



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ
ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΜΕΣΩ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CAD/CAM-
ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΑΚΡΑΞΙΟΝΙΩΝ**



**ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΤΙΡΙΑΚΙΔΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Στους γονείς μου,
Φωτεινή και Βασίλη...

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπαιδευτώ στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής προσομοίωσης, ανοίγοντας μου έτσι την πόρτα σε έναν άγνωστο για εμένα μέχρι πρότινος τομέα. Είμαι σίγουρος πως θα συνεργαστούμε ξανά στο μέλλον.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι δημιούργησαν τις προϋποθέσεις, για να μείνουμε και να φιλοδοξούμε στον τόπο μας, αλλά και τα αδέρφια μου Κοσμά, Θωμάϊδα και Μαρία Χριστίνα, με τα οποία ήμαστε, είμαστε και θα είμαστε πάντα ενωμένοι.

Τα μέλη του εργαστηρίου Ιωάννα, Βαγγέλη και Άγγελο για τη βοήθεια τους, αλλά και τους ατέρμονους διαλόγους, όπως επίσης τον Μανώλη και τον Στράτο, που μου πρόσφεραν απλόχερα τη βοήθεια τους. Δε θα το ξεχάσω.

Τους φίλους μου Θανάση και Αλέξανδρο, με τους οποίους πάντα βρίσκουμε τον βέλτιστο τρόπο να ξεπεράσουμε τα εμπόδια του HMMY. Τον Νικόλα, ο οποίος έχει το πιο ευρύ φάσμα τρόπων διασκέδασης, αλλά και γνώσεων. Τον Νίκο, με τον οποίο είχα τις πιο μακροσκελείς ιδεολογικές, πολιτικές, αλλά και αεροπλοϊκές συζητήσεις.

Για το τέλος πρέπει να αφήσω το σημαντικότερο άτομο, το οποίο έπαιξε τον πιο καθοριστικό ρόλο για να ολοκληρώσω τις σπουδές μου στα Χανιά, δίνοντας μου κίνητρο βάζοντας κοινούς στόχους για το μέλλον: την Κατερίνα, που δεν αφήσαμε ποτέ ο ένας τον άλλον και γίναμε πιο δυνατοί μαζί.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	5
2. Σύνθετα Υλικά.....	6
2.1 Ορισμός συνθέτων υλικών	6
2.2 Ιστορική αναδρομή.....	7
2.3 Χαρακτηριστικά σύνθετων υλικών	8
2.4 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών	10
2.5 Ινοπλισμένα σύνθετα υλικά	10
2.6 Εφαρμογές σύνθετων υλικών	12
2.7 Η τεχνική περιέλιξης ινών γύρω από μεταλλική μήτρα (filament winding)	15
3. Φάσεις κατασκευής ανθρακονημάτων τεμαχίων	24
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας.....	24
3.2 Μηχανική Σύνθετων Υλικών	35
4. Ακραξόνια	41
4.1 Ιστορική αναδρομή μηχανικών διαμορφώσεων	41
4.2 Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού.....	43
4.3 Τόρνευση	45
4.4 Ο αριθμητικός έλεγχος (NC).....	48
4.5 Συνθήκες κοπής κατά την τόρνευση	50
4.6 Η εργαλειομηχανή CTX310	50
4.7 Κατασκευή ακραξονίων	53
4.8 Τελικά τεμάχια.....	78
5. Σύνοψη.....	80
6. Παράρτημα κώδικα	81
7. Βιβλιογραφία	92
Παράρτημα μηχανολογικών σχεδίων	93

1. Εισαγωγή

Ο κόσμος σήμερα έχει μεγάλη ανάγκη για υψηλές αποδόσεις σε όλους τους τομείς και κυρίως στις σύγχρονες γραμμές παραγωγής, όπου υλικά με ειδικές ιδιότητες και αντοχές είναι πλέον απαραίτητα.

Την ανάγκη αυτή, έρχονται να καλύψουν τα σύνθετα υλικά, δηλαδή εκείνα τα υλικά που αποτελούνται από δυο ή περισσότερα συστατικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από τα συμμετέχοντα συστατικά δεν μπορεί από μόνο του να επιτύχει.

Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να σταθούν μόνα τους σε κανενός είδους εφαρμογή. Η επιτυχία της κάθε εφαρμογής εξαρτάται από την άρτια συναρμογή των συνθέτων με συμβατικά υλικά, όπως το αλουμίνιο.

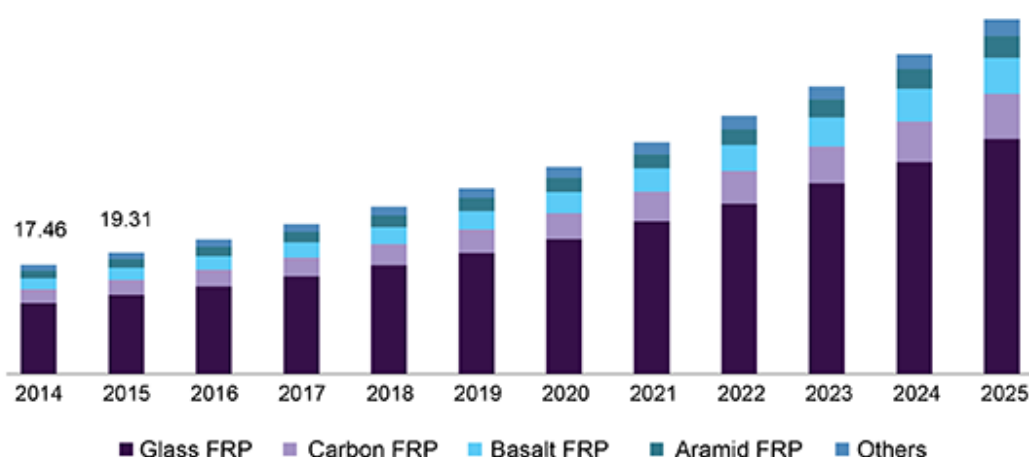
Η συναρμογή συνθέτων και συμβατικών υλικών, απαιτεί την ορθή μηχανουργική τους επεξεργασία με μεγάλη ακρίβεια, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με ψηφιακή καθοδήγηση εργαλειομηχανών μέσω συστήματος CAD/CAM.

Στην παρούσα Διπλωματική γίνεται αρχικά μια περιγραφή των συνθέτων υλικών, των τρόπων παραγωγής αυτών και των εφαρμογών τους. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των μεταλλικών, κυλινδρικών ακραζονίων και εξηγούνται οι τρόποι σύνδεσης τους με τα σύνθετα υλικά, κυλινδρικής γεωμετρίας. Τέλος περιγράφεται λεπτομερώς ο τρόπος παραγωγής των μεταλλικών ακραζονίων με τη χρήση συστήματος CAD/CAM και CNC εργαλειομηχανών.

2. Σύνθετα Υλικά

Η σημασία των ινοπλισμένων πολυμερών υλικών φαίνεται από το γεγονός πως η Αμερικανική βιομηχανία κατασκευής συνθέτων υλικών με την τεχνική της περιέλιξης ινών γύρω από μεταλλική μήτρα (filament winding), ακολουθεί ρυθμούς ανάπτυξης της τάξεως του 6,5% από το 1960 έως σήμερα, ποσοστό μακράν υψηλότερο από αυτό των συμβατικών μεταλλικών υλικών, αλουμινίου ή χάλυβα, αλλά και διπλάσιο ποσοστό αυτού της Αμερικανικής οικονομίας. Η τάση ανάπτυξης του συγκεκριμένου κλάδου της οικονομίας φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

U.S. fiber reinforced polymer (FRP) composites market, by type, 2014 - 2025 (USD Bn)



Σχήμα 2.1: Τα σύνθετα υλικά κατακτούν όλο και μεγαλύτερο κομμάτι της αγοράς, παρουσιάζοντας σταθερή πρόοδο στην ανάπτυξή τους.

Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, τη μοναδική ευελιξία των σχεδιαστικών δυνατοτήτων και την ευκολία κατασκευής, την οποία απλόχερα προσφέρουν. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων σύνθετων υλικών είναι το μικρό τους βάρος, η ανθεκτικότητά τους στη χημική διάβρωση και η εξαιρετική τους αντοχή στην κόπωση.

Νέες εφαρμογές με σύνθετα υλικά αναπτύσσονται συνεχώς και αυτή η ανάπτυξη έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή πρόοδο της συγκεκριμένης βιομηχανίας παγκοσμίως.

2.1 Ορισμός συνθέτων υλικών

Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις¹, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material).

Πιο συγκεκριμένα, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ

1. Στις φυσικές επιστήμες, ο όρος φάση δηλώνει μια περιοχή του χώρου, μέσα στην οποία όλες οι φυσικές ιδιότητες είναι ομοιόμορφες (πυκνότητα, δείκτης διάθλασης, μαγνητικότητα, χημική σύσταση κ.α.). Μια απλή περιγραφή του όρου είναι ότι η φάση είναι μια περιοχή ενός υλικού, η οποία είναι χημικά ομοιόμορφη, διακριτή από το υπόλοιπο περιβάλλον της και μηχανικά διαχωρίσιμη. Ένα απλοϊκό παράδειγμα είναι ένα σύστημα που αποτελείται από πάγο και νερό σε ένα γυάλινο ποτήρι, όπου ο πάγος αποτελεί μια φάση, το νερό μια άλλη, οι υδατμοί μια τρίτη. Το γυάλινο τοίχωμα του ποτηριού είναι μια ξεχωριστή φάση.

τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του. Για παράδειγμα, τα κοινά μέταλλα σχεδόν πάντα εμπεριέχουν ανεπιθύμητες προσμίξεις ή κράματα· τα πλαστικά περιέχουν μικρές ποσότητες διαφόρων υλικών, όπως πλήρωσης, λιπαντικών, προστασίας υπεριώδους ακτινοβολίας και άλλων υλικών για εμπορικούς σκοπούς, όπως μείωσης κόστους ή διευκόλυνσης της επεξεργασίας τους. Ωστόσο, οι προσμίξεις (ανεπιθύμητες ή μη) αυτές δεν κάνουν τα συγκεκριμένα υλικά μέρος των σύνθετων. Δε θα πρέπει ένα υλικό με προσμίξεις να θεωρείται σύνθετο, εάν οι φυσικές τους ιδιότητες δεν επηρεάζονται σημαντικά από τα πρόσθετα συστατικά.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον πενταπλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή ($> 10\%$).

Ο Bhagan D. Agarwal ως σύνθετα, ορίζει τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το ευρύ φάσμα των ειδών των σύνθετων υλικών επιτρέπει στον καθένα να υιοθετήσει ένα δικό του ορισμό, ώστε να καλύπτει τις εκάστοτε ανάγκες. Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής, ως σύνθετα υλικά θα καλούνται τα δοκίμια κυλινδρικής γεωμετρίας κατασκευασμένα από ανθρακονήματα και ρητίνη με την τεχνική της περιέλιξης ινών γύρω από μεταλλική μήτρα, τα οποία κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας και περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά. Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ 21 μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

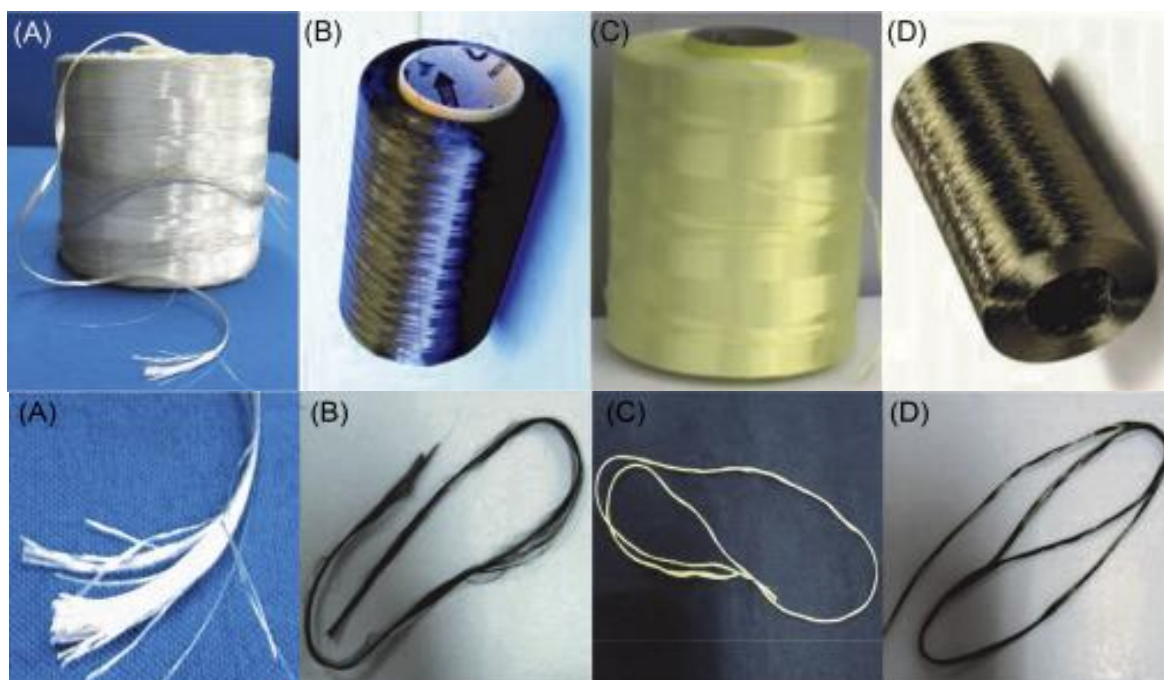
Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και

διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).

