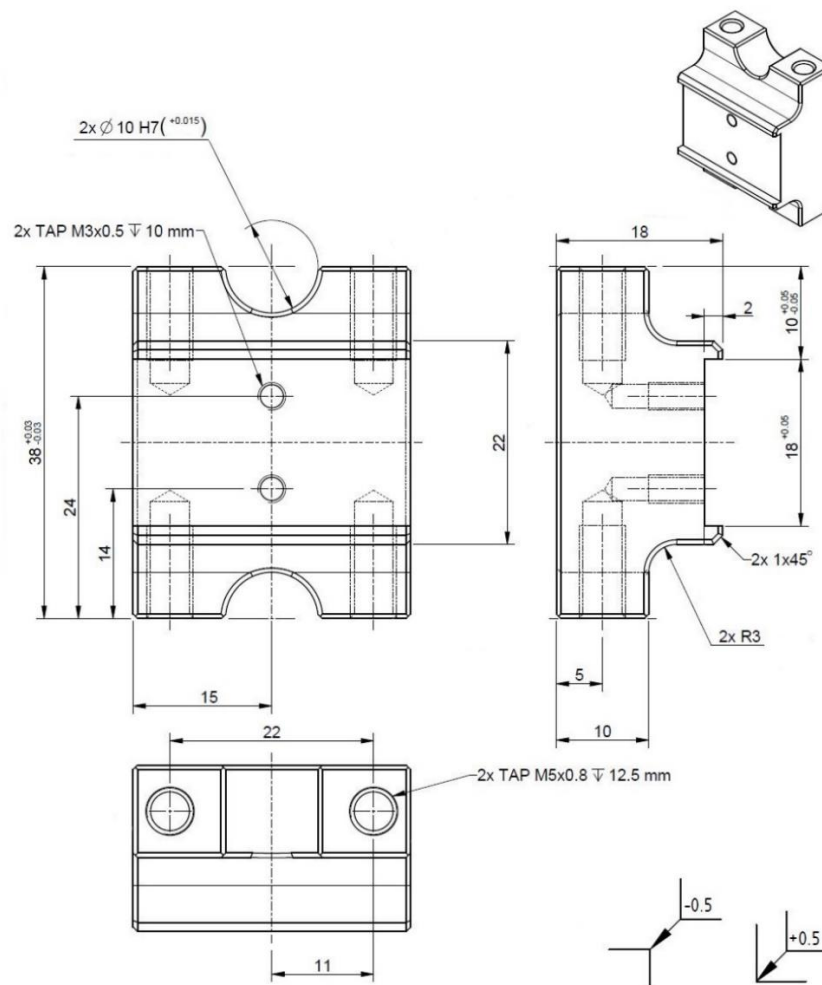


Εικόνα 3.2.20: Το τελικό τεμάχιο.

3.3 Κατασκευή 3^{ου} τεμαχίου



Εικόνα 3.3.1: Ψηφιακό μοντέλο του 3^{ου} τεμαχίου.



Εικόνα 3.3.2: Μηχανολογικό σχέδιο του 3^{ου} τεμαχίου.

Πρώτη (Α') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων:

Η κατασκευή του τεμαχίου γίνεται σε δύο φάσεις. Για την Α' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- δύο κοντύλια (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)
- τρία τρυπάνια (Twisted Drill)
- δύο εσωτερικούς σπειροτόμους (Tap)
- μια φρεζοκεφαλή
- ένα κοντύλι με σφαιρικό άκρο (Ball End Mill)

| Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------|------|-------|--------|-----|---|
| T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 2 | | 3mm | 10mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H38-CP16-BTB40-A=120 |
| T 5 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 7 | | 40mm | 11,5mm | 0mm | WIDIA-VSM11D040Z06M16XD11-SK40-M16-102-... |
| T 9 | | 8,5mm | 61mm | 0mm | Twisted Drill-D8.5-A140-L61-H103-MS0850-SLA-... |
| T 10 | | 4,7mm | 36mm | 0mm | Twisted Drill-D4.7-A140-L36-H74-MPS0470-L-CP... |
| T 11 | | 5mm | 8mm | 0mm | Tap-M5x0.8-TC115-M5-C0-WY80AA-CP16M-BTP... |
| T 21 | | 6mm | 19mm | 3mm | Ball End Mill-D6-L19-H63-SD6-FL4-CP16-BTB40-... |
| T 22 | | 2,8mm | 32mm | 0mm | Twisted Drill-D2.8-A140-L32-H82-MZS0280LB-CP... |
| T 23 | | 3mm | 6mm | 0mm | Tap-M3x0.5-TC115-M3-C0-WY80AA-CP16M-BTB... |

Εικόνα 3.3.3: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Α' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου,

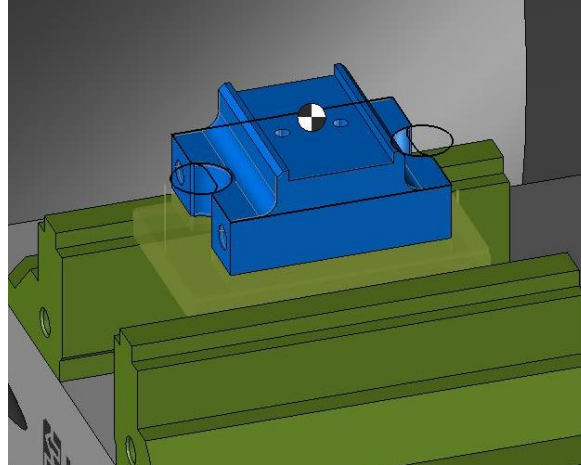
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου,

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου.

Ψηφιακή καθοδήγηση της εργαλειομηχανής (CAM):

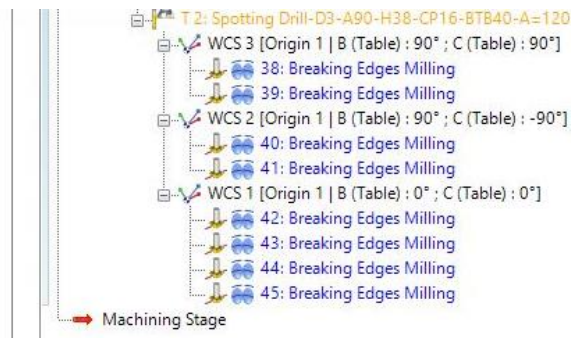
Η κατεργασία απαιτεί την χρήση και των πέντε αξόνων της εργαλειομηχανής.

Η κατεργαζόμενη πρώτη ύλη συγκρατείται στα «δόντια» της μέγγνης.



