



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Εργαστήριο Στροβιλομηχανών & Ρευστοδυναμικής (TurboLab-TUC)

Αντίστροφη μηχανική, σχεδιασμός και κατασκευή εξαρτημάτων μικρού στροβιλοαντιδραστήρα

Πέτρος Α. Ζωγράφος

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, Αύγουστος 2022

"Intentionally left blank"



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Εργαστήριο Στροβιλομηχανών & Ρευστοδυναμικής (TurboLab-TUC)

Αντίστροφη μηχανική, σχεδιασμός και κατασκευή εξαρτημάτων μικρού στροβιλοαντιδραστήρα

Πέτρος Α. Ζωγράφος

Εγκρίνεται από:

Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός
(Επιβλέπων)

Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης,
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

Δρ. Νικόλαος Χ.

Τσουρβελούδης

Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης,
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

Δρ. Αριστομένης Αντωνιάδης

Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης,
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

"Intentionally left blank"

*Η παρούσα εργασία αφιερώνεται
στον Πατέρα μου Αθανάσιο Ζωγράφο, στην Οικογένειά μου και σε όλους μου τους φίλους.*

"Intentionally left blank"

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή ακολουθήθηκαν τα διαδοχικά στάδια μιας συνολικής διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής για την μέτρηση, τον σχεδιασμό και την κατασκευή 3 τμημάτων, που απαρτίζουν τα ακίνητα μέρη του συμπιεστή ενός μικρού στροβιλοαντιδραστήρα. Τα τμήματα του συμπιεστή που κατασκευάστηκαν χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα και δυσκολία τόσο στη μέτρηση όσο και στην κατασκευή του, κυρίως λόγω του μικρού τους μεγέθους και της παρουσίας σταθερών πτερυγίων. Από τη συγκεκριμένη διαδικασία, η οποία περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια, φάνηκε ότι είναι δυνατή η κατασκευή τμημάτων μικρού στροβιλοαντιδραστήρα με τα μέσα που διατίθενται εντός των Εργαστηρίων ενός Τεχνολογικού Ιδρύματος, χωρίς πολύ σημαντικά προβλήματα, καθώς η εν λόγω κατασκευή βρίσκεται εντός των δυνατοτήτων που διατίθενται, τόσο σε υποδομές όσο και σε γνώση. Γενικά η όλη διαδικασία χαρακτηρίστηκε από μεγάλη επιτυχία και ανοίγει τον δρόμο για την εφαρμογή αντίστοιχης διαδικασίας και για άλλα τμήματα μικρών στροβιλοαντιδραστήρων στο μέλλον.

"Intentionally left blank"

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου Ιωάννη Νικολό για την συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής, καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ολοκλήρωσή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών Καθ. Νικόλαο Τσουρβελούδη για την εμπιστοσύνη και την παροχή του απαραίτητου εργαστηριακού εξοπλισμού, καθώς και τους συνεργάτες του Πολυχρόνη Σπανουδάκη και Νεκτάριο Χαιρέτη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Εργαστηρίου Κατεργασιών Μικροκοπής και μοντελοποίησης **m3** Καθ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την παροχή εργαστηριακού εξοπλισμού, αλλά κυρίως για την συνεισφορά του από την αρχή των σπουδών μου, η οποία είχε καθοριστικό ρολό στην μετέπειτα πορεία μου.

"Intentionally left blank"

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	11
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	13
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	24
ΜΙΚΡΟΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	24
1.1 Ιστορική αναδρομή των αεριοστροβίλων.....	24
1.2 Μικροί στροβιλοαντιδραστήρες (Small Turbojet Engines)	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	30
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ.....	30
2.1 Ο στροβιλοαντιδραστήρας AMT OLYMPUS	30
2.2 Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε	32
2.3 Η διαδικασία που ακολουθήθηκε	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	41
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CAD	41
3.1 Το τμήμα εισόδου (εισαγωγή)	41
3.2 Η πλήμνη του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια	44
3.3 Το κέλυφος του διαχύτη	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	53
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ G	53
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ CNC	53
4.1 Η εργαλειομηχανή HAAS VF-2.....	53
4.2 Ανάπτυξη κώδικα G με χρήση CAM.....	55
4.3 Κατασκευή των τμημάτων του στροβιλοαντιδραστήρα	58
4.3.1 Το τμήμα εισόδου (εισαγωγή)	59
4.3.2 Η πλήμνη του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια.....	68
4.3.3 Το κέλυφος του διαχύτη	74
4.4 Επαλήθευση συναρμογής και συναρμολόγηση τμημάτων	78
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	81

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια εντυπωσιακή διεθνής τάση προς την ανάπτυξη και χρήση μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs – Unmanned Aerial Vehicles), τόσο για πολιτικές όσο και για στρατιωτικές εφαρμογές. Λόγω του μικρότερου μεγέθους των UAVs, σε σχέση με τα επανδρωμένα αεροσκάφη, και λόγω της διαφορετικής φύσης των αποστολών τους, απαιτούνται στροβιλοκινητήρες μικρότερου μεγέθους, από αυτούς των επανδρωμένων αεροσκαφών. Επίσης, οι κινητήρες αυτοί διαθέτουν διαφορετικά λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, με επιθυμητό το πολύ χαμηλότερο κόστος κτήσης και χρήσης, αφού (σε πολλές περιπτώσεις) τα UAVs θεωρούνται αναλώσιμα υλικά. Ως αποτέλεσμα, η σχεδίαση και κατασκευή τους είναι ιδιαίτερα απλοποιημένη, με λιγότερο απαιτητικές προδιαγραφές αντοχής και απόδοσης, σε σχέση πάντα με τους μεγάλους στροβιλοκινητήρες των επανδρωμένων αεροσκαφών.

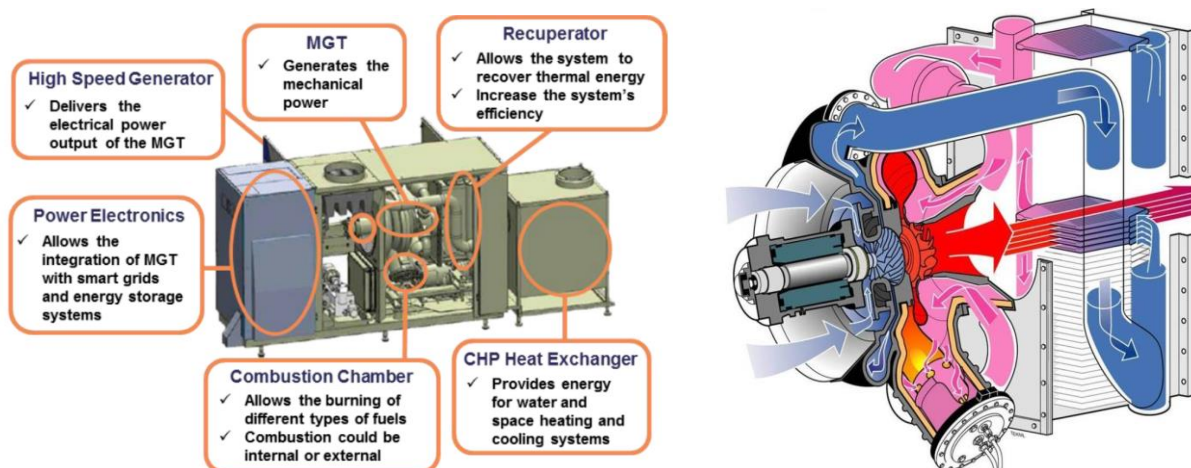
Το US Air Force Research Laboratory (AFRL), σχεδιάζει να διαθέσει 725 εκατομύρια δολάρια στο διάστημα 2018-2026 για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών (Advanced Turbine Technologies for Affordable Mission (ATTAM) programme) [Reim, 2019], [Norris, 2016]. Μεγάλο τμήμα αυτής της επένδυσης σχεδιάζεται να αφορά ανάπτυξη μικρών στροβιλοκινητήρων, με σκοπό τον 20-πλασιασμό της ηλεκτρικής ισχύος χαμηλού κόστους UAVs, τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 30%, καθώς και τη μείωση των αναγκών συντήρησης των κινητήρων [Reim, 2019]. Η συγκεκριμένη επένδυση θα αφορά και στην ανάπτυξη κινητήρων για αναλώσιμα UAVs υψηλών επιδόσεων. Σε πρώτη φάση έχουν δοθεί συμβόλαια ανάπτυξης μικρών στροβιλοκινητήρων για UAVs σε 9 εταιρίες (Boeing, Kratos, GE Aviation, Honeywell, Lockheed Martin, Northrop Grumman, Pratt & Whitney, Rolls-Royce LibertyWorks, Williams International). Ειδικότερα, η Kratos (κορυφαίος κατασκευαστής UAVs) επένδυσε 60 εκατομύρια δολάρια για την εξαγορά πλειοψηφικού μεριδίου μετοχών της εταιρίας Florida Turbine Technologies (τώρα πλέον Kratos Turbine Technologies - <http://www.kratosdefense.com/divisions/turbine-technologies>), που εξειδικεύεται στη σχεδίαση και κατασκευή μικρού μεγέθους στροβιλοκινητήρων για χρήση σε UAVs [Reim, 2019].

Ως μικροί στροβιλοκινητήρες (για χρήση σε UAVs) θεωρούνται οι στροβιλοκινητήρες (turbojet ή turbofan) που επιτυγχάνουν ώση μικρότερη από περίπου 13 kN (3.000 lb-thrust), διαθέτουν εξωτερική διάμετρο μικρότερη από 300 mm (12 in), συνολικό μήκος μικρότερο από 1 m (3 ft) και συνολικό βάρος μικρότερο από 90 kg (200 lb) [Reim, 2019].

Όμως η χρήση μικρών στροβιλοκινητήρων δεν περιορίζεται σε εφαρμογές UAVs (στρατιωτικές και πολιτικές), αλλά επεκτείνεται και σε επίγειες, ιδιαίτερα σημαντικές, εφαρμογές. Οι μικροί στροβιλοκινητήρες ισχύος (Micro Gas Turbines – MGTs) είναι επίγειες στροβιλομηχανές παραγωγής ισχύος πολύ μικρού μεγέθους, που διαθέτουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως μικρό μέγεθος, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος κτήσης, χαμηλό κόστος συντήρησης, χαμηλά επίπεδα θορύβου, πολύ χαμηλές εκπομπές καυσαερίων και

δυνατότητα καύσης διαφορετικών καυσίμων [ETN Global]. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά τις καθιστούν πολύ ανταγωνιστικές σε σχέση με τις εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (MEK), για πλήθος επίγειων εφαρμογών, οι οποίες επιπλέον είναι συμβατές με το concept της αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, που προωθείται ιδιαίτερα από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Εικ. 0.1). Για παράδειγμα, ένα αποκεντρωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος θα μπορεί να συνδυάζει MGTs, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά συστήματα, συστήματα βιομάζας, κυψέλες καυσίμου και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας, χωρίς μεγάλες απώλειες μεταφοράς και μετατροπής της ενέργειας [ETN Global]. Ήδη από την προηγούμενη δεκαετία οι MGTs αποδεδειγμένα λειτουργούν αποδοτικά και αξιόπιστα, επιτυγχάνοντας θερμικούς βαθμούς απόδοσης 30% σε πλήρες φορτίο, συνολική απόδοση (με συμπαραγωγή θερμότητας) της τάξης του 80%, επίπεδα παραγωγής NOx κάτω των 15 ppm και διαθεσιμότητα πάνω από 90% με κόστος μονάδος 800 €/kW [ETN Global] [Hanssen et al., 2004]. Μία εκτεταμένη παρουσίαση του τεχνολογικού επιπέδου και των εφαρμογών των MGTs υπάρχει στο [ETN Global], καθώς και στις περιεχόμενες βιβλιογραφικές αναφορές.

Στην παρούσα διατριβή θα αναλυθούν οι διαδικασίες αντιγραφείς, σχεδιασμού και υλοποίησης εξαρτημάτων μικρού στροβιλοκινητήρα.



Εικόνα 0.1: Σύστημα MGT με συμπαραγωγή θερμότητας (Ansaldo Energia T100 MGT), [Πηγή: Ansaldo].

Οι κύριες τεχνολογικές προκλήσεις, που αφορούν στην ανάπτυξη μικρών στροβιλοκινητήρων, συνδέονται με το γεγονός ότι μεθοδολογίες και τεχνολογίες, που έχουν αναπτυχθεί για μεγάλους στροβιλοκινητήρες, δεν μπορούν να μεταφερθούν άμεσα στους μικρούς. Ο περιορισμός της μέγιστης διαμέτρου του κινητήρα, περιορίζει τη μέγιστη παροχή μάζας μέσα από αυτόν, οπότε απαιτείται αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής των καυσαερίων για άυξηση της ώσης του κινητήρα (για αεροπορικές εφαρμογές). Αυτή όμως εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης (και το μέγιστο λόγο συμπίεσης του συμπίεστη). Όμως, η μέγιστη θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης δεν μπορεί να φτάσει στα επίπεδα των μεγάλων κινητήρων (~1500 °C), διότι στα μικρά μεγέθη η ψύξη

των πτερυγίων του στροβίλου είναι ιδιαίτερα δύσκολη έως αδύνατη (οπότε η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία περιορίζεται στους ~ 1000 °C). Συνεπώς, πρέπει να αναπτυχθούν ειδικές κεραμικές επικαλύψεις των πτερυγίων του στροβίλου (ή να κατασκευαστούν μικρά κεραμικά πτερύγια) για να επιτευχθούν οι επιθυμητές επιδόσεις. Επιπλέον, τα μεγάλα ακτινικά διάκενα (που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία των μικρών στροβιλοκινητήρων) έχουν πολύ αρνητικές συνέπειες στην αεροδυναμική απόδοση των συμπιεστών και των στροβίλων τους. Τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα την σμίκρυνσης των γεωμετριών, διότι στις μικρές διαστάσεις είναι δύσκολο να επιτευχθούν κατασκευαστικά (με μεθόδους κοπής και χύτευσης) και να διατηρηθούν λειτουργικά τα ίδια σχετικά διάκενα, όπως στους μεγάλους κινητήρες. Ως αποτέλεσμα, οι μικροί κινητήρες έχουν πάντα μικρότερη απόδοση από τους μεγαλύτερους. Λόγω του μικρού τους μεγέθους μπορούν όμως να περιστρέφονται με υψηλές ταχύτητες (140.000 rpm).

Τα κύρια πεδία έρευνας, όσον αφορά στους μικρούς στροβιλοκινητήρες (για επίγειες και αεροπορικές εφαρμογές) είναι τα ακόλουθα [ETN Global]:

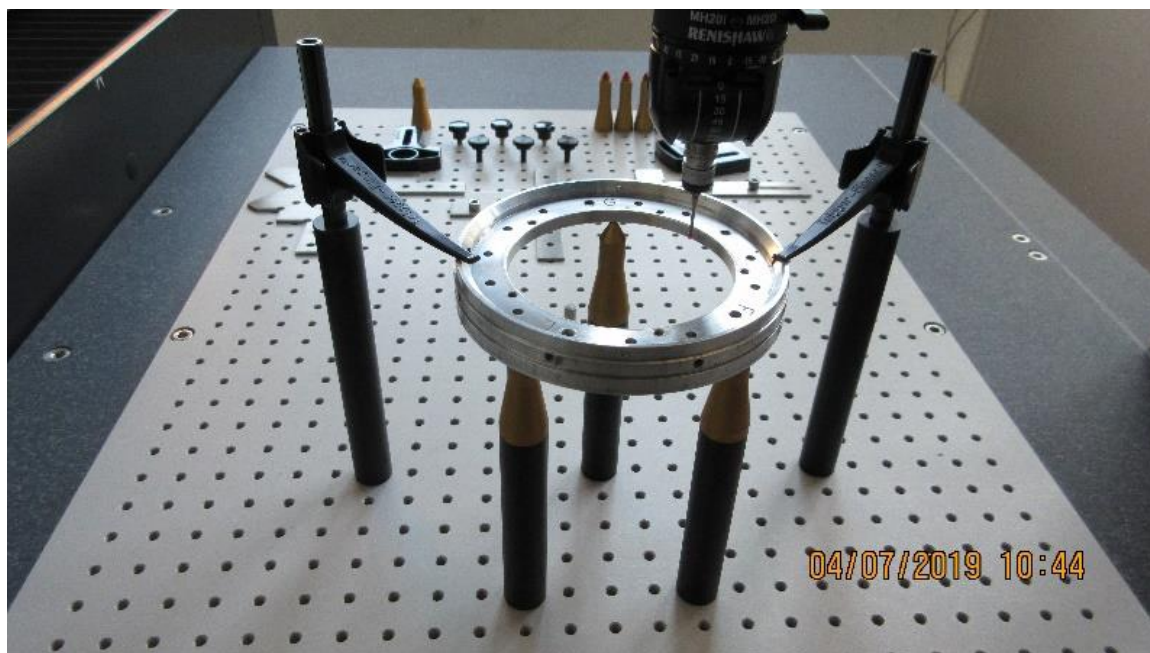
- Βέλτιστος αεροδυναμικός σχεδιασμός συμπιεστή, στροβίλου. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μείωση του μεγέθους (και η αντίστοιχη μείωση του αριθμού Reynolds) προκαλεί δυσανάλογη αύξηση των αεροδυναμικών απωλειών.
- Μείωση των ακτινικών διακένων (με μεθόδους ενεργητικού ελέγχου του ακτινικού διακένου και εξελιγμένες κατασκευαστικές μεθόδους).
- Μείωση των μηχανικών απωλειών των εδράνων.
- Μείωση του επιπέδου εκπομπών ρύπων.
- Μείωση του κόστους κατασκευής (υιοθετώντας πρακτικές από τον χώρο των κατασκευαστών στροβιλοϕεραλειωμάτων για την αυτοκινητοβιομηχανία).
- Βελτιστοποίηση των θερμοδυναμικών κύκλων.
- Αύξηση της αντιδιαβρωτικής προστασίας και αντοχής.
- Ανάπτυξη υλικών και επικαλύψεων ειδικών χαρακτηριστικών.

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής είναι πολλαπλό:

- Αρχικά η αντίστροφη μηχανική (reverse engineering) τμημάτων υπάρχοντος μικρού αεριοστροβίλου, που διαθέτει το Εργαστήριο Στροβιλομηχανών και Ρευστοδυναμικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.
- Η παραγωγή (στη συνέχεια) λεπτομερών ψηφιακών μοντέλων των παραπάνω τμημάτων σε λογισμικό CAD (Computer-Aided Design).
- Η κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων των παραπάνω τμημάτων σε εργαλειομηχανές CNC, διαθέσιμες εντός των Εργαστηρίων του Πολυτεχνείου Κρήτης (με ανάπτυξη του κατάλληλου G-code, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας), με βελτιωμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα αρχικά (ποιότητα επιφανείας, ακρίβεια διαστάσεων).
- Η παραγωγή σε μελλοντικό χρόνο βελτιωμένων εναλλακτικών σχεδιάσεων των εν λόγω τμημάτων, για τη μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής τους, τη βελτίωση

της ποιότητας κατασκευής τους, καθώς και την τελική βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα.

- Η επίδειξη και απόδειξη της ικανότητας κατασκευής τμημάτων μικρών αεριοστροβίλων με ίδια μέσα και η τυποποίηση της συνολικής διαδικασίας παραγωγής τους.
- Η παράλληλη διερεύνηση της αναγκαιότητας προμήθειας επιπλέον (μη διαθέσιμων) συσκευών, διατάξεων και μηχανημάτων, που απαιτούνται για την επίτευξη ολοκληρωμένης κατασκευαστικής δυνατότητας τμημάτων μικρών αεριοστροβίλων στο Εργαστήριο Στροβιλομηχανών και Ρευστοδυναμικής και η σύνταξη των σχετικών προδιαγραφών τους.

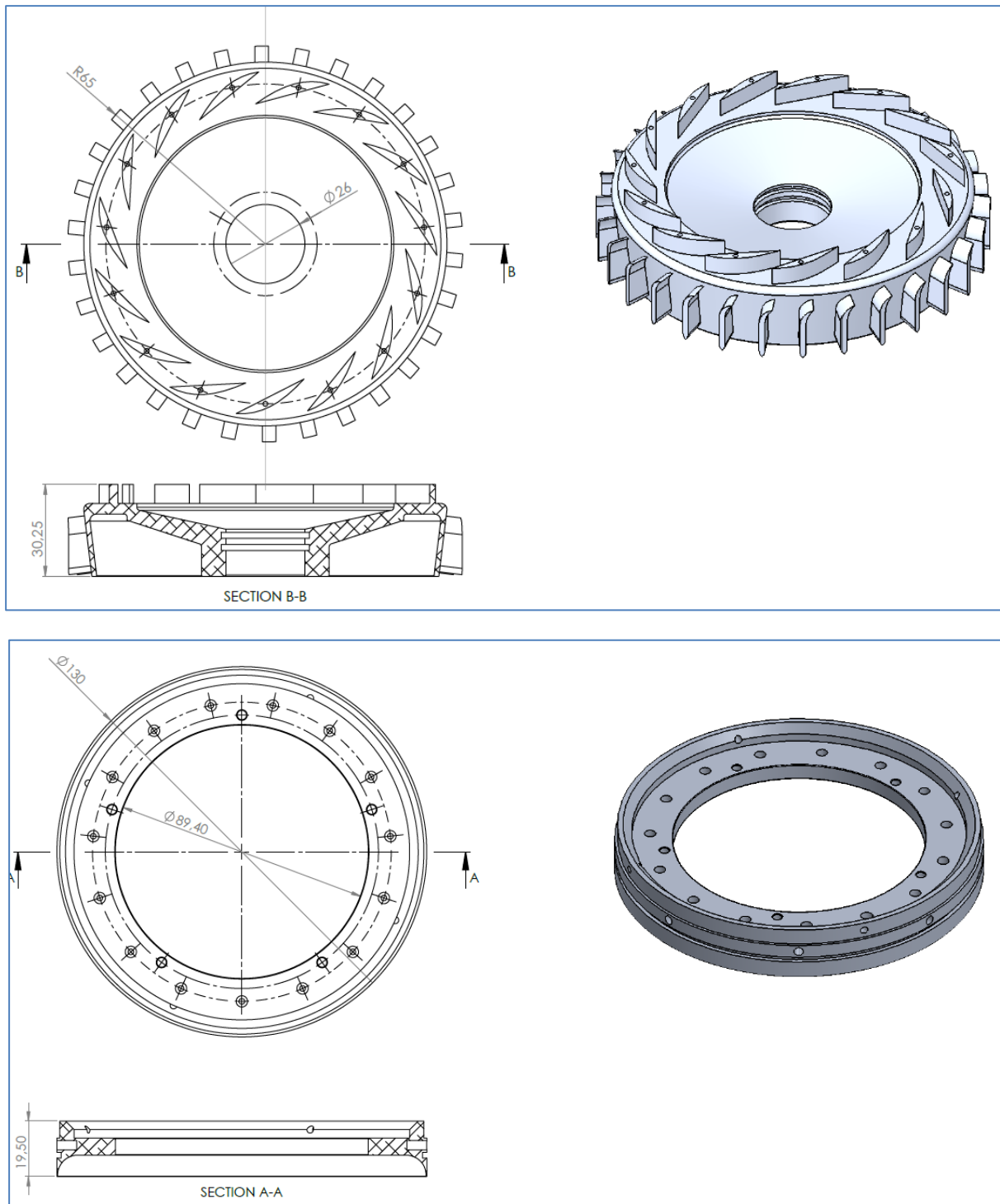


***Εικόνα 0.2:** Μετρήσεις ακριβείας των διαστάσεων τμημάτων συμπιεστή υπάρχοντος μικρού στροβιλοαντιδραστήρα.*

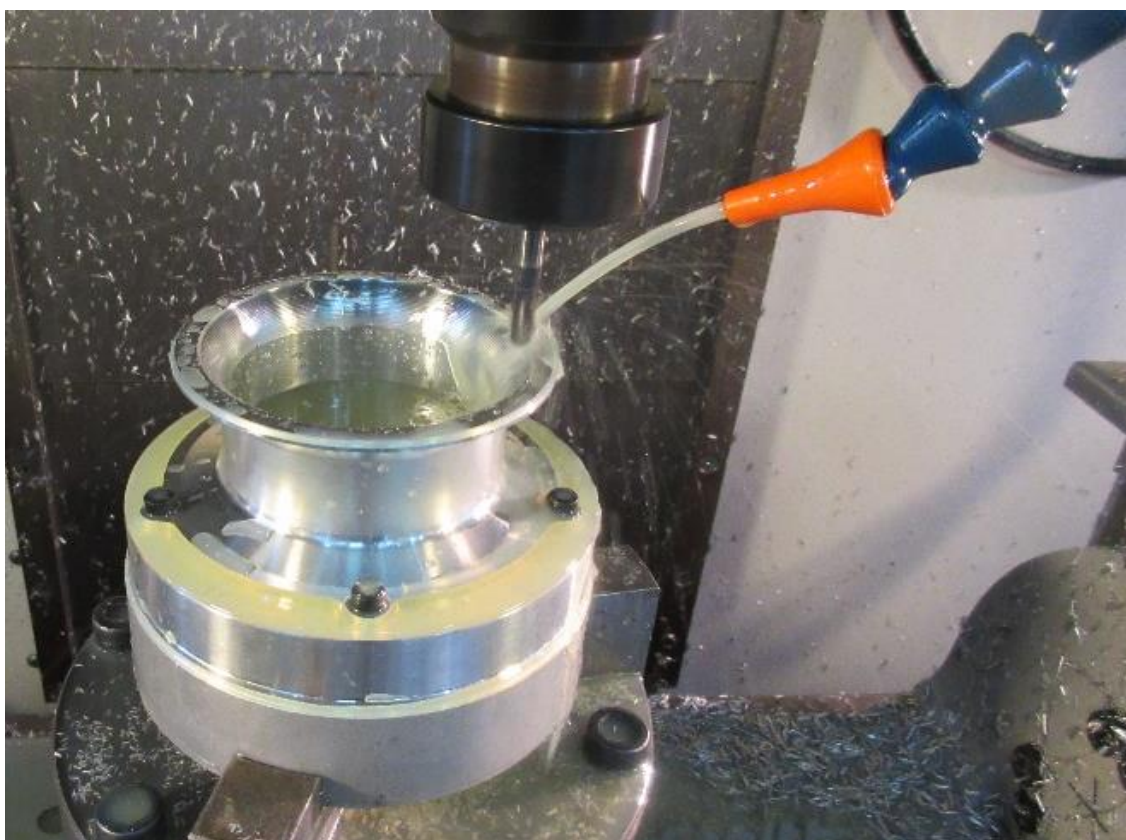
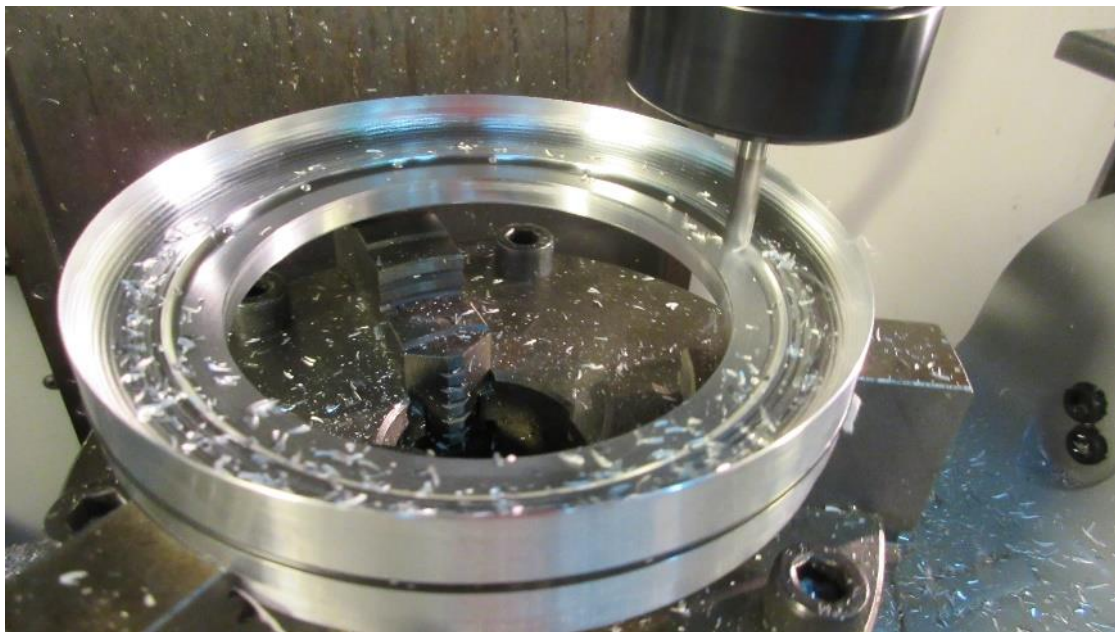
Απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας (στα πλαίσια του γενικότερου σχεδιασμού του Εργαστηρίου Στροβιλομηχανών και Ρευστοδυναμικής, της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, του Πολυτεχνείου Κρήτης), είναι η κατασκευή με ίδια μέσα του πρωτοτύπου ενός μικρού αεριοστροβίλου (και της αντίστοιχης εγκατάστασης δοκιμών – test-bed), όπου θα είναι δυνατόν να δοκιμάζονται νέες σχεδιάσεις και τεχνολογίες, που θα αφορούν σε μικρούς αεριοστροβίλους (για επίγειες και αεροπορικές εφαρμογές). Αντίστοιχες προσπάθειες ανάπτυξης, κατασκευής και μελέτης τμημάτων και συγκροτημάτων μικρών αεριοστροβίλων αναφέρονται στις εργασίες [Hartman, 2014], [Llanes et al. 2016], [Fuchs et al., 2016], [Xiang et al. 2016], [Turan, 2016], [Virdi et al., 2017], [Alonzo et al., 2018].