2.3 Χαρακτηριστικά σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα αποτελούνται από μια ή περισσότερες ασυνεχείς φάσεις ενσωματωμένες σε μια συνεχή (στην παρούσα Διπλωματική η ασυνεχής είναι τα ανθρακονήματα τα οποία ενσωματώνονται στη ρητίνη). Η ασυνεχής φάση είναι συνήθως σκληρότερη και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από την συνεχή και για αυτό το λόγω καλείται υλικό ενίσχυσης, μερικά από τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.2, ενώ η συνεχής αποτελεί τη μήτρα². Μια αξιοσημείωτη εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα αποτελεί μια κατηγορία υλικών, γνωστή ως ελαστομερή πολυμερή, αποτελούμενα από μια άκαμπτη μήτρα εμπλουτισμένη από σωματίδια καουτσούκ.



Σχήμα 2.2: Είδη ινών, που χρησιμοποιούνται ως υλικά ενίσχυσης. (Α) Υαλόνημα, (Β) Ανθρακόνημα, (C) Αραμίδιο, (D) Βασάλτης.

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των συστατικών τους υλικών, την κατανομή³ αυτών στο τελικό προϊόν, αλλά και την αναμεταξύ τους αλληλεπίδραση. Οι ιδιότητες του σύνθετου μπορεί να είναι το άθροισμα των ιδιοτήτων των συστατικών του, ή τα συστατικά του μπορεί να αλληλοεπιδρούν με έναν συνεργατικό

² Ένα πιο καθημερινό ανάλογο των ανθρακονημάτων σύνθετων υλικών, που αποτελούν μέρος της εργασίας, είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου οι χαλύβδινες ράβδοι (ανθρακόνημα) αποτελούν το υλικό ενίσχυσης, ενώ το σκυρόδεμα τη μήτρα.

³ Για παράδειγμα στα σύνθετα υλικά της συγκεκριμένης εργασίας, πρωτεύοντα ρόλο για τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος διαδραματίζει η γωνία πλέξης των νημάτων. Η τεχνική εξηγείται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

τρόπο, ώστε να παρέχουν ιδιότητες στο σύνθετο, που δεν προέρχονται απλά από το άθροισμα των επιμέρους συστατικών⁴. Έτσι, γίνεται σαφές πως για να περιγράψει πλήρως ένα σύνθετο υλικό ως σύστημα, δεν αρκεί μόνο να οριστούν τα συστατικά του στοιχεία και οι ιδιότητές τους, αλλά πρέπει να περιγράφεται με σαφήνεια η γεωμετρία του ενισχυτικού υλικού σε σχέση με το σύστημα. Η γεωμετρία της ενίσχυσης μπορεί να περιγράφει ως προς το σχήμα, το μέγεθος, την κατανομή του μέσα σε αυτό, ή την κατεύθυνση που ακολουθούν ως προς κάποιον άξονα. Για το λόγο αυτό, όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικοί για τον καθορισμό των τελικών ιδιοτήτων του συνθέτου, αλλά σπάνια λαμβάνονται όλοι υπόψη για την ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων τέτοιων υλικών.

Το σχήμα των διακριτών στοιχείων του υλικού ενίσχυσης, συχνά προσεγγίζεται ως σφαίρα ή κύλινδρος. Υπάρχουν ωστόσο κάποια υλικά, όπως οι μαρμαρυγίες⁵, τα αργιλώδη και κάποια τεχνητά υλικά όπως το υαλοϋφασμα που φαίνεται στο Σχήμα 2.3, τα οποία περιγράφονται βέλπιστα ως διατομές πρισμάτων ή ως φυλλίδες. Το μέγεθος και η κατανομή τους ελέγχουν την υφή του υλικού. Μαζί με την κατ' όγκο περιεκτικότητά τους καθορίζουν την επιφανειακή περιοχή, που παίζει με τη σειρά της σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ενισχυτικού υλικού και της μήτρας.



Σχήμα 2.3: Είδη υφασμάτων, που χρησιμοποιούνται ως υλικά ενίσχυσης για την κατασκευή σύνθετων υλικών. (Α) Υαλόνημα, (Β) Ανθρακόνημα, (Γ) Αραμίδιο, (Δ) Βασάλτης.

Η συγκέντρωση ενός συστατικού μετριέται συνήθως κατ' όγκο ή κατά βάρος. Η συμβολή ενός συστατικού στις συνολικές ιδιότητες του συνθέτου καθορίζεται από αυτή τη παράμετρο. Η περιεκτικότητα είναι η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει τις τελικές ιδιότητες του συνθέτου. Επίσης είναι μια ευκόλως ελεγχόμενη κατασκευαστική μεταβλητή, η οποία χρησιμοποιείται για να μεταβληθούν οι ιδιότητες του συνθέτου. Η κατανομή της συγκέντρωσης έχει ως μέτρο την ομοιογένεια ή την ομοιομορφία του συστήματος. Η ομοιογένεια είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που καθορίζει το βαθμό στον οποίο ένας αντιπροσωπευτικός όγκος του υλικού μπορεί να διαφέρει σε φυσικές και μηχανικές ιδιότητες από τις συνολικές ιδιότητες του υλικού. Η ανομοιομορφία του συστήματος θα πρέπει να αποφεύγεται, επειδή αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας του υλικού στο πιο αδύναμο κομμάτι του.

Ο προσανατολισμός του υλικού ενίσχυσης επηρεάζει την ισοτροπία του υλικού. Όταν η ενίσχυση είναι στη μορφή σωματιδίων, με όλες τις διαστάσεις του κάθε σωματιδίου ίσες, το σύνθετο υλικό συμπεριφέρεται ως ισοτροπικό υλικό, του οποίου οι ιδιότητες είναι ανεξάρτητες της κατεύθυνσης. Όταν οι διαστάσεις του υλικού ενίσχυσης δεν είναι ίσες, τότε το

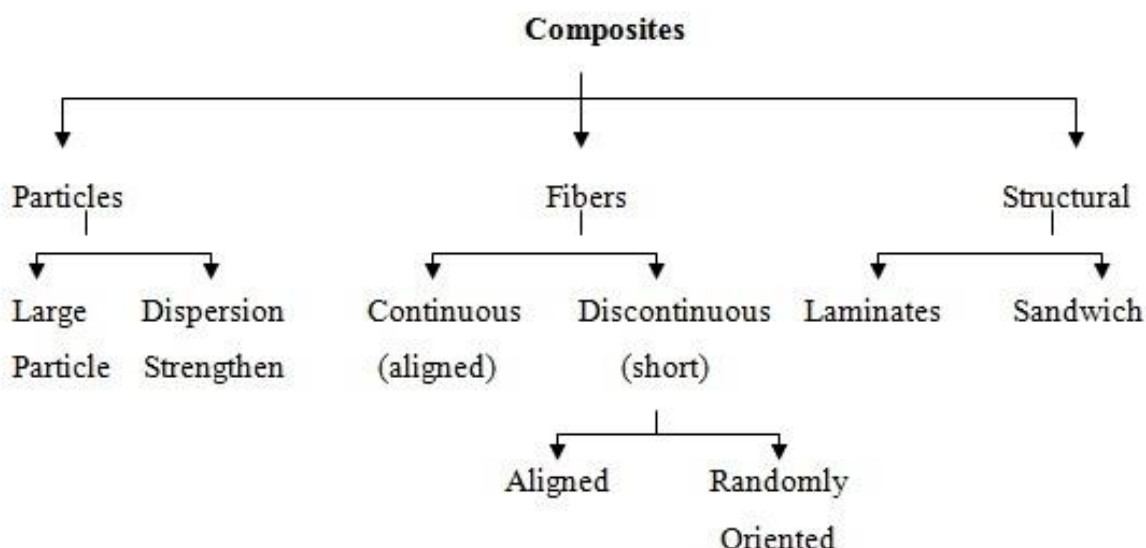
⁴ Για παράδειγμα τα σύνθετα υλικά της εργασίας, έχουν ως συστατικά τους στοιχεία τα ανθρακονήματα και ρητίνη. Τα υλικά αυτά από μόνα τους δεν έχουν καθόλου καλές μηχανικές ιδιότητες. Με την αλληλεπίδραση αυτών, όμως, το τελικό προϊόν αποκτά απίστευτες μηχανικές ιδιότητες.

⁵ Η ομάδα Μαρμαρυγιών της κατηγορίας των φυλλοπυριτικών ορυκτών περιλαμβάνει αρκετά στενά συναφή υλικά που έχουν σχεδόν τέλεια βασική διάσπαση. Όλα τα ορυκτά της ομάδας κρυσταλλώνονται στο μονοκλινές σύστημα, με τάση προς ψευδοεξαγωνικούς κρυστάλλους και είναι παρόμοια στη χημική σύνθεση. Η σχεδόν τέλεια διάσπαση, η οποία είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του μαρμαρυγία, εξηγείται από τη διάταξη του ατόμων σαν εξαγωνικό φύλλο.

σύνθετο μπορεί πάλι να συμπεριφέρεται ως ιστροπικό, εξαιτίας του τυχαίου προσανατολισμού του υλικού ενίσχυσης, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του υαλοϋφάσματος και του ανθρακοϋφάσματος. Με άλλες κατασκευαστικές τεχνικές, όπως της περιέλιξης ινών ή της χύτευσης σε καλούπι (molding), μπορεί να επιτευχθεί ελεγχόμενος προσανατολισμός του υλικού ενίσχυσης (των ινών στην παρούσα εργασία), ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένες κατασκευαστικές απαιτήσεις. Έτσι στην περίπτωση των ινοπλισμένων πολυμερών, η ανισοτροπία είναι, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, θεμιτή.

2.4 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αναπτύχθηκαν έως σήμερα, έχοντας ως σκοπό να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες των υφιστάμενων συμβατικών υλικών, ιδιότητες όπως η αντοχή, η ακαμψία, η σκληρότητα και η αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Είναι, λοιπόν, φυσικό να μελετηθούν μαζί τα σύνθετα υλικά τα οποία έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό το μηχανισμό ενίσχυσης. Συνεπώς, είναι αρκετά βολικό να κατηγοριοποιηθούν τα σύνθετα υλικά βάσει της γεωμετρίας του υλικού ενίσχυσης. Το Σχήμα 2.4 απεικονίζει μια συνήθη και κοινώς αποδεκτή κατηγοριοποίηση για τα σύνθετα υλικά.



Σχήμα 2.4: Συνήθης κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών.

Τα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά καλούνται και ινώδη. Η Διπλωματική εργασία ασχολείται με τα ινώδη σύνθετα υλικά. Η ίνα χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα της να έχει πολύ μεγαλύτερο μήκος από τις διαστάσεις της διατομής της.

2.5 Ινοπλισμένα σύνθετα υλικά

Είναι γνωστό, ότι οι πραγματικές αντοχές της πλειοψηφίας των υλικών τείνουν να είναι πολύ μικρότερες (μερικές τάξεις μεγέθους) από αυτές των θεωρητικών υπολογισμών. Η συγκεκριμένη ανακολουθία εκτιμάται ότι οφείλεται στην παρουσία ατελειών ή εγγενών ελαττωμάτων στο υλικό. Η προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν ή να εξαλειφθούν τα ελαττώματα αυτά έχει ως αντίκτυπο την αύξηση της αντοχής του υλικού. Ατέλειες στη φόρμα του υλικού ή ρωγμές, οι οποίες είναι κάθετες στην κατεύθυνση των ασκούμενων φορτίων είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για την αντοχή του υλικού. Για το λόγο αυτό, συγκρινόμενα με τα συμβατικά υλικά, τα τεχνητά ινώδη υλικά παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλότερες αντοχές κατά μήκος του άξονα τους, επειδή ελαττώματα που μπορεί να υφίστανται στα συμβατικά υλικά, ελαχιστοποιούνται, λόγω των μικρών διαστάσεων της διατομής της ίνας, στην περίπτωση των

πολυμερών υλικών ο προσανατολισμός των μοριακών δομών ευθύνεται για την υψηλή αντοχή και τη σκληρότητα αυτών. Οι ιδιότητες μερικών συνηθισμένων τύπων ινών, όπως επίσης και ορισμένων συμβατών υλικών δίνονται στον Πίνακα 2.1, όπου φαίνεται ξεκάθαρα η σημασία των ινών για την επίτευξη υψηλών αντοχών. Η υψηλή αντοχή των υαλονημάτων είναι η αιτία για μια επιφάνεια απουσία ελαττωμάτων. Οι ίνες άνθρακα και αραμιδίου, οφείλουν την εξαιρετική τους αντοχή στον βελτιστοποιημένο προσανατολισμό της ατομικής και μοριακής τους δομής. Ένα από τα σημαντικότερα ενισχυτικά υλικά είναι το E-glass λόγω του εξαιρετικά χαμηλού του κόστους. Οι ίνες βορίου, άνθρακα και αραμιδιοπολυμερούς, γνωστό και ως Kevlar 49, είναι εξαιρετικά λόγω των τόσο υψηλών τιμών αντοχής που παρουσιάζουν. Οι ίνες γραφίτη παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αντοχή λόγω της δυνατότητας να ελέγχεται η δομή τους.