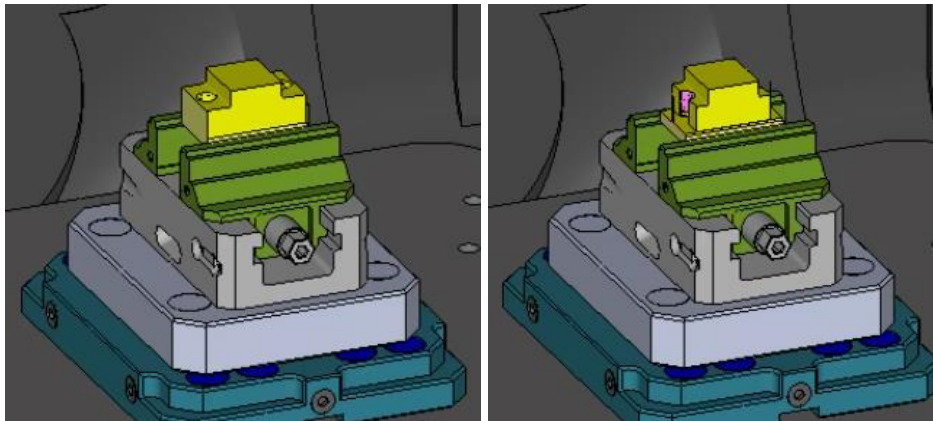
Εικόνα 3.3.4: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.





Εικόνα 3.3.5: Το «δέντρο» κατεργασιών του CAM Α' Φάσης.

Η γεωμετρία του τεμαχίου περιέχει δύο ημικύκλια, των οποίων οι διαστάσεις έχουν ανοχή H7 (0 / +0,015 mm). Για να μπορέσουν να μετρηθούν με ακρίβεια χρησιμοποιείται η στρατηγική που χρησιμοποιήθηκε και στο 2^ο τεμάχιο: Το τεμάχιο αρχικά κατασκευάζεται με οπές στη θέση των ημικυκλίων, οι οποίες θα μπορούν να μετρηθούν με έναν ελεγκτήρα οπής. Μετά τον έλεγχο τους, αφαιρείται υλικό από αυτά και φτάνουν στην τελική τους μορφή μέσω μιας περιφερειακής κατεργασίας (side milling).



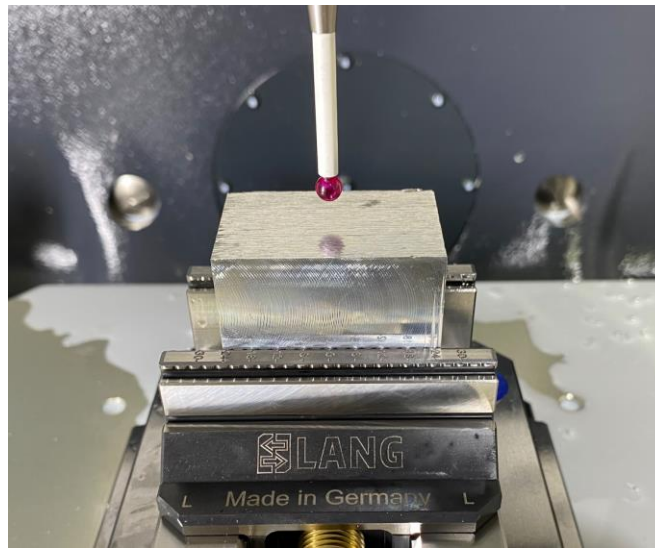
Εικόνα 3.3.6: Η μορφή του τεμαχίου για να ελεγχθούν οι διάμετροι ακριβείας με ελεγκτήρα οπής (αριστερά) και η τελική γεωμετρία (δεξιά).

Περιγραφή της διαδικασίας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.5:

Αρχικά, με τη φρεζοκεφαλή T7 γίνεται το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης. Ύστερα, δημιουργούνται τα κέντρα για τις οπές ακριβείας με τον κεντραδόρο T2. Ακολουθεί η διάτρησή τους με το τρυπάνι T9, το ξεχόνδρισμα με το κοντύλι T5 και τέλος η αποπεράτωσή τους με το κοντύλι T1. Εδώ, γίνεται παύση του προγράμματος, εμφανίζοντας μήνυμα «Change tool Wear», δηλαδή να γίνει αλλαγή της αντιστάθμισης του εργαλείου T1 και να επανεκκινηθεί το πρόγραμμα όσες φορές χρειαστεί έως να επιτευχθεί

η διάσταση ακριβείας. Στη συνέχεια, το κοντύλι T5 αφαιρεί υλικό περιφερειακά του τεμαχίου (εδώ σχηματίζονται τα ημικύκλια). Ακολουθεί το κοντύλι T21 (Ball End Mill) που σχηματίζει τα ράδια R3. Επίσης, γίνεται το ξεχόνδρισμα της εσοχής (pocket) στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου από το κοντύλι T5 και με το κοντύλι T1 πραγματοποιείται το φινίρισμα της εσοχής καθώς και η ολοκλήρωση των διαστάσεων ακριβείας, δηλαδή των $(38 \pm 0,03)$ mm και $(10 \pm 0,05)$ mm. Σε επόμενο βήμα, γίνονται τα κέντρα για όλες τις οπές του τεμαχίου από τον κεντραδόρο T2, η διάτρηση αυτών με τα αντίστοιχα τρυπάνια, T10 και T22, καθώς και η δημιουργία των σπειρωμάτων από τους εσωτερικούς σπειροτόμους T11 και T23 αντίστοιχα. Τέλος, γίνονται όλα τα σπασίματα των γωνιών όπου είναι εφικτό να προσεγγίσει η μηχανή.

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:



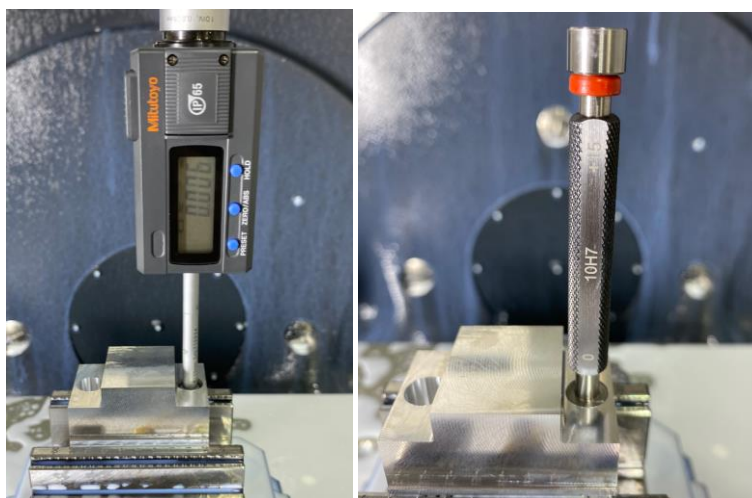
Εικόνα 3.3.7: Η πρώτη ύλη τοποθετημένη στη μέγγενη για την Α' Φάση.

Γίνεται ο μηδενισμός του συστήματος συντεταγμένων με το touch probe. Το μηδέν των XYZ βρίσκεται στο κέντρο του τεμαχίου όσον αφορά στο X και στο Y και στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου όσον αφορά στο Z. Το πρόγραμμα εκκινείται και αφού έχουν διατρηθεί οι οπές ακριβείας, γίνεται παύση του προγράμματος για να μετρηθούν οι διάμετροί τους.



Εικόνα 3.3.8: Μέτρηση των διαμέτρων των οπών ακριβείας με παχύμετρο.

Αρχικά, η αντιστάθμιση του κοντυλιού T1 που πραγματοποιεί το φινίρισμα των οπών ακριβείας είναι 0,000 mm. Η αντιστάθμιση διορθώνεται στα -0,013 mm και γίνεται επανεκκίνηση του προγράμματος στο σημείο πριν το φινίρισμα των οπών. Μετά την αλλαγή της αντιστάθμισης, οι οπές μετρώνται με μικρόμετρο οπής και η ένδειξη είναι 0,006 mm, άρα η αντιστάθμιση είναι και η τελική.