Στα πλαίσια της Μεταπτυχιακής Διατριβής, έγιναν οι αναγκαίες μετρήσεις (με χρήση και ειδικών μετρητικών διατάξεων του Εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης της Σχολής Μ.Π.Δ. – [Εικ. 0.2](#)) και κατασκευάστηκαν τα ψηφιακά μοντέλα τριών τμημάτων, που απαρτίζουν τον συμπίεστη ενός μικρού στροβιλοαντιδραστήρα ([Εικ. 0.3](#)). Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε κώδικας-G για την κατασκευή τους με κοπή (από Αλουμίνιο αεροπορικού τύπου) στη διαθέσιμη CNC φρέζα του Διατμηματικού Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών του Πολυτεχνείου Κρήτης ([Εικ. 0.4](#)).

Όπως φάνηκε κατά τη διαδικασία κατασκευής των παραπάνω 3 πρώτων τμημάτων, υπάρχουν αρκετά περιθώρια βελτίωσης της μηχανολογικής σχεδίασης των εν λόγω τμημάτων, χωρίς απαραίτητα να απαιτηθεί (στο παρόν στάδιο) αεροδυναμική βελτιστοποίηση αυτών. Εκτός των πλαισίων της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής, πραγματοποιήθηκε αεροδυναμική μελέτη με χρήση μεθόδων CFD (Computational Fluid Dynamics) για την αεροδυναμική αξιολόγηση των τμημάτων του συγκεκριμένου αεριοστροβίλου [Kastrisios, 2022].



Εικόνα 0.3: Ψηφιακά μοντέλα των τμημάτων συμπίεστη υπάρχοντος μικρού στροβιλοαντιδραστήρα.



***Εικόνα 0.4:** Φωτογραφίες από τη διαδικασία κατασκευής των τμημάτων του συμπιεστή μικρού στροβιλοαντιδραστήρα.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΙΚΡΟΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

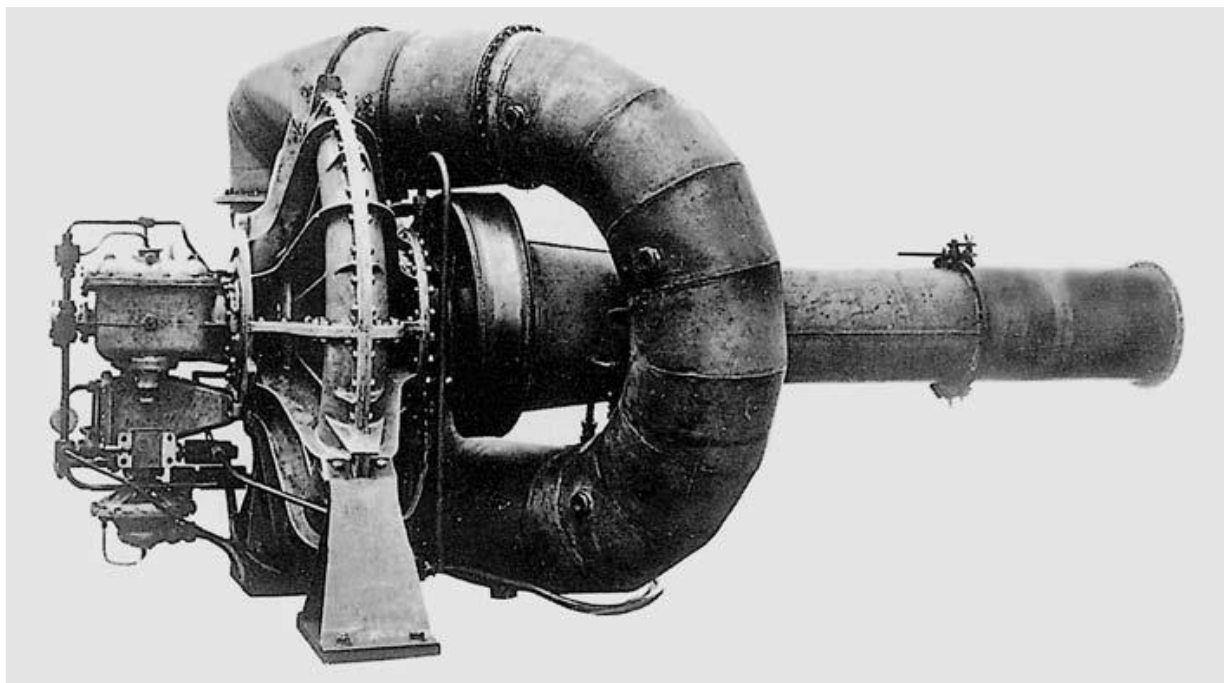
1.1 Ιστορική αναδρομή των αεριοστροβίλων

Οι αεριοστρόβιλοι αναπτύχθηκαν αρκετά αργότερα από τις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσεως. Η ανάπτυξη των αεριοστροβίλων πραγματοποιήθηκε πρώτα στο πεδίο των επιγείων μηχανών για παραγωγή ισχύος. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αεριοστρόβιλο αποκτήθηκε το 1791 από τον Βρετανό John Barber (1734-1801) με τίτλο “A Method of Rising Inflammable Air for the Purposes of Procuring Motion”. Στο Παρίσι το 1837 ο Bresson είχε την ιδέα να θερμαίνει και να συμπιέζει αέρα, ο οποίος θα οδηγείται σε θάλαμο καύσεως, όπου θα αναμειγνύεται με καύσιμο για καύση. Το 1872 ο Franz Stolze (1836-1910) αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αεριοστρόβιλο αποτελούμενο από πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή, πολυβάθμιο στρόβιλο, εναλλάκτη θερμότητας και θάλαμο καύσεως. Ο Βρετανός Sir Charles Algernon Parsons (1854-1931), είχε επίσης αποκτήσει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν τύπο αεριοστροβίλου, ενώ από τις αρχές του 20ου αιώνα σχεδίαζε και κατασκεύαζε βιομηχανικούς συμπιεστές. Ο Charles Gordon Curtis (1860-1953) αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1899 για σχέδιο αεριοστροβίλου, το πρώτο στις ΗΠΑ [Νικολός, 2022].

Το 1903 οι Γάλλοι Rene Armengaud και Charles Lemale κατασκευάζουν και δοκιμάζουν επιτυχώς τον πρώτο αεριοστρόβιλο, ο οποίος διέθετε εσωτερική ψύξη με νερό των δίσκων και των πτερυγίων του στροβίλου. Ο Ιρλανδός Matthew Henry Phineas Riall Sankey (1853-1925) ανακάλυψε το ομόνυμο διάγραμμα Sankey. Ο Νορβηγός εφευρέτης Aegidius Elling (1861-1949) σχεδίασε και κατασκεύασε το 1903 τον πρώτο αεριοστρόβιλο σταθερής πίεσεως. Ο καθηγητής στην Ελβετία Aurel Boleslav Stodola (1859-1942) ήταν πρωτοπόρος στη θερμοδυναμική και στις εφαρμογές της. Το βιβλίο του, που δημοσιεύθηκε το 1903, περιείχε ειδικό παράρτημα για τους αεριοστροβίλους. Η εταιρεία Brown-Boveri πρωτοπόρησε στη βιομηχανική σχεδίαση και κατασκευή αεριοστροβίλων. Οι πρώτοι αεριοστρόβιλοι της εταιρείας χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή συμπιεσμένου αέρα σε λέβητες. Κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1932 και βασίστηκαν σε δοκιμές ενός στροβίλου καυσαερίων κατασκευασμένου το 1927 από τους Stodola και Schule. Το 1939 η Brown-Boveri κατασκεύασε τον πρώτο σταθμό παραγωγής ισχύος κινούμενο με αεριοστρόβιλο, με παραγόμενη ισχύ 4000 kW [Νικολός, 2022].

Στο τέλος της δεκαετίας του 1930 στην Αγγλία ο Whittle αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1930 για αεριοστρόβιλο προώσεως αεροσκάφους. Το 1936 ιδρύει εταιρεία και κατασκευάζει αεριοστρόβιλο με μονοβάθμιο ακτινικό συμπιεστή, μονοβάθμιο στρόβιλο σε κοινό άξονα με το συμπιεστή και απλό, ενιαίο θάλαμο καύσεως (Εικ. 1.1). Το 1939 το Υπουργείο Αεροπορίας της Αγγλίας αναθέτει στην εταιρεία του Whittle την κατασκευή αεροπορικού αεριοστροβίλου. Το 1935, ο Hans von Ohain στη Γερμανία αποκτά διπλώματα ευρεσιτεχνίας για αεροπορικό αεριοστρόβιλο εφοδιασμένο με ακτινικό συμπιεστή. Ξεκινά την κατασκευή πρωτοτύπου επιδείξεως τεχνολογίας το 1936, με τις δοκιμές του να ξεκινούν

το Μάρτιο του 1937. Ο κινητήρας Jumo (Εικ. 1.2) της Junkers ήταν ο μοναδικός σε παραγωγή αεροπορικός κινητήρας στη Γερμανία μέχρι το τέλος του πολέμου [Νικολός, 2022].

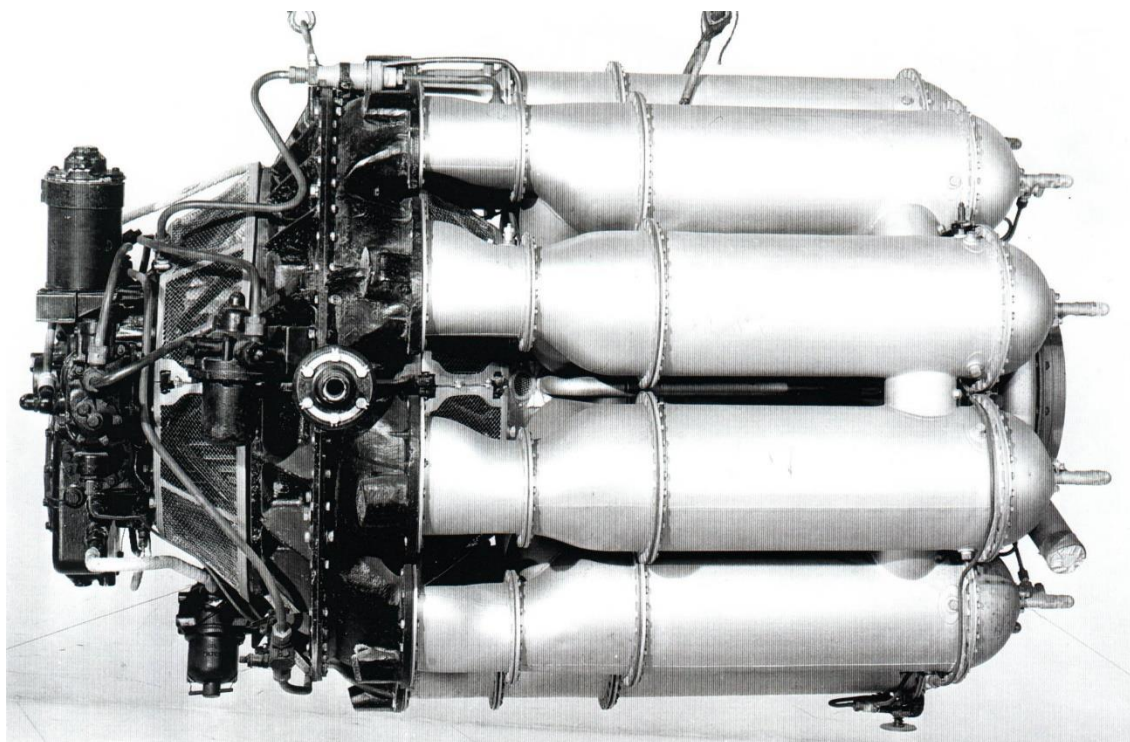


Εικόνα 1.1: Ο πρώτος αεριοστρόβιλος του Whittle.



Εικόνα 1.2: Ο κινητήρας Jumo 004 B4 της Junkers σε τομή (πηγή: National Air and Space Museum – Smithsonian).

Η εταιρεία Rolls-Royce αναλαμβάνει την ανάπτυξη και τη βιομηχανική παραγωγή του κινητήρα του Whittle, οδηγώντας στο μοντέλο Welland (Εικ. 1.3), μοναδικό αεροπορικό αεριοστρόβιλο σε παραγωγή στην Αγγλία μέχρι το τέλος του πολέμου. Ο πρώτος αεριοστρόβιλος (κατασκευασμένος από την Brown-Boveri), τοποθετείται σε τρένο στην Ελβετία και λειτουργεί για πρώτη φορά τον Ιανουάριο του 1941 [Νικολός, 2022].



Εικόνα 1.3: Ο κινητήρας Welland της Rolls-Royce (πηγή: Rolls-Royce).

Στις 14 Ιουλίου 1947 καθελκύεται το σκάφος του Βρετανικού Ναυτικού MGB 2009 (Motor Gun Boat), το οποίο φέρει αεριοστρόβιλο αξονικής ροής τύπου Metrovick F2, που παρέχει μέρος της ισχύος προώσεως. Η εταιρία Centrax ήταν η πρώτη που σχεδίασε και κατασκεύασε αεριοστρόβιλο ισχύος 160 hp για κίνηση φορτηγών το 1948. Ο πρώτος αεριοστρόβιλος σε αυτοκίνητο (της εταιρείας Rover) δοκιμάστηκε το 1950. Από το 1950 και μετά η ανάπτυξη των αεριοστροβίλων ήταν ραγδαία. Η σημαντικότερη εφαρμογή τους ήταν αρχικά η κίνηση των αεροσκαφών. Όμως σημαντική εφαρμογή βρίσκουν οι επίγειοι αεριοστρόβιλοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η πρώτη κλάση κυρίων μονάδων στόλου που είχαν αποκλειστική πρόωση με αεριοστροβίλους ήταν καναδική (κλάση DDH-280), με συνδυασμό κινητήρων Pratt and Whitney FT-4 για μέγιστη ταχύτητα και FT-12 για οικονομική πλεύση [Νικολός, 2022].

1.2 Μικροί στροβιλοαντιδραστήρες (Small Turbojet Engines)

Η ανάπτυξη των μικρών στροβιλοαντιδραστήρων ξεκίνησε από τον χώρο της κατασκευής μοντέλων αεροσκαφών. Οι κινητήρες αυτοί πλέον αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως και οι μεγάλοι αεροπορικοί κινητήρες jet, διότι βρίσκουν και εφαρμογές πέρα από τον χώρο των μοντελιστών, όπως για παράδειγμα σε στρατιωτικές εφαρμογές για την πρόωση Μή-επανδρωμένων αεροσκαφών [Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or Unmanned Aerial Systems (UAS)] [Kastrisios, 2022].

Δεν υπάρχει συγκεκριμένη προδιαγραφή για τον χαρακτηρισμό ενός στροβιλοαντιδραστήρα ως «Μικρού». Συνήθως ως τέτοιοι χαρακτηρίζονται οι στροβιλοαντιδραστήρες με ώση μικρότερη από 1000N και βάρος μικρότερο από 90kg (200lbs). Η χρήση αυτής της κατηγορίας αεροπορικών κινητήρων για την πρόωση μικρών και μεσαίου μεγέθους στρατιωτικών UAV βρίσκει συνεχώς αυξανόμενες εφαρμογές. Επιπλέον αυξανόμενες εφαρμογές βρίσκουν αυτού του είδους οι κινητήρες και σε πολιτική χρήση.

Μία άλλη εφαρμογή των μικρών στροβιλομηχανών είναι η χρήση τους ως auxiliary power units (APU), για την έναυση της λειτουργίας μεγάλων αεροπορικών κινητήρων. Επίσης χρησιμοποιούνται και για την κίνηση ηλεκτοργενητριών (ως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη) σε απομακρυσμένες τοποθεσίες εκτός δικτύου, σε πολλές εφαρμογές.

Οι πιο γνωστές εταιρίες κατασκευής μικρών στροβιλοαντιδραστήρων είναι οι: Williams International, Kratos Defense & Security Solutions, PBS Aerospace (Εικ. 1.4), King Tech Turbines International (Εικ. 1.5), JetCat (Εικ. 1.6), Jet Breetle, WREN Turbines, και AMT Turbines (Εικ. 1.7), κ.α. [Kastrisios, 2022].



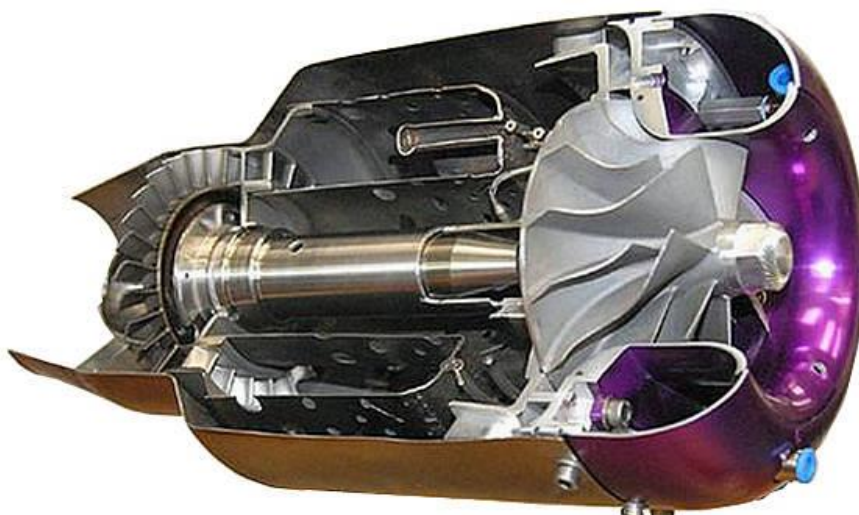
Εικόνα 1.4: Ο κινητήρας PBS TJ 40.



Εικόνα 1.5: Η οικογένεια μικρών στροβιλοαντιδραστήρων της King-Tech (πάνω). Ο κινητήρας K-310G της KingTech (κάτω).



Εικόνα 1.6: Ο κινητήρας P200-RX της JetCat.



Εικόνα 1.7: Ο κινητήρας AMT Olympus σε τομή.

Τα κύρια πλεονεκτήματα για διαφορετικές εφαρμογές των μικρών αεριοστροβίλων παρατίθενται στη συνέχεια [Kastrisios, 2022]:

1. Υψηλός λόγος ώσης προς βάρος, που αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό για την πρόωση UAVs.
2. Λειτουργία με διαφορετικά είδη καυσίμων.
3. Μπορούν να συνδυαστούμε με άλλα είδη πρόωση, ώστε να προκύψουν υβριδικά συστήματα πρόωσης.
4. Διαθέτουν σπονδυλωτή κατασκευή, οπότε έχουν ευκολία συναρμολόγησης και συντήρησης.
5. Έχουν μικρή εκπομπή ρύπων.
6. Διαθέτουν μικρό μέγεθος, άρα απαιτούν μικρό χώρο εγκατάστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ

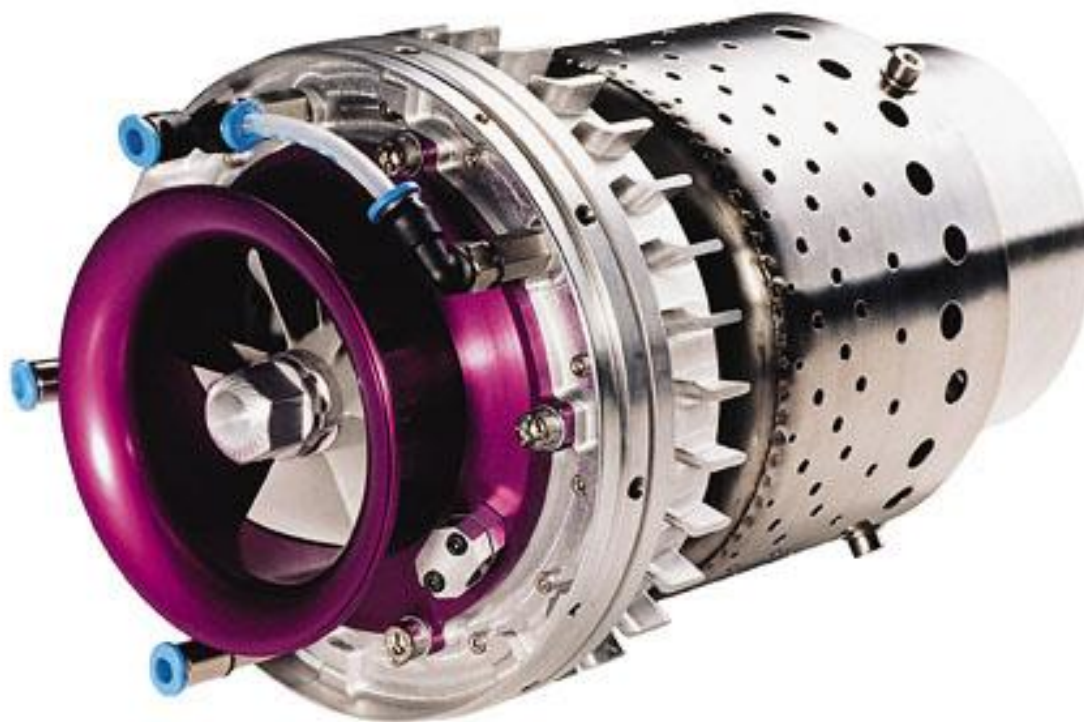
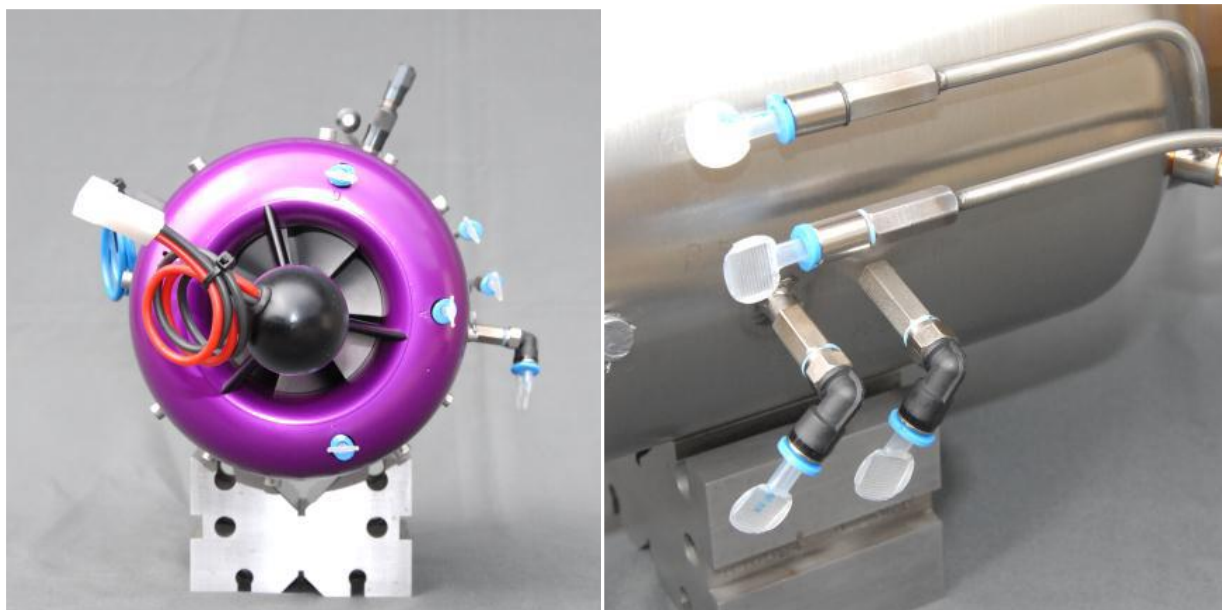
2.1 Ο στροβιλοαντιδραστήρας AMT OLYMPUS

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο AMT Olympus, που κατασκευάζεται από την εταιρία AMT Netherlands. Η συγκεκριμένη εταιρία σχεδιάζει και κατασκευάζει μικρούς αεριοστροβίλους για την πρόωση μοντέλων αεροσκαφών, μικρών UAV, πειραματικών αεροσκαφών, καθώς και εναέριων στόχων. Ο συγκεκριμένος κινητήρας βρίσκεται σε παραγωγή από το 2004, ενώ το 2010 τροποποιήθηκε ώστε να έχει αυτόματο σύστημα εκκίνησης με κηροζίνη. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του παρουσιάζονται στην [Εικ. 2.1](#).