Material	Tensile Modulus (E) (GPa)	Tensile Strength (σ_u) (GPa)	Density (ρ) (g/cm ³)	Specific modulus (E/ ρ)	Specific Strength (σ_u/ρ)
Fibers					
E-Glass	72.4	3.5	2.54	28.5	1.38
S-Glass	85.5	4.6	2.48	34.5	1.85
Graphite (high modulus)	390	2.10	1.90	205.0	1.10
Boron	385.0	2.8	2.63	146.0	1.10
Silica	72.4	5.8	2.19	33.0	2.65
Tungsten	414.0	4.2	19.30	21.0	0.22
Beryllium	240.0	1.3	1.83	131.0	0.71
Kevlar 49	130.0	2.8	1.50	87.0	1.87
Conventional Materials					
Steel	210.0	0.34-2.1	7.80	26.9	0.043-0.27
Aluminum alloys	70.0	0.14-0.62	2.70	25.9	0.052-0.23
Glass	70.0	0.7-2.1	2.50	28.0	0.28-0.84
Tungsten	350.0	1.1-4.1	19.30	18.1	0.057-0.21
Beryllium	300.0	0.7	1.83	164.0	0.38

Πίνακας 2.1: Διάφορες μηχανικές ιδιότητες διαφόρων ινών και συμβατικών υλικών.

Οι ίνες, λόγω της μικρής τους διατομής, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε διάφορες εφαρμογές. Και για το λόγο αυτό εμβαπτίζονται στο κάποιο υλικό (συνήθως ρητινούχο με υψηλό ιξώδες), το οποίο αποτελεί τη μήτρα του σύνθετου υλικού. Η μήτρα χρησιμεύει στο να συνδέσει τις ίνες αναμεταξύ τους⁶, αλλά και να τις προστατέψει από τις διάφορους κινδύνους του περιβάλλοντος, όπως επίσης και από το χειρισμό τους κατά της διάρκειας της απόδοσης έργου στην εφαρμογή που καλούνται να υπηρετήσουν. Τα ινοπλισμένα

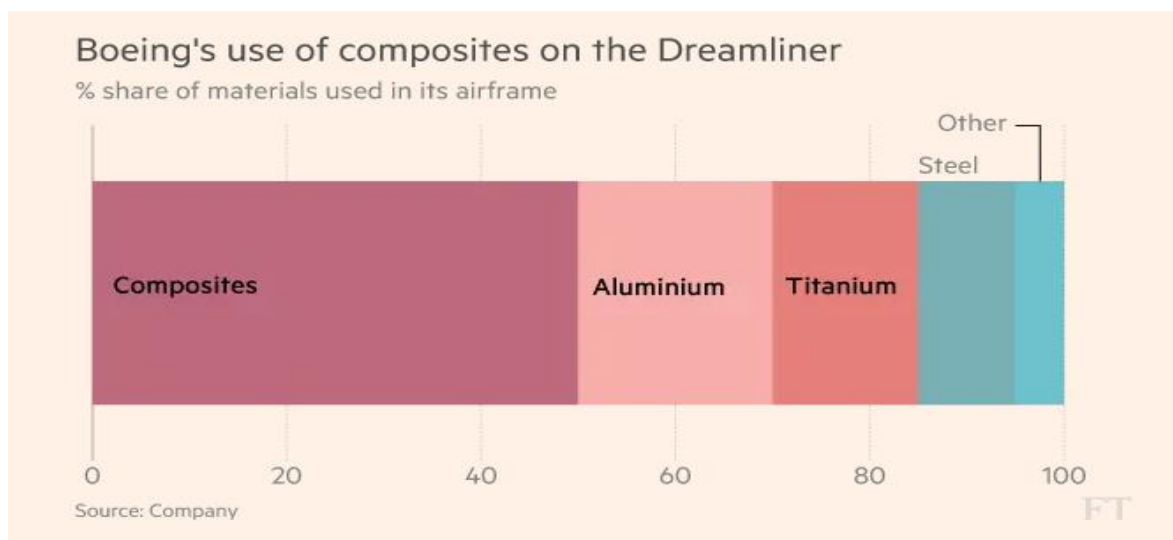
⁶ Θα μπορούσε κανείς εύστοχα να χαρακτηρίσει τις ίνες ως τον φέροντα οργανισμό του συνθέτου, ο οποίος είναι χρήσιμος μόνο εάν του μεταφέρεται σωστά η ενέργεια από το φορτίο που ασκείται στο σύνθετο, έργο που αναλαμβάνει με απόλυτη (τις περισσότερες φορές) επιτυχία η μήτρα.

πολυμερή (συνεχούς ίνας) αποτελούν τη σημαντικότερη κατηγορία των σύνθετων υλικών, λόγω των υψηλών επιδόσεων τους στη μηχανική αντοχή.

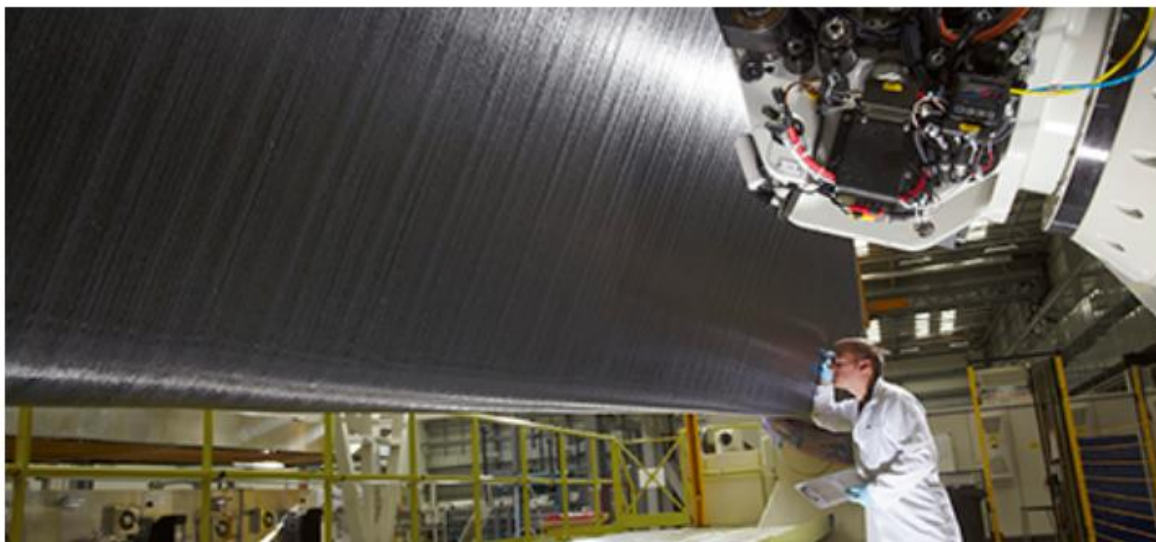
2.6 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα δυο εξέχοντα χαρακτηριστικά των κατευθυντικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών είναι η πολύ καλή αναλογία αντοχής-βάρους και η ελεγχόμενη ανισοτροπία τους. Όταν η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των συνήθως χρησιμοποιούμενων σύνθετων υλικών συγκρίνονται με αυτά των συμβατικών δομικών υλικών στον, φαίνεται η ανωτερότητα των ινοπλισμένων σύνθετων. Τα υαλονημάτινα σύνθετα υλικά είναι κατώτερα εν συγκρίσει με τον χάλυβα και το αλουμίνιο όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο σε εφαρμογές που καθοριστικό ρόλο παίζει το βάρος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, όχι μόνο οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αλλά και η αναλογία αυτών με τη μάζα τους.

Η ελεγχόμενη ανισοτροπία σημαίνει, ότι οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού διαμοιράζονται σε οποιονδήποτε προσανατολισμό είναι επιθυμητό, σε διάφορες αναλογίες. Για παράδειγμα, η αντοχή σε εγκάρσιες δυνάμεις ως προς τον άξονα του υλικού, μπορεί πολύ εύκολα να αλλάξει με την διαφοροποίηση του όγκου των ινών στο σύνθετο, όσο και με την αλλαγή των μοιρών πλέξης (ή τοποθέτησης) των ινών. Παρομοίως, μπορούν να αλλάξουν και πολλές άλλες ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους στη διαδικασία κατασκευής τους ή στα ίδια τα υλικά. Αυτά τα δυο χαρακτηριστικά (υψηλή αντοχή και ελεγχόμενη ανισοτροπία) κάνουν τα ινοπλισμένα σύνθετα ιδιαίτερα ελκυστικά υλικά. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα αυτών είναι τόσο η ευκολία της διαδικασίας κατασκευής τους, όσο και η ευελιξία που δίνουν στις γεωμετρίες που μπορούν να κατασκευαστούν με αυτά. Έτσι τα υλικά αυτά κατακτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στην αεροναυπηγική (Σχήμα 2.5), διαστημική (Σχήμα 2.6), την αυτοκινητοβιομηχανία (Σχήμα 2.7) και της ενέργειας (Σχήμα 2.8)



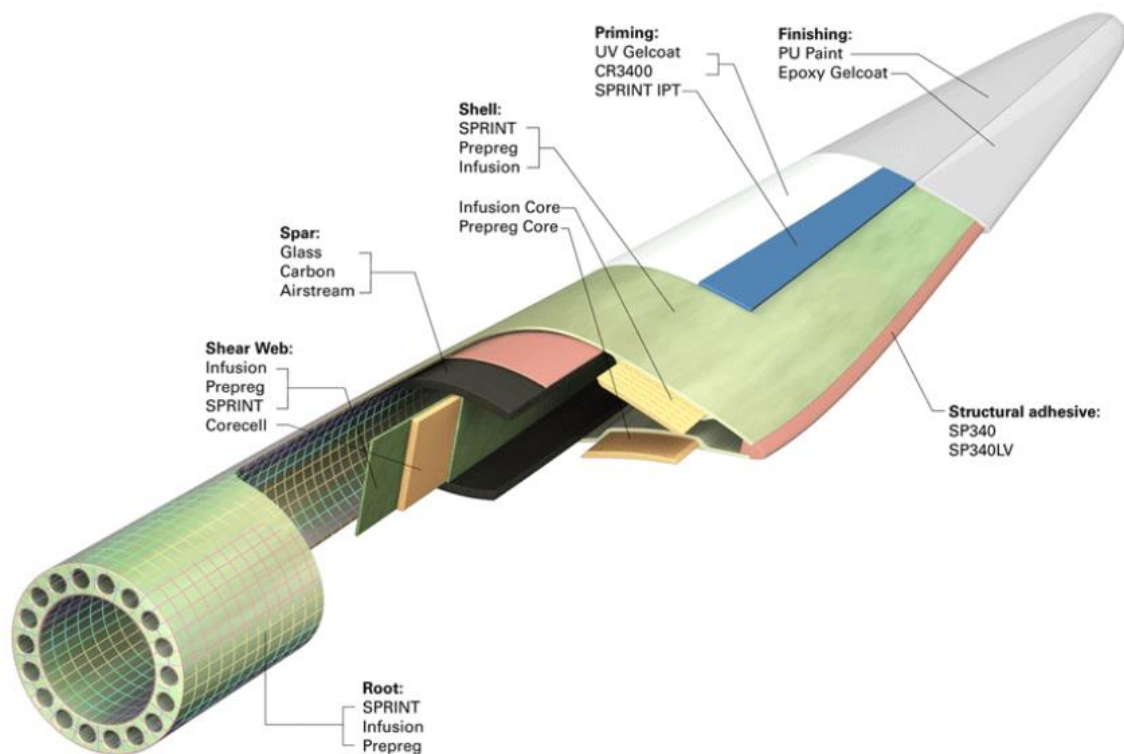
Σχήμα 2.5: Τα ποσοστά των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του Boeing 787.



Σχήμα 2.6: Τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα προσφέρουν στις διαστημικές αποστολές πλεονεκτήματα, όπως το μειωμένο βάρος, κρίσιμος παράγοντας για την κατανάλωση λιγότερων καυσίμων που οδηγεί στη μεταφορά περισσότερου ωφέλιμου φορτίου, όπως επίσης χαμηλή θερμική διαστολή.



Σχήμα 2.7: BMW i8, το νέο ηλεκτροκίνητο μοντέλο της εταιρείας για το οποίο χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά για το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής του.

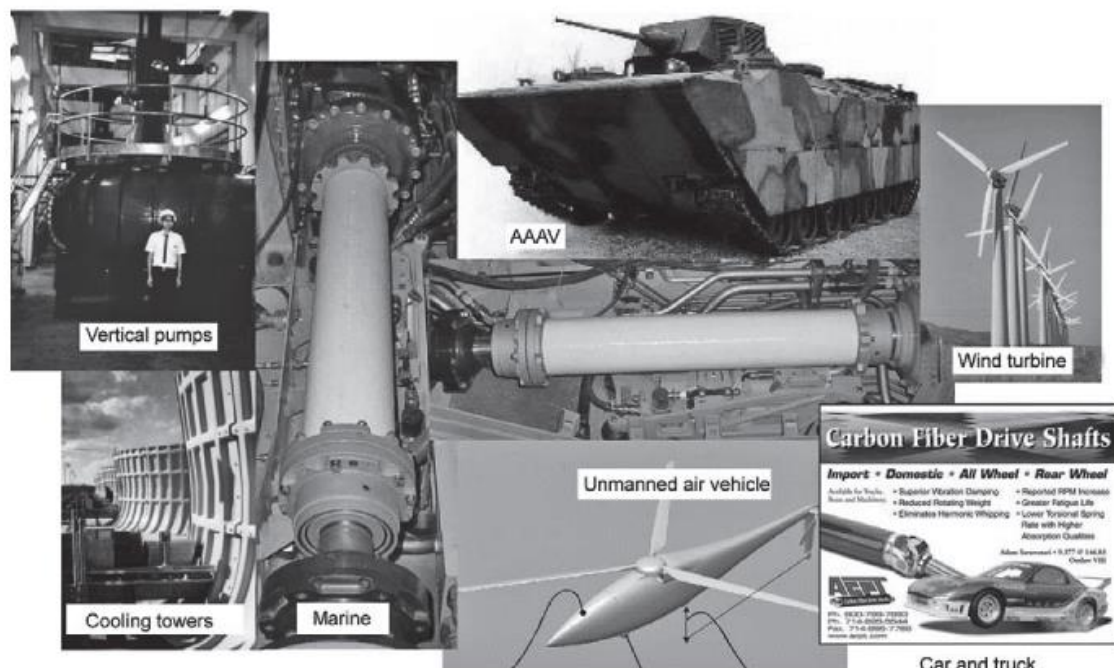


Σχήμα 2.8: Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από σύνθετα υλικά. Το μειωμένο βάρος, τους επιτρέπει να περιστρέφονται με μικρότερη ένταση αέρα, αλλά και να τοποθετούνται μέσα στο πέλαγος, λόγω της ευκολότερης μεταφοράς τους.