Εικόνα 3.3.9: Μέτρηση των διαμέτρων ακριβείας με μικρόμετρο και έλεγχος με ελεγκτήρα οπής (Go) 10H7.

Το πρόγραμμα συνεχίζει σχηματίζοντας την εσοχή πλάτους 18 mm. Για να μετρηθεί η διάσταση αυτή, χρησιμοποιήθηκε ένα πρότυπο πλακίδιο πλάτους 18,000 mm.



Εικόνα 3.3.10: Μέτρηση του πρότυπου πλακιδίου με μικρόμετρο για επαλήθευση της ακρίβειας της διάστασής του.

Όπως φάνηκε και κατά την κατασκευή του 2^{ου} τεμαχίου, όταν χρησιμοποιείται ένα κοντύλι για την επίτευξη μιας διάστασης ακριβείας, ό,τι κατεργασία κάνει αυτό με την ίδια αντιστάθμιση, επιτυγχάνει τις εκάστοτε ονομαστικές διαστάσεις με την ακρίβεια της εργαλειομηχανής. Στην προκειμένη περίπτωση, το κοντύλι T1 που χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση των οπών ακριβείας είναι το ίδιο κοντύλι που χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση του πλάτους της εσοχής. Αφού λοιπόν, από την ολοκλήρωση των οπών ακριβείας, η αντιστάθμιση του εργαλείου είναι η σωστή, είναι αναμενόμενο το πλακίδιο να εισέρχεται «σφηνωτά» στην εσοχή, υποδεικνύοντας ότι η διάσταση είναι εντός των επιτρεπτών ανοχών. Εντός των επιτρεπτών ανοχών, αναμένεται να είναι επίσης και το συνολικό πλάτος του τεμαχίου με ονομαστική διάσταση $(38 \pm 0,03)$ mm.

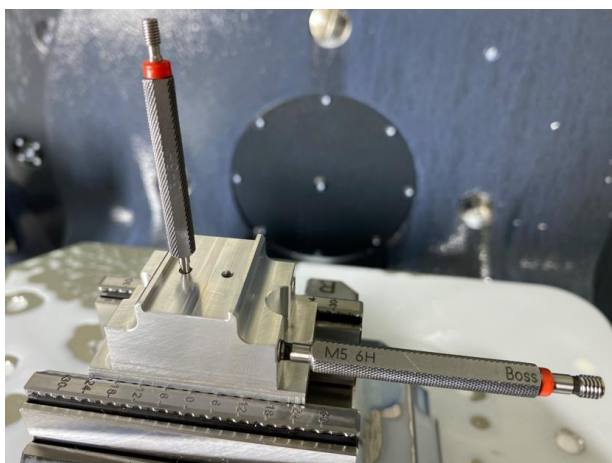


Εικόνα 3.3.11: Έλεγχος της εσοχής με τη χρήση του πρότυπου πλακιδίου.



Εικόνα 3.3.12: Μέτρηση του συνολικού πλάτους του τεμαχίου με μικρόμετρο 25–50 mm ($25,000 + 13,003 = 38,003$ mm).

Στο τέλος του προγράμματος ελέγχονται τα σπειρώματα M5 και M3 με τους αντίστοιχους ελεγκτήρες σπειρωμάτων Go – No Go.



Εικόνα 3.3.13: Έλεγχος των σπειρωμάτων με τους αντίστοιχους ελεγκτήρες σπειρωμάτων Go – No Go.

Δεύτερη (B') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων:

Για την B' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- δύο κοντύλια (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)

| Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------|------|-----|------|-----|--|
| T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 2 | | 3mm | 10mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H38-CP16-BTB40-A=120 |
| T 5 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |

Εικόνα 3.3.14: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην B' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου,

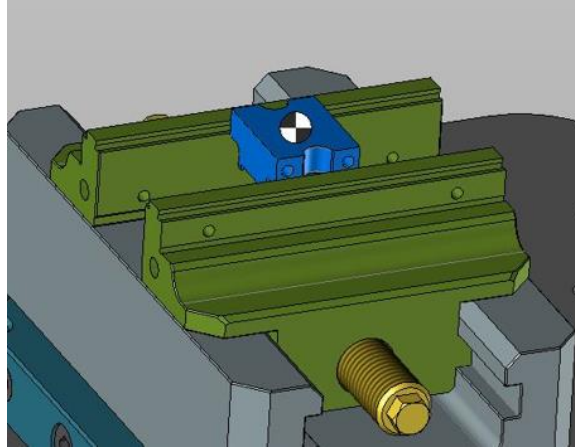
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου,

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου.

Ψηφιακή καθοδήγηση στις εργαλειομηχανές (CAM)

Η κατεργασία απαιτεί την χρήση μόνο των τριών αξόνων στις εργαλειομηχανές.

Στην προκειμένη περίπτωση, το τεμάχιο τοποθετείται με την ακατέργαστη επιφάνεια προς τα πάνω και συγκρατείται από την ήδη κατεργασμένη επιφάνεια, στο εσωτερικό των σιαγόνων της μέγγενης.



Εικόνα 3.3.15: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.



Εικόνα 3.3.16: Το δέντρο κατεργασιών του CAM της Β' Φάσης.

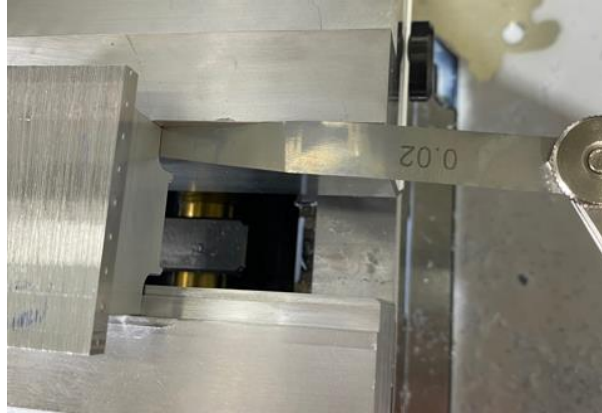
Περιγραφή της διαδικασίας που φαίνεται στην Εικόνα 3.3.16:

Αρχικά, με το κοντύλι T5 γίνεται το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης. Ύστερα, το πρόγραμμα διακόπτεται για να «μηδενιστούν» οι άξονες X και Y με το touch probe. Το πρόγραμμα επανεκκινείται, ο κεντραδόρος T2 κάνει τα σπασίματα των γωνιών και τέλος, το κοντύλι T1 ολοκληρώνει το συνολικό ύψος του τεμαχίου (facing).