Είναι στροβιλοαντιδραστήρας απλής ροής με μονοβάθμιο αεροσυμπιεστή ακτινικής ροής και μονοβάθμιο στρόβιλο αξονικής ροής, αποδίδοντας ονομαστική ώση 230 N. Μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικούς τύπους καυσίμων, όπως κηροζίνη και παραφινέλαιο, ενώ το καύσιμο αναμιγνύεται με λιπαντικό για την λίπανση των εδράνων. Διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου ([Εικ. 2.2](#)).

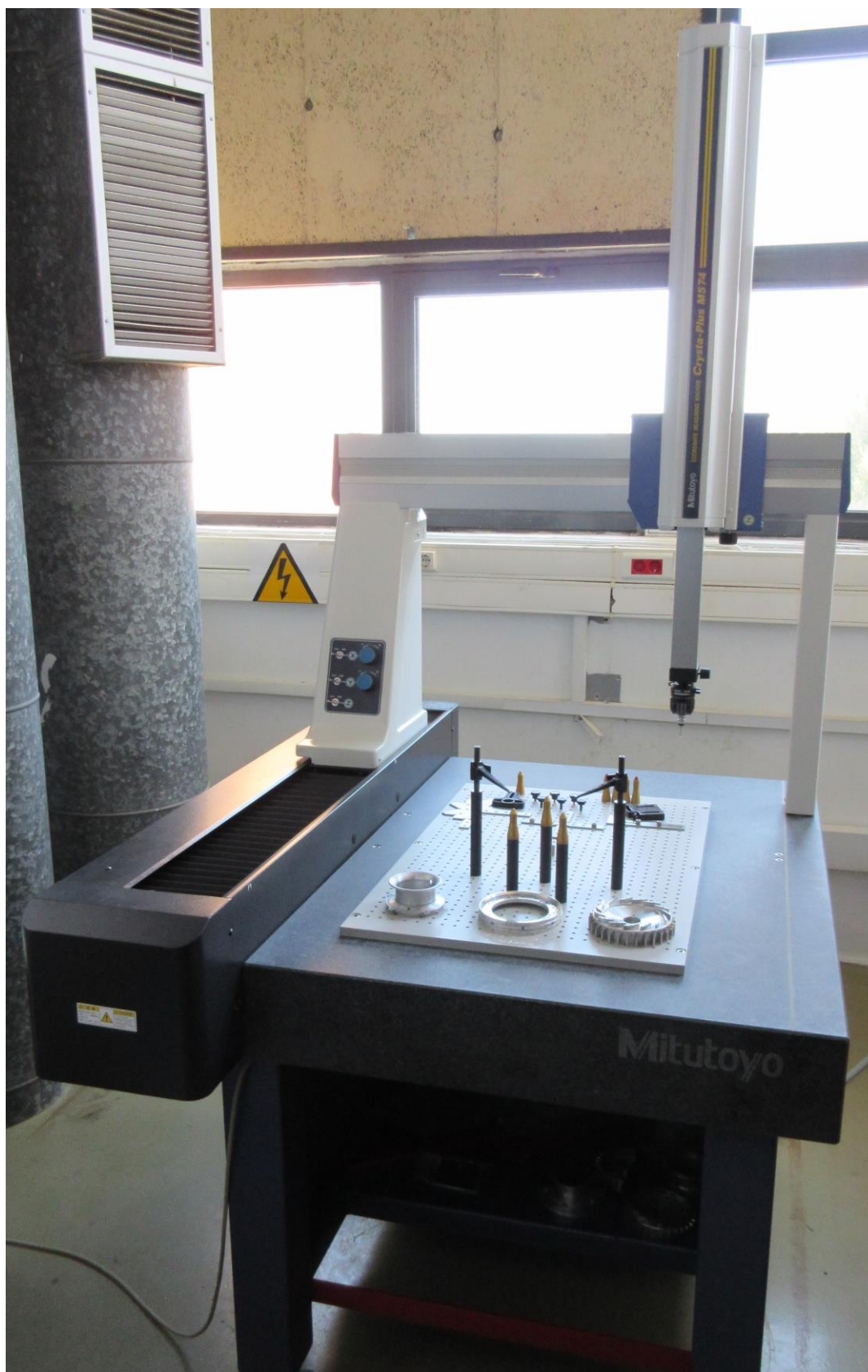
Specifications				All data at STP +/- 2%
Engine diameter	130 mm	/	5.1 Inch	
Engine length	374 mm	/	14.7 Inch	
Engine weight	2900 gram	/	6.4 Lbs	
System airborne weight *	3845 gram	/	8,5 Lbs	
Thrust at S.T.P. **	230 N	/	51.7 Lbf	
Maximum RPM	108.500	/	108.500	
Thrust at Idle RPM	13 N	/	2.9 Lbf	
Pressure ratio	3.5:1	/	3.5:1	
Mass flow	450 Gr/sec	/	0.99 Lb/Sec	
Max continues EGT	750 Deg C	/	1380 Deg F	
Fuel consumption	640 Gr/min	/	22,5 oz/min	
Specific fuel consumption	46,4 gr/(Kn*sec)	/	1,64 lb/(lbf*hr)	
Starting method	Direct kerosene starting gas turbine, on request propane start.			
* Total weight of; Engine,ECU,pump,battery,thermosensor, valves, mounting straps.				
** On request the RPM can be raised to 110.000 RPM giving 10 Newton additional thrust.				

Εικόνα 2.1: Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του AMT Olympus.



Εικόνα 2.2: Ο κινητήρας AMT Olympus.

2.2 Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 2.3: Η μετρητική διάταξη μέτρησης συντεταγμένων CMM (Coordinate-measuring machine) M574 – Crysta-Plus M (Mitutoyo), που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Για την μέτρηση των διαστάσεων των τμημάτων του στροβιλοαντιδραστήρα AMT Olympus, χρησιμοποιήθηκε μετρητική διάταξη μέτρησης συντεταγμένων CMM (Coordinate-measuring machine), η οποία μας παραχωρήθηκε από το Εργαστήριο m3 του Πολυτεχνείου Κρήτης. Πρόκειται για μια μετρητική διάταξη υψηλής ακρίβειας, η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση διαστάσεων στερεών γεωμετριών και την επαλήθευσή τους.

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM φέρουν ειδική κεφαλή, αποτελούμενη από ένα ευαίσθητο όργανο, που ονομάζεται ακίδα επαφής (Touch Trigger Probe – TTP) και συνδέεται με ένα ευαίσθητο ελατήριο, που τη συγκρατεί και την επαναφέρει στην αρχική θέση ισορροπίας έπειτα από μια επαφή. Η συγκεκριμένη ακίδα έχει τη δυνατότητα να μετακινείται (χειροκίνητα) στους τρεις άξονες, εντός συγκεκριμένου χώρου, σχηματίζοντας ένα ιδεατό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο και καθορίζοντας έτσι τα όρια κίνησης της κεφαλής στο χώρο εργασίας (Working Volume). Η ακίδα επαφής εφάπτεται στο υπό μελέτη στερεό, στο σημείο ενδιαφέροντος, και μέσω της στιγμιαίας μετακίνησής της από την επαφή, στέλνεται το σήμα στο ηλεκτρονικό σύστημα της μηχανής να καταγράψει το αποτέλεσμα της μέτρησης στον τριδιάστατο χώρο.

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης πραγματοποιείται με τη γραφίδα αντιγραφής. Η γραφίδα αντιγραφής προσαρμόζεται στη θέση της ακίδας επαφής. Είναι ένας πρόβολος που φέρει στο τελειώμά του μια σφαίρα συγκεκριμένης διαμέτρου και χρησιμοποιείται κυρίως για αντιγραφές γεωμετριών. Για να πάρουμε μια μέτρηση πρέπει να είναι κλειδωμένος ο ένας από τους τρεις άξονες, έτσι ώστε καθώς μετακινούμε (χειροκίνητα) τη γραφίδα, να διαγράφουμε την πορεία με την οποία ήρθε σε επαφή η γραφίδα. Στην απεικόνιση του λογισμικού της μηχανής η πορεία αποτελείται από πολλά σημεία, δημιουργώντας μια αντιπροσωπευτική καμπύλη της γεωμετρίας. Στη συνέχεια υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής της καμπύλης σε DXF αρχείο, προκειμένου να εισαχθεί σε λογισμικό CAD.

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η CMM M574 – Crysta-Plus M (Mitutoyo), η οποία επιτυγχάνει τις ακριβέστερες μετρήσεις στον κόσμο, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χειροκίνητες μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (Εικ. 2.3).

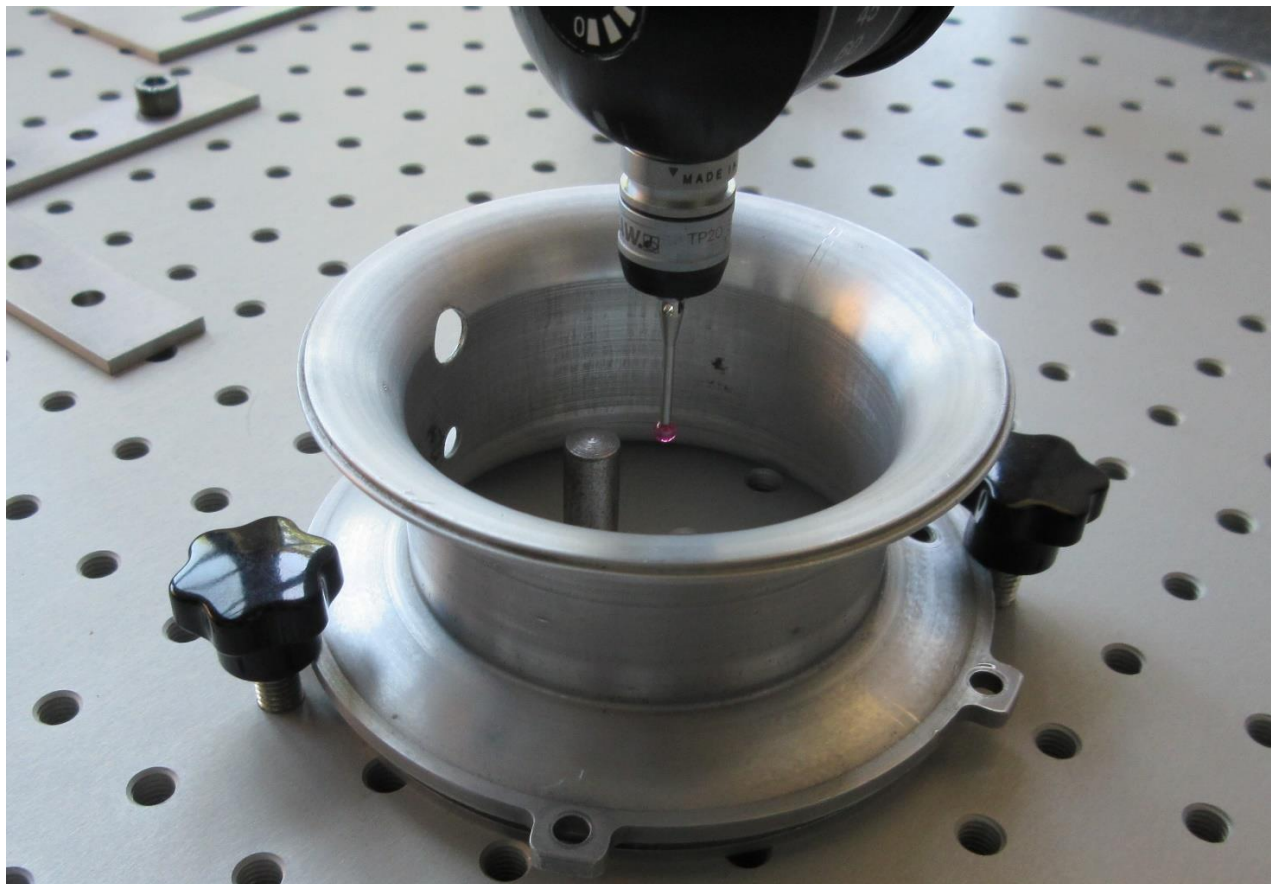
2.3 Η διαδικασία που ακολουθήθηκε

Τα στάδια της αντίστροφης μηχανικής είναι τρία: σάρωση (scanning), επεξεργασία των σημείων της σάρωσης (point processing) και γεωμετρική ανάπτυξη του μοντέλου (geometric model development). Το πρώτο στάδιο αφορά στη διαδικασία που ακολουθήθηκε, προκειμένου να αποτυπωθεί ψηφιακά η γεωμετρία του εκάστοτε τεμαχίου.

Τμήμα εισόδου αέρα (εισαγωγή)

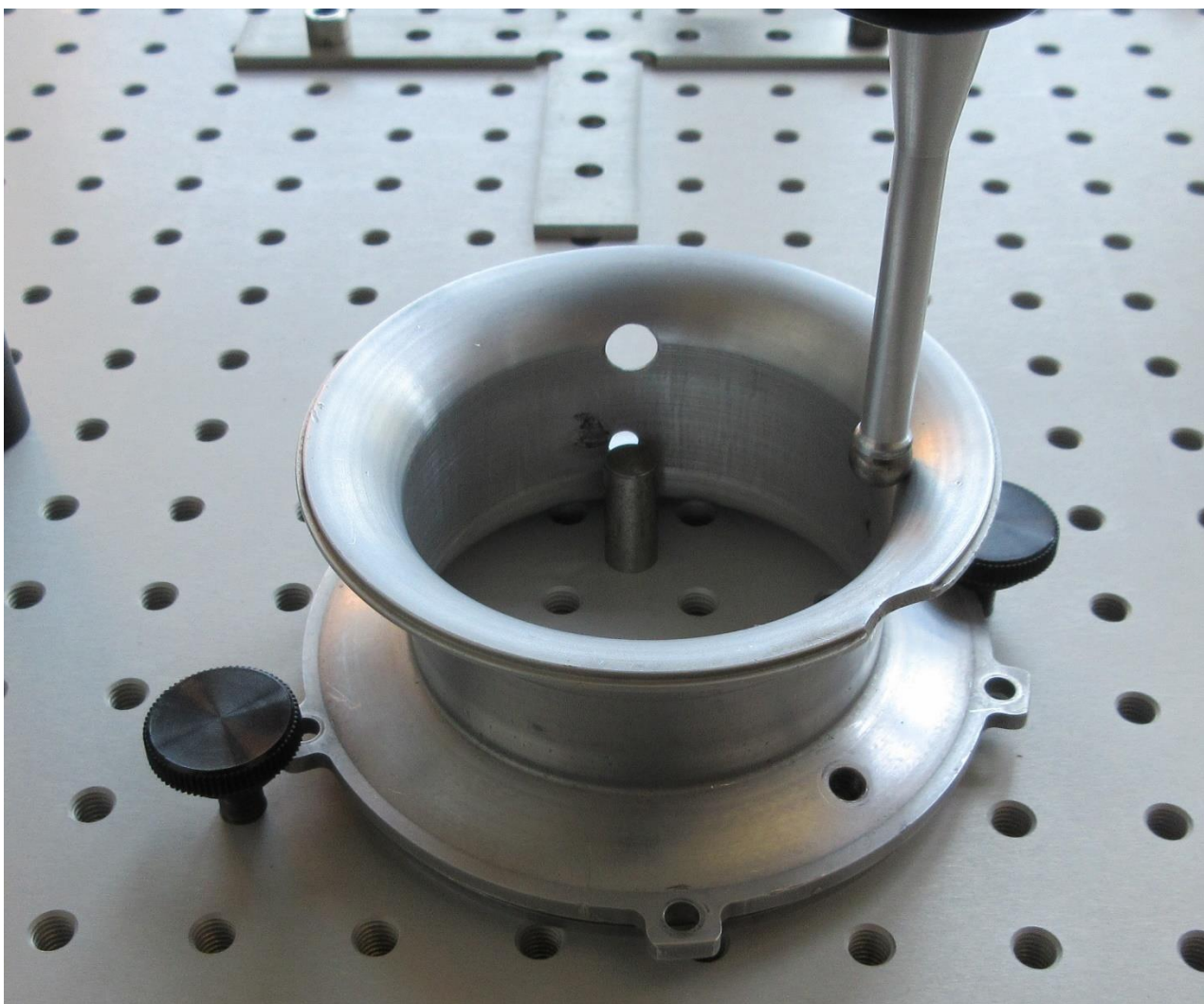
Το τμήμα εισόδου (Εικ. 2.4) είναι απαραίτητο να μετρηθεί με ιδιαίτερη προσοχή, διότι το τελικό προϊόν της κατεργασίας που θα προκύψει από τις μετρήσεις, θα καθορίσει και το ακτινικό διάκενο μεταξύ συμπιεστή (impeller) και κελύφους. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η ακίδα επαφής για την μέτρηση της εσωτερικής διαμέτρου. Η ακίδα ήρθε

σε επαφή με πέντε διαφορετικά σημεία και με δεδομένο ότι ο άξονας z ήταν κλειδωμένος, οι μετρήσεις έγιναν όλες στο ίδιο ύψος. Αμέσως μετά το λογισμικό πρόγραμμα της μηχανής δημιούργησε έναν κύκλο με μια ακτίνα, στην οποία έπρεπε να προστεθεί και η ακτίνα της σφαίρας 2mm προκειμένου να πάρουμε την αντισταθμισμένη μέτρηση.



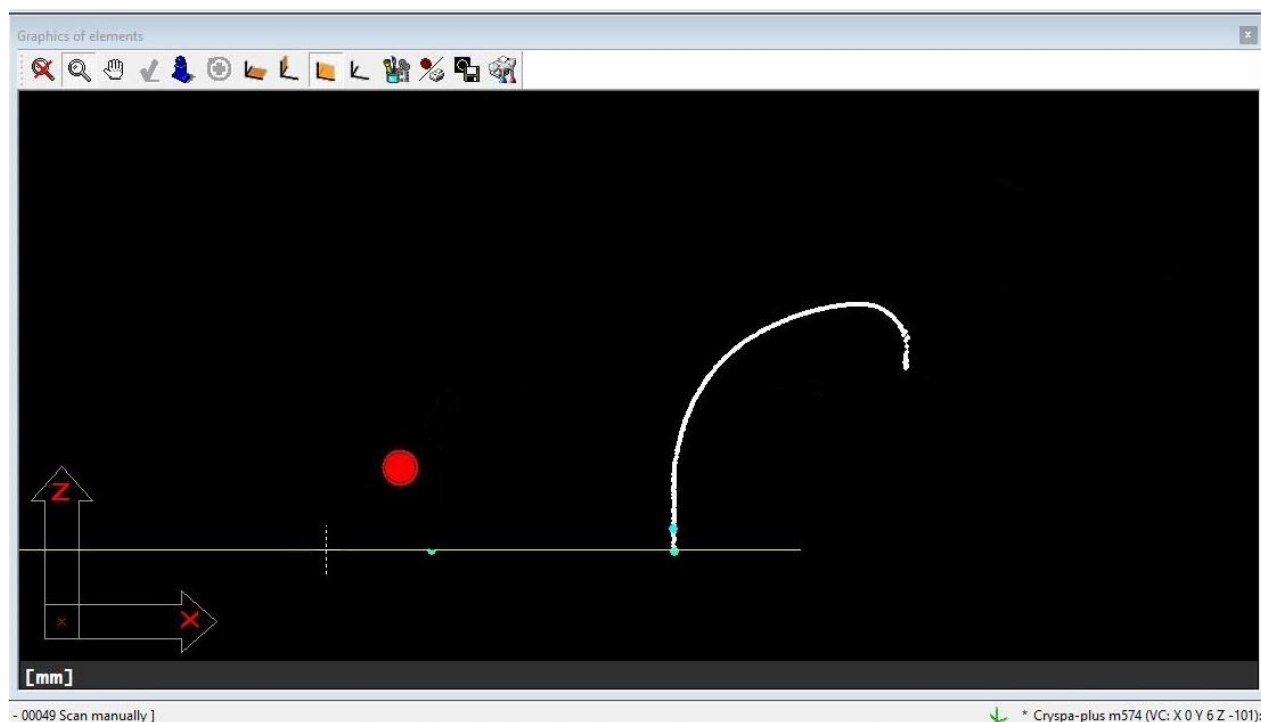
Εικόνα 2.4: Μέτρηση του τμήματος εισόδου.

Για την μέτρηση της παρακάτω γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε γραφίδα αντιγραφής (Εικ. 2.5). Η συγκεκριμένη γραφίδα φέρει στο τελειώμά της μια σφαίρα διαμέτρου 8mm, συνεπώς στην καμπύλη που θα δημιουργήσει το λογισμικό θα πρέπει να αντισταθμιστούν 4mm. Στην παρακάτω μέτρηση ο y άξονας ήταν κλειδωμένος προκειμένου να περιοριστεί η κίνηση μόνο στους άξονες x και y .



Εικόνα 2.5: Μέτρηση του τμήματος εισόδου.

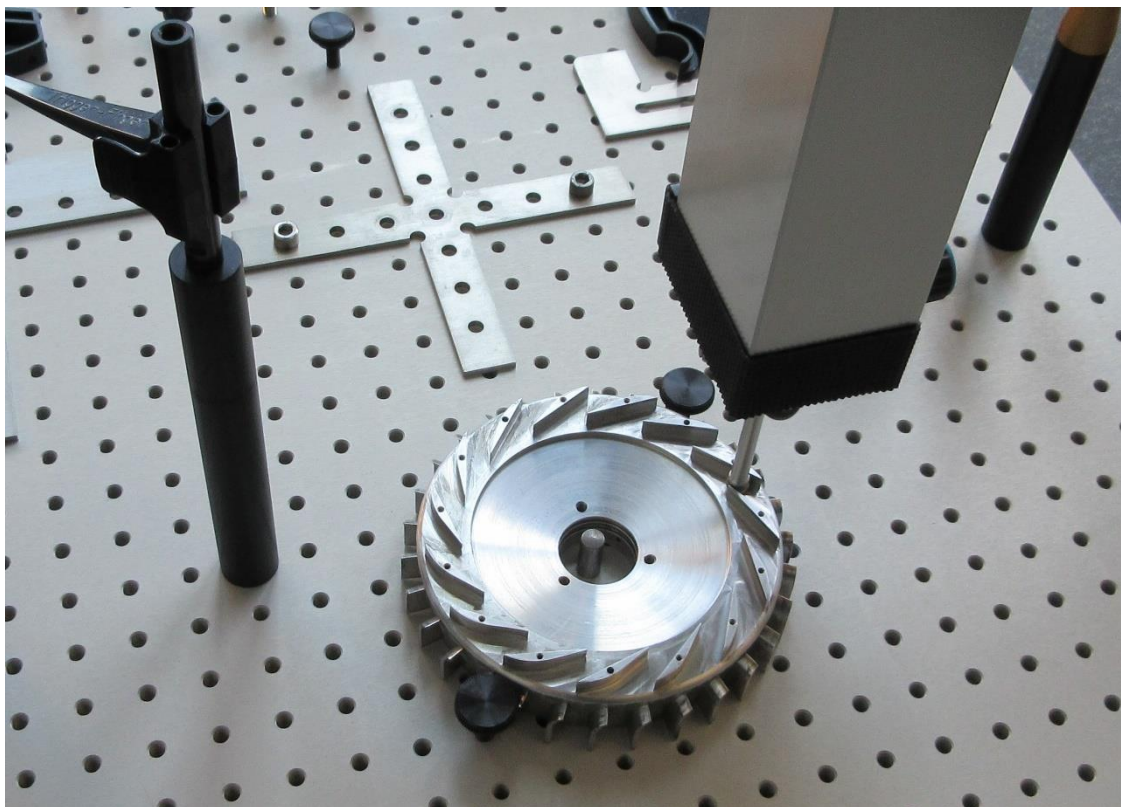
Στην [Εικ. 2.6](#) παρουσιάζεται η διδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας που σαρώθηκε, έτοιμη να μετατραπεί σε αρχείο DXF και να εισαχθεί σε λογισμικό CAD.



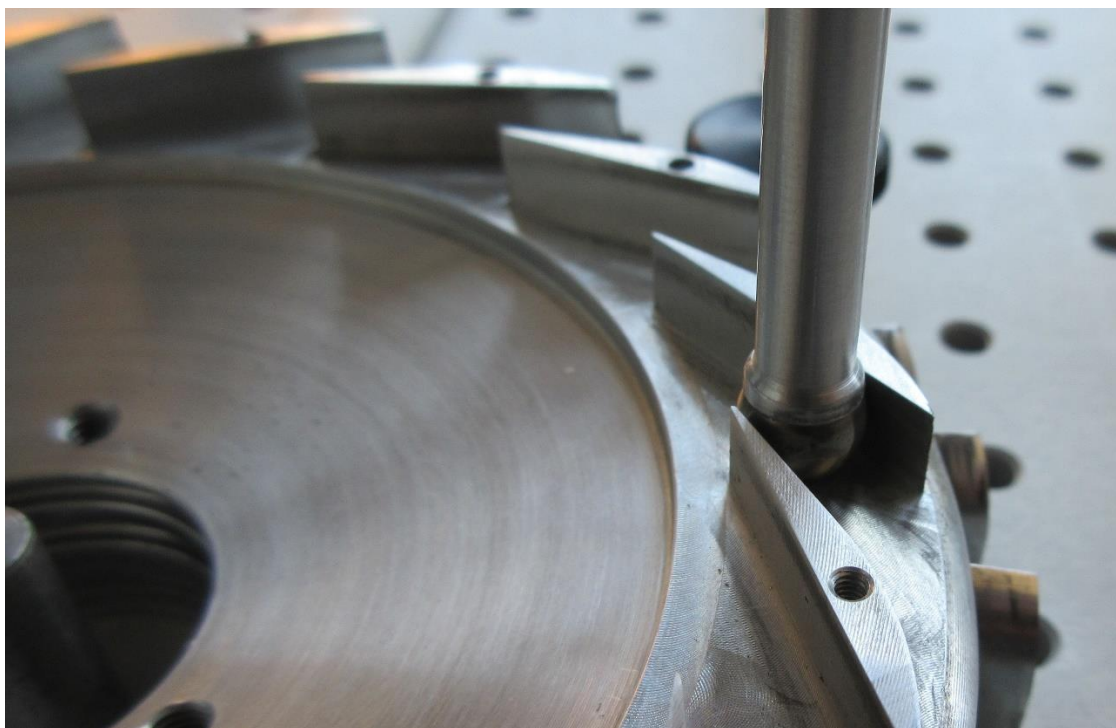
Εικόνα 2.6: Διδιάστατη απεικόνιση της τομής του τμήματος εισόδου, όπως προέκυψε από τη διαδικασία μετρήσεων.