Στη συγκεκριμένη Διπλωματική εργασία κατασκευάζονται ινοπλισμένοι άξονες από ίνες άνθρακα. Μερικές εφαρμογές αυτών των συγκεκριμένων τεμαχίων φαίνονται παρακάτω στα Σχήματα 2.9 και 2.10.



Σχήμα 2.9: Άξονας του "Flying Cat", της εταιρίας CENTA.



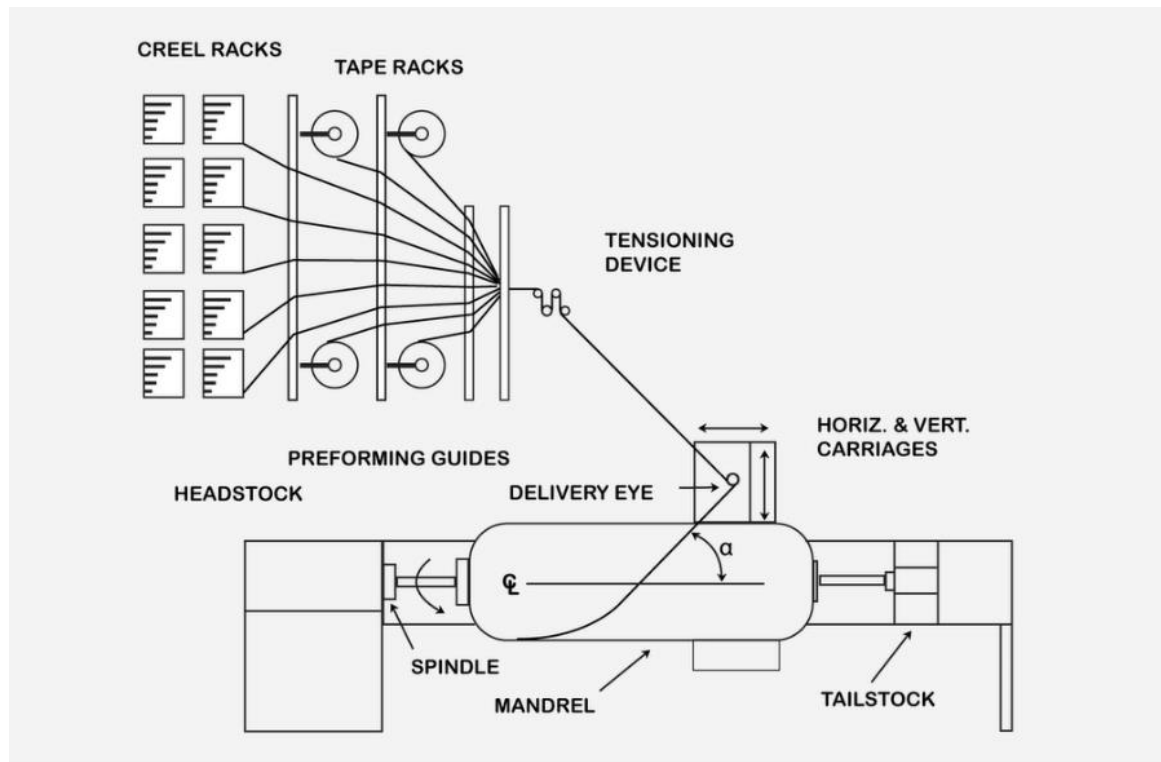
Σχήμα 2.10: Άξονες μετάδοσης ισχύος σε διάφορες εφαρμογές. (AAAV, advanced amphibious assault vehicle).

2.7 Η τεχνική περιέλιξης ινών γύρω από μεταλλική μήτρα (filament winding)

Η διαδικασία κατασκευής αξόνων από σύνθετα υλικά είναι η περιέλιξη των νημάτων. Τα περισσότερα σχήματα που δημιουργούνται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι επιφάνειες περιστροφής, όπως σωλήνες, κυλίνδρους και σφαίρες. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, οι συνεχείς ενισχύσεις τυλίγονται σε μια μεταλλική μήτρα (καλούπτι) μέχρι ολόκληρη η επιφάνεια να καλύπτεται και να επιτευχθεί το απαιτούμενο πάχος. Η διαδικασία χρησιμοποιεί ως πρώτες ύλες, διαφόρων ειδών ίνες και ρητίνη, και αποτελεί μια αρκετά αυτοματοποιημένη διαδικασία με αρκετά χαμηλή απαίτηση εργατωρών, συμβάλλοντας έτσι σε ένα χαμηλό κόστος παραγωγής. Η προγραμματισμένη περιστροφή της μεταλλικής μήτρας και η οριζόντια κίνηση του οφθαλμού απελευθέρωσης των ινών παράγουν το ελικοειδές σχέδιο που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11.

Ο παραπάνω τρόπος αποτελεί τον απλούστερο τρόπο λειτουργίας του μια ελικοειδούς μηχανής τυλίγματος. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μηχανών περιέλιξης: ο ελικοειδής και ο πολικός. Η ελικοειδής μηχανή τυλίγματος είναι παρόμοια με ένα τόνρο.

Ο άξονας περιστρέφεται συνεχώς, ενώ ο οφθαλμός μετακινείται εμπρός και πίσω. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα και η γραμμική ταχύτητα του οφθαλμού απελευθέρωσης μπορεί να είναι προσαρμοσμένο έτσι ώστε να τοποθετεί την ίνα πάνω στο καλούπτι σε οποιοδήποτε γωνία μεταξύ 5° και 90° .



Σχήμα 2.11: Απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας μιας μηχανής filament winding.

Αρκετές μετακινήσεις του μηχανήματος προς τα εμπρός και προς τα πίσω είναι απαραίτητες, για την ολοκλήρωση ενός στρώματος που καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του άξονα. Μια τέτοια στρώση είναι πάντα ένα ισορροπημένη ως προς τη γωνία πλέξης, αφού όταν το μηχάνημα κινείται προς τα εμπρός τοποθετεί την ίνα υπό γωνία $+\theta$, ενώ αντίθετα όταν κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση την τοποθετεί υπό γωνία $-\theta$. Οι ενισχύσεις των ινών φτάνουν στο καλούπι από τα κιγκλιδώματα και τις ράβδους ταινιών και μέσω μιας διατάξεως τάνυσης ή ενός φρένου, το οποίο έχει ρυθμιζόμενη ασκούμενη δύναμη τάνυσης, για τον έλεγχο της τάσης στο οπλισμό. Στη συνέχεια, η ενίσχυση εμβαπτίζεται σε ένα λουτρό ρητίνης. Η υγρή ενίσχυση φτάνει στο καλούπι μέσω του ματιού που είναι τοποθετημένο σε ένα φορείο. Εκτός από την περιστροφή του άξονα, το φορείο και το μάτι μπορεί να κινηθεί με διάφορους τρόπους (περιορισμένη περιστροφή, ή κάθετη κίνηση ως προς την επιφάνεια της μεταλλικής μήτρας), οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να βοηθήσουν στην τοποθέτηση του οπλισμού κατά μήκος των επιφανειών. Ένα ελικοειδές τύλιγμα με τρεις πιθανές κινήσεις, που ονομάζονται άξονες, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11, αλλά υπάρχουν μηχανές με έως και έξι άξονες. Ένας μηχανισμός έξι αξόνων ελέγχει ανεξάρτητα την περιστροφή της ατράκτου, την οριζόντια τροφοδοσία του φορέα, την ακτινική θέση του φορέα, τη γωνία του οφθαλμικού άξονα και τη ταχύτητα περιστροφής και κάθετης μεταφοράς του ματιού. Οι μηχανές που χρησιμοποιούν λιγότερους άξονες χρησιμοποιούνται για απλά εξαρτήματα, όπως ιστία ιστιοπλοϊκών, ενώ ο μεγαλύτερος αριθμός αξόνων χρησιμοποιείται για πιο σύνθετες γεωμετρίες όπως για παράδειγμα οι λεπίδες ανεμογεννητριών.

Μια ελικοειδής μηχανή αφήνει ένα μονοπάτι ινών πάνω στην επιφάνεια της μεταλλικής μήτρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Για πιο περίπλοκα σχήματα, το πρόγραμμα περιελίξεως μπορεί να προγραμματιστεί να αποκλίνει από τη διαδρομή. Σε αυτή την περίπτωση, το είδη εναποθετημένο υλικό τείνει να γλιστρήσει πίσω στη φυσιολογική του διαδρομή. Η διαφορά μεταξύ της προσαρμοσμένης και της καθορισμένης διαδρομής είναι η γωνία ολίσθησης, η οποία περιορίζεται από τις συνθήκες επεξεργασίας. Μια χορδή ελεύθερη να

γλιστρήσει, τεντωμένη μεταξύ δύο σημείων στην κυρτή πλευρά οποιασδήποτε επιφάνειας, ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή. Εάν το σχήμα της επιφάνειας μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε το μονοπάτι να συμπίπτει με το αποτέλεσμα των στεφανιαίων και μεσημβρινών δυνάμεων, το σχήμα καλείται θόλος. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου σχήματος χρησιμοποιείται για τους δεξαμενές υψηλών πιέσεων.

Μετά την περιέλιξη, το εξάρτημα μετακινείται σε έναν ηλεκτρικό φούρνο, απελευθερώνοντας έτσι το μηχανισμό περιέλιξης για την παραγωγή ενός άλλου κομματιού. Η ανάγκη για συνεχή τάνυση της ίνας γύρω από τον άξονα πρακτικά εμποδίζει την κατασκευή σχημάτων με αρνητική καμπυλότητα, εκτός εάν χρησιμοποιούνται ειδικά εξαρτήματα. Μικρές ακτίνες καμπυλότητας είναι επίσης ένα πρόβλημα, διότι οι θραύσεις των ινών και οι ξαφνικές αλλαγές στην καμπυλότητα τείνει να δημιουργήσει ζώνες με μεγάλη ποσότητα ρητίνης. Η ανάγκη για ένα καλούπι, του οποίου το σχήμα θα επιτρέπει την απομάκρυνση του εξαρτήματος από πάνω του, με τη χρήση του εξολκέα, αφού πολυμεριστεί στο φούρνο περιορίζει τις γεωμετρίες που μπορούν να τυλιχθούν. Σε γενικές γραμμές η τεχνική της περιέλιξης ινών εφαρμόζεται για την κατασκευή κυλινδρικών τεμαχίων.

Τα βήματα της παραγωγικής διαδικασίας περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

1. Προθέρμανση του φούρνου και του λουτρού ρητίνης σε κατάλληλη θερμοκρασία.
2. Επιλογή του κατάλληλου καλουπιού (μήτρας), κάποια από τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.12, και τοποθέτηση του στη μηχανή.



Σχήμα 2.12: Μερικά από τα καλούπια που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κυλινδρικών εξαρτημάτων με τη τεχνική της περιέλιξης ινών.

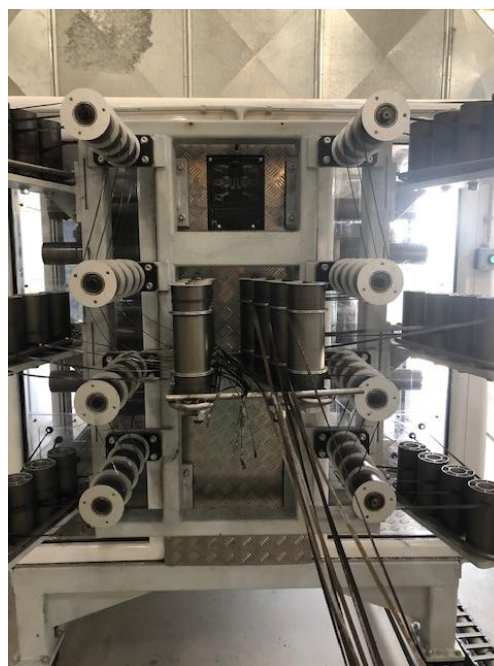
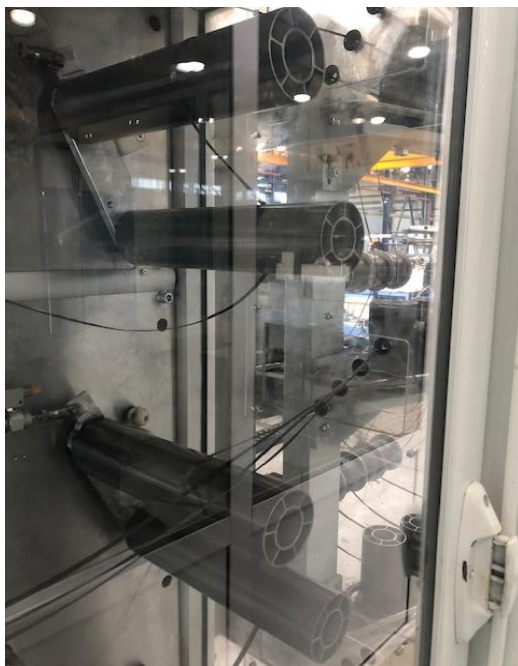
3. Καθαρισμός του καλουπιού, έλεγχος της επιφάνειας και τοποθέτηση του στο φούρνο για προθέρμανση.
4. Τοποθέτηση του προθερμασμένου καλουπιού στη μηχανή για τελικό καθαρισμό και έλεγχο της επιφάνειας.