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:

Για την συγκεκριμένη κατεργασία, χρησιμοποιούνται μαλακές σιαγόνες στην μέγγενη, για να μην φθαρεί η εξωτερική επιφάνεια του τεμαχίου. Αφού το τεμάχιο συσφιχθεί στη μέγγενη, γίνεται έλεγχος με φύλλερ πάχους 0,02 mm για να εξασφαλιστεί ότι το τεμάχιο

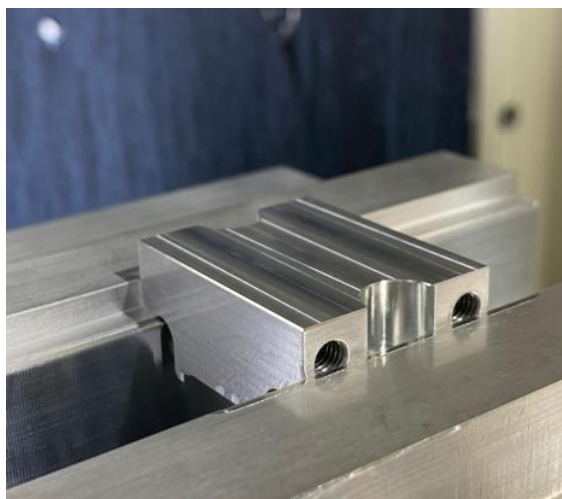
είναι τοποθετημένο παράλληλα στο οριζόντιο επίπεδο. Γίνεται ο πρώτος μηδενισμός των XYZ με το touch probe και εκκινείται το πρόγραμμα. Ακολουθεί το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου και μετά ο δεύτερος μηδενισμός των αξόνων X και Y. Τέλος, σύμφωνα με το CAM, γίνονται τα σπασίματα των γωνιών και ολοκληρώνεται το τελικό ύψος του τεμαχίου.



Εικόνα 3.3.17: Έλεγχος με φύλλερ για την σωστή τοποθέτηση του τεμαχίου στην μέγγενη.



Εικόνα 3.3.18: Μέτρηση – Μηδενισμός των αξόνων XYZ με το touch probe.

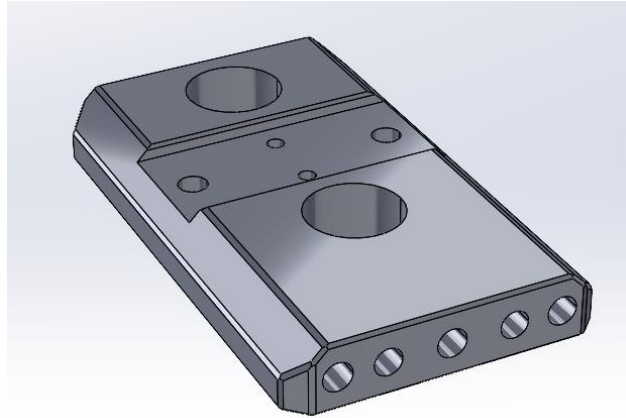


Εικόνα 3.3.19: Το τεμάχιο στο τέλος της Β' Φάσης.

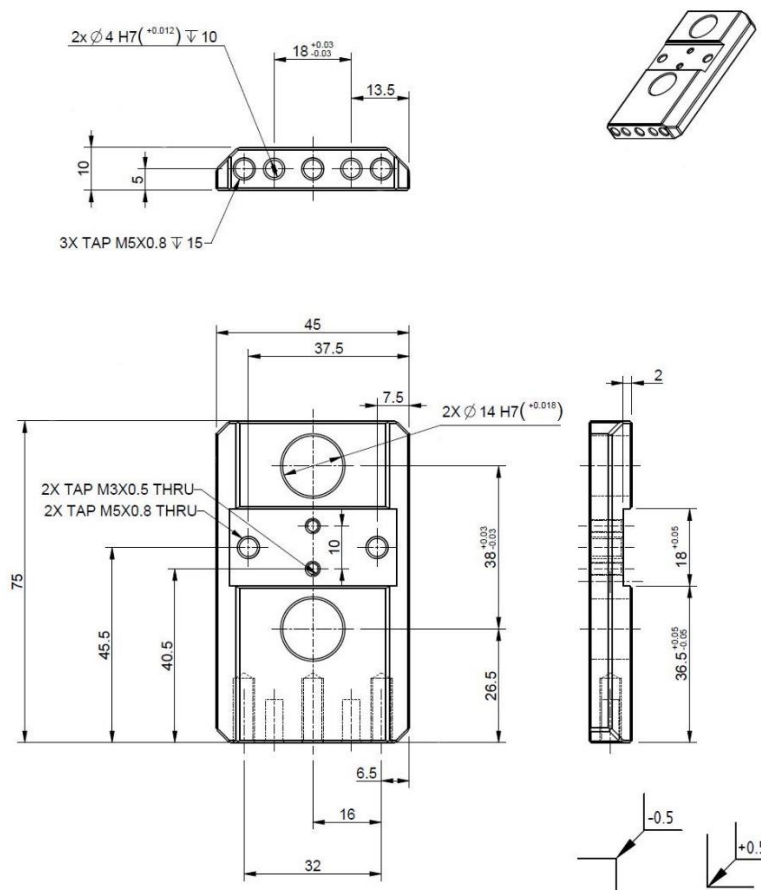


Εικόνα 3.3.20: Το τελικό τεμάχιο.

3.4 Κατασκευή 4^{ου} τεμαχίου



Εικόνα 3.4.1: Ψηφιακό μοντέλο του 4^{ου} τεμαχίου.



Εικόνα 3.4.2: Μηχανολογικό σχέδιο του 4^{ου} τεμαχίου.

Πρώτη (Α') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων:

Η κατασκευή του τεμαχίου γίνεται σε δύο φάσεις. Για την Α' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- τρία κοντύλια (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)
- πέντε τρυπάνια (Twisted Drill)
- τρεις εσωτερικοί σπειροτόμοι (Tap)
- μια φρεζοκεφαλή

| Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------|------|-------|--------|-----|--|
| T 2 | | 3mm | 8mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H50-CP16-BTB40-A=160 |
| T 5 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APFE3080-060-CP32-BTB40-A=120 |
| T 6 | | 12mm | 32mm | 0mm | Side End Mill-D12-L32-H75-SD12-FL3-KORLOY-APFE3120-075-CP32-BTB40-A=160 |
| T 9 | | 8.5mm | 61mm | 0mm | Twisted Drill-D8.5-A140-L61-H103-MS0850-SLA-CP32-BTB40-A=160 |
| T 10 | | 4.7mm | 36mm | 0mm | Twisted Drill-D4.7-A140-L36-H74-MPS0470-L-CP16-BTB40-A=120 |
| T 11 | | 5mm | 8mm | 0mm | Tap-M5x0.8-TC115-M5-C0-WY80AA-CP16M-BTP40-A=120 |
| T 15 | | 3mm | 6mm | 0mm | Side End Mill-D3-L6-H50-SD6-FL3-MITSUBISHI-VQ-MHZV-INOX-CP16-BTB40-A=100 |
| T 20 | | 3.5mm | 28mm | 0mm | Twisted Drill-D3.5-A140-L28-H66-MZS0350-L-CP16M-BTP40-A=120 |
| T 22 | | 2.8mm | 32mm | 0mm | Twisted Drill-D2.8-A140-L32-H82-MZS0280LB-CP16-BTB40-A=120 |
| T 23 | | 3mm | 6mm | 0mm | Tap-M3x0.5-TC115-M3-C0-WY80AA-CP16M-BTB40-A=120 |
| T 25 | | 4.2mm | 36mm | 0mm | Twisted Drill-D4.2-A140-L36-H74-MS0420-SLA-CP32-BTB40-A=120 |
| T 26 | | 5mm | 8mm | 0mm | Tap-M5x0.8-TC115-M5-C0-WY80AA-CP32-BTB40-A=120 |
| T 30 | | 100mm | 16.5mm | 0mm | MITSUBISHI-AXD4000-100A06RA-SK40-32-100-MAS 403BT |