Η πλήμνη του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια

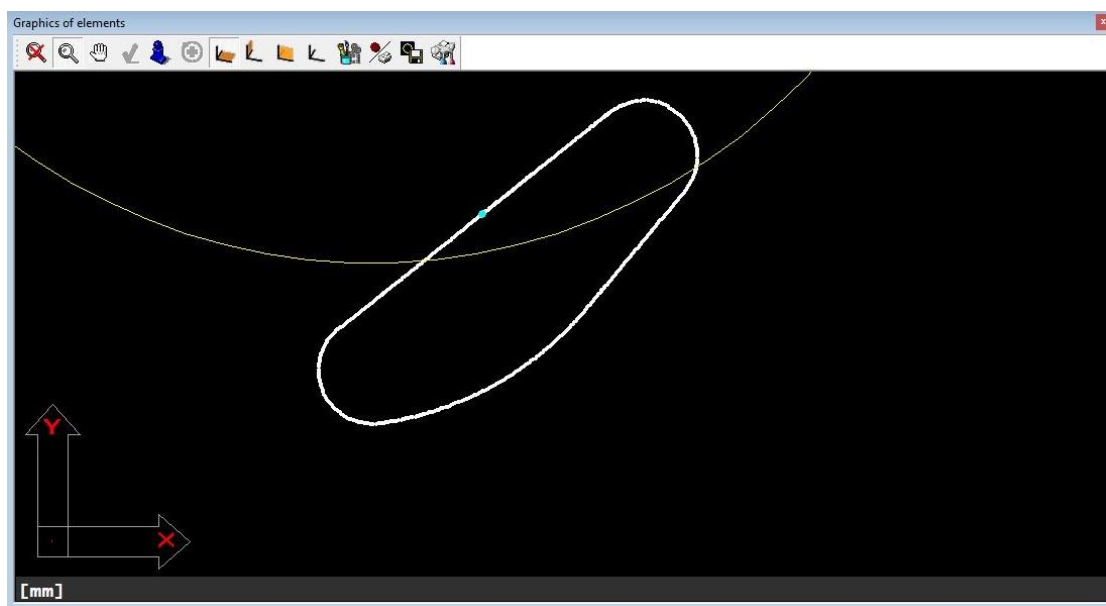
Με την ίδια διαδικασία μετρήθηκαν και τα σταθερά πτερύγια του διαχύτη ([Εικ. 2.7 - 2.9](#)). Προκειμένου να διαγράψουμε μια πορεία κατά τους άξονες x και y, ο άξονας z ήταν κλειδωμένος.



Εικόνα 2.7: Μέτρηση του διαχύτη.



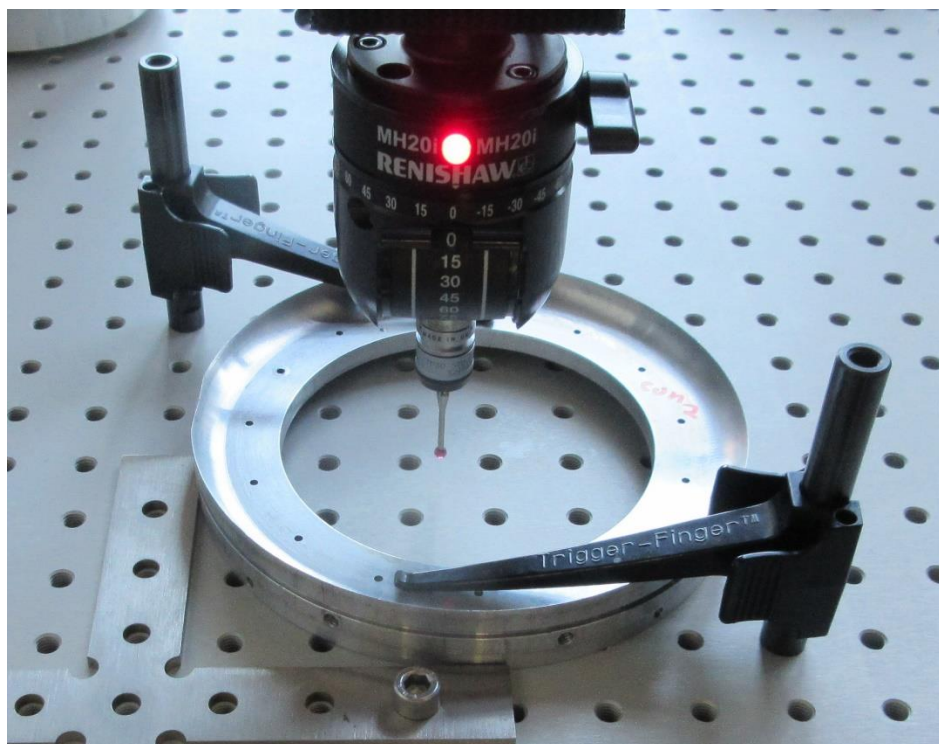
Εικόνα 2.8: Χειροκίνητη μέτρηση σταθερού πτερυγίου με γραφίδα αντιγραφής.



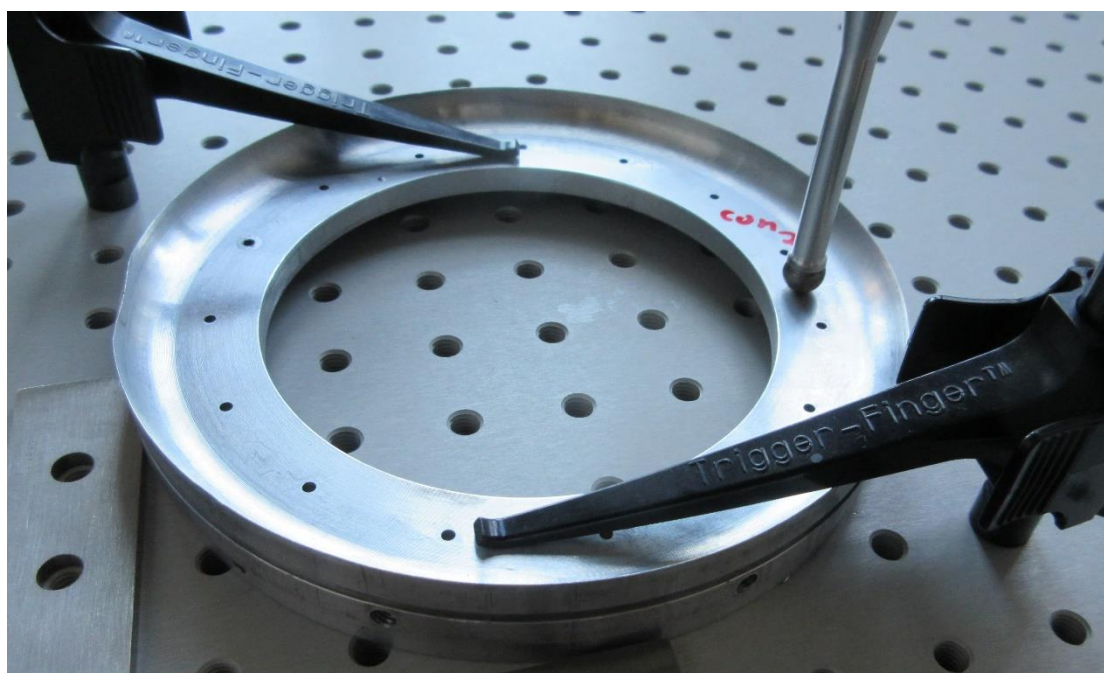
Εικόνα 2.9: Η διαδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας που σαρώθηκε έτοιμη να μετατραπεί σε αρχείο DXF.

Το κέλυφος του διαχύτη

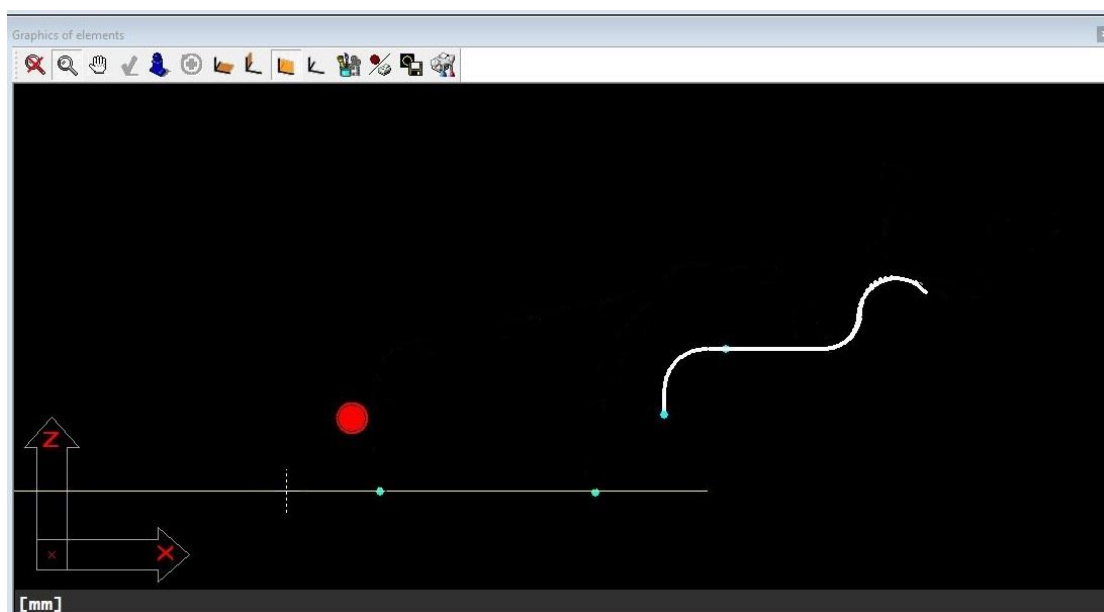
Στις επόμενες εικόνες (Εικ. 2.10 – 2.12) απικονίζεται η διαδικασία μέτρησης του κελύφους του διαχύτη.



Εικόνα 2.10: Μέτρηση της εσωτερικής διαμέτρου του δακτυλίου του κελύφους τρου διαχύτη.



Εικόνα 2.11: Χειροκίνητη μέτρηση με γραφίδα αντιγραφής.



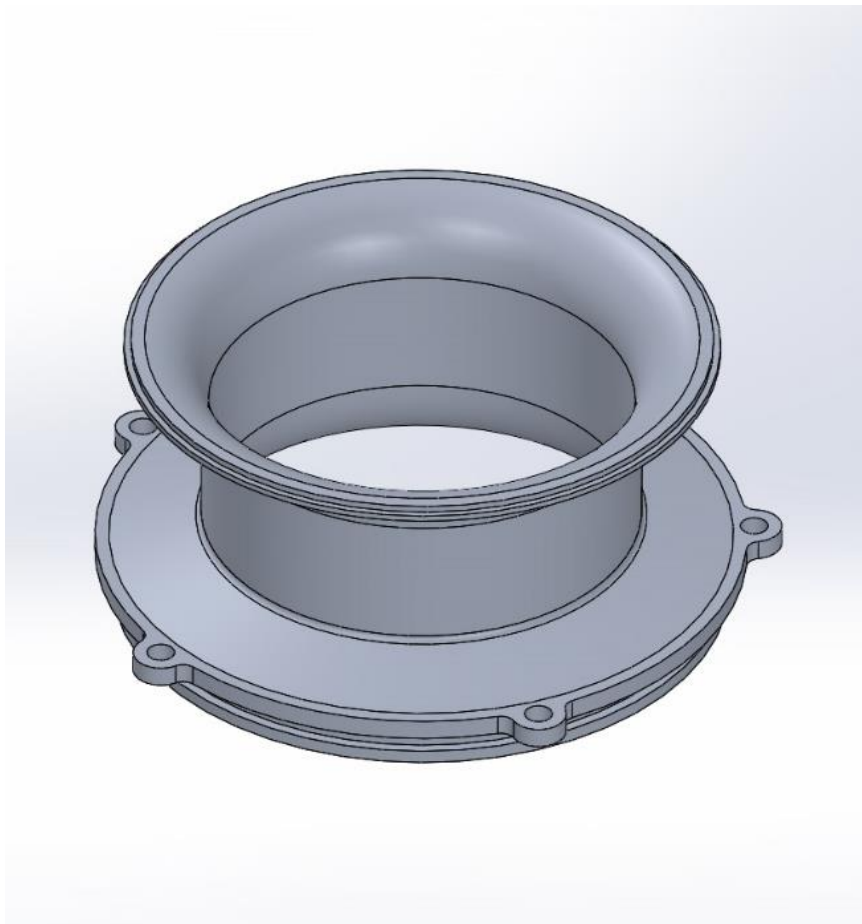
Εικόνα 2.12: Αποτέλεσμα μέτρησης της γραφίδας αντιγραφής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

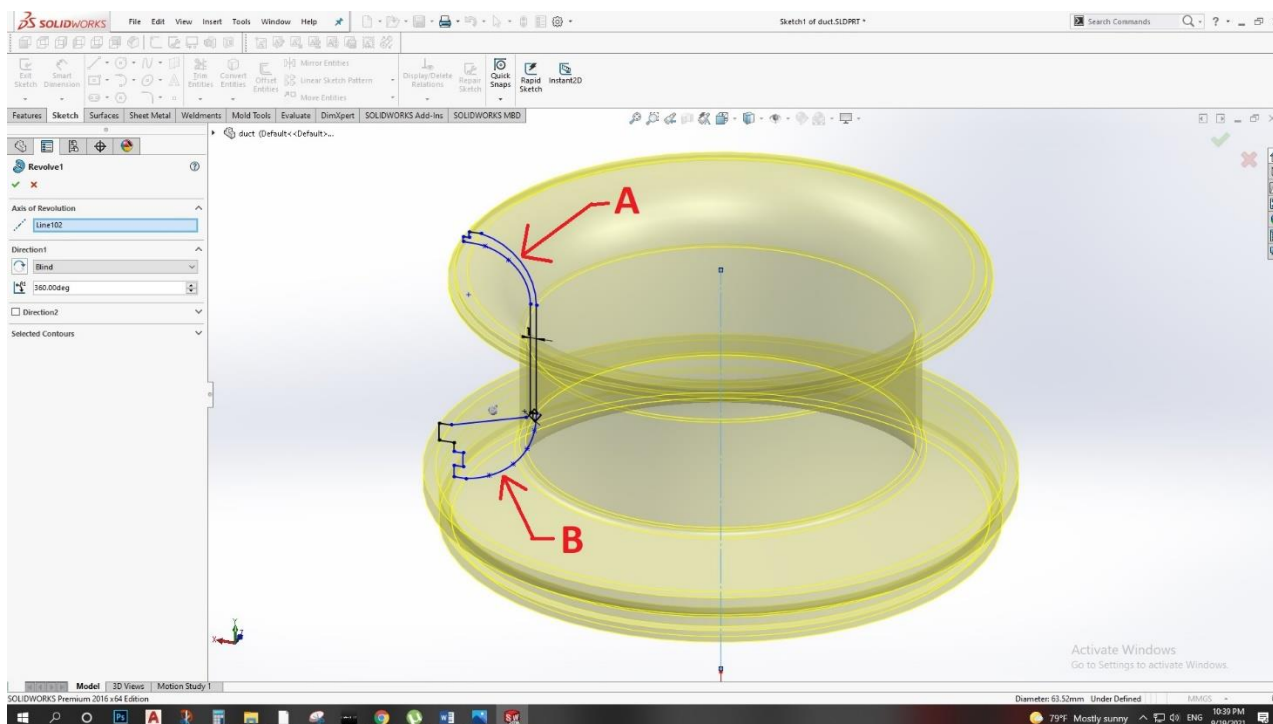
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CAD

Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος και η διαδικασία σχεδιασμού, των 3 τεμαχίων, των οποίων οι διαστάσεις μετρήθηκαν (όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) με τη χρήση της συσκευής CMM.

3.1 Το τμήμα εισόδου (εισαγωγή)



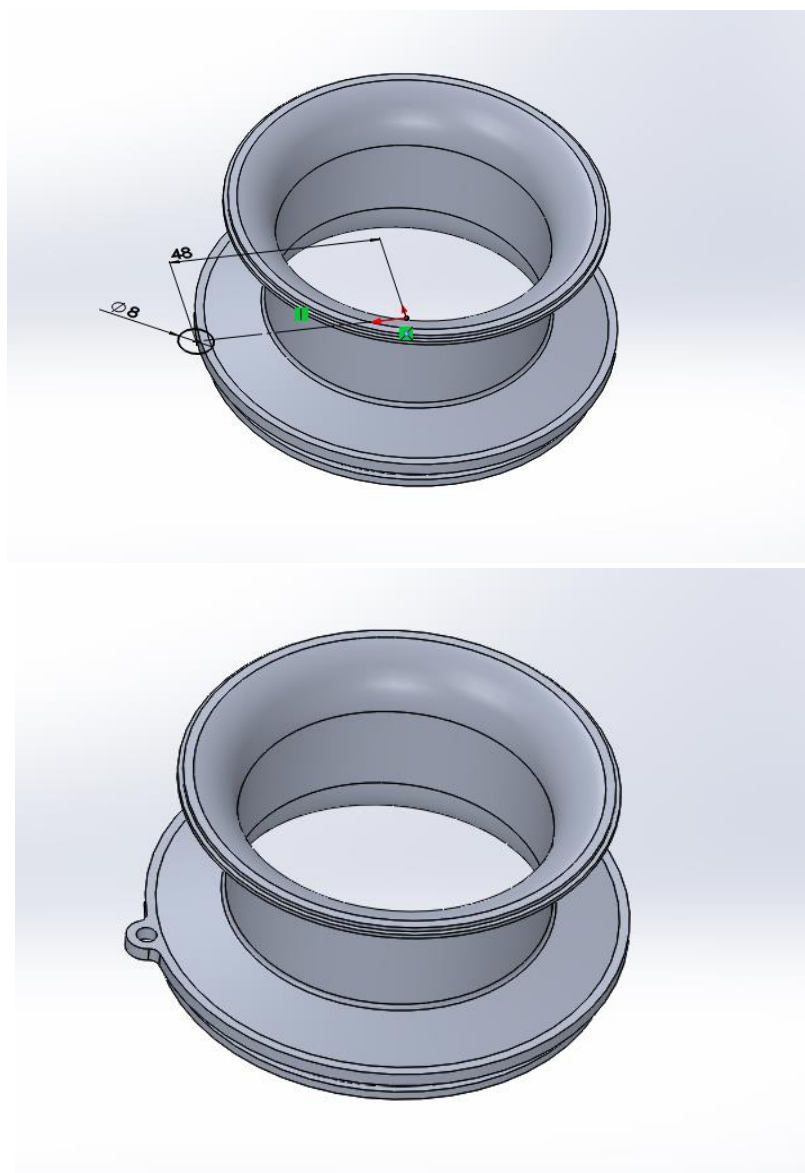
Εικόνα 3.1: Το τμήμα εισόδου στην τελική του μορφή.



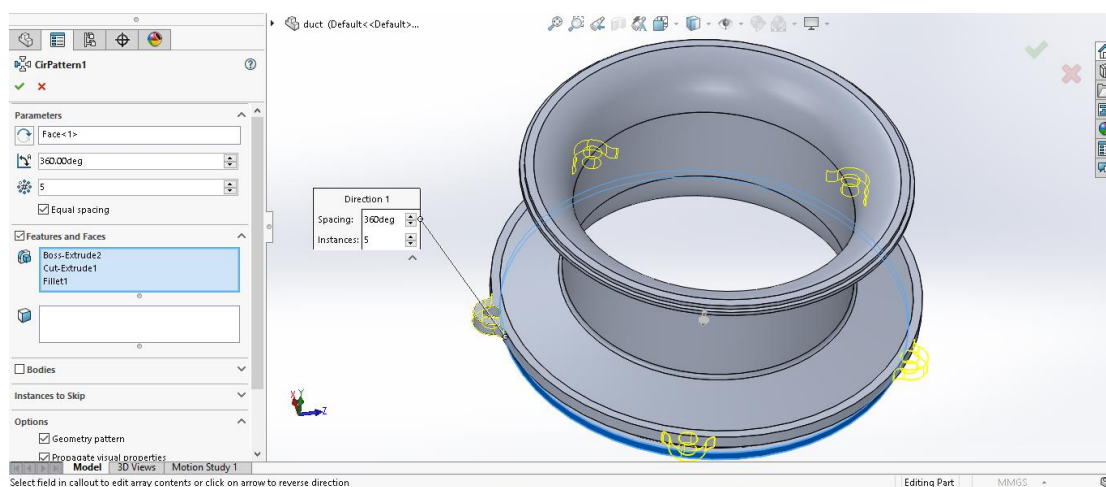
Εικόνα 3.2: Διαδικασία σχεδίασης του τμήματος εισόδου.

Αρχικά δημιουργήσαμε το σχεδιάγραμμα (sketch). Οι καμπύλες A και B (Εικ. 3.2) προέρχονται από τις μέτρησεις με τη γραφίδα αντιγραφής, ενώ το υπόλοιπο σχέδιο βασίστηκε σε μετρήσεις με παχύμετρο και υψομετρικό χαράκτη. Στη συνέχεια, επιλέγοντας τον άξονα συμμετρίας, δημιουργήθηκε ο όγκος εκ περιστροφής, με την εντολή Revolve και δημιουργήθηκε το αντίστοιχο στερεό (Εικ. 3.2).

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η οπή συγκράτησης, που συγκρατεί το τεμάχιο στο υπόλοιπο σώμα του κινητήρα (Εικ. 3.3). Με την εντολή circular pattern προσθέσαμε περιμετρικά άλλες 4 ίδιες οπές συγκράτησης (Εικ. 3.4).

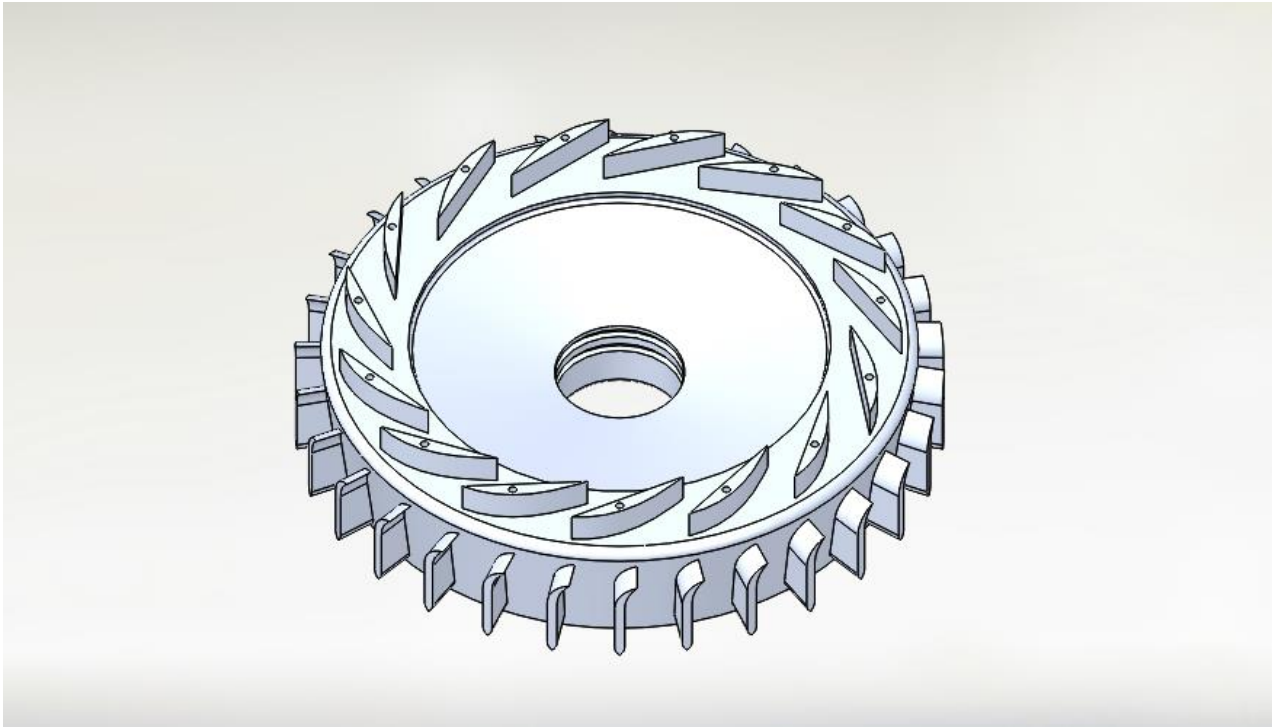


Εικόνα 3.3: Διαδικασία πρόσθεσης της οπής συγκράτησης.

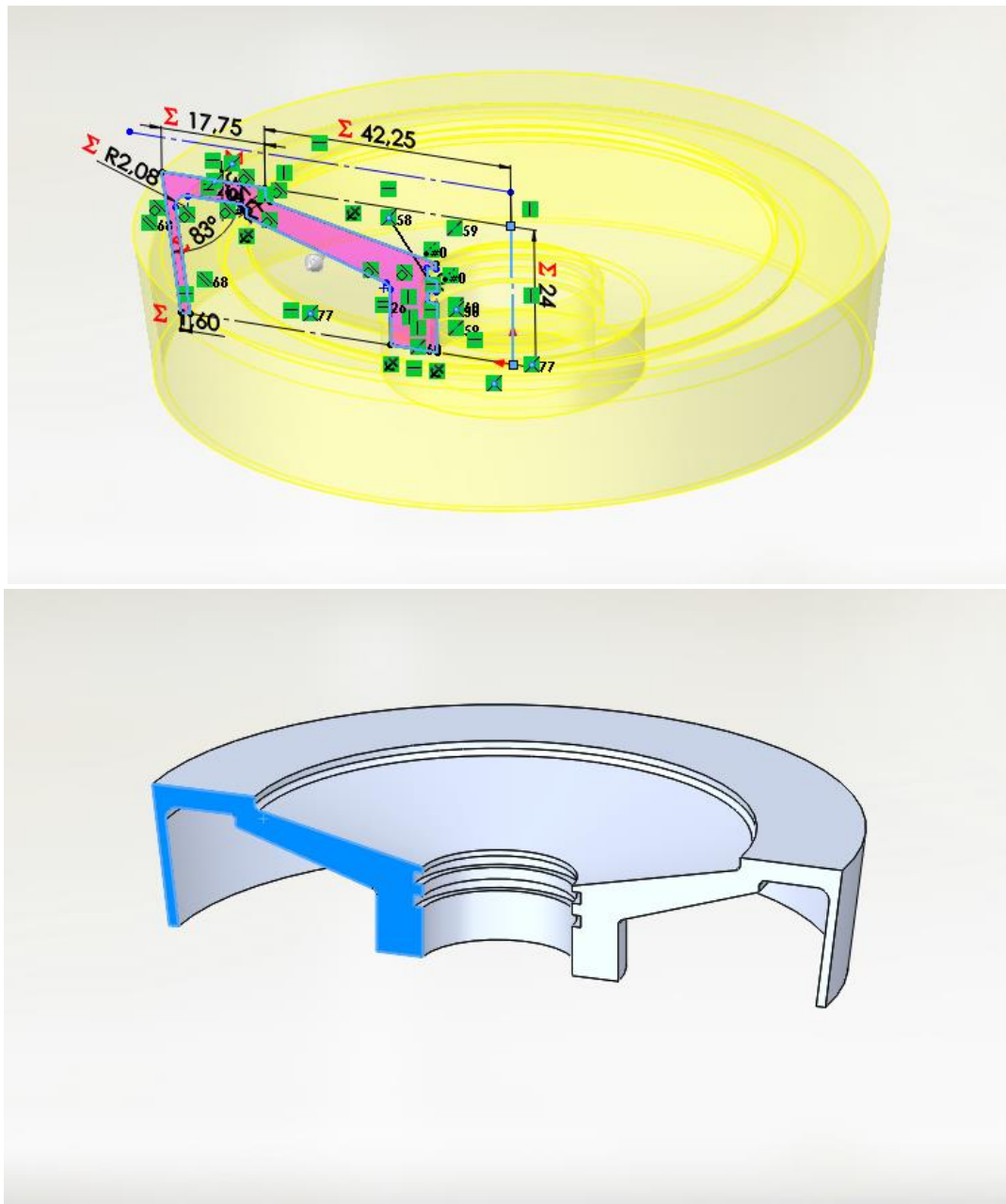


Εικόνα 3.4: Διαδικασία πρόσθεσης επιπλέον οπών συγκράτησης.