5. Τοποθέτηση αντιστάσεων υπέρυθρης ακτινοβολίας πάνω από το καλούπι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, ώστε η θερμοκρασία στο χώρο της περιέλιξης να διατηρείται σταθερή.



Σχήμα 2.13: Υπέρυθρη ακτινοβολία, μέσω της οποίας η θερμοκρασία στο χώρο περιέλιξης σταθερή.

6. Επιλογή των κατάλληλων ινών για τη συγκεκριμένη περιέλιξη και τοποθέτηση τους στον ηλεκτρονικό προεντατήρα, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2.14. Στη συνέχεια οδηγούνται προσεκτικά στο λουτρό ρητίνης (Σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.14 Αριστερά: οι ίνες μέσα στον ηλεκτρικό προεντατήρα, τεντώνονται με ελεγχόμενη δύναμη. Δεξιά: οι ίνες εξέρχονται και οδηγούνται στο λουτρό ρητίνης.



Σχήμα 2.15: Οι ίνες οδηγούνται στο λουτρό ρητίνης, μέσω κεραμικών οπών, για να αποφευχθούν ανεπιθύμητοι τραυματισμοί των ινών.

7. Μέτρηση της ποσότητας των ινών πριν την περιέλιξη.
8. Τοποθέτηση των ινών δια μέσου του λουτρού ρητίνης στη μηχανή περιέλιξης (Σχήμα 2.16).



Σχήμα 2.16: Το τύμπανο της εικόνας περιστρέφεται συνεχώς, έχοντας συνεχώς βυθισμένη τη μια του πλευρά στο λουτρό ρητίνης. Οι ίνες απλώνονται πάνω του και παίρνουν ακριβώς όση ρητίνη χρειάζονται.

9. Επιλογή του συστήματος ρητίνης για τη συγκεκριμένη περιέλιξη.
10. Μέτρηση των συστατικών και ανάμειξη τους και τοποθέτηση στο προθερμασμένο λουτρό ρητίνης.
11. Προγραμματισμός της μηχανής.
12. Κατάλληλος σχεδιασμός των layers για το συγκεκριμένο προϊόν, σύμφωνα με τις προδιαγραφές.
13. Εκκίνηση της περιέλιξης (filament winding). Στο Σχήμα 2.17 οι ίνες οδηγούνται μέσω του ματιού (το οποίο, περιστρεφόμενο, δίνει την κατάλληλη γωνία πλέξης), ενώ στο Σχήμα 2.18 φαίνεται η εναπόθεση των ινών στο καλούπι.



Σχήμα 2.17: Οι ίνες φτάνουν στο μάτι, διαχωρίζονται και τους αφαιρείται, η ποσότητα ρητίνης, αν τυχόν είναι πλεονάζουσα. Το μάτι περιστρέφεται και εναποθέτει τις ίνες άνω στο καλούπι, με την κατάλληλη γωνία πλέξης. Η γωνία πλέξης προσδιορίζεται από τον σχεδιαστή και εξαρτάται από τα φορτία που θα ασκούνται στο εκάστοτε εξάρτημα. Σύμφωνα με τη γωνία πλέξης, προγραμματίζεται κατάλληλα και η περιστροφή του ματιού.



Σχήμα 2.18: Οι ίνες φτάνουν στο καλούπι με τη κατάλληλη γωνία πλέξης. Το στεφάνι με τα καρφιά, επιτρέπει την αλλαγή κατεύθυνσης του φορέα κατά 180°, χωρίς να παρασύρει τις ίνες.

14. Μέτρηση σε κάθε layer του εύρους των ινών και του πάχους του σωλήνα.
15. Τοποθέτηση του καλουπιού με το προϊόν στο φούρνο πολυμερισμού (Σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.19: Ο φούρνος πολυμερισμού έχει τη δυνατότητα να ελέγχει τη θερμοκρασία και τη διάρκεια της διαδικασίας. Το καλούπι με το εμποτισμένο με ρητίνη, πλέον, ανθρακόνημα συνεχίζει να περιστρέφεται, ώστε το τελικό προϊόν, να μην πά-ρει ανεπιθύμητες παραμορφώσεις και να μη διαφύγει ποσότητα ρητίνης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

16. Προγραμματισμός του κύκλου πολυμερισμού σύμφωνα με τις προδιαγραφές του συστήματος ρητίνης για την επίτευξη της μέγιστης αντοχής της ρητίνης.
17. Καθαρισμός της μηχανής περιέλιξης και τοποθέτηση των απορριμμάτων σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο.
18. Τοποθέτηση του προϊόντος στον υδραυλικό εξολκέα (Σχήμα 2.20).

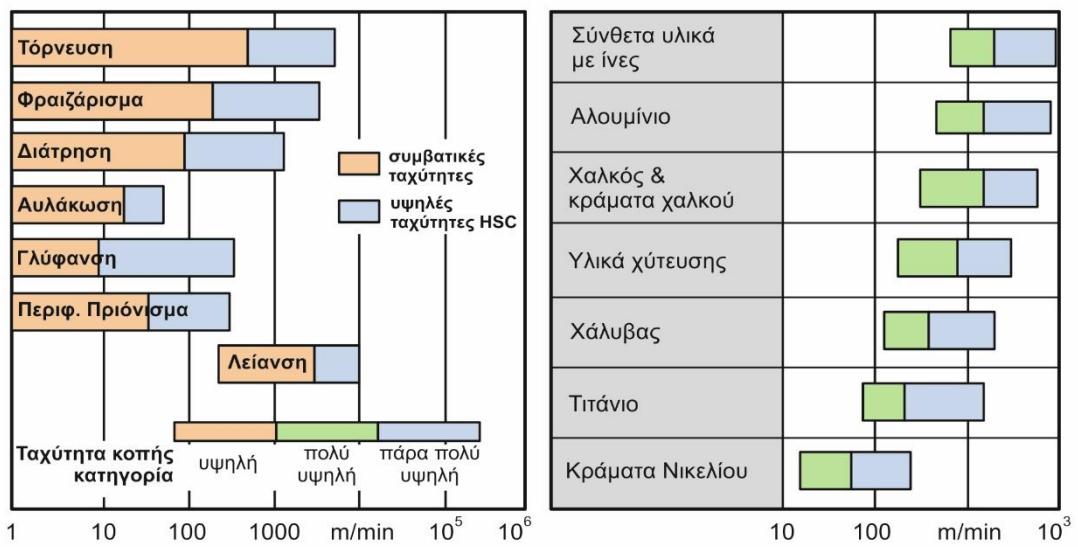


Σχήμα 2.20: Ο υδραυλικός εξολκέας, αφαιρεί το καλούπι μέσα από το, πολυμερισμένο πλέον, σύνθετο υλικό.

19. Επεξεργασία του προϊόντος, ώστε να συμφωνεί με τις προδιαγραφές (Σχήμα 2.21). Μια σύγκριση για τις κατεργασίες μεταξύ των διάφορων υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των ινοσύνθετων υλικών φαίνεται στο Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.21: Πάνω αριστερά: CNC horizontal boring and milling machine, length 6m. Πάνω δεξιά: CNC grinding machine, length 3m. Κάτω κέντρο: lathe machine, length 8m.



Σχήμα 2.22: Συγκρίσεις κατεργασιών μεταξύ διαφόρων υλικών.

20. Ποιοτικός έλεγχος

3. Φάσεις κατασκευής ανθρακονημάτων τεμαχίων

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η κατασκευή των τεμαχίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Κατασκευάστηκαν 3 διαφορετικά κυλινδρικά τεμάχια. Παρόλο που δεν φαίνεται να μην έχουν ιδιαίτερες διαφορές εξωτερικά, οι στρώσεις που αποτελούν το κάθε τεμάχιο είναι διαφορετικές, δίδοντας έτσι στο κάθε τεμάχιο διαφορετικές ιδιότητες, όσον αφορά τις δυνάμεις που μπορεί να δεχτεί κάθε τεμάχιο. Και αυτό εξαιτίας της διαφορετικής ανισοτροπίας του κάθε τεμαχίου, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής γωνίας πλέξης μέσα σε κάθε διαστρωμάτωση. Ακολουθούν τα φασεολόγια κατασκευής του καθενός από τα 3 ανθρακονημάτινα τεμάχια.

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας

Η διαδικασία περιλαμβάνει την περιέλιξη των ινών υπό τάση επί ενός περιστρεφόμενου άξονα – μήτρα – μάντρελ. Η μήτρα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της (Άξονας 1 ή X) ενώ ταυτόχρονα το delivery eye (Άξονας 3-4 ή Z-W) τοποθετημένο σε ένα φορείο (Άξονας 2 ή Y) διασχίζει οριζοντίως σε σχέση με τον άξονα της περιστρεφόμενης μήτρας, τοποθετώντας τις ίνες στο επιθυμητό σχέδιο (pattern) ή γωνία.

Τα νήματα που χρησιμοποιούνται είναι τα ανθρακονήματα. Εμποτίζονται σε ένα λουτρό με ρητίνη και στη συνέχεια τυλίγονται επάνω στον άξονα. Μόλις ολοκληρωθεί η κάλυψη του μάντρελ στο επιθυμητό πάχος, ακολουθεί η διαδικασία πολυμερισμού της ρητίνης.

Ανάλογα με το σύστημα ρητίνης και τα χαρακτηριστικά του, συχνά ο περιστρεφόμενος άξονας - μάντρελ τοποθετείται σε ένα φούρνο ή τοποθετείται κάτω από θερμαντήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας μέχρι να ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός.





Μόλις η ρητίνη αποκτήσει τα τελικά χαρακτηριστικά της, ο άξονας-μάντρελ απομακρύνεται ή εξάγεται, αφήνοντας το κοίλο τελικό προϊόν.

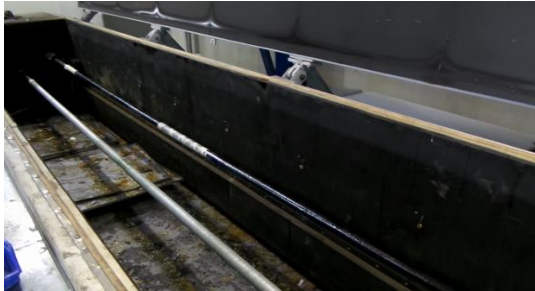
Παράμετροι που πρέπει να οριστούν κατά τη διαδικασία της περιέλιξης είναι:

- Τάνυση (N) στον προεντατήρα (tensioner). Η διαφορετική τιμή στην τάνυση επιτρέπει:
 - Ίδια τάνυση των ινών ανεξαρτήτως του διαφορετικού βάρους/μέτρου κάθε τύπου ίνας.
 - Ενδεχόμενη επίδραση στον εμποτισμό των ινών.
 - Έλεγχο της τάνυσης των ινών κατά την εναπόθεση τους στο μάντρελ, λαμβάνοντας υπόψιν και τη γωνία περιέλιξης.
 - Στη filament winding αποφεύγουμε την περιέλιξη σε γωνίες κάτω των 5°.
- Γωνία περιέλιξης.
- Έλεγχος αλληλουχίας των layers διαφορετικών γωνιών περιέλιξης.
- Αριθμός των ινών.
- Bandwidth του batch των ινών.
- Έλεγχος πάχους / layer.
- Ταχύτητα περιέλιξης των ινών.

Στους Πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται τα φασεολόγια για την κατασκευή των τριών ανθρακονημάτων τεμαχίων

3.1.1 Τεμάχιο 1

Τεμάχιο 1	Υλικό περιέλιξης: αν-θρακόνημα	Υλικό μεταλλικής μήτρας: 25CrMo4	
Αριθμός ινών	Κωδικός ίνας	Κωδικός ρητίνης	Πάχος τεμαχίου (mm)
10	T700 Toray 12k	828 epicote Hexion	2
Κωδικός σκληρυντή: 866 epicure Hexion		Δύναμη Tensioner (N)	Μήκος τεμαχίου (mm)
Κωδικός καταλύτη: 101 epicure Hexion		45	500
1 ^η Φάση			
Επιλογή κατάλληλης διαμέτρου καλουπιού και προθέρμανση αυτού με χρήση θερμαντικών υπέρυθρης ακτινοβολίας.			
2 ^η Φάση			
Περιέλιψη του καλουπιού με ρητίνη, ώστε να ομογενοποιηθεί με την πρώτη στρώση των ανθρακονημάτων.			
Φάσεις 3 έως 7: περιέλιξη ινών			
1 ^η στρώση: η περιέλιξη αρχίζει με 12°. Πραγματοποιείται κίνηση του φορέα και του delivery eye μέχρις ότου καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια.			
2 ^η στρώση: η περιέλιξη συνεχίζει ξανά με 12°.			
		 <div>Περιέλιξη στις 12°</div>	

<p>3^η στρώση: η περιέλιξη συνεχίζει με 90° μοίρες πλέξη (radial).</p>	
<p>4^η στρώση: μετά την περιέλιξη με radial η πλέξη επιστρέφει στις 12° για άλλα δύο στρώματα.</p>	
<p>5^η στρώση: επιπλέον στρώση στις 12°.</p>	
<p>6^η στρώση: η περιέλιξη τερματίζει με 90°. Σε αυτό το στάδιο δε γίνεται περιέλιξη με νήμα, αλλά με reel ply, ώστε να απομακρυνθεί η περιττή ποσότητα ρητίνης.</p>	
<p>8^η Φάση</p> <p>Στην παρούσα φάση γίνεται ο πολυμερισμός του τεμαχίου. Το τυλιγμένο πλέον τεμάχιο εισέρχεται στον φούρνο πολυμερισμού, όπου συνεχίζει να περιστρέφεται, ενώ πολυμερίζεται. Το συγκεκριμένο τεμάχιο πολυμερίζεται συνολικά για 3 ώρες, σε 2 στάδια: για 90 λεπτά στους 90 °C και στη συνέχεια στους 150 °C για ακόμα 90 λεπτά.</p>	
<p>9^η Φάση</p>	

Σε αυτήν τη φάση γίνεται εξώλκυση του τεμαχίου από τη μεταλλική μήτρα. Έτσι το τελικό πολυμερισμένο τεμάχιο διαχωρίζεται από το καλούπι, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την περιέλιξη του επόμενου τεμαχίου ίδια εσωτερική διαμέτρου. Το ανθρακονημάτινο τεμάχιο είναι πλέον έτοιμο να επεξεργασθεί, ένα αυτό είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια ερνάει στο στάδιο του ποιοτικού ελέγχου.