Εικόνα 3.4.3: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Α' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου,

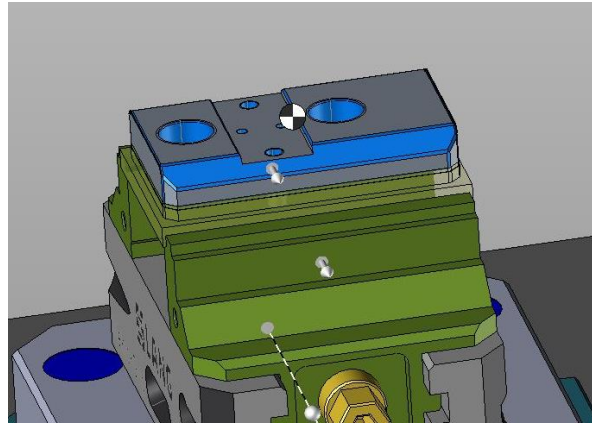
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου,

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου.

Ψηφιακή καθοδήγηση της εργαλειομηχανής (CAM):

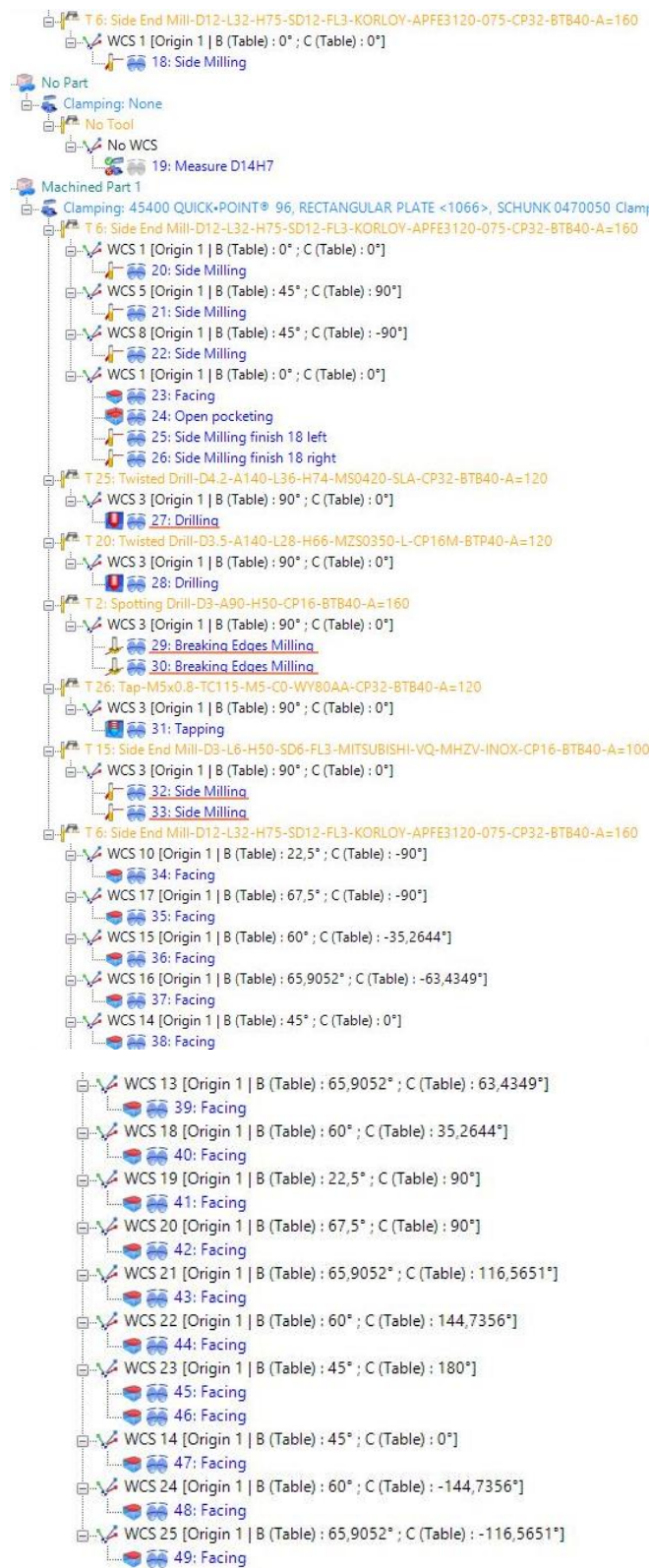
Η κατεργασία απαιτεί την χρήση και των πέντε αξόνων της εργαλειομηχανής.

Η κατεργαζόμενη πρώτη ύλη συγκρατείται στα «δόντια» της μέγγενης.



Εικόνα 3.4.4: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.

Clamping: 45400 QUICK-POINT® 96, RECTANGULAR PLATE <1066>, SCHUN
 T 30: MITSUBISHI-AXD4000-100A06RA-SK40-32-100-MAS 403BT
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 2: Facing
 T 5: Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APFE3080-060-CP32-E
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 3: Side Milling
 4: Open pocketing
 T 2: Spotting Drill-D3-A90-H50-CP16-BTB40-A=160
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 5: Centering/Pointing
 WCS 3 [Origin 1 | B (Table) : 90° ; C (Table) : 0°]
 6: Centering/Pointing
 T 9: Twisted Drill-D8.5-A140-L61-H103-MS0850-SLA-CP32-BTB40-A=16
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 7: Drilling
 T 10: Twisted Drill-D4.7-A140-L36-H74-MPS0470-L-CP16-BTB40-A=120
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 8: Drilling
 T 22: Twisted Drill-D2.8-A140-L32-H82-MZS0280LB-CP16-BTB40-A=120
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 9: Drilling
 T 2: Spotting Drill-D3-A90-H50-CP16-BTB40-A=160
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 10: Breaking Edges Milling
 T 11: Tap-M5x0.8-TC115-M5-C0-WY80AA-CP16M-BTP40-A=120
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 11: Tapping
 T 23: Tap-M3x0.5-TC115-M3-C0-WY80AA-CP16M-BTB40-A=120
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 12: Tapping
 T 5: Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APFE3080-060-CP32-E
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 13: Side Milling
 WCS 5 [Origin 1 | B (Table) : 45° ; C (Table) : 90°]
 14: Side Milling
 WCS 8 [Origin 1 | B (Table) : 45° ; C (Table) : -90°]
 15: Side Milling
 T 2: Spotting Drill-D3-A90-H50-CP16-BTB40-A=160
 WCS 1 [Origin 1 | B (Table) : 0° ; C (Table) : 0°]
 16: Breaking Edges Milling
 17: Breaking Edges Milling

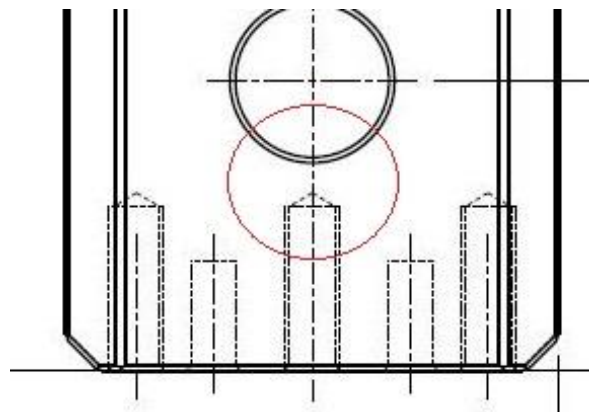


Εικόνα 3.4.5: Το «δέντρο» κατεργασιών του CAM Α' Φάσης.