3.2 Η πλήμνη του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια

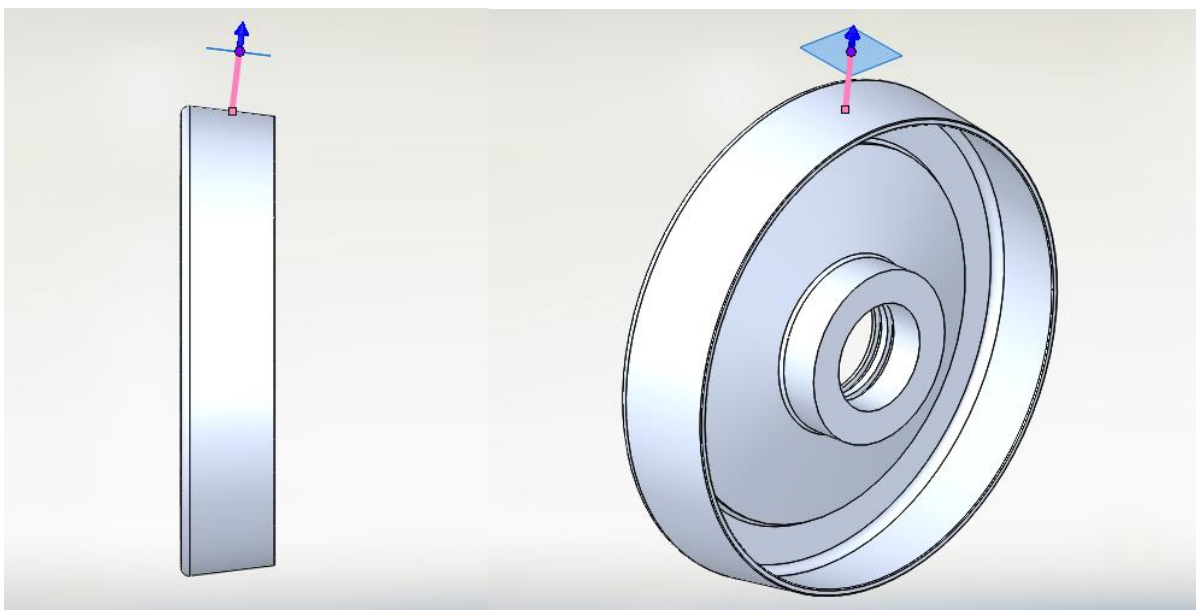


Εικόνα 3.5: Ο διαχύτης με τα σταθερά πτερύγια στην τελική του μορφή.

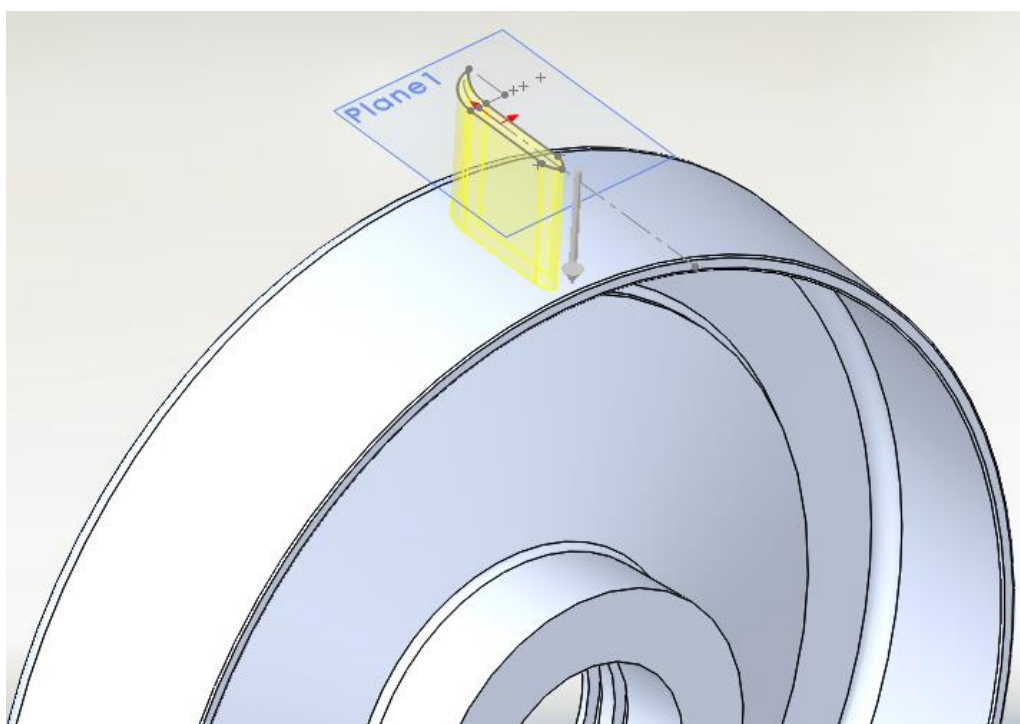


Εικόνα 3.6: Διαδικασία σχεδίασης της πλάτης του διαχύτη.

Για τη σχεδίαση της πλάτης του διαχύτη, αρχικά δημιουργήσαμε ένα sketch με τα δεδομένα των μετρήσεων από το CMM και με την εντολή Revolve δημιουργήθηκε ο όγκος εκ περιστροφής (Εικ. 3.6). Στη συνέχεια δημιουργήσαμε ένα plane υπό γωνία για να σχεδιαστεί σε αυτό το sketch της γεωμετρίας του πτερυγίου (Εικ. 3.7).

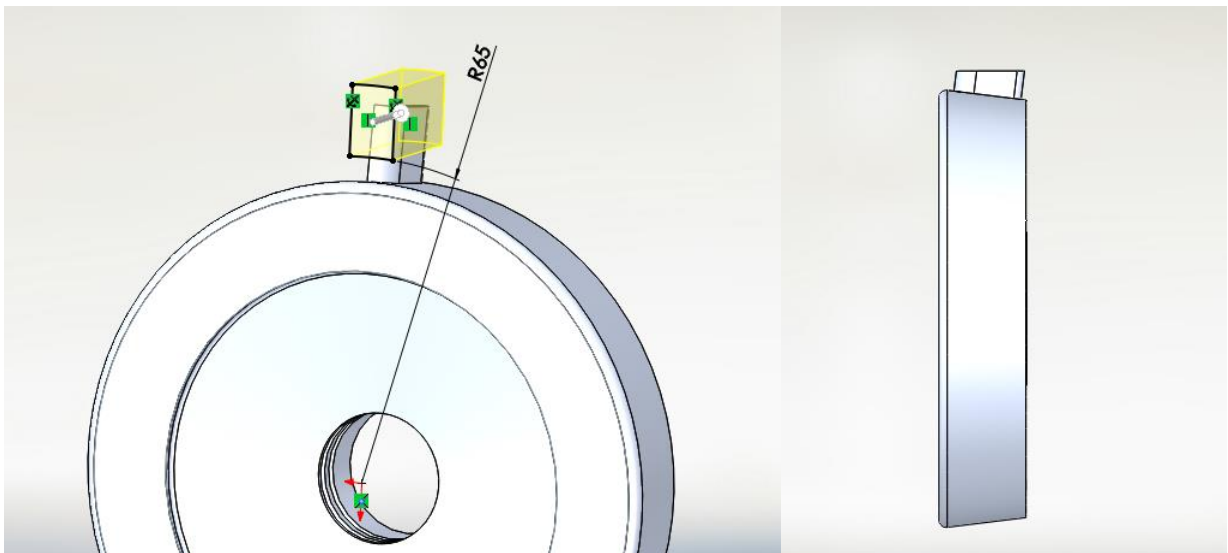


Εικόνα 3.7: Διαδικασία ορισμού του επιπέδου σχεδίασης των πτερυγίων του διαχύτη.



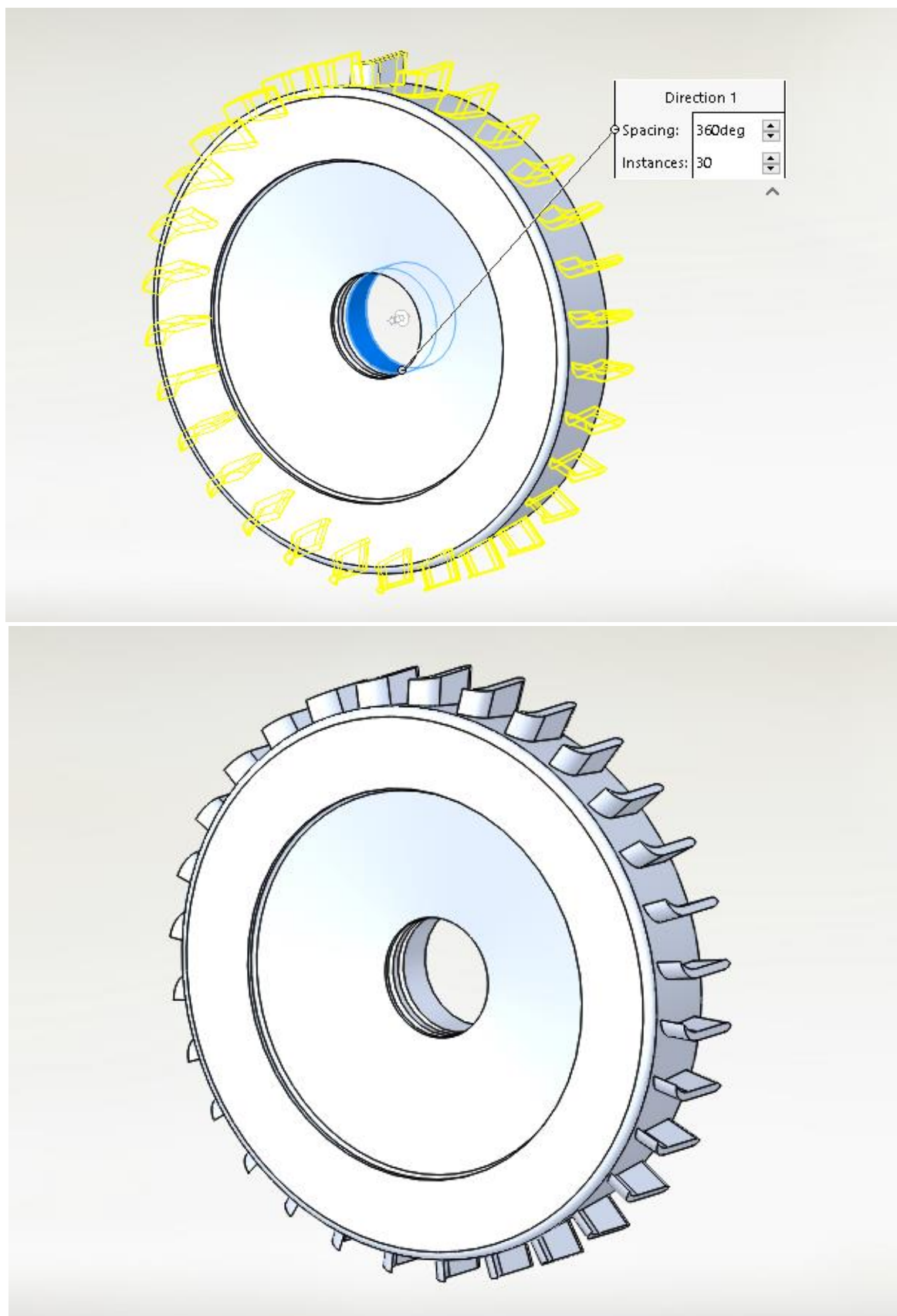
Εικόνα 3.8: Διαδικασία σχεδίασης ενός εκ των πτερυγίων του διαχύτη.

Αφού σχεδιάστηκε η κάτοψη του πτερυγίου στο υπό γωνία επίπεδο (plane 1) (Εικ. 3.8), με την εντολή boss extrude δημιουργείται ο όγκος του πτερυγίου έως την επόμενη επιφάνεια που θα συναντήσει (Εικ. 3.9).

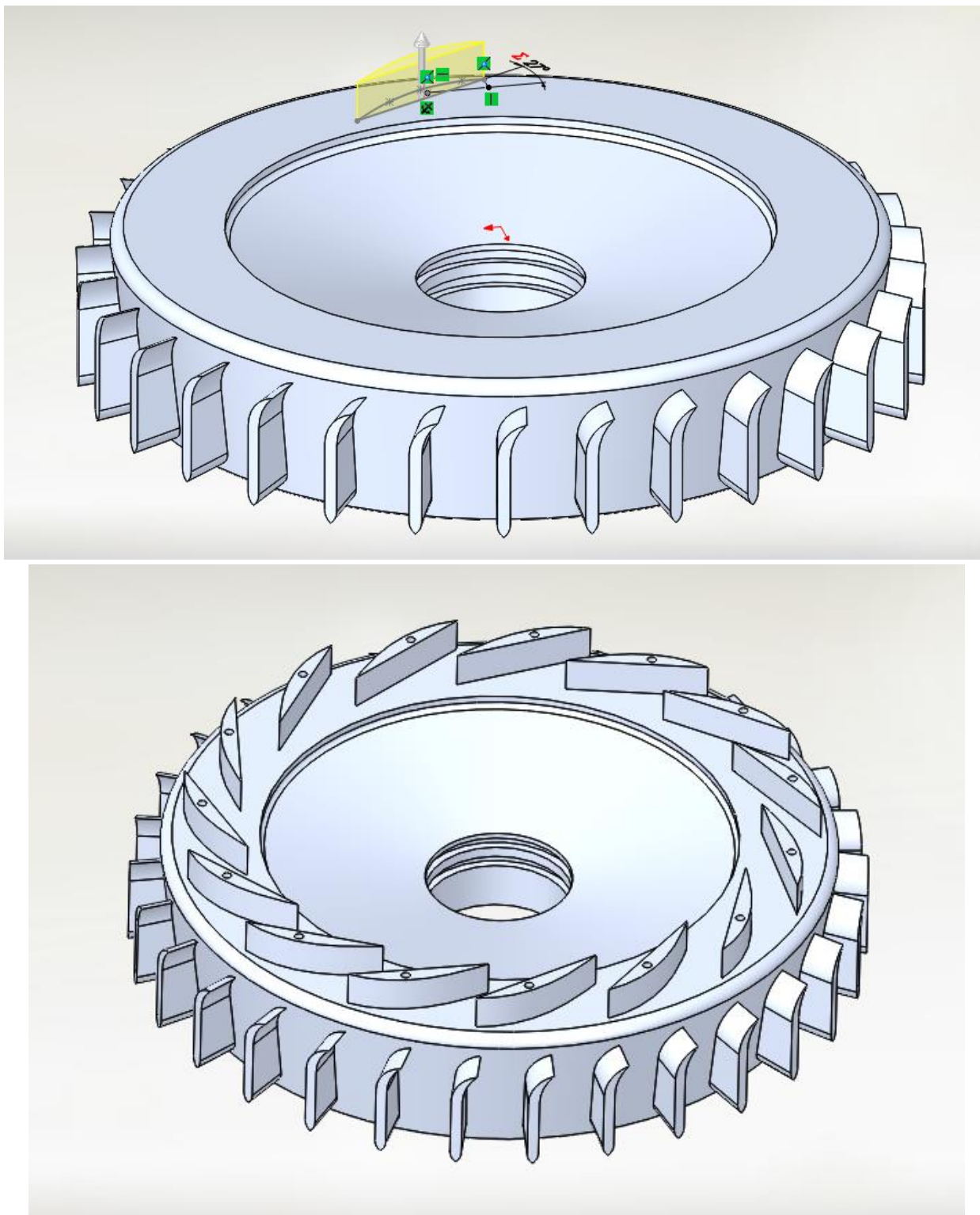


Εικόνα 3.9: Διαδικασία boss extrude.

Κόβουμε στη συνέχεια τμήμα του περυγίου, ώστε να μπορέσει αυτό να εφαρμόσει περιμετρικά στο εξωτερικό κέλυφος του στροβίλου. Με την εντολή circular pattern αντιγράφουμε περιμετρικά 30 περύγια ([Εικ. 3.10](#)). Στη συνέχεια ακολουθούμε την ίδια διαδικασία σχεδιασμού για τα υπόλοιπα περύγια ([Εικ. 3.11](#)).



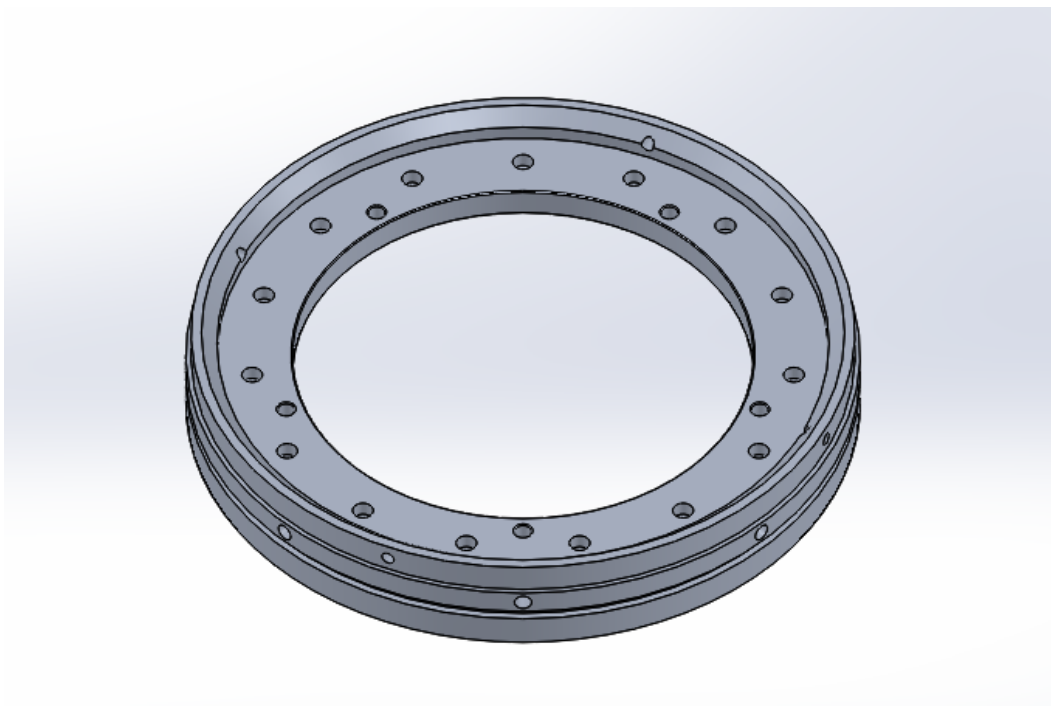
Εικόνα 3.10: Διαδικασία circular pattern.



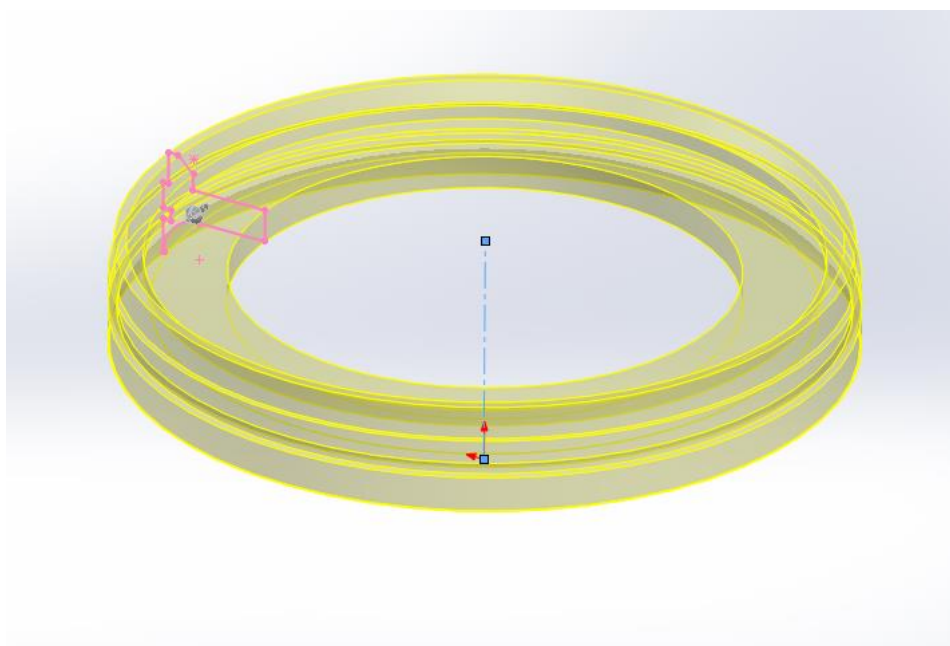
Εικόνα 3.11: Η διαδικασία ορισμού και το τελικό αποτέλεσμα της σχεδίασης των υπολοίπων πτερυγίων του διαχύτη.

3.3 Το κέλυφος του διαχύτη

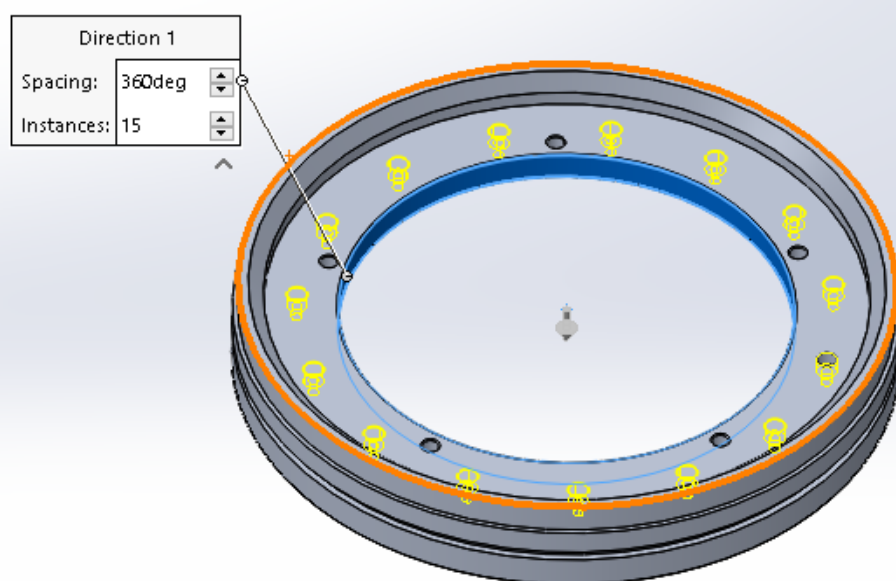
Στις επόμενες εικόνες περιγράφεται διαδοχικά η διαδικασία με την οποία σχεδιάστηκε το κέλυφος του διαχύτη.



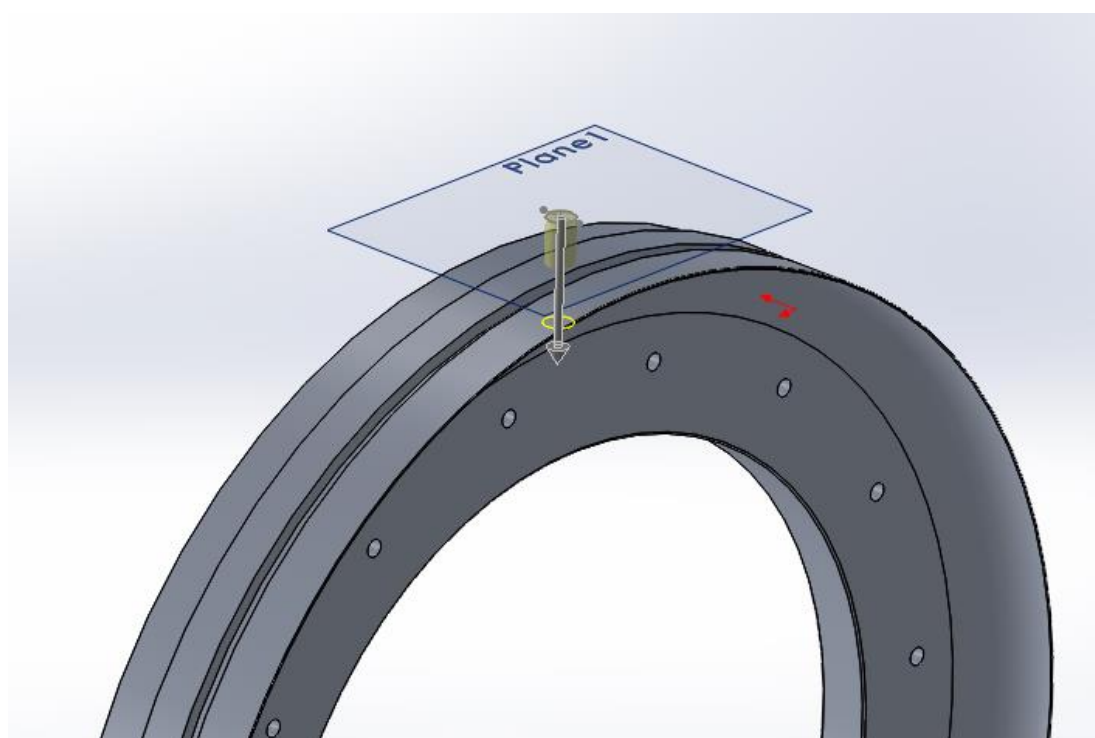
Εικόνα 3.12: Το κέλυφος του διαχύτη στην τελική του μορφή.