Τμήμα προγράμματος



TITLE: HELICAL Layer
 MANDREL: Tube
 MANDREL FILE: t.mdr
 UNITS: mm
 OFFSET: X0.0000 Y250.0000 Z545.0000 V-26.5507 U0.0000 W0.0000
 MOVE: Relative
 CYCLES: 10
 STARTING POINT: AUTO
 FIND PATH: YES
 START BUTTON: YES
 OPTIMIZATION: NO
 CYCLE LENGTH: 100.00

```
=====
N10 X4.9635 Y0.0157 Z0.0000 V-2.5097 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N20 X4.9635 Y0.0627 Z0.0000 V-2.5059 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N30 X4.9635 Y0.1408 Z0.0000 V-2.4943 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N40 X4.9635 Y0.2493 Z0.0000 V-2.4750 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N50 X4.9635 Y0.3878 Z0.0000 V-2.4483 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N60 X4.9635 Y0.5553 Z0.0000 V-2.4142 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N70 X4.9635 Y0.7507 Z0.0000 V-2.3729 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N80 X4.9635 Y0.9730 Z0.0000 V-2.3248 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N90 X4.9635 Y1.2206 Z0.0000 V-2.2701 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N100 X4.9635 Y1.4921 Z0.0000 V-2.2091 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N110 X4.9635 Y1.7859 Z0.0000 V-2.1422 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N120 X4.9635 Y2.1000 Z0.0000 V-2.0698 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N130 X4.9635 Y2.4326 Z0.0000 V-1.9924 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N140 X4.9635 Y2.7817 Z0.0000 V-1.9105 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N150 X4.9635 Y3.1449 Z0.0000 V-1.8246 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N160 X4.9635 Y3.5202 Z0.0000 V-1.7351 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N170 X4.9635 Y3.9052 Z0.0000 V-1.6426 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N180 X4.9635 Y4.2976 Z0.0000 V-1.5478 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N190 X4.9635 Y4.6948 Z0.0000 V-1.4512 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N200 X4.9635 Y5.0945 Z0.0000 V-1.3533 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N210 X4.9635 Y5.4942 Z0.0000 V-1.2549 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N220 X4.9635 Y5.8915 Z0.0000 V-1.1564 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N230 X4.9635 Y6.2838 Z0.0000 V-1.0586 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N240 X4.9635 Y6.6688 Z0.0000 V-0.9619 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N250 X4.9635 Y7.0441 Z0.0000 V-0.8671 U0.0000 W0.0000 T0.0250
```

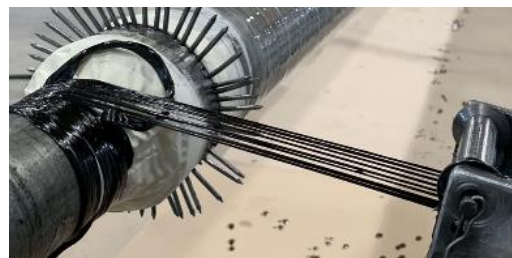

N260 X4.9635 Y7.4074 Z0.0000 V-0.7746 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N270 X4.9635 Y7.7564 Z0.0000 V-0.6852 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N280 X4.9635 Y8.0890 Z0.0000 V-0.5992 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N290 X4.9635 Y8.4031 Z0.0000 V-0.5173 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N300 X4.9635 Y8.6969 Z0.0000 V-0.4399 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N310 X4.9635 Y8.9684 Z0.0000 V-0.3675 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N320 X4.9635 Y9.2161 Z0.0000 V-0.3007 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N330 X4.9635 Y9.4383 Z0.0000 V-0.2397 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N340 X4.9635 Y9.6338 Z0.0000 V-0.1849 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N350 X4.9635 Y9.8012 Z0.0000 V-0.1368 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N360 X4.9635 Y9.9397 Z0.0000 V-0.0955 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N370 X4.9635 Y10.0483 Z0.0000 V-0.0614 U0.0000 W0.0000 T0.0250
 N1820 X158.8494 Y0.0000 Z0.0000 V-53.1014 U0.0000 W0.0000 T0.8001
 =====
 PARAMETERS 25.00 6.00 17.00 12.00 P 400.00 30.00 18 3.000 40 0.025

Πίνακας 3.1: Φασεολόγιο κατασκευής 1^{ου} ανθρακονημάτινου τεμαχίου.

3.1.2 Τεμάχιο 2

Τεμάχιο 2	Υλικό περιέλιξης: αν-θρακόνημα	Υλικό μεταλλικής μήτρας: 25CrMo4	
Αριθμός ινών	Κωδικός ίνας	Κωδικός ρητίνης	Πάχος τεμαχίου (mm)
10	T700 Toray 24k	Voraforce 100 επο-ξική	4
Κωδικός σκληρυντή: 150 Voraforce Dow		Δύναμη Tensioner (N)	Μήκος τεμαχίου (mm)
Κωδικός καταλύτη: 300 Voraforce Dow		45	500
1 ^η Φάση			
Επιλογή κατάλληλης διαμέτρου καλουπιού και προθέρμανση αυτού με χρήση θερμαντικών υπέρυθρης ακτινοβολίας.			
2 ^η Φάση			
Περιέλευση του καλουπιού με ρητίνη, ώστε να ομογενοποιηθεί με την πρώτη στρώση των ανθρακονημάτων.			
Φάσεις 3 εως 14: περιέλιξη ινών			

1^η στρώση: η περιέλιξη αρχίζει με 90° προς τα θετικά και τα αρνητικά του άξονα. Επομένως, πρακτικά γίνεται λόγος για δυο στρώσεις στις 90°.

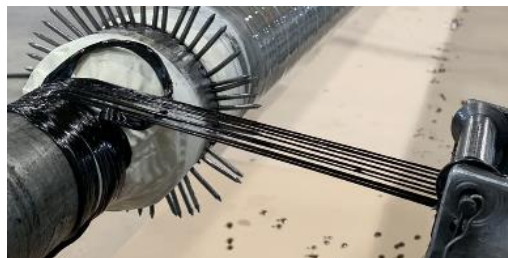


2^η στρώση: περιέλιξη στις 90° στην αρνητική φορά του άξονα.

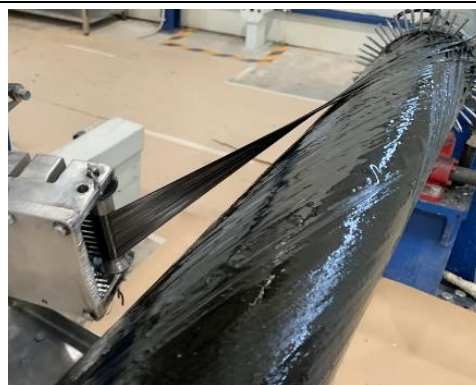
3^η και 4^η στρώση: η περιέλιξη συνεχίζει με 45°.



5^η στρώση: περιέλιξη στις 90°



6^η και 7^η στρώση: επιπλέον στρώσεις στις 45°.



<p>8^η και 9^η στρώση: η περιέλιξη συνεχίζει με 90° προς τα θετικά και τα αρνητικά του άξονα.</p>	
<p>10^η και 11^η στρώση: επιπλέον στρώσεις στις 45°.</p>	
<p>12^η στρώση: περιέλιξη στις 90° με peel ply</p>	
<p>15^η Φάση Στην παρούσα φάση γίνεται ο πολυμερισμός του τεμαχίου. Το τυλιγμένο πλέον τεμάχιο εισέρχεται στον φούρνο πολυμερισμού, όπου συνεχίζει να περιστρέφεται, ενώ πολυμερίζεται. Το συγκεκριμένο τεμάχιο πολυμερίζεται συνολικά για 165 λεπτά, σε 2 στάδια: για 60 λεπτά στους 90 °C και στη συνέχεια στους 170 °C για ακόμα 105 λεπτά.</p>	
<p>16^η Φάση</p>	

Σε αυτήν τη φάση γίνεται εξώλκυση του τεμαχίου από τη μεταλλική μήτρα. Έτσι το τελικό πολυμερισμένο τεμάχιο διαχωρίζεται από το καλούπι, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την περιέλιξη του επόμενου τεμαχίου ίδια εσωτερική διαμέτρου. Το ανθρακονημάτινο τεμάχιο είναι πλέον έτοιμο να επεξεργασθεί, ένα αυτό είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια ερνάει στο στάδιο του ποιοτικού ελέγχου.



Τμήμα προγράμματος



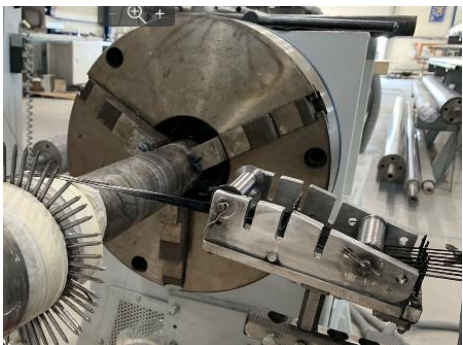
TITLE: HELICAL Layer
 MANDREL: Tube
 MANDREL FILE: t.mdr
 UNITS: mm
 OFFSET: X0.0000 Y250.0000 Z545.0000 V-40.7085 U0.0000 W0.0000
 MOVE: Relative
 STARTING POINT: AUTO
 FIND PATH: YES
 START BUTTON: YES
 OPTIMIZATION: NO
 CYCLE LENGTH: 100.00

```
=====
N10 X3.3762 Y0.0023 Z0.0000 V-0.2093 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N20 X3.3762 Y0.0091 Z0.0000 V-0.2090 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N30 X3.3762 Y0.0204 Z0.0000 V-0.2081 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N40 X3.3762 Y0.0361 Z0.0000 V-0.2064 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N50 X3.3762 Y0.0561 Z0.0000 V-0.2042 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N60 X3.3762 Y0.0803 Z0.0000 V-0.2014 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N70 X3.3762 Y0.1085 Z0.0000 V-0.1979 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N80 X3.3762 Y0.1407 Z0.0000 V-0.1939 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N90 X3.3762 Y0.1765 Z0.0000 V-0.1894 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N100 X3.3762 Y0.2157 Z0.0000 V-0.1843 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N110 X3.3762 Y0.2582 Z0.0000 V-0.1787 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N120 X3.3762 Y0.3036 Z0.0000 V-0.1726 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N130 X3.3762 Y0.3517 Z0.0000 V-0.1662 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N140 X3.3762 Y0.4022 Z0.0000 V-0.1594 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N150 X3.3762 Y0.4547 Z0.0000 V-0.1522 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N160 X3.3762 Y0.5090 Z0.0000 V-0.1447 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N170 X3.3762 Y0.5646 Z0.0000 V-0.1370 U0.0000 W0.0000 T0.0250
=====
```

PARAMETERS 5.00 6.00 22.00 45.00 P 400.00 30.00 17 3.000 40 0.025

Πίνακας 3.2: Φασεολόγιο κατασκευής 2^{ου} ανθρακονημάτινου τεμαχίου.

3.1.3 Τεμάχιο 3

Τεμάχιο 3	Υλικό περιέλιξης: αν-θρακόνημα	Υλικό μεταλλικής μήτρας: 25CrMo4	
Αριθμός ινών	Κωδικός ίνας	Κωδικός ρητίνης	Πάχος τεμαχίου (mm)
10	Tohotenax 12k	828 epicote Hexion	2
Κωδικός σκληρυντή: 866 epicure Hexion		Δύναμη Tensioner (N)	Μήκος τεμαχίου (mm)
Κωδικός καταλύτη: 101 epicure Hexion		45	500
1 ^η Φάση			
Επιλογή κατάλληλης διαμέτρου καλουπιού και προθέρμανση αυτού με χρήση θερμαντικών υπέρυθρης ακτινοβολίας.			
2 ^η Φάση			
Περιέλιψη του καλουπιού με ρητίνη, ώστε να ομογενοποιηθεί με την πρώτη στρώση των ανθρακονημάτων.			
Φάσεις 2 έως 8: περιέλιξη ινών			
1 ^η στρώση: Η αρχική στρώση στο συγκεκριμένο τεμάχιο είναι radial, δηλαδή 90°.			

2^η και 3^η στρώση: Το συγκεκριμένο τεμάχιο έχει ως σε αυτές τις φάσεις περιελίσσεται στις 85°.



4^η στρώση: Στη συνέχεια επαναλαμβάνονται οι 90°.



5^η και 6^η στρώση: Στις συγκεκριμένες φάσεις επαναλαμβάνεται η πλέξη στις 85°.



7^η έως 10^η στρώση: στη συνέχεια ακολουθούν 4 συνεχόμενες στρώσεις με κάθετη περιέλιξη ως προς τον άξονα περιστροφής του τεμαχίου, δηλαδή στις 90°.