Περιγραφή της διαδικασίας που φαίνεται στην Εικόνα 3.4.5:

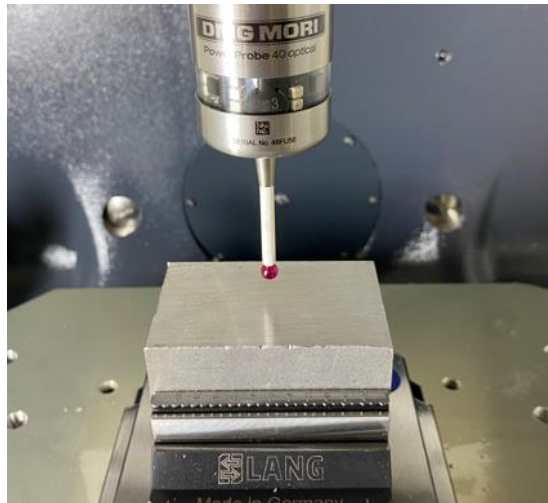
Αρχικά, αφαιρείται η πρώτη ύλη από την πάνω επιφάνεια με τη φρεζοκεφαλή T30. Στη συνέχεια δημιουργείται το περιφερειακό ξεχόνδρισμα και η εσοχή (rocketing) από το κοντύλι T5. Ακολουθούν τα κέντρα από τον κεντραδόρο T2, οι διατρήσεις από τα τρυπάνια T9, T10 και T22, καθώς και η δημιουργία των σπειρωμάτων από τους αντίστοιχους εσωτερικούς σπειροτόμους. Το τραπέζι περιστρέφεται στον άξονα B κατά 45° και στον άξονα C κατά 90° για να γίνουν οι λοξοτομήσεις (chamfers) κατά μήκος του τεμαχίου από το κοντύλι T5. Οι δύο οπές στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου, $\varnothing 14H7$ ($0 / + 0,018$) mm, ολοκληρώνονται από το κοντύλι T6 και αμέσως μετά την κατεργασία αυτή εμφανίζεται μήνυμα για να μετρηθεί η διάμετρος και να αλλάξει η αντιστάθμιση έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια. Επιπλέον, με το εργαλείο T6, γίνεται η αποπεράτωση της πάνω επιφάνειας του τεμαχίου, καθώς και της εσοχής, επειδή η διάσταση του πλάτους της είναι επίσης ακριβείας: 18 ($0 / + 0,05$) mm. Οι υπόλοιπες διαστάσεις ακριβείας επιτεύχθηκαν επίσης με το εργαλείο T6, που πλέον έχει τη «σωστή» αντιστάθμιση. Τέλος, με τον κεντραδόρο T2 γίνονται όλα τα σπασίματα γωνιών (breaking edges) και με το κοντύλι T6 ολοκληρώνεται η τελική γεωμετρία του τεμαχίου.

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή των τριών σπειρωμάτων στη δεξιά πλευρά (όπως είναι τοποθετημένο στη μέγγενη). Το τρυπάνι πρέπει να κατέβει σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό του τελικού σπειρώματος, λόγω της γεωμετρίας του εσωτερικού σπειροτόμου. Ωστόσο, υπάρχει ο περιορισμός στο τελικό βάθος της διάτρησης, λόγω ύπαρξης των οπών $\varnothing 14H7$. Για να αξιοποιηθεί πλήρως το βάθος που έχει γίνει από το τρυπάνι, επιλέγονται εσωτερικοί σπειροτόμοι με «ίσιο» άκρο (bottoming taps) κι όχι με μυτερό άκρο.



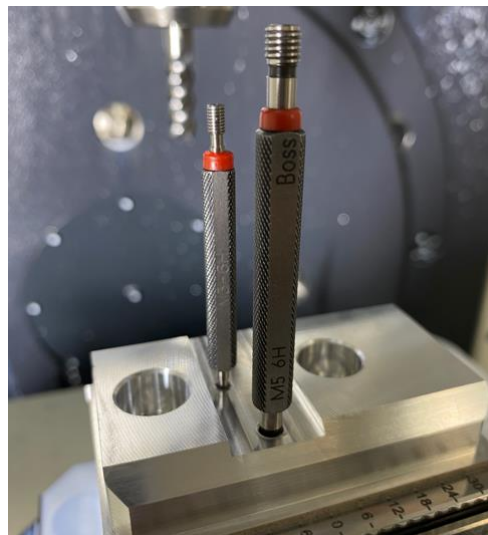
Εικόνα 3.4.6: Το σημείο που απαιτεί προσοχή όσον αφορά το βάθος της διάτρησης (κόκκινος κύκλος).

Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:



Εικόνα 3.4.7: Η πρώτη ύλη τοποθετημένη στη μέγγενη για την Α' Φάση.

Γίνεται ο μηδενισμός του συστήματος συντεταγμένων με το touch probe. Το μηδέν των XYZ βρίσκεται στο κέντρο του τεμαχίου όσον αφορά στο X και στο Y και στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου όσον αφορά στο Z.



Εικόνα 3.4.8: Έλεγχος των σπειρωμάτων M5 και M3 με ελεγκτήρες οπών Go – No Go.

Μετά το πρώτο φινιρίσμα των οπών ακριβείας, αυτές μετρώνται με μικρόμετρο οπών, έτσι ώστε να βρεθεί πόσο θα πρέπει να μειωθεί η αντιστάθμιση του εργαλείου T6. Πρώτα το μικρόμετρο πρέπει να μηδενιστεί σε πρότυπη καλίμπρα εσωτερικής διαμέτρου Ø14 mm.



Εικόνα 3.4.9: Η συσκευασία της πρότυπης καλίμπρας, όπου αναγράφονται τα στοιχεία πιστοποίησής της.



Εικόνα 3.4.10: Καλιμπράρισμα – Μηδενισμός του μικρομέτρου οπής στα Ø14 mm.

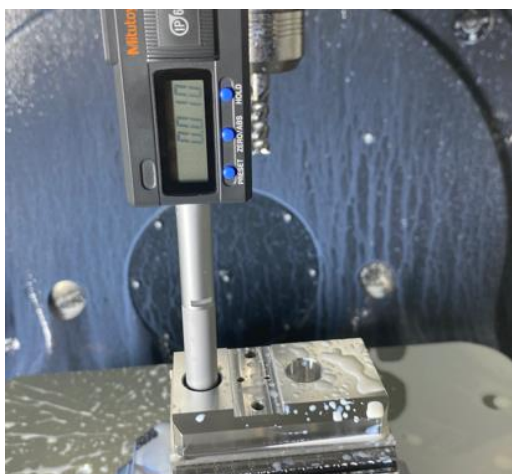
Αρχικά, με μηδενική αντιστάθμιση, η διάμετρος της οπής μετρήθηκε στα -0,033 mm, δηλαδή $14.000 - 0.033 = 13.967$ mm.