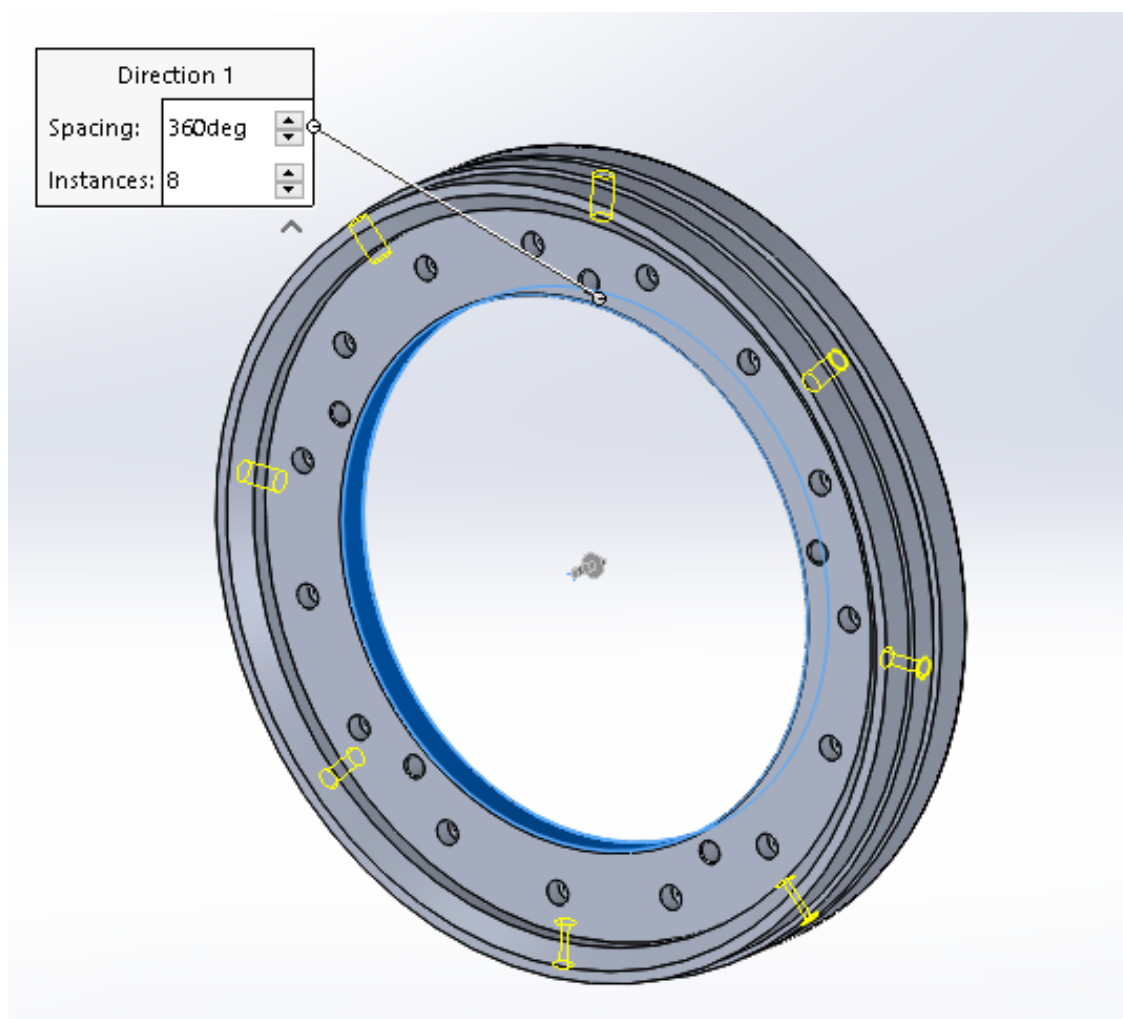
Εικόνα 3.13: Το κέλυφος του διαχύτη ως όγκος εκ περιστροφής.



Εικόνα 3.14: Σχεδιασμός των οπών συγκράτησης.



Εικόνα 3.15: Δημιουργία επιπέδου για τον σχεδιασμό της πρώτης οπής συγκράτησης, του εξωτερικού περιβλήματος.



Εικόνα 3.16: Δημιουργία των υπολοίπων οπών συγκράτησης, του εξωτερικού περιβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ G

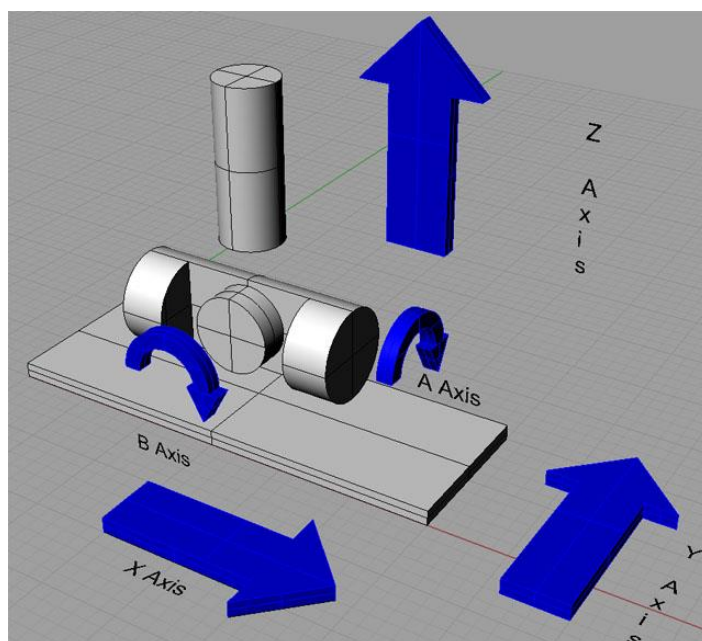
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ CNC

4.1 Η εργαλειομηχανή HAAS VF-2



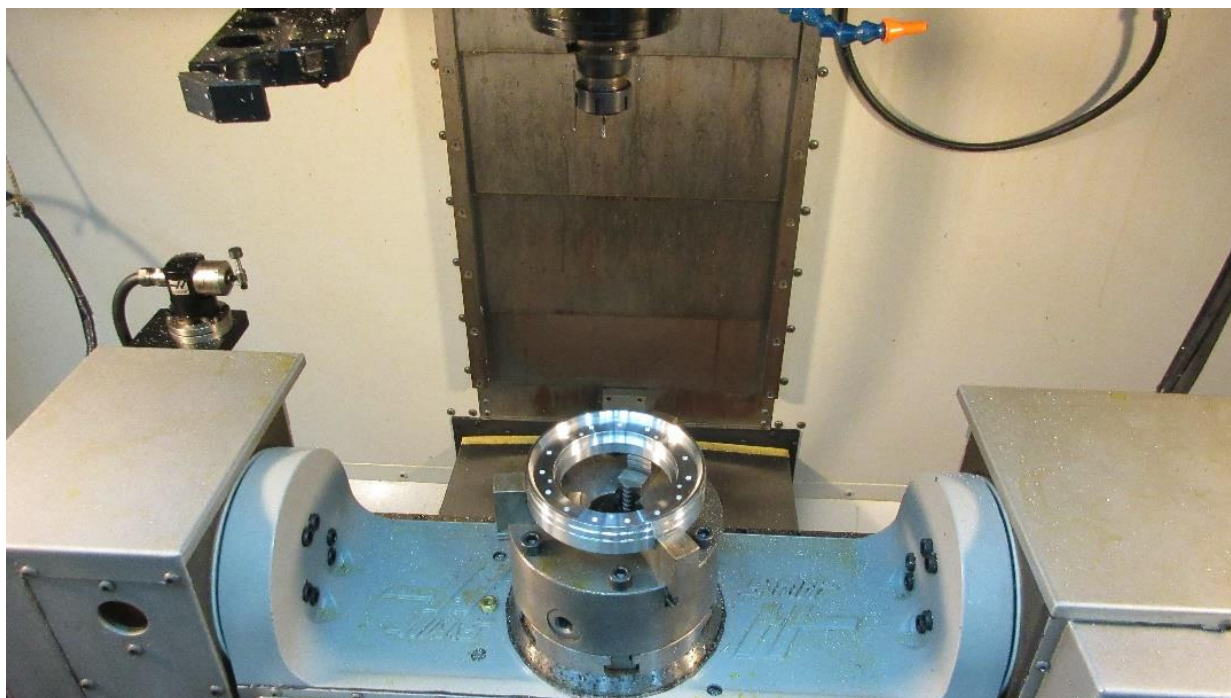
Εικόνα 4.1: Η εργαλειομηχανή HAAS VF-2.

Η CNC εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε, ήταν η VF-2 της εταιρίας HAAS (Εικ. 4.1), η οποία παραχωρήθηκε από το Διατμηματικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή έχει πέντε άξονες, που σημαίνει ότι εκτελούνται ταυτόχρονες κινήσεις και από τους πέντε αυτούς άξονες. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή σύνθετων κατεργασιών και γεωμετριών (Εικ. 4.2).



Εικόνα 4.2: Οι 5 άξονες της CNC εργαλειομηχανής HAAS VF-2.

Η τράπεζα έχει δυνατότητα κίνησης κατά τους άξονες X και Y ενώ το περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο κατά τον άξονα Z. Ο τέταρτος και πέμπτος άξονας (A, B) στηρίζονται πάνω στην τράπεζα και το προς κατεργασία τεμάχιο επάνω στο B άξονα (Εικ. 4.3).

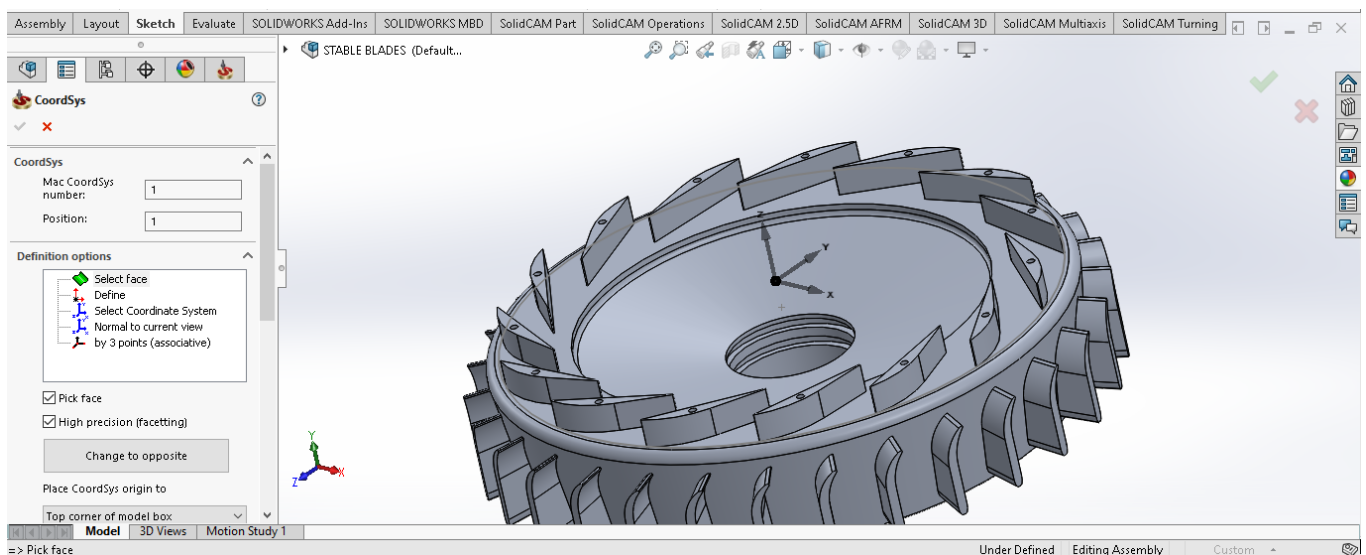


Εικόνα 4.3: Κατεργασμένο τεμάχιο πάνω στον B άξονα.

4.2 Ανάπτυξη κώδικα G με χρήση CAM

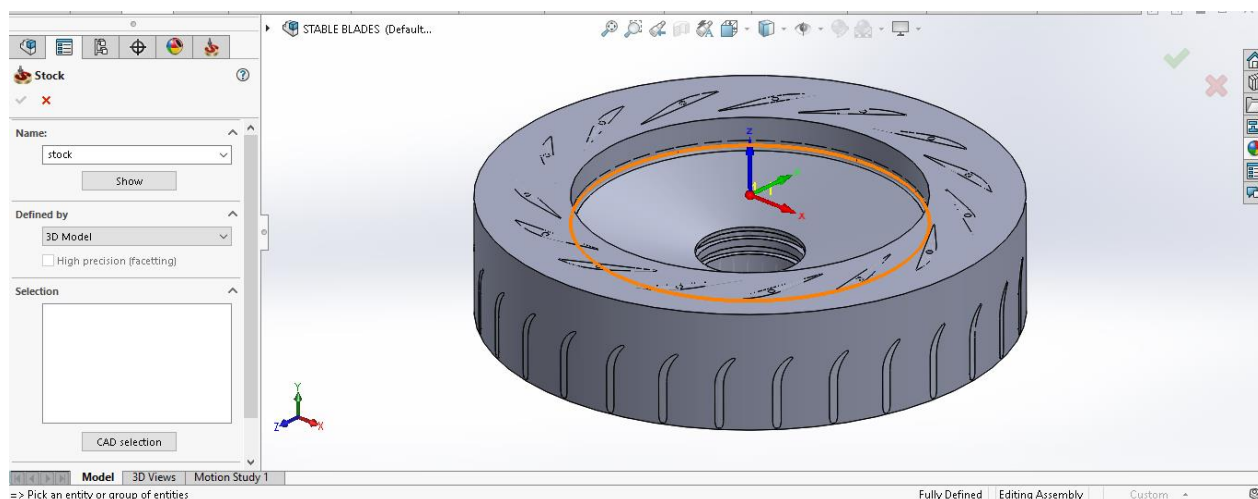
Ο κώδικας G είναι μια γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου, που χρησιμοποιείται για την ψηφιακή καθοδήγηση αυτόματων εργαλειομηχανών, προκειμένου να καθοριστεί από εντολές η πορεία του κοπτικού η ταχύτητα ο τρόπος που θα κινηθεί, κ.λπ. Για απλές κινήσεις και απλές γεωμετρίες η ανάπτυξη του κώδικα μπορεί να γίνει γράφοντας τις εντολές. Για σύνθετες κινήσεις και γεωμετρίες η ανάπτυξη του κώδικα G πρέπει να γίνει με λογισμικό CAM (Computer Aided Manufacturing), προκειμένου η εξαγωγή του κώδικα να γίνει αυτόματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidCam. Το SolidCam είναι ένα λογισμικό CAM που έχει χιλιάδες χρήστες σε όλο τον κόσμο, λόγω του ότι έχει εύχρηστο περιβάλλον και μεγάλες δυνατότητες. Σε ένα λογισμικό CAM εισάγουμε την έτοιμη γεωμετρία από ένα λογισμικό CAD, με σκοπό να ορίσουμε τις κινήσεις του κοπτικού εργαλείου, ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή γεωμετρία του τεμαχίου.

Αρχικά εισάγουμε τη γεωμετρία στο CAM και ορίζουμε τη θέση του προς κατεργασία τεμαχίου στο χώρο της μηχανής (Εικ. 4.4).



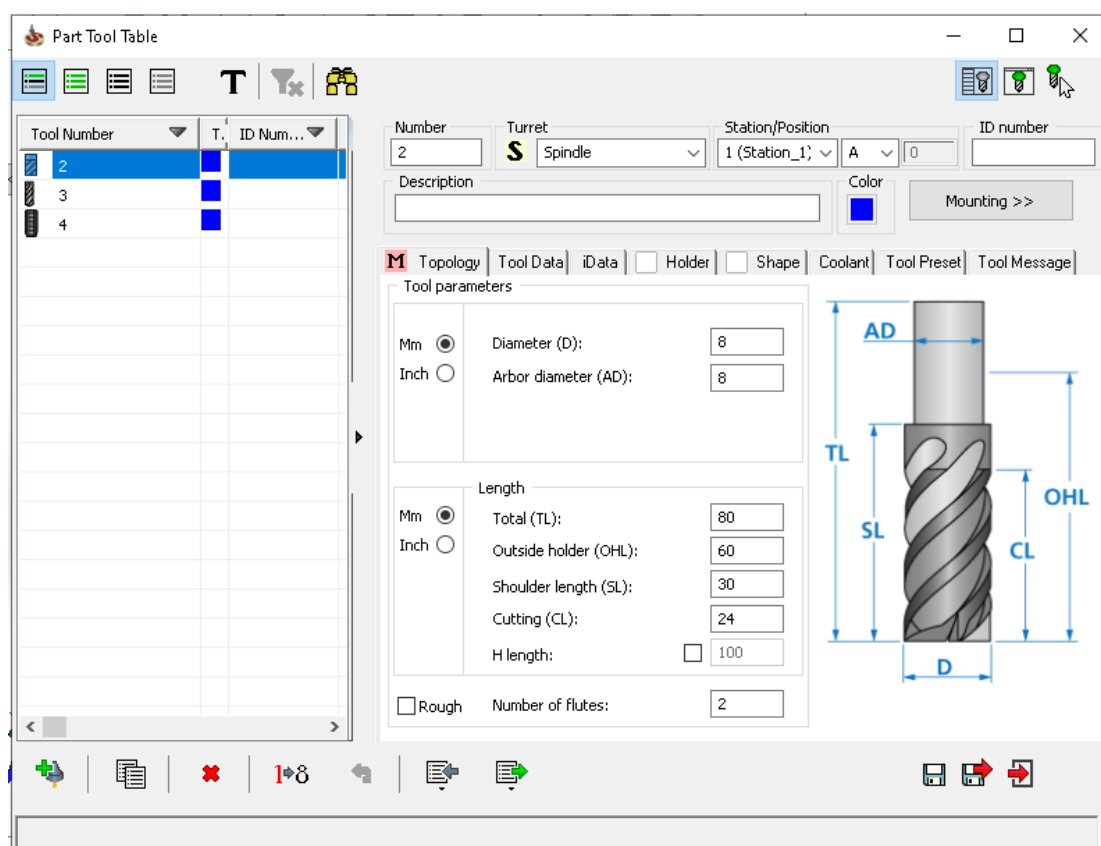
Εικόνα 4.4: Εισαγωγή της τελικής γεωμετρίας στο λογισμικό CAM.

Στη συνέχεια εισάγουμε τη γεωμετρία του αρχικού προς κατεργασία τεμαχίου (Stock), προκειμένου να ορίσουμε στο λογισμικό τις αρχικές διαστάσεις του τεμαχίου (Εικ. 4.5).

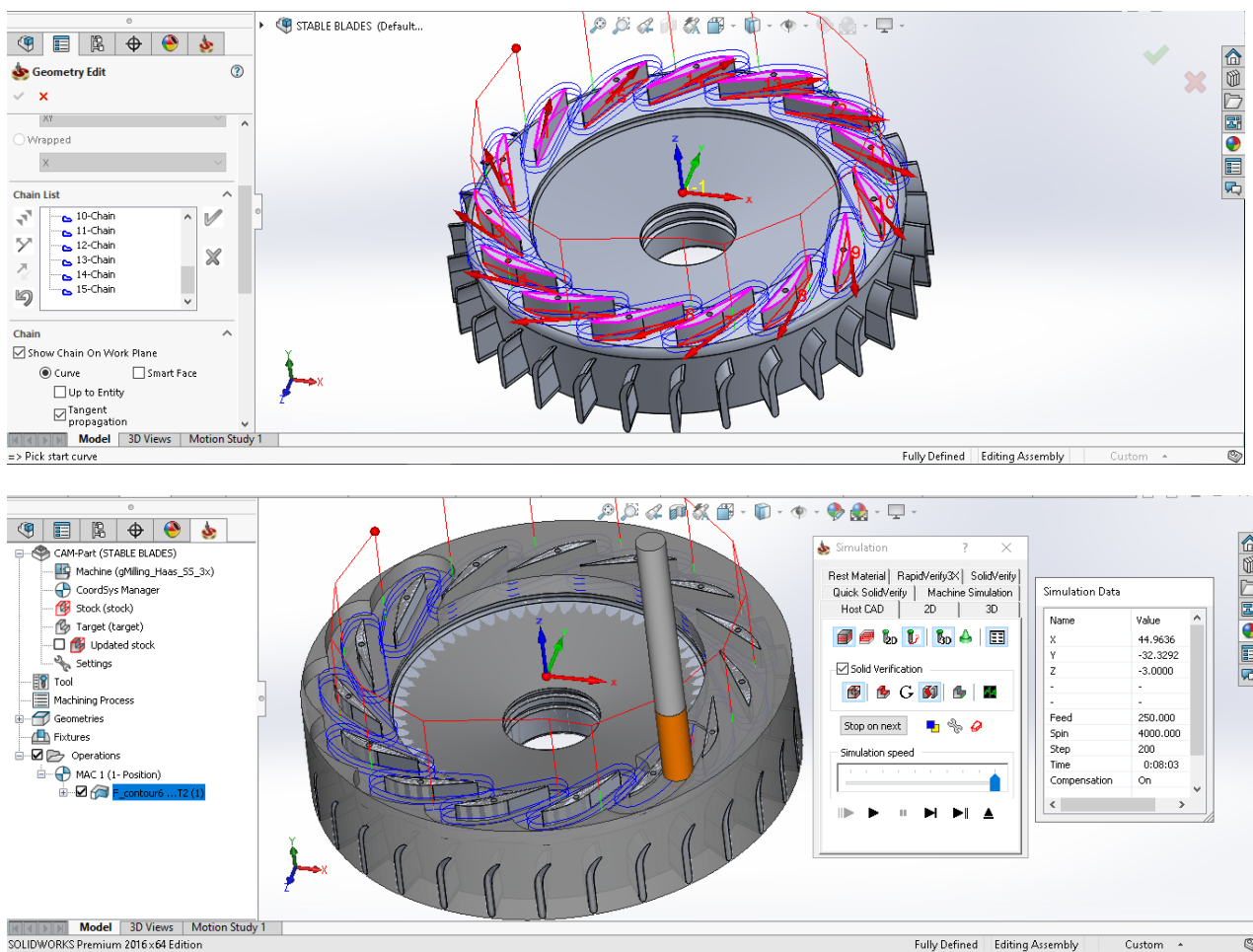


Εικόνα 4.5: Εισαγωγή της γεωμετρίας του αρχικού μεταλλικού τεμαχίου στο λογισμικό CAM.

Για το συγκεκριμένο τεμάχιο χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω εργαλεία: T2 κονδύλι D8mm, T3 τρυπάνι D2mm, T4 σπειρότομος M2.5 (Εικ. 4.6). Στη συνέχεια το λογισμικό προσομοιώνει τη διαδικασία κοπής (Εικ. 4.7).



Εικόνα 4.6: Ορισμός διαδρομής κοπτικού εργαλείου και τρόπος εισαγωγής και εξαγωγής του εργαλείου στο τεμάχιο.



Εικόνα 4.7: Προσομοίωση της κατεργασίας και υπολογισμός χρόνου κατεργασίας.

4.3 Κατασκευή των τμημάτων του στροβιλοαντιδραστήρα

Στην ακόλουθη [Εικ. 4.8](#) παρουσιάζονται τα αρχικά κυλινδρικά μεταλλικά τεμάχια (Αλουμινίου 7075T6), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κοπή των 3 αντικειμένων, καθώς και το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας.



Εικόνα 4.8: Τα αρχικά μεταλλικά τεμάχια και το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας..

4.3.1 Το τμήμα εισόδου (εισαγωγή)

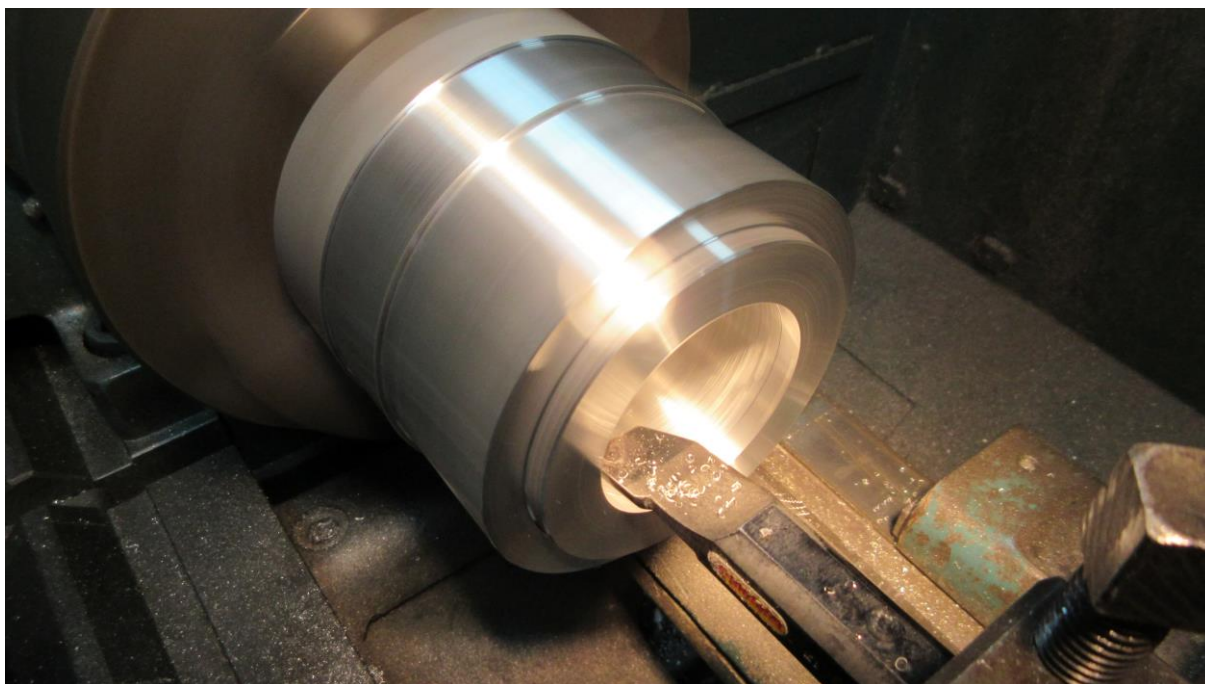
Στις ακόλουθες [Εικ. 4.8 - 4.11](#) και στις αντίστοιχες λεζάντες, παρουσιάζονται οι αρχικές κατεργασίες σε συμβατικό τόρνο, που πραγματοποιήθηκαν για την προετοιμασία του τεμαχίου.



***Εικόνα 4.9:** Το αρχικό τεμάχιο συγκρατημένο σε σφικτήρα συμβατικού τόρνου.*



***Εικόνα 4.10:** Διάνοιξη αρχικής οπής με τρυπάνι.*



Εικόνα 4.11: Διάνοιξη τελικής διαμέτρου με εργαλείο εσωτερικής τórνευσης.



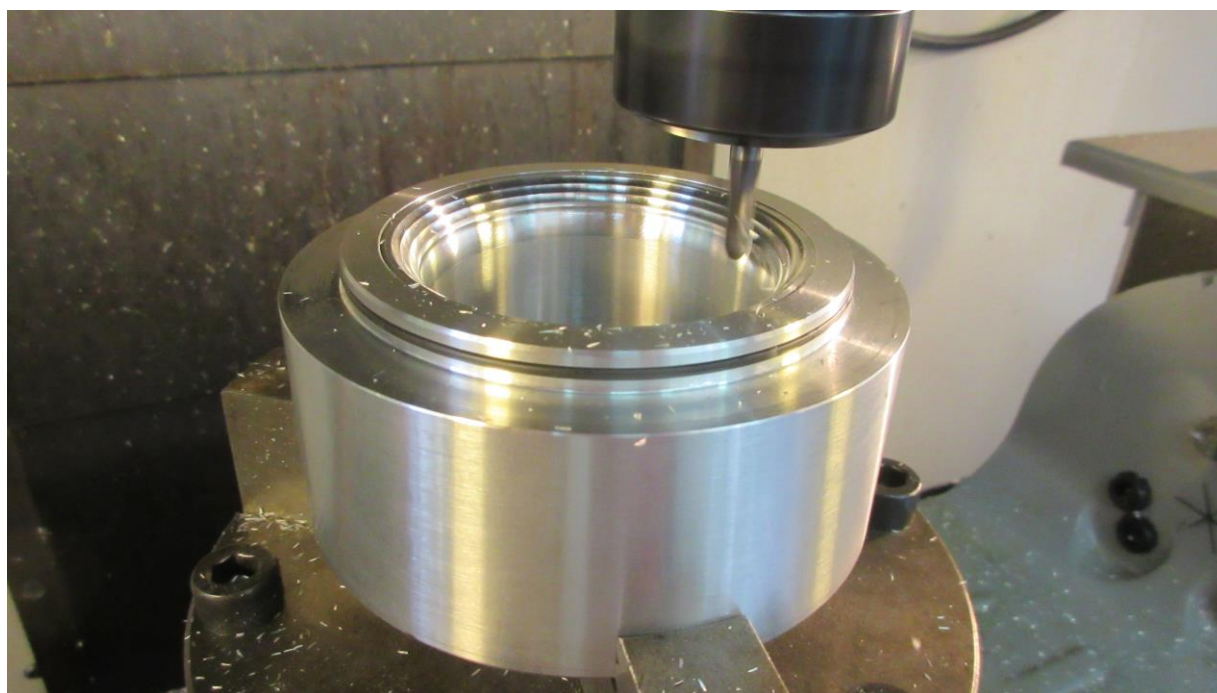
Εικόνα 4.11: Κόψιμο σε πριονοκορδέλα.