11^η στρώση: η περιέλιξη τερματίζει με 90°. Σε αυτό το στάδιο δε γίνεται περιέλιξη με νήμα, αλλά με reel ply, ώστε να απομακρυνθεί η περιττή ποσότητα ρητίνης.



9^η Φάση

Στην παρούσα φάση γίνεται ο πολυμερισμός του τεμαχίου. Το τυλιγμένο πλέον τεμάχιο εισέρχεται στον φούρνο πολυμερισμού, όπου συνεχίζει να περιστρέφεται, ενώ πολυμερίζεται. Το συγκεκριμένο τεμάχιο πολυμερίζεται συνολικά για 3 ώρες, σε 2 στάδια: για 90 λεπτά στους 90 °C και στη συνέχεια στους 150 °C για ακόμα 90 λεπτά.



10^η Φάση

Σε αυτήν τη φάση γίνεται εξώλκυση του τεμαχίου από τη μεταλλική μήτρα. Έτσι το τελικό πολυμερισμένο τεμάχιο διαχωρίζεται από το καλούπι, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την περιέλιξη του επόμενου τεμαχίου ίδια εσωτερική διαμέτρου. Το ανθρακονημάτινο τεμάχιο είναι πλέον έτοιμο να επεξεργασθεί, ένα αυτό είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια ερνάει στο στάδιο του ποιοτικού ελέγχου.



Τμήμα προγράμματος

```
TITLE:      RADIAL Layer
MANDREL:    Tube
MANDREL FILE:  t.mdr
UNITS:      mm
OFFSET:      X0.0000 Y265.0000 Z545.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000
MOVE:       ABS
CYCLES:      1
STARTING POINT: AUTO
FIND PATH:   YES
START BUTTON: YES
OPTIMIZATION: NO
CYCLE LENGTH: 100.00
```

```
=====
N10 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N20 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N30 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N40 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
```

```

N50 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N60 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N70 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N80 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N90 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N100 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N110 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N120 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N130 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N140 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N150 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N160 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N170 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N180 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N190 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N200 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N210 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N220 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N230 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N240 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N250 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N260 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N270 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
N280 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000 W0.0000 T0.6350
=====
PARAMETERS RADIAL 10.00 30.00 1 0.00 0.00 P 400.00 30.00 360.00 0

```

Πίνακας 3.3: Φασεολόγιο κατασκευής 3^{ου} ανθρακονημάτινου τεμαχίου.

3.2 Μηχανική Σύνθετων Υλικών

Για την ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς συνθέτων υλικών, περιοριζόμαστε στην θεωρηση δομικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε μορφή λεπτών στρώσεων από πολυμερή πλαστικά ενισχυμένα με μακριές συνεχείς ίνες. Η μονοαξονική στρώση (lamina) ινώδους συνθέτου υλικού, η οποία μπορεί να είναι επίπεδη ή καμπύλη, αποτελείται από συνεχείς ίνες παράλληλες μεταξύ τους και συγκρατούμενες με το συνδετικό υλικό (μήτρα). Το πάχος μιας τέτοιας στρώσεως είναι συνήθως μικρό (της τάξεως 100-600 μm) και στις κατασκευαστικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται πολύστρωτα κελύφη ή πλάκες (laminates), αποτελούμενα από αρκετές μονοαξονικές στρώσεις των οποίων όμως οι διευθύνσεις ινών ως προς κάποιο σταθερό σύστημα αναφοράς διαφέρουν.

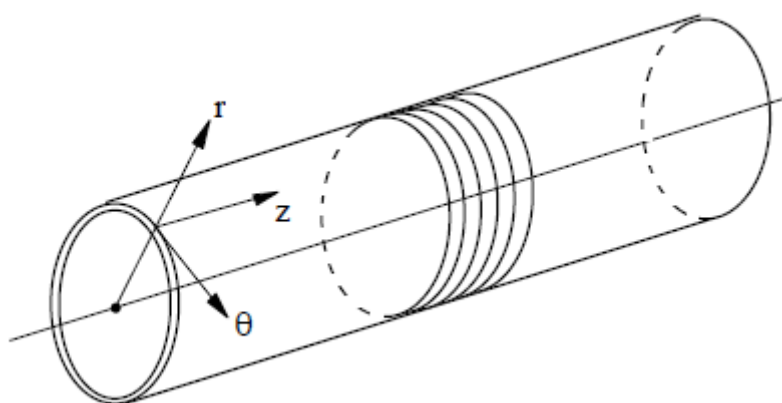
Η απόκριση πολύστρωτης πλάκας, δηλαδή η μηχανική συμπεριφορά, σε εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία εξαρτάται από την επιμέρους μακροσκοπική απόκριση εκάστης στρώσεως, η οποία και μελετάται σε αυτό το κεφάλαιο. Με τον όρο μακροσκοπική συμπεριφορά νοείται το σύνολο των μέσων φαινομένων μηχανικών ιδιοτήτων της μονοαξονικής στρώσεως ή του πολύστρωτου κελύφους αντιστοίχως. Κατ' αυτό τον τρόπο, μια στρώση θα θεωρείται μακροσκοπικώς ως ομογενές ανισότροπο υλικό, υπόθεση που πειραματικώς υποστηρίζεται ικανοποιητικά όσον αφορά μεγέθη γενικών μηχανικών ιδιοτήτων όπως οι τεχνικές ελαστικές σταθερές ή οι τάσεις αστοχίας κατά τις διάφορες διευθύνσεις του ανισότροπου μέσου. Για μελέτη αστοχίας του σύνθετου υλικού (τρόποι αστοχίας) ή για πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του συναρτήσει των αντιστοίχων των συνιστώντων μερών (ίνες και

συνδετική μήτρα), είναι αναγκαία μικροσκοπική θεώρηση του μέσου κατά την οποία το σύνθετο ινώδες αντιμετωπίζεται ως ανομοιογενές, με διακριτές φάσεις, υλικό.

Η δεύτερη υπόθεση στην οποία στηρίζεται η μαθηματική ανάλυση, αφορά την καταστατική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του ανισότροπου ινώδους συνθέτου υλικού, το οποίο θεωρείται ως γραμμικώς ελαστικό μέσο έως της αστοχίας του.

Ανισότροπο ελαστικό μέσο καλείται ομογενές όταν παράλληλες διευθύνσεις που περνούν από διαφορετικά σημεία του έχουν τις ίδιες ελαστικές ιδιότητες. Ισοδυνάμως, δύο απειροστά στοιχεία του μέσου στην μορφή ορθογωνίων παραλληλεπιπέδων θα έχουν τις ίδιες ελαστικές ιδιότητες όταν οι πλευρές τους είναι παράλληλες. Από την θεωρία ελαστικότητας είναι γνωστό ότι η καταστατική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, υπό την προϋπόθεση απειροστά μικρών παραμορφώσεων, εκφράζεται από τον γενικευμένο νόμο Hooke.

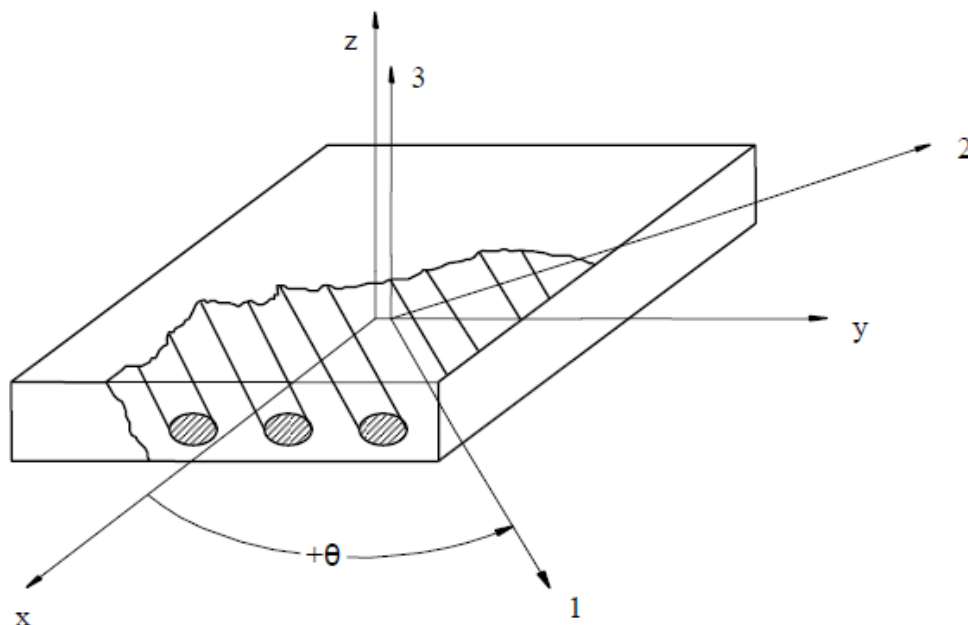
Τυπικό παράδειγμα κυλινδρικής ορθοτρόπου (εγκαρσίως ισοτρόπου) μέσου είναι ο λεπτότοιχος κύλινδρος του Σχήματος 3.1 που παράγεται με τεχνική περιελίξεως ινών.



Σχήμα 3.1: Κύλινδρος παραγόμενος με περιέλιξη συνεχών ινών. Κυλινδρικός ορθότροπο μέσο.

Η γωνία περιελίξεως των ινών ως προς τον άξονα του κυλίνδρου είναι επιλογή του σχεδιαστή μηχανικού και προφανώς εξαρτάται από τα φορτία λειτουργίας. Συνήθως, τέτοιου είδους κατασκευαστικά στοιχεία αποτελούνται από πολλαπλές στρώσεις (περιελίξεις) διαφορετικών γωνιών περιελίξης. Για την περίπτωση του Σχήματος 3.1, όπου θεωρείται ότι η διεύθυνση των ινών είναι κάθετη στον άξονα του κυλίνδρου.

Όμως, στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων ενός ορθοτρόπου υλικού, έχουν τους άξονες συμμετρίας του μέσου τους σε τυχαίες διευθύνσεις ως προς το φυσικό σύστημα αναφοράς του παραπάνω παραδείγματος στο Σχήμα 3.1. Στα περισσότερα προβλήματα, όμως, το φυσικό σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο γίνεται η επίλυση ή είναι γνωστά τα εξωτερικά φορτία διαφέρει του κυρίου συστήματος συμμετρίας του υλικού. Παραδείγματος χάριν, αυτό συμβαίνει στην λεπτή στρώση με τυχαία διεύθυνση ινών (off-axis lamina) ως προς το σύστημα γεωμετρικής συμμετρίας (φυσικό) του Σχήματος 3.2. Το κύριο σύστημα συμμετρίας είναι το (1,2,3) ενώ το φυσικό σύστημα αναφοράς το (x, y, z). Ο μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων επιτελείται δια περιστροφής του κυρίου συστήματος περί τον άξονα 3 κατά γωνία $-\theta$.



Σχήμα 3.2: Θετική περιστροφή του κυρίου συστήματος αξόνων ως προς το τυχαίο (x, y, z) σύστημα αναφοράς.

Συμπερασματικά, η μελέτη της μεταβολής των τεχνικών ελαστικών σταθερών γενικώς ορθοτρόπου στρώσεως (off-axis) συναρτήσει της διευστάσεως των ινών ως προς το φυσικό σύστημα συντεταγμένων είναι αναγκαίο να γίνεται για κάθε διαφορετικό υλικό. Οι τιμές των ελαστικών ιδιοτήτων στο μετασχηματισμένο σύστημα συντεταγμένων εξαρτώνται από αυτές του κυρίου συστήματος συμμετρίας και άρα δεν γίνεται να εξαχθούν γενικές αρχές μελετώντας απλώς και μόνο ένα υλικό. Τα συμπεράσματα από μια τέτοια ανάλυση βοηθούν στην κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των off-axis στρώσεων σαν εν γένει ανισότροπα μέσα αλλά κυρίως αναδεικνύουν τα ιδιαίτερα εκείνα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε στρώσεως βάσει των οποίων αυτή επιλέγεται ως στοιχείο πολύστρωτου πλακός. Η συνθετότητα των υπολογισμών και ο όγκος της δουλειάς του μηχανικού αυξάνει δουλεύοντας με σύνθετα υλικά αλλά οι καινούργιοι βαθμοί ελευθερίας που παρέχονται στις επιλογές για τα υλικά και οι δυνατότητες για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού επίσης αυξάνουν κατά πολύ σε σχέση με τα συμβατικά τεχνικά υλικά.

Δηλαδή, ο σχεδιαστής μηχανικός στην περίπτωση των ινωδών συνθέτων υλικών διαμορφώνει ο ίδιος τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου υλικού του επιλέγοντας καταλλήλως την διάταξη και την αναλογία των off-axis στρώσεων που απαρτίζουν την πολύστρωτη κατασκευή.

Τέλος, από τα παρακάτω παραδείγματα αλλά και από τη μέχρι τώρα θεωρία, η οποία έχει εξηγηθεί στα Κεφάλαια 2 και 3 μπορεί να γίνει κατανοητό πως Για τον υπολογισμό του lay-up λαμβάνονται υπόψιν πολλές παράμετροι που επηρεάζουν την τελική συμπεριφορά του συνθέτου:

- Αντοχή σε φορτία ανάλογα με την εφαρμογή του προϊόντος.
- Σύστημα ρητίνης (ρητίνη, σκληρυντής, καταλύτης).
- Τύπος ινών (διαφορετικά πάχη, διαφορετική συμπεριφορά κατά την περιέλιξη).
- Αριθμός μπομπινών που χρησιμοποιούνται (6,12,24).
- Ταχύτητα περιέλιξης.