Επομένως, η αντιστάθμιση μειώνεται στα $-0,033 / 2 = -0,0165$ mm, το πρόγραμμα επανεκκινείται και η ένδειξη πλέον είναι 0.



Εικόνα 3.4.11: Μέτρηση διαμέτρου οπής ακριβείας με αντιστάθμιση $-0,0165$ mm.

Προτείνεται η διάσταση να βρίσκεται στο μέσο της ανοχής, οπότε η αντιστάθμιση μειώνεται επιπλέον $-0,005$ mm. Η μέτρηση τώρα είναι $0,010$, άρα οι οπές πλέον έχουν διάμετρο $14,010$ mm.



Εικόνα 3.4.12: Μέτρηση διαμέτρου οπής ακριβείας με αντιστάθμιση $-0,0215$ mm.

Το ίδιο κοντύλι, αφού πλέον έχει τη σωστή αντιστάθμιση, ολοκληρώνει το μήκος και το πλάτος του τεμαχίου, οπότε, όπως φάνηκε και από την κατασκευή των προηγούμενων τεμαχίων, αναμένεται οι μετρήσεις να είναι ίσες με τις ονομαστικές διαμέτρους του τεμαχίου. Η μέτρηση του συνολικού μήκους του τεμαχίου έγινε με μικρόμετρο εύρους $50-75$ mm. Η μέτρηση δηλαδή προστίθεται στο 50 για να υπολογιστεί η εκάστοτε διάσταση.

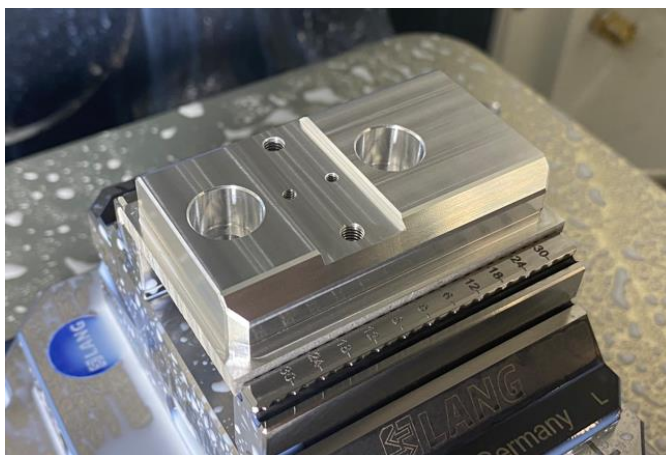


Εικόνα 3.4.13: Μέτρηση του συνολικού μήκους: $25,000 + 50,000 = 75,000$ mm.

Για την κατασκευή των οπών διαμέτρου $\varnothing 4H7$, το εργαλείο T15 αρχικά έχει αντιστάθμιση $-0,015$ mm. Ο έλεγχος των οπών γίνεται με ελεγκτήρα οπής $\varnothing 4H7$ Go – No Go και με αυτή την αντιστάθμιση, η πλευρά Go δεν εισέρχεται στην οπή. Η αντιστάθμιση μειώνεται στο $-0,023$ mm και αυτή τη φορά, ο ελεγκτήρας δεν εισέρχεται σε όλο το βάθος της οπής λόγω κωνικότητας της οπής. Κωνικότητα ονομάζεται η μείωση της διαμέτρου της οπής όσο μεγαλώνει το βάθος και ενισχύεται όσο περισσότερο εξέχει το κοπτικό εργαλείο από τον κώνο συγκράτησης. Τελικά, η αντιστάθμιση φτάνει στα $-0,024$ mm και ο ελεγκτήρας εισέρχεται κανονικά (σε βάθος 10 mm).



Εικόνα 3.4.14: Έλεγχος του ελεγκτήρα οπής για επαλήθευση της ακρίβειάς του (αριστερά) και έλεγχος οπών με τον ελεγκτήρα (δεξιά).



Εικόνα 3.4.15: Το τεμάχιο στο τέλος της Α' Φάσης.

Δεύτερη (Β') φάση κατεργασίας

Επιλογή κοπτικών εργαλείων:

Για την Β' φάση, τα εργαλεία που επιλέχθηκαν είναι:

- ένα κοντύλι (Side End Mill)
- ένας κεντραδόρος (Spotting Drill)
- μια φρεζοκεφαλή

| Pocket | P... | D | L | r | Description |
|--------|------|-------|--------|-----|--|
| T 1 | | 8mm | 20mm | 0mm | Side End Mill-D8-L20-H60-SD8-FL3-KORLOY-APF... |
| T 2 | | 3mm | 8mm | 0mm | Spotting Drill-D3-A90-H50-CP16-BTB40-A=160 |
| T 30 | | 100mm | 16,5mm | 0mm | MITSUBISHI-AXD4000-100A06RA-SK40-32-100-... |

Εικόνα 3.4.16: Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην Β' Φάση.

Όπου

D: η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου,

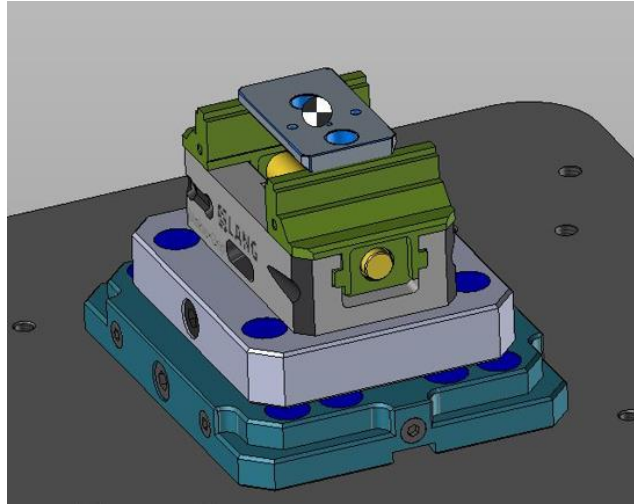
L: το μήκος κοπής του κοπτικού εργαλείου,

r: η αντιστάθμιση του κοπτικού εργαλείου.

Ψηφιακή καθοδήγηση στις εργαλειομηχανές (CAM):

Η κατεργασία απαιτεί την χρήση και των πέντε αξόνων στις εργαλειομηχανές.

Στην προκειμένη περίπτωση, το τεμάχιο τοποθετείται με την ακατέργαστη επιφάνεια προς τα πάνω και συγκρατείται από την ήδη κατεργασμένη επιφάνεια, στο εσωτερικό των σιαγόνων της μέγγενης.



Εικόνα 3.4.17: Το σύστημα συγκράτησης και το τεμάχιο.



Εικόνα 3.4.18: Το δέντρο κατεργασιών του CAM της Β' Φάσης.

Περιγραφή της διαδικασίας που φαίνεται στην Εικόνα 3.4.18:

Αρχικά, με τη φρεζοκεφαλή T30 γίνεται το ξεχόνδρισμα της πρώτης ύλης στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου, έτσι ώστε να γίνει οριζόντια και να είναι εφικτός ένας αξιόπιστος μηδενισμός των αξόνων XYZ με το touch probe. Μετά το μηδενισμό του συστήματος

συντεταγμένων, ο κεντραδόρος T2 κάνει τα σπασίματα γωνιών περιφερειακά του τεμαχίου και, τέλος, το κοντύλι ολοκληρώνει την γεωμετρία του τεμαχίου.