Στις ακόλουθες [Εικ. 4.12-4.25](#) παρουσιάζεται ο τρόπος συγκράτησης του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή CNC, καθώς και τα στάδια της αντίστοιχης κατεργασίας.

Όλα τα τεμάχια που συγκρατήθηκαν στον σφικτήρα (chuck) χρειάστηκε να γίνουν ομόκεντρα με τον **Β** Άξονα περιστροφής της εργαλειομηχανής, χρησιμοποιώντας μικρομετρικό ρολόι. Έχοντας σφίξει χαλαρά το chuck επάνω στο **Β** Άξονα, που περιστρέφεται με χαμηλή ταχύτητα, χτυπάμε ελαφρά τα σημεία που είναι απαραίτητο μέχρι το ρολόι να δείξει μηδενική μετατόπιση. Στη συνέχεια σφίγγουμε το chuck με τις έξι βίδες.



***Εικόνα 4.12:** Ομοκεντρία τεμαχίου με τον Β άξονα να περιστρέφεται με χαμηλή ταχύτητα.*

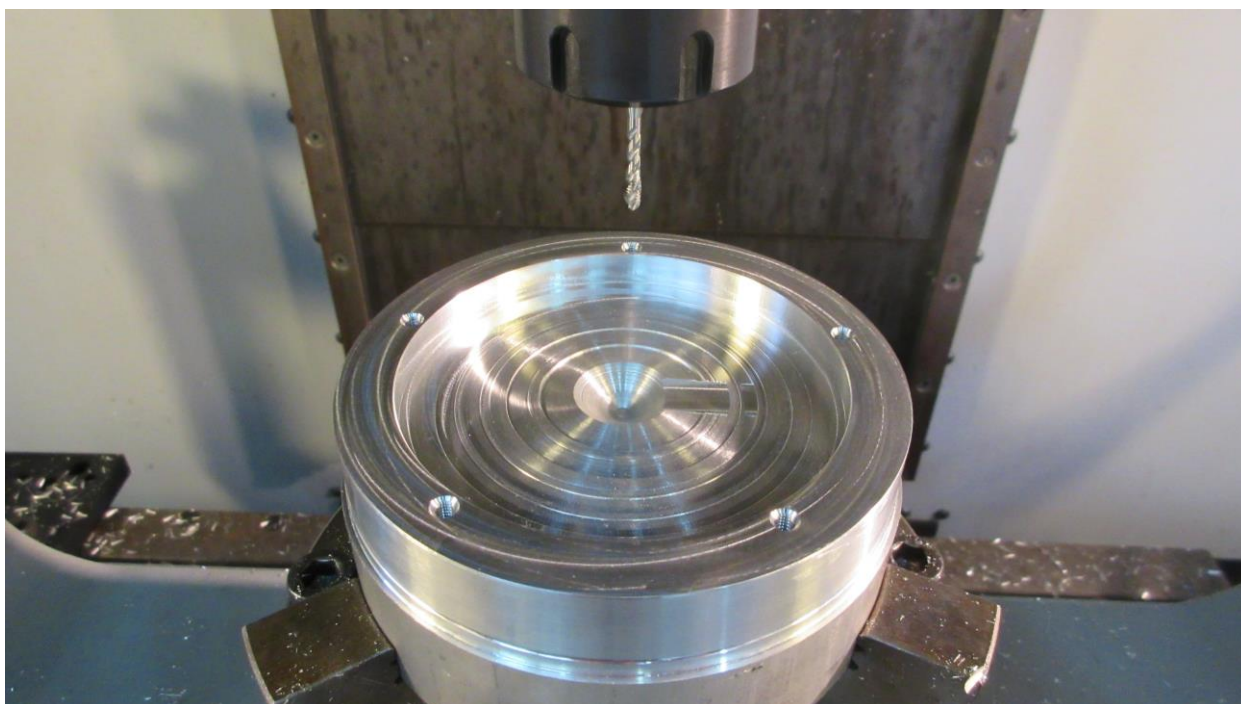


***Εικόνα 4.13:** Κατεργασία ξεχονδρίσματος και φινιρίσματος με σφαιρικό κονδύλι, για τη δημιουργία της εσωτερικής καμπυλότητας.*



Εικόνα 4.14: Κατεργασία των πέντε οπών συγκράτησης της εισαγωγής στο κέλυφος του διαχύτη.

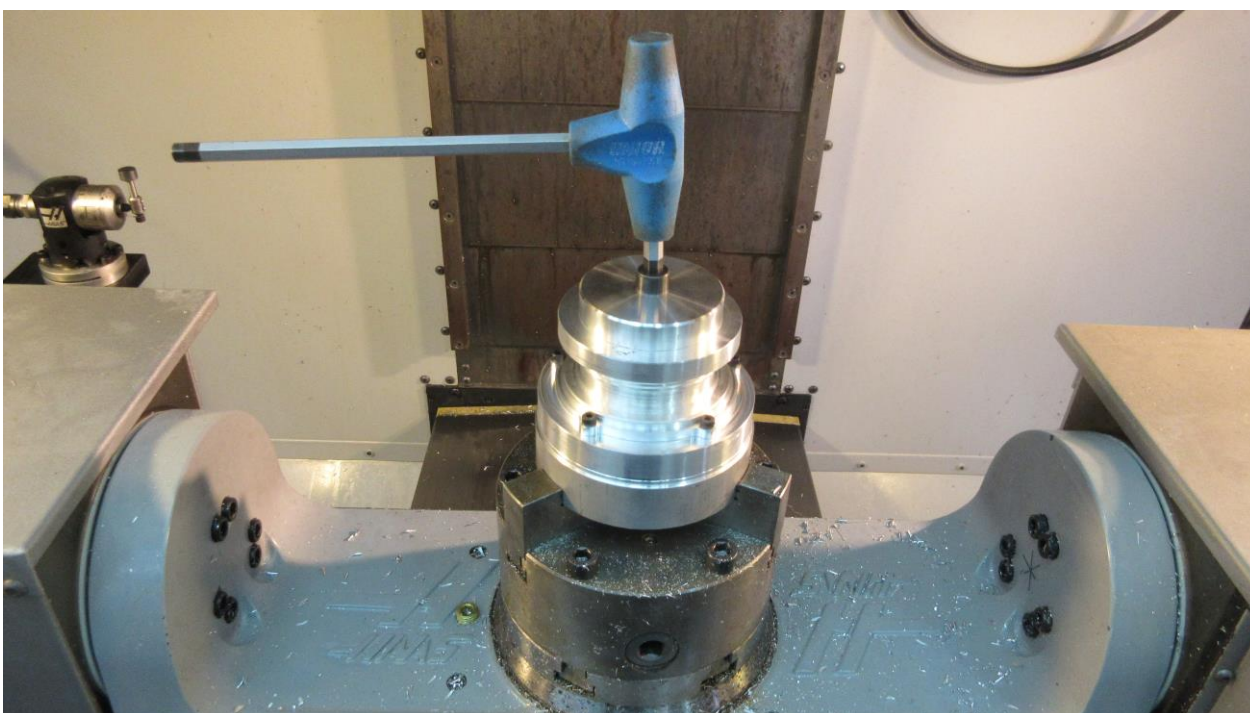
Στο συγκεκριμένο τεμάχιο, όπως και στην πλήμνη του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια, ήταν αναγκαίο να δημιουργηθεί ειδική βάση του τεμαχίου και μια ροδέλα συγκράτησης για τη δεύτερη φάση της κατεργασίας.



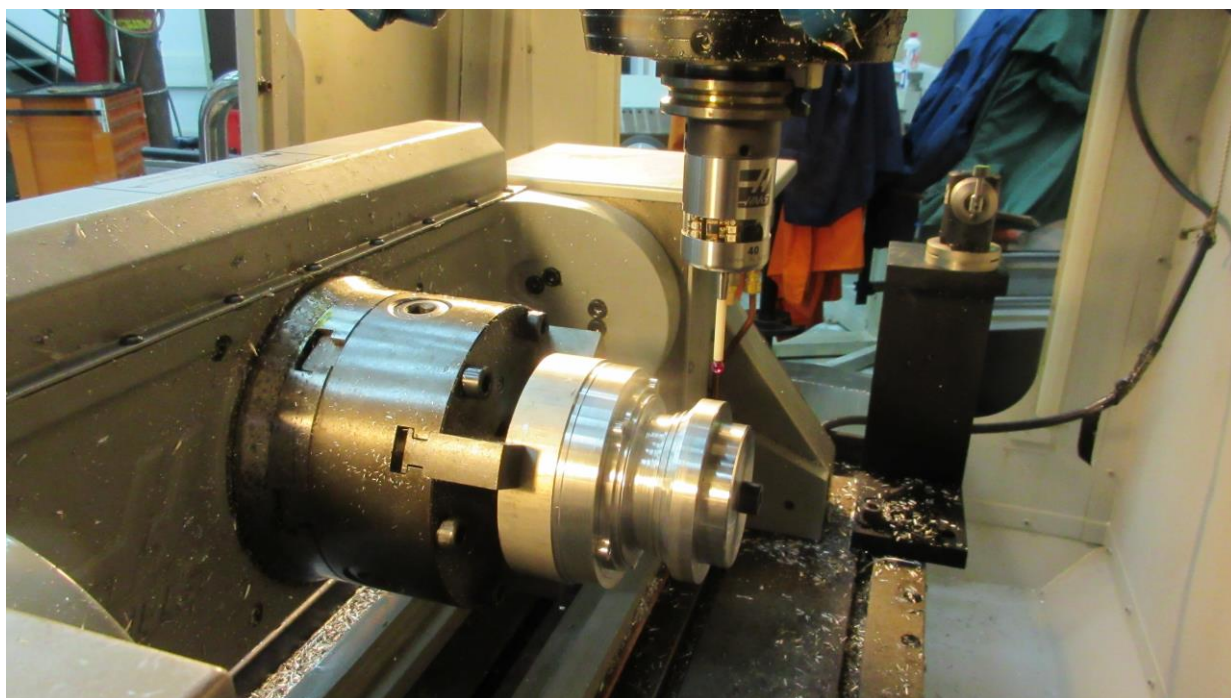
Εικόνα 4.15: Κατασκευή ειδικής βάσης για τη συγκράτηση του τεμαχίου στη Β φάση κατεργασίας.



Εικόνα 4.16: Σύσφιξη τεμαχίου στην ειδική βάση, για τη συγκράτηση του τεμαχίου στη Β φάση κατεργασίας.



Εικόνα 4.17: Τελική σύσφιξη τεμαχίου με την ειδική ροδέλα συγκράτησης.



***Εικόνα 4.18:** Μηδενισμός τεμαχίου με ακίδα επαφής.*



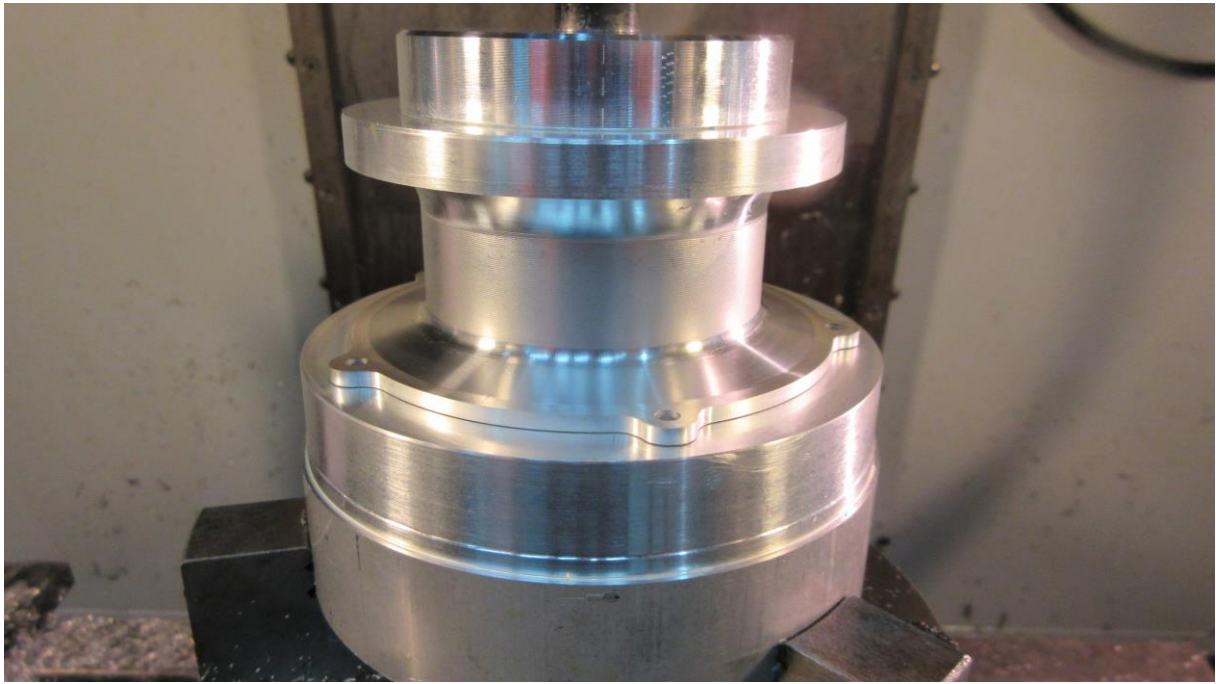
***Εικόνα 4.19:** Κατεργασία εξωτερικού ξεχονδρίσματος με σφαιρικό κονδύλι.*



Εικόνα 4.20: Αποτέλεσμα ξεχονδρίσματος.



Εικόνα 4.21: Κατεργασία εξωτερικού φινιρίσματος με σφαιρικό κονδύλι.



Εικόνα 4.22: Αποτέλεσμα φινιρίσματος.

Εν συνεχεία, τοποθετήθηκαν οι πέντε κοχλίες συγκράτησης και ξεβιδώθηκε η ροδέλα, για να υπάρξει πρόσβαση του κοπτικού εργαλείου στην εσωτερική γεωμετρία του τεμαχίου.



Εικόνα 4.23: Κατεργασία προσώπου τεμαχίου και τελικό ύψος.



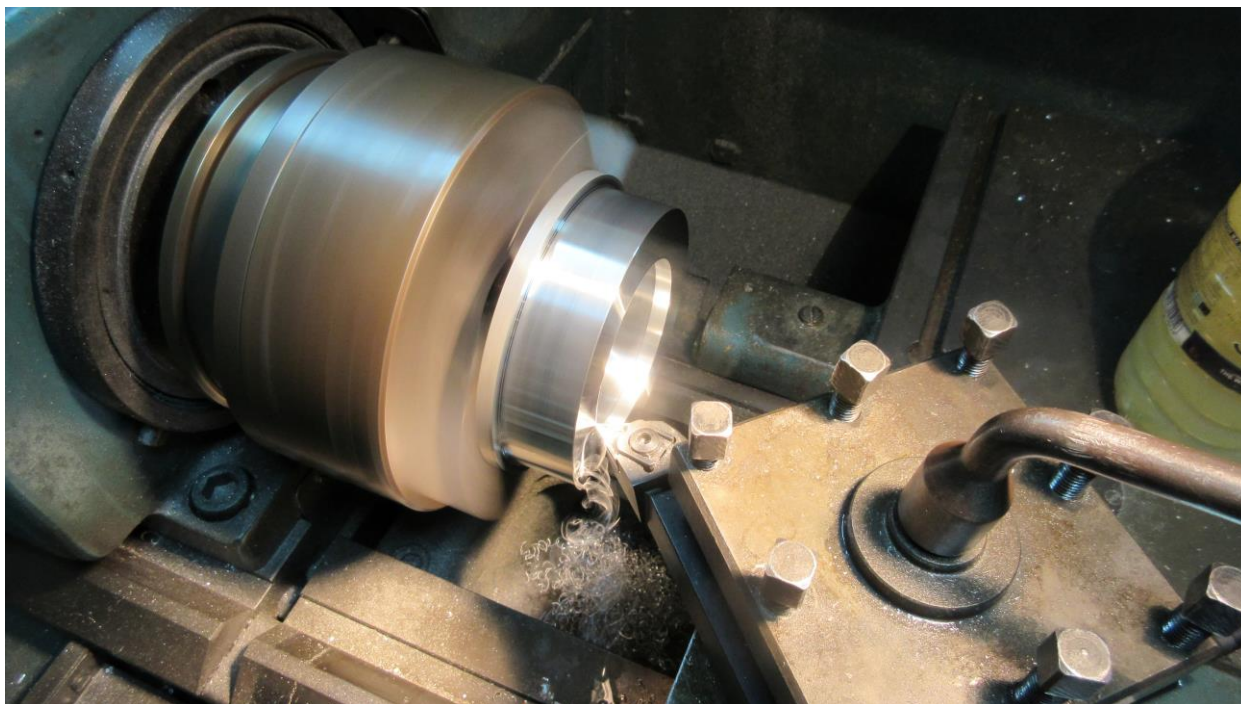
Εικόνα 4.24: Κατεργασία εσωτερικού ξεχονδρίσματος και φινιρίσματος με σφαιρικό κονδύλι.



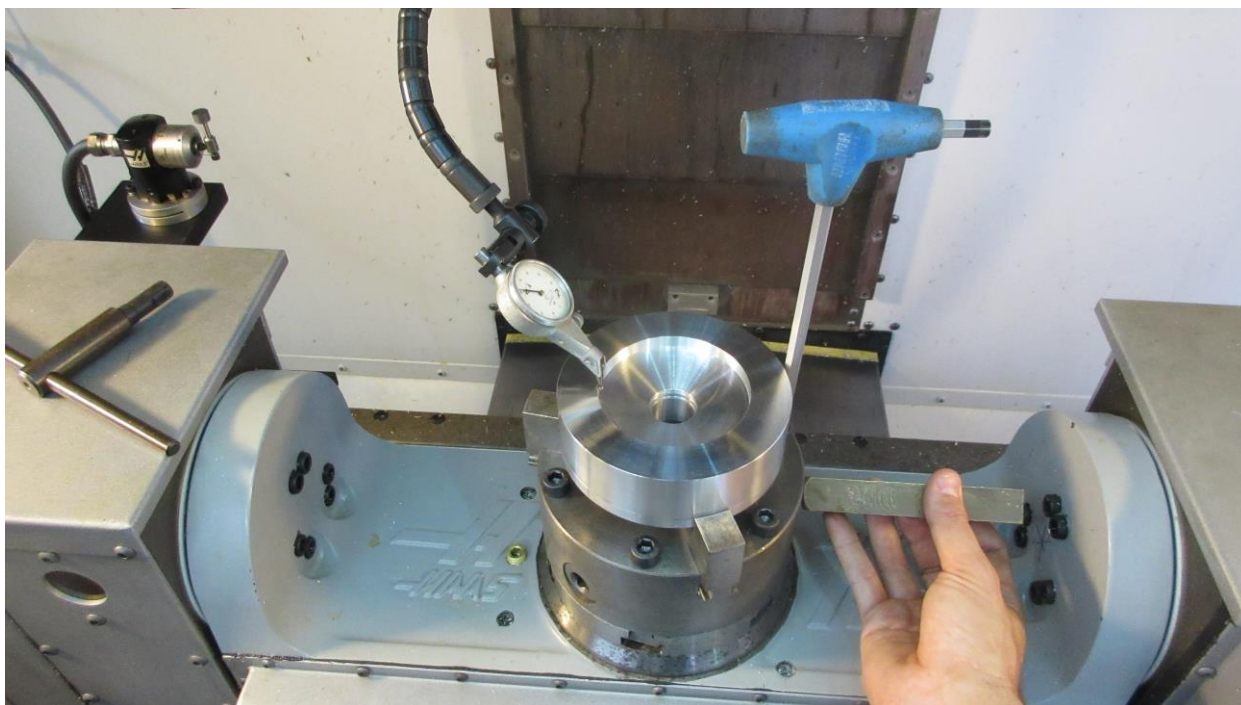
Εικόνα 4.25: Αποτέλεσμα φινιρίσματος και τέλος κατεργασίας.

4.3.2 Η πλήμνη του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια

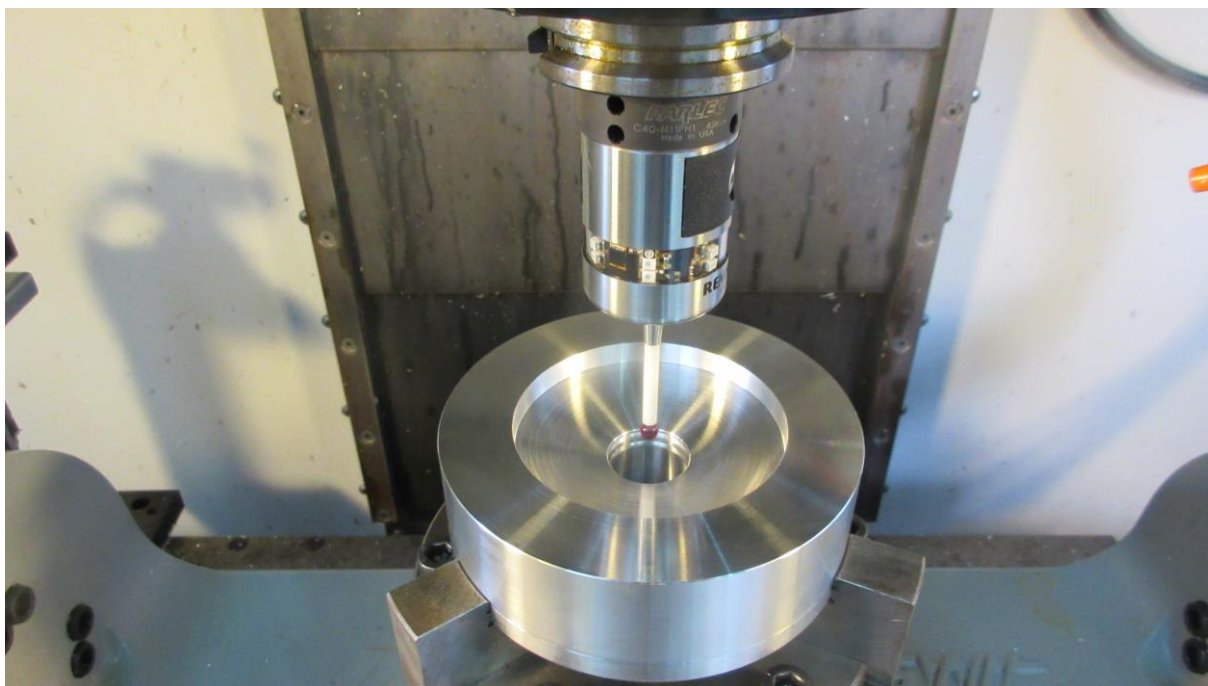
Στις ακόλουθες [Εικ. 4.26-4.35](#) παρουσιάζονται οι κατεργασίες σε συμβατικό τόρνο και σε εργαλειομηχανή CNC για την κατασκευή του διαχύτη με τα σταθερά πτερύγια.



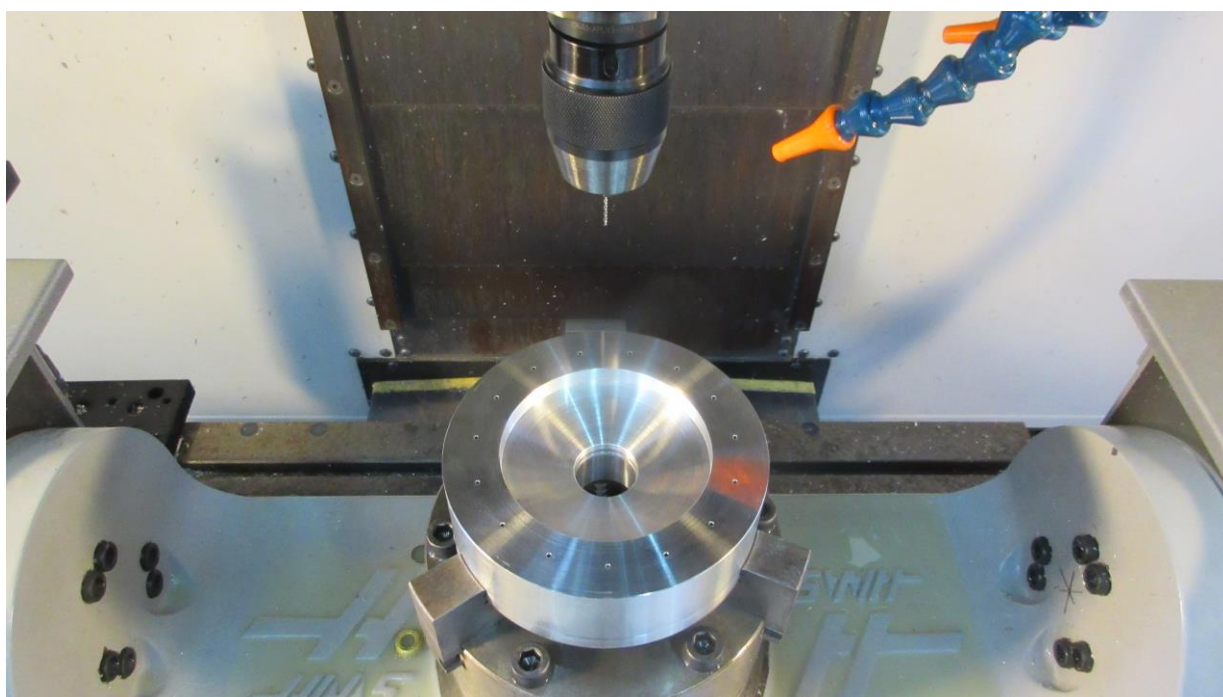
Εικόνα 4.26: Δημιουργία αρχικής γεωμετρίας σε συμβατικό τόρνο.