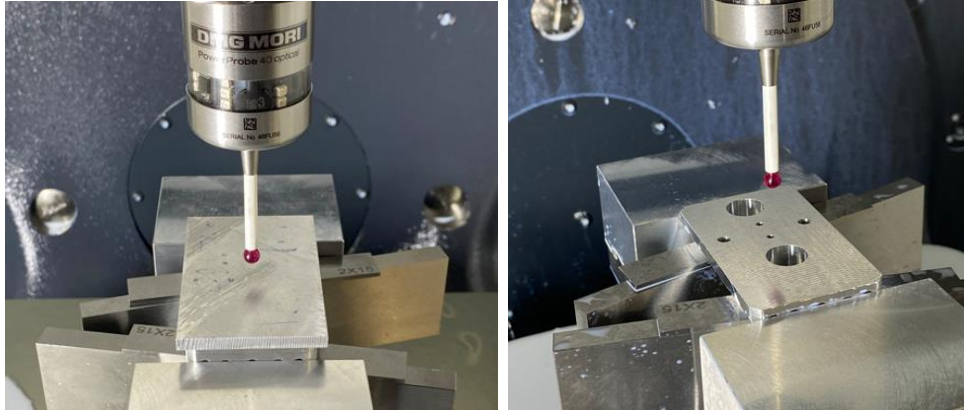
Κατασκευή του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή:

Αρχικά γίνεται αλλαγή σε μαλακούς σφικτήρες της μέγγενης, για να μην φθαρεί η τελική επιφάνεια του τεμαχίου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται πρότυπα πλακίδια ως αποστάτες, για να εξασφαλιστεί το ύψος του τεμαχίου που θα γίνει η κατεργασία. Ο συνδυασμός των πλακιδίων αυτών, όπως θα χρησιμοποιηθούν στην κατεργασία, ελέγχεται σε υψομετρικό όργανο του ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας σχετικά με την επιπεδότητά του.

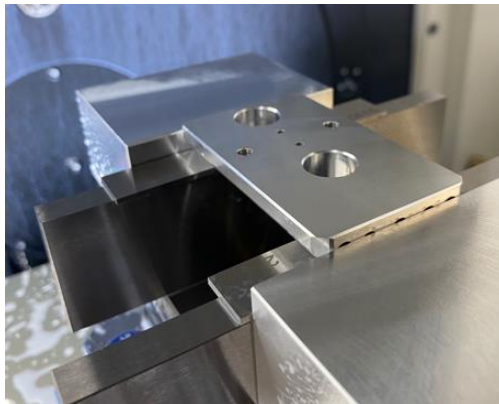


Εικόνα 3.4.19: Τα πρότυπα πλακίδια που χρησιμοποιήθηκαν.

Αφού τοποθετήθηκαν τα πλακίδια και το τεμάχιο στο σύστημα συγκράτησης, ξεκινάει το πρόγραμμα με την αφαίρεση της πρώτης ύλης από την πάνω επιφάνεια του τεμαχίου. Έπειτα, χρησιμοποιείται το touch probe για να μηδενιστεί το σύστημα συντεταγμένων XYZ και το πρόγραμμα συνεχίζει χωρίς διακοπή μέχρι το τέλος.



Εικόνα 3.4.20: Το τεμάχιο τοποθετημένο στην Β' Φάση πριν και μετά την αφαίρεση της πρώτης ύλης.



Εικόνα 3.4.21: Το τεμάχιο στο τέλος της Β' Φάσης.



Εικόνα 3.4.22: Το τελικό τεμάχιο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής τεσσάρων εξαρτημάτων ακριβείας. Η σειρά κατασκευής τους ξεκινούσε από το λιγότερο απαιτητικό τεμάχιο και κατέληγε προς το πιο δύσκολο, όσον αφορά στην απαιτούμενη ακρίβεια, στην περιπλοκότητα της γεωμετρίας, στον τρόπο συγκράτησης του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή, καθώς και στον τρόπο συγκράτησης των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν. Όλα τα τεμάχια κατασκευάστηκαν επιτυχώς χάρη στον εξοπλισμό και στην τεχνογνωσία που δόθηκε από την εταιρία.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρόλο που η κατασκευή των τεμαχίων γίνεται σε εργαλειομηχανή CNC, όταν περιέχονται διαστάσεις ακριβείας, ο ανθρώπινος παράγοντας κατά την παραγωγή είναι απαραίτητος. Η κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας μέσω CNC είναι μια περίπλοκη συνέργεια μεταξύ του τεχνολογικού αυτοματισμού και της ανθρώπινης τεχνογνωσίας. Η τεχνογνωσία, η διαίσθηση και οι δεξιότητες επίλυσης προβλημάτων των χειριστών είναι καθοριστικής σημασίας για την υπέρβαση των εγγενών περιορισμών του αυτοματισμού, την προσαρμογή σε απρόβλεπτες προκλήσεις και τη διασφάλιση της σχολαστικής ακρίβειας που απαιτείται κατά την κατασκευή.

Δεδομένου ότι τα τεμάχια που κατασκευάστηκαν δεν θα μπορούσαν να έχουν παραχθεί με κάποια παραδοσιακή μέθοδο, αποδεικνύεται η αναγκαιότητα των CNC εργαλειομηχανών. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει υψηλό επίπεδο ακρίβειας, συνέπειας και πολυπλοκότητας που ξεπερνά τις δυνατότητες των χειροκίνητων ή συμβατικών τεχνικών κατεργασίας. Επιπλέον, καθώς οι απαιτήσεις των διαφόρων βιομηχανιών συνεχίζουν να εξελίσσονται, ο ρόλος των CNC γίνεται ολοένα και σημαντικότερος, όχι μόνο στην ικανοποίηση αλλά και στην υπέρβαση των προσδοκιών για ακρίβεια και ποιότητα κατασκευής. Αυτή η διπλωματική εργασία υπογραμμίζει ότι η χρήση της τεχνολογίας CNC δεν είναι απλώς πλεονεκτική, αλλά, σε όλο και περισσότερες περιπτώσεις, το μοναδικό μέσο για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας για την παραγωγή περίπλοκων εξαρτημάτων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

<https://www.nmw.gr>

<https://www.fictiv.com/articles/a-brief-history-of-cnc-machining>

https://en.wikipedia.org/wiki/Whirlwind_I

https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_control

<https://www.techtarget.com/searcherp/definition/computer-numerical-control-CNC>

<https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/index.xhtml?jsessionid=E2A6EA3E39F348033B77079BC3F91410>

<https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/index.xhtml>

<https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/index.xhtml>

<https://www.indiamart.com/proddetail/insize-40mm-h7-go-no-go-plain-plug-gauge-4124-40-2850611108448.html>

<https://www.hoffmann-group.com/Fl/en/ravemaf/Masurement-technology/Gauges>

<https://www.furco.com.tw/news-detail-1442802.html>

<https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/cmx-u/cmx-50-u>