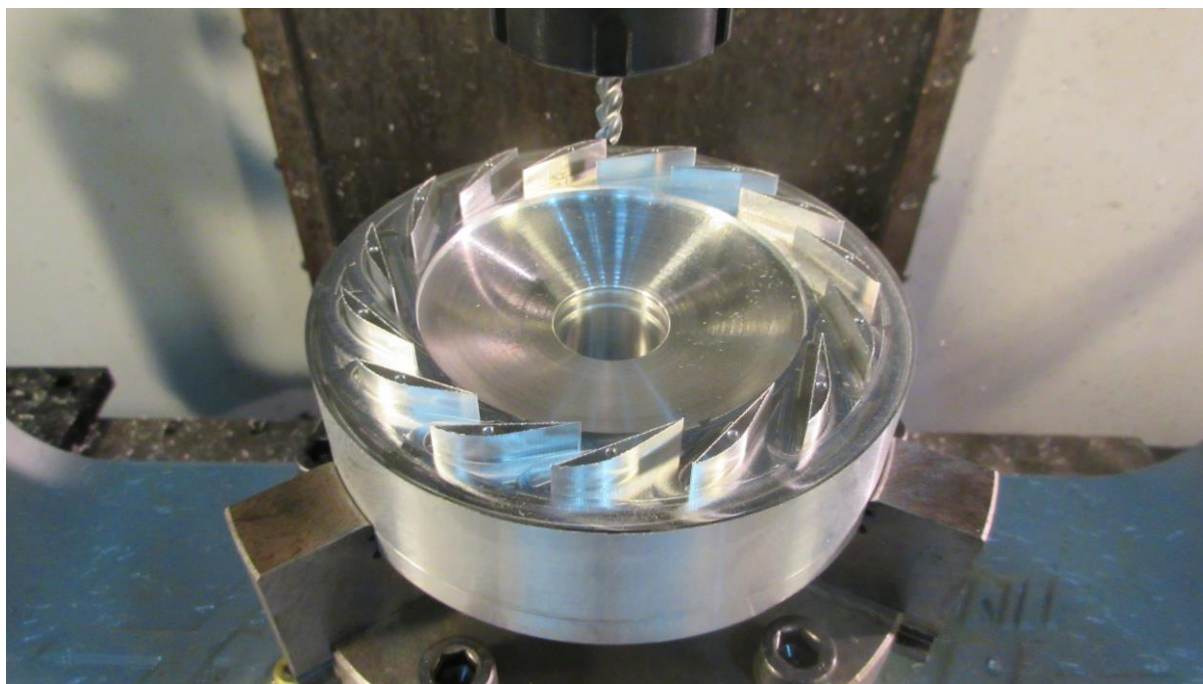
Εικόνα 4.27: Ομοκεντρία τεμαχίου με τον Β άξονα.



Εικόνα 4.28: Μηδενισμός τεμαχίου στο κέντρο του Β' Άξονα με ακίδα επαφής probe.



Εικόνα 4.29: Διάνοιξη οπών και σπειρωμάτων με κολαούζο M2.5.

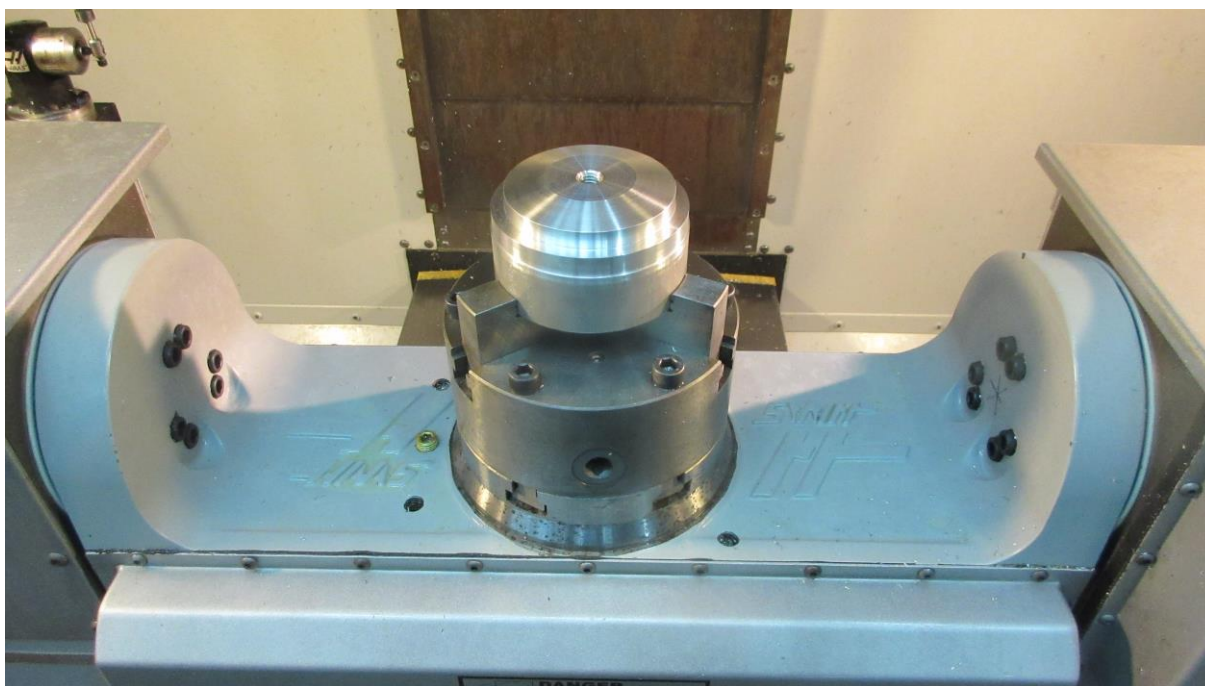


Εικόνα 4.30: Κατεργασία ακτινικών πτερυγίων.

Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος συγκράτησης για την κατεργασία της δεύτερης φάσης, η οποία απαιτεί την κατασκευή ειδικής βάσης (όπως και στο προηγούμενο τεμάχιο).



Εικόνα 4.31: Τεμάχιο έτοιμο για τη δεύτερη φάση κατεργασίας και βάση σύσφιξης.



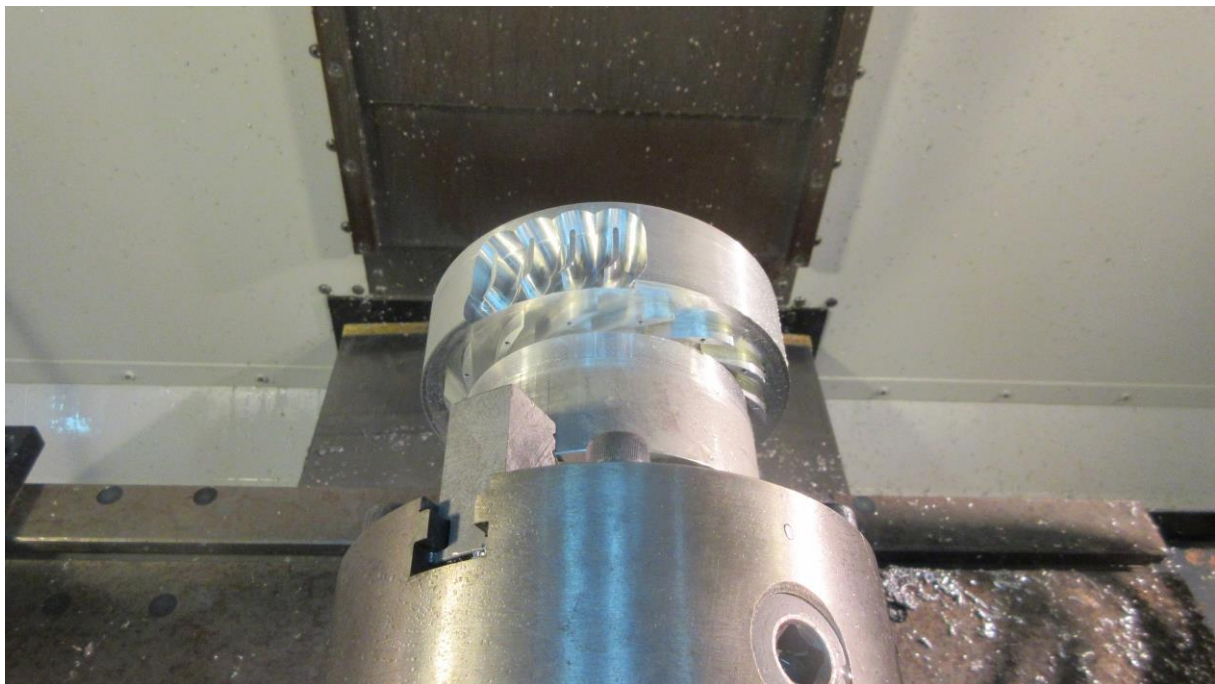
Εικόνα 4.32: Τοποθέτηση βάσης στο Β Αξονα.



Εικόνα 4.33: Τοποθέτηση, επαλήθευση ομοκεντρίας και σύσφιξη τεμαχίου στη βάση. Το τεμάχιο είναι έτοιμο προς κατεργασία.



Εικόνα 4.33: Ο Άξονας Α τοποθετείται στις σωστές μοίρες και το τεμάχιο είναι έτοιμο προς κατεργασία.



Εικόνα 4.34: Κατεργασία αξονικών πτερυγίων.



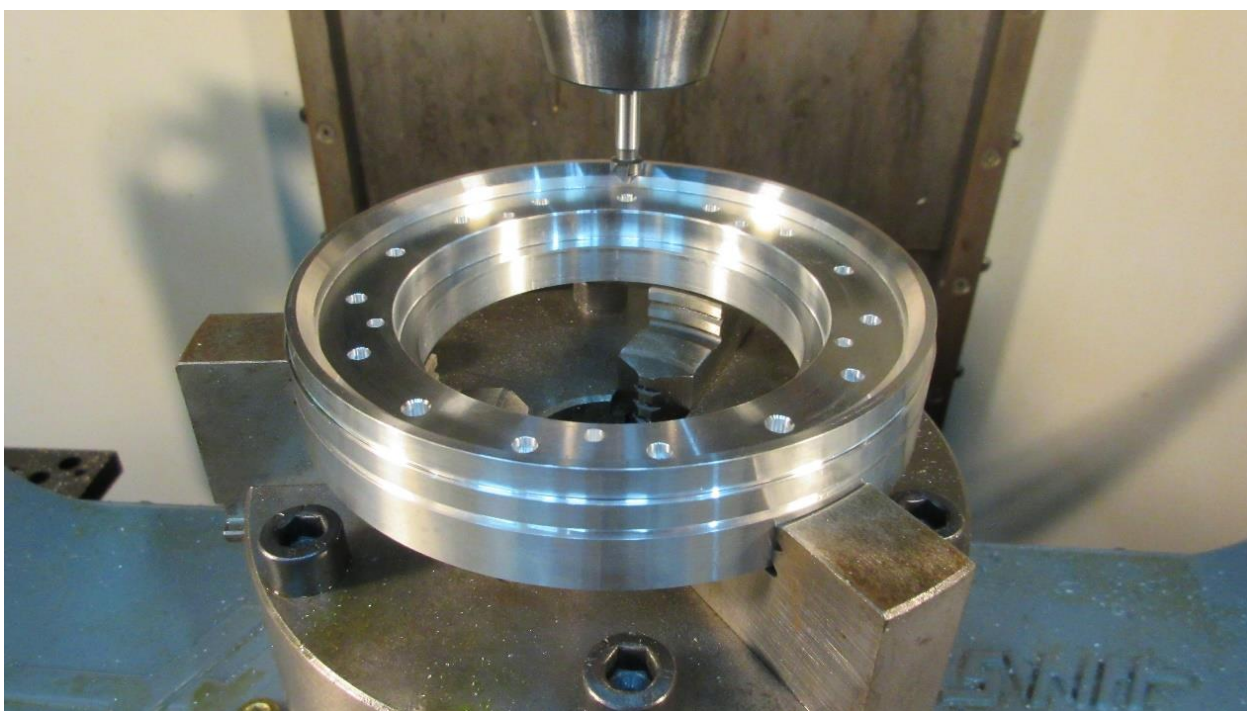
***Εικόνα 4.35:** Τέλος κατεργασίας αξονικών πτερυγίων.*

4.3.3 Το κέλυφος του διαχύτη

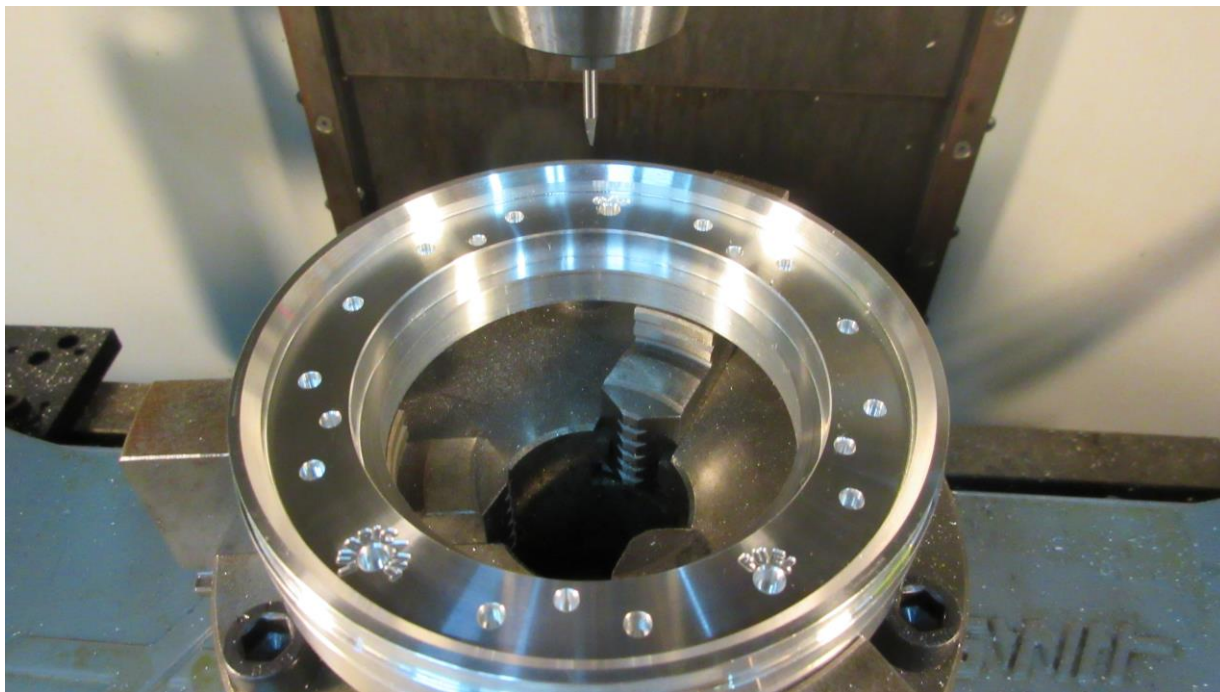
Στις ακόλουθες Εικόνες, με τις αντίστοιχες λεζάντες, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευή του κελύφους του διαχύτη. Στους Πίνακες 4.1 έως 4.3 στο τέλος της παραγράφου περιέχονται τα εργαλεία, καθώς και οι συνθήκες κοπής για τα τρία τεμάχια που κατασκευάστηκαν.



Εικόνα 4.36: Προετοιμασία σε συμβατικό τόρνο.

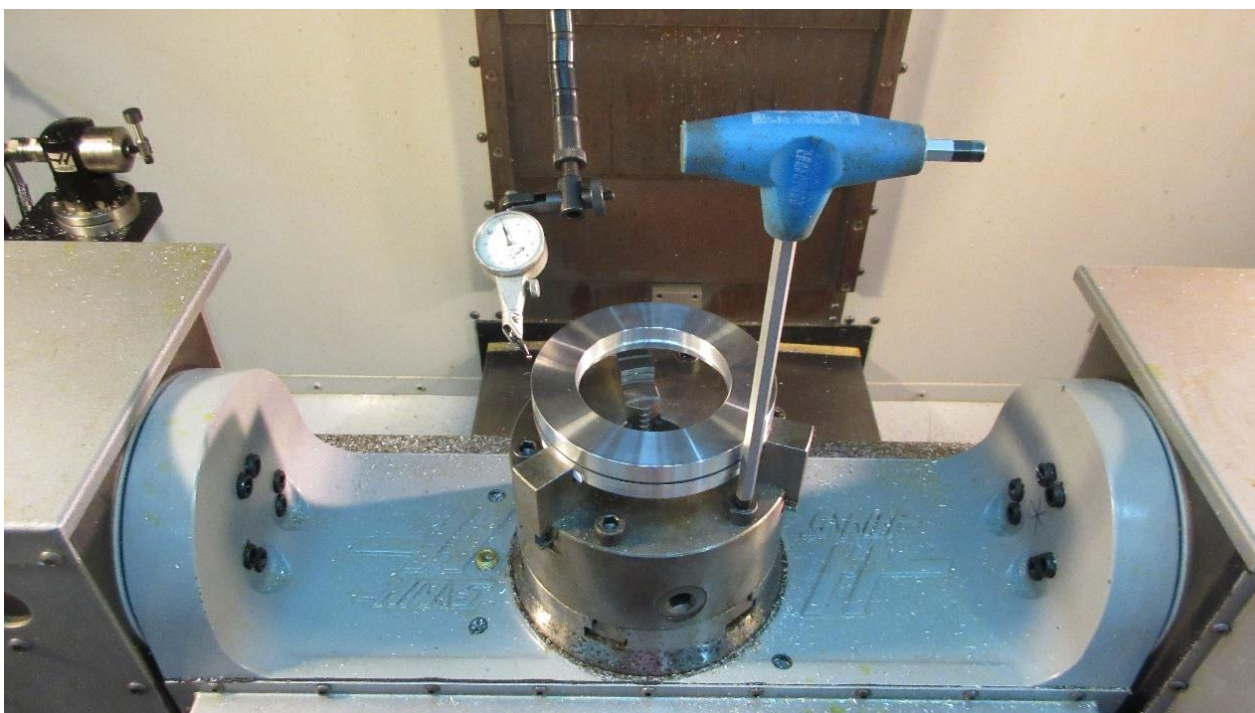


Εικόνα 4.37: Ολόκληρη η κατεργασία, εκτός από τις σπές ολοκληρώθηκε στο στάδιο της προετοιμασίας σε συμβατικό τόρνο.

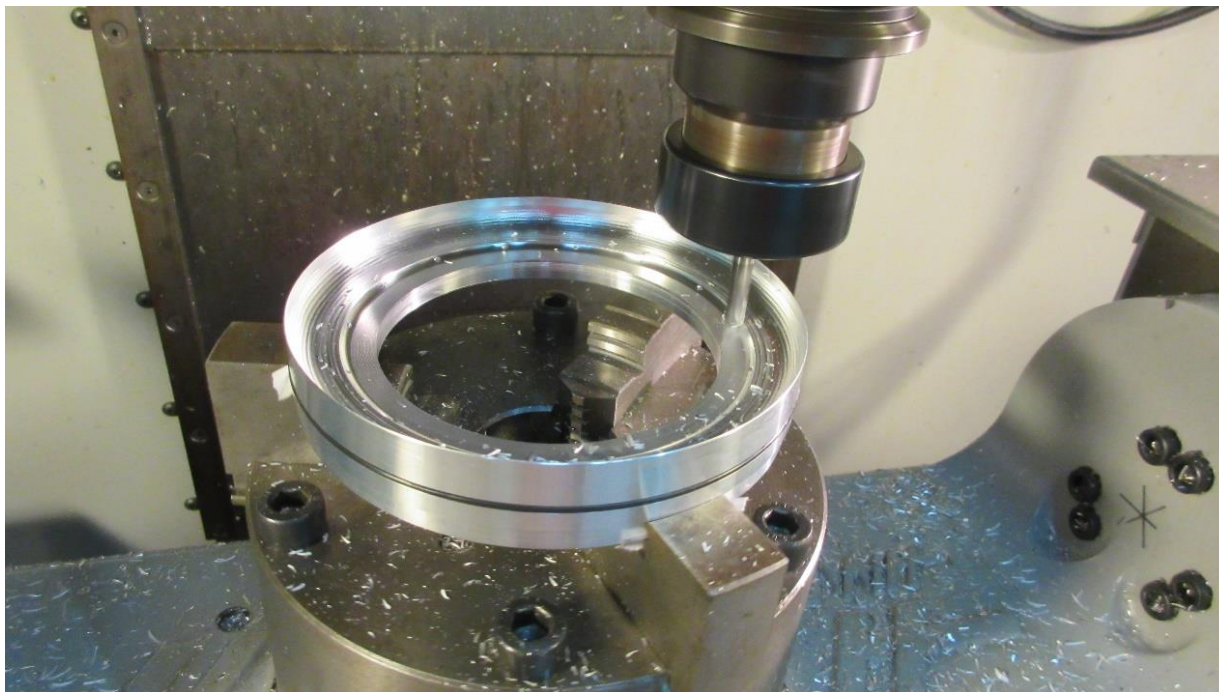


Εικόνα 4.38: Κατεργασία ενδεικτικών γραμμών με κοπτικό χάραξης.

Η δεύτερη φάση κατεργασίας περιλαμβάνει τη διάνοιξη της εσωτερικής κοιλότητας.



Εικόνα 4.39: Ομοκεντρία τεμαχίου με τον Β άξονα.



Εικόνα 4.40: Κατεργασία εσωτερικής κοιλότητας, ξεχόνδρισμα και φινίρισμα.



Εικόνα 4.41: Τελικό τεμάχιο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ.

	Κοπτικό εργαλείο	Διάμετρος (mm)	Βάθος κοπής (mm)	Πρόωση (mm/min)	Ταχύτητα κοπής (rev*min ⁻¹)
1	2 Flutes Solid Carbide Ball End Mill	6	0.25	350	5500
2	4 Flutes, Solid Carbide Square End Mill	8	2.5	400	4200

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗ.

	Κοπτικό εργαλείο	Διάμετρος (mm)	Βάθος κοπής (mm)	Πρόωση (mm/min)	Ταχύτητα κοπής (rev*min ⁻¹)
1	2 Flutes Solid Carbide Ball End Mill	6	0.25	350	5500
2	3 Flutes, Chamfer Mill 45°	6	1	180	2200
3	Engraving Bit V Shape End Mill	3	0.15	120	6500
4	Hss tap thread Co8% M4 x 0.7	4	-	245	350

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗ.

	Κοπτικό εργαλείο	Διάμετρος (mm)	Βάθος κοπής (mm)	Πρόωση (mm/min)	Ταχύτητα κοπής (rev*min ⁻¹)
1	4 Flutes, Solid Carbide Square End Mill	6	0.25	350	5500
2	Hss tap thread Co8% M2 x 0.4	2	-	160	400

4.4 Επαλήθευση συναρμογής και συναρμολόγηση τμημάτων

Στη συνέχεια παρατίθενται εικόνες από την τελική συναρμογή και την επαλήθευση των τεμαχίων.



Εικόνα 4.42: Τελικά τεμάχια.



Εικόνα 4.43: Σημείο εφαρμογής (εσωτερικά).



Εικόνα 4.43: Σημείο εφαρμογής (εξωτερικά).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή ακολουθήθηκε πλήρως μια διαδικασία αντίστροφης μηχανικής για την μέτρηση, τον σχεδιασμό και την κατασκευή 3 τμημάτων, που απαρτίζουν τα ακίνητα μέρη του συμπιεστή ενός μικρού στροβιλοαντιδραστήρα. Τα συγκεκριμένα τμήματα χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα και δυσκολία τόσο στη μέτρηση όσο και στην κατασκευή.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα:

1. Είναι δυνατή η κατασκευή τμημάτων μικρού στροβιλοαντιδραστήρα με τα μέσα που διατίθενται εντός των Εργαστηρίων ενός Τεχνολογικού Ιδρύματος, χωρίς πολύ σημαντικά προβλήματα, καθώς η εν λόγω κατασκευή βρίσκεται εντός των δυνατοτήτων που διατίθενται (τόσο σε υποδομές όσο και σε γνώση).
2. Η ποιότητα κατασκευής και η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν ανώτερη των αρχικών τεμαχίων, από τα οποία προήλθαν οι διαστάσεις.
3. Τα τεμάχια κατασκευάστηκαν με ακρίβεια που επέτρεψε την πολύ επιτυχημένη συναρμογή τους μετά το πέρας της κατασκευής τους, χωρίς προβλήματα και χωρίς ανάγκη για διορθώσεις.
4. Τα γεωμετρικά σχέδια CAD χρησιμοποιήθηκαν, εκτός από την κατασκευή των τεμαχίων, για το στήσιμο προσομοίωσης της ροής εντός του συμπιεστή, στα πλαίσια άλλης Μεταπτυχιακής Διατριβής (Kastrisios, 2022). Τα αποτελέσματα της εν λόγω προσομοίωσης εμφάνισαν τα προβλήματα της εν λόγω σχεδίασης, οπότε είναι δυνατή η βελτίωση της σχεδίασης σε επόμενο στάδιο.
5. Γενικά η όλη διαδικασία χαρακτηρίστηκε από μεγάλη επιτυχία και ανοίγει τον δρόμο για την εφαρμογή αντίστοιχης διαδικασίας και για άλλα τμήματα μικρών στροβιλοαντιδραστήρων στο μέλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

D. Alonzo, A. Crocker, E. James, J. Kingston III, “Design and Manufacturing of a Miniature Turbojet Engine”, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2018.

ETN Global, Micro Gas Turbine Technology/ Research and Development for European Collaboration, “Micro Gas Turbine Technology Summary”.

F. Fuchs, V. Meidinger, N. Neuburger, T. Reiter, M. Zündel, A. Hupfer, “Challenges in designing very small jet engines – fuel distribution and atomization”, ISROMAC 2016, International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hawaii, Honolulu, April 10-15, 2016.

J.-E. Hanssen, A. Riikonen, C. Noren, G. Karlsson, L. Malmrup, S. Ernebrandt, R. Stockholm, B. J. Veland, F. Fock, Mosbech, Hakon, J. de Wit and A. H. Pedersen, “Operating experiences from 18 microturbine applications for CHP and industrial purposes,” OMES, 2004.

J.A. Hartman, “Design and Fabrication of a Low-Cost Turbine Engine Component Testbed (TECT)”, MSc Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, 2014.

K. Kastrisios, Flow field simulation inside the centrifugal compressor of a small turbojet, M.Sc. Thesis, Technical University of Crete, 2022.

C. Llanes, C. Abendschein, M. Memon, "KJ66 REVAMP", ASEE EDGD Midyear Conference, 2016.

G. Norris, “U.S. Finalizes Next-Gen Military Engine National Tech Plan”, Aviation Week & Space Technology, Aug. 2016.

G. Reim, “ANALYSIS: USAF eyes revolution in small jet turbines”, Flight International, August, 2019.

O. Turan, “Energy and entropy analyses of an experimental turbojet engine for target drone application”, Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, 17(5), pp. 936-952, 2016.

P.S. Viridi, M.S. Khan, N. Pereira, K.V. Suresh, R.S. D'Silva, “Design and Fabrication of Major Components of Turbojet Engine”, Energy and Power, 7(5), pp. 130-135, 2017.

J. Xiang, J.U. Schlueter, F. Duan, “Study of KJ-66 micro gas turbine compressor: Steady and unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes approach”, Proc. I. Mech. E., Part G: J. Aerospace Engineering, 2016.

I.K. Νικολός, «Θερμικές & Υδροδυναμικές Μηχανές», Ψηφιακές Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2022.

<https://commons.erau.edu/asee-edgd/conference70/posters-2016/7>.