- Τάνυση ινών του ηλεκτρονικού tensioner.
- Θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος.

Παρακάτω ακολουθούν κάποια παραδείγματα, χωρίς να εμφανίζονται οι σύνθετοι μαθηματικοί υπολογισμοί⁷:

- 1) Εσωτερική διάμετρος ID=350mm
Εξωτερική διάμετρος OD=378,3mm
Μήκος L=4000mm
Μέτρο ελαστικότητας E1=98Gpa

Layers N°	Angle
1	rad +/-
2	45
3	45
4	Rad
5	45
6	45
7	rad +/-
8	45
9	45
10	rad
11	45
12	45
13	rad +/-
14	45
15	45
16	rad
17	45
18	45

Πίνακας 3.4: Αριθμός στρώσης και γωνία πλέξης της εκάστοτε στρώσης.

Στον Πίνακα 3.4 δίδεται ο αριθμός των στρώσεων (Lamina) για να κατασκευαστεί το τελικό πολύστρωτο τεμάχιο (Laminate), καθώς και η γωνία περιέλιξης της κάθε στρώσης, ώστε να εξαχεται ως τελικό προϊόν ένα τεμάχιο με τα χαρακτηριστικά που δίδονται πριν από το Πίνακα 3.4. Όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα που θα δοθούν στη συνέχεια ο υπολογισμός των στρώσεων και των γωνιών περιελίξεως που απαιτούνται για την κατασκευή κάθε τεμαχίου είναι πολύ σύνθετος και απαιτεί από τον σχεδιαστή μηχανικό εξατομικευμένη μελέτη για το κάθε τεμάχιο ξεχωριστά.

⁷ Για τη ορθή θεωρητική μελέτη των πολύστρωτων σύνθετων υλικών, είναι απαραίτητη η γνώση θεωρίας ταυστών και της κλασικής θεωρίας κελύφων (classical lamination theory).

- 2) Εσωτερική διάμετρος ID=7mm
 Εξωτερική διάμετρος OD=90mm
 Μήκος L=5400mm
 Μέτρο ελαστικότητας E1=100Gpa

Layers N°	Angle
1	12
2	12
3	rad
4	12
5	12
6	rad
7	12
8	12
9	rad
10	12

Πίνακας 3.5: Αριθμός στρώσης και γωνία πλέξης της εκάστοτε στρώσης.

- 3) Εσωτερική διάμετρος ID=110mm
 Εξωτερική διάμετρος OD=120mm
 Μήκος L=6300mm
 Μέτρο ελαστικότητας E1=110Gpa

Layers N°	Angle
1	12
2	12
3	rad
4	12
5	12
6	rad
7	12

Πίνακας 3.6: Αριθμός στρώσης και γωνία πλέξης της εκάστοτε στρώσης.

- 4) Εσωτερική διάμετρος ID=110mm
 Εξωτερική διάμετρος OD=135mm
 Μήκος L=6500mm
 Μέτρο ελαστικότητας E1=120Gpa

Layers N°	Angle	Layers N°	Angle
1	12	7	12
2	12	8	12
3	rad	9	rad
4	12	10	12
5	12	11	rad
6	rad	12	12

Πίνακας 3.7: Αριθμός στρώσης και γωνία πλέξης της εκάστοτε στρώσης.

- 5) Εσωτερική διάμετρος ID=140mm
 Εξωτερική διάμετρος OD=149mm
 Μήκος L=9000mm
 Μέτρο ελαστικότητας E1=105Gpa

Layers N°	Angle
1	rad
2	8
3	8
4	rad
5	8
6	8
7	rad
8	rad
9	rad
10	rad
11	rad

Πίνακας 3.8: Αριθμός στρώσης και γωνία πλέξης της εκάστοτε στρώσης

- 6) Εσωτερική διάμετρος ID=210mm
 Εξωτερική διάμετρος OD=234mm
 Μήκος L=3165mm
 Μέτρο ελαστικότητας E1=110Gpa

Layers N°	Angle
1	55
2	55
3	rad
4	55
5	55
6	rad
7	55
8	55
9	rad
10	55
11	55
12	rad
13	55
14	55
15	rad
16	55
17	55

Πίνακας 3.9: Αριθμός στρώσης και γωνία πλέξης της εκάστοτε στρώσης.

4. Ακραξόνια

Η σημασία της λέξης «ακραξόνιο» φαίνεται από την ετυμολογία της λέξης. Τα δύο της συνθετικά, άκρο + άξονας, δηλώνουν ότι είναι εξαρτήματα στο άκρο του άξονα. Στο Κεφάλαιο 2, έγινε λόγος για τα σύνθετα υλικά, αλλά κατέστη σαφές ότι η παρούσα Διπλωματική ασχολείται με τα κυλινδρικά ινοπλισμένα σύνθετα υλικά. Επομένως τα ακραξόνια, στην περίπτωση αυτή, είναι τα εξαρτήματα, τα οποία τοποθετούνται στα άκρα των συγκεκριμένων αξόνων και χρησιμεύουν ως διεπαφή του σύνθετου υλικού με τη συνολική εφαρμογή, της οποίας είναι μέρος. Για να ενωθούν αυτά τα δύο υλικά, το μεταλλικό ακραξόνιο και ο ανθρακονημάτινος άξονας, είναι απαραίτητο και τα δυο εξαρτήματα να έχουν κατασκευαστεί και επεξεργαστεί άσσογα, ώστε το ενιαίο αποτέλεσμα να είναι χρήσιμο. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι υπάρχει μεγάλη ανάγκη για μηχανουργικές κατεργασίες μεγάλης και σταθερής ακρίβειας.

Στο παρόν Κεφάλαιο, γίνεται μια γνωριμία με τις κατεργασίες. Στη συνέχεια εξηγούνται οι τρόποι, με τους οποίους μπορεί να ενωθεί το σύνθετο με το συμβατικό υλικό. Τέλος εξηγούνται οι αρχές με τις οποίες έγιναν οι κατεργασίες.

4.1 Ιστορική αναδρομή μηχανικών διαμορφώσεων

Η ιστορία του ανθρώπινου είδους είναι στενά συνδεδεμένη με τις κατεργασίες των μετάλλων, με τις κατεργασίες αυτές ο άνθρωπος κατασκεύασε εργαλεία και όπλα που του έδωσαν τη δυνατότητα να επιβιώσει ανάμεσα σε δυνατότερα είδη, συλλέγοντας τροφή και κάνοντας τη ζωή του ασφαλέστερη, αλλά και πλήθος άλλων χρηστικών αντικειμένων που του έκαναν τη ζωή πιο άνετη. Μια καθαρή ματιά στην ιστορία του ανθρώπου φανερώνει ότι ουσιαστικά η ανακάλυψη των υλικών και των τεχνικών επεξεργασίας τους είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας της εξέλιξης του.

Στις ανοιχτές εκτάσεις οι αρχέγονοι πρόγονοι μας μάλλον αποτελούσαν οι ίδιοι θηράματα άγριων ζώων παρά διεκδικούσαν τη λεία τους. Όταν, πριν από 2.6 εκατομμύρια χρόνια εμφανίστηκαν τα πρώτα ακατέργαστα λίθινα εργαλεία, οι κανόνες του παιχνιδιού άλλαξαν. Περίπου εκατό χιλιάδες χρόνια αργότερα, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν εργαλεία για να αφαιρούν κρέας και μεδούλι από τα κουφάρια μεγάλων θηλαστικών. Αυτές οι τροφές υψηλής θερμιδικής αξίας ήταν ιδανικές για την ανάπτυξη του μεγάλου εγκεφάλου που χαρακτηρίζει το μεταγενέστερο Homo. Η χρήση των εργαλείων, που είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή της διατροφής, είχε κοσμογονικές επιπτώσεις.

Οι κατεργασίες των μετάλλων ακολούθησαν δια μέσου των αιώνων μια εξελικτική πορεία συνοδεύοντας τις αντίστοιχες ανακαλύψεις των υλικών. Αυτές οι κατεργασίες δεν ήταν μόνο απλές όπως η σφυρηλάτηση, αλλά ήταν πολλές φορές και σύνθετες, όπως η χύτευση.

Από την εποχή της Αναγέννησης (1450μ.Χ.) και έως τη βιομηχανική επανάσταση (1850μ.Χ.), ένας πολύ μεγάλος αριθμός ανακαλύψεων έθεσαν διαδοχικά τις βάσεις για τον τεχνολογικό πολιτισμό του σήμερα. Σε αυτές τις ανακαλύψεις το μεγαλύτερο μέρος αφορά εξελίξεις στην επεξεργασία των υλικών την κατασκευή εργαλείων και την υλοποίηση νέων μεθόδων και τεχνικών μορφοποίησης προϊόντων. Σήμερα, οι τεράστιες δυνατότητες που διαθέτουν οι εργαλειομηχανές και οι αντίστοιχες καθοδηγήσεις τους, προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων μηχανικών διαμορφώσεων.

Ειδικά ο τόρνος, του οποίου γίνεται χρήση στην παρούσα εργασία, χρονολογείται τουλάχιστον από την ακμή της Αιγύπτου, και με γνωστή χρήση από Ασσύριους, Έλληνες, Ρωμαίους και Βυζαντινούς, πρωτοεμφανίστηκε περίπου το 1300 π.Χ. όταν οι Αιγύπτιοι σκέφτηκαν

να χρησιμοποιήσουν δύο άτομα για την κατεργασία, ένα να περιστρέφει με τη βοήθεια σχοινιού το κατεργαζόμενο κομμάτι και το δεύτερο άτομο να κατεργάζεται το κομμάτι αυτό με τη βοήθεια ενός κοφτερού εργαλείου.

Οι Ρωμαίοι προχώρησαν την ιδέα αυτή χρησιμοποιώντας για την περιστροφή ένα τόξο που το μετακινούσε ο χειριστής, πάντα όμως χρησιμοποιώντας τη μυϊκή δύναμη. Στο Μεσαίωνα, ένα πετάλι αντικατέστησε την τórνευση με το χέρι, απελευθερώνοντας τα χέρια του χειριστή ώστε να συγκρατεί με ασφάλεια και σταθερότητα το κοπτικό εργαλείο. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα παράδειγμα τórνου εκείνης της εποχής. Αυτή η μικρή διαφοροποίηση στην τεχνολογία κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα θα αντικατασταθεί στη συνέχεια από την αλματώδη πρόοδο που χαρακτήρισε η εποχή της Αναγέννησης, όπου έγιναν σημαντικές και μεγάλες αλλαγές στις οποίες στηρίζεται η σημερινή πραγματικότητα.



Σχήμα 4.1: Ποδοκίνητη τórνευση.

Τα τελευταία 20 χρόνια με την είσοδο πλέον της ψηφιακής καθοδήγησης ακόμα και σε μικρά μηχανουργεία, από την απλή διάτρηση έως την πιο πολύπλοκη επεξεργασία ανάγλυφων επιφανειών, χρησιμοποιούνται σήμερα απλές και φθηνές ή σύνθετες και ακριβές εργαλειομηχανές CNC. Με την εξέλιξη αυτή οι παραδοσιακές δομές των μηχανουργείων την εικοσαετία αυτή διαμορφώθηκαν ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εργαλειομηχανών αλλά και τις παραγωγικές ανάγκες του σημερινού κόσμου.

Η συνεργασία των μηχανουργικών κατεργασιών με NC, CNC και DNC μηχανές με άλλες λειτουργίες που υποστηρίζονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή, οδήγησαν στη δημιουργία των ολοκληρωμένων με υπολογιστή συστημάτων παραγωγής (CIM). Έτσι, από τη σύλληψη ενός νέου προϊόντος, αυτό σχεδιάζεται, εξελίσσεται και βελτιστοποιείται μέσω των συστημάτων ανάπτυξης (CAE), που περιλαμβάνουν συστήματα σχεδίασης (CAD) και προγράμματα υπολογισμών αντοχής με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Κατόπιν, ο προγραμματισμός των κατεργασιών γίνεται με συστήματα CAM, λαμβάνοντας υπόψη τεχνολογικές παραμέτρους των κατεργασιών αυτών.

Τα σύγχρονα μηχανουργεία εντάσσουν τις NC, CNC και DNC εργαλειομηχανές σε ακόμα πιο σύνθετες δομές, που ονομάζονται ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS), τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν ηλεκτρονικό σχεδιασμό της παραγωγής, αυτόματες μεταφορικές διατάξεις και αποθήκες, βιομηχανικά ρομπότ και διατάξεις ποιοτικού ελέγχου. Όλα αυτά καθοδηγούνται και εποπτεύονται από έμπειρους Μηχανικούς και τεχνικούς με τη βοήθεια δικτύου ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με τον τρόπο αυτόν, η σύγχρονη παραγωγή μετατρέπεται σε ελεγχόμενη και απλοποιημένη διαδικασία. Η χρήση της τεχνολογίας λογισμικού και υπολογιστών με στοιχεία τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), οδηγεί στην πρώτη έννοια του αυτόματου εργοστασίου, στο οποίο η συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα στη λήψη αποφάσεων και στην καθοδήγηση μειώνεται ακόμα περισσότερο.

4.2 Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού

Με τον όρο κατεργασίες με αφαίρεση υλικού ή κοπής, εννοούνται μια σειρά από τεχνολογίες που ουσιαστικά έχουν σκοπό να αφαιρέσουν ποσότητα μη επιθυμητού υλικού από ένα αρχικό τεμάχιο. Οι κατεργασίες κοπής χρησιμοποιούνται συνήθως για να μετατρέψουν ένα τεμάχιο που είναι χυτό, σφυρήλατο ή προερχόμενο από άλλες πρωτογενείς διαδικασίες διαμόρφωσης (Σχήμα 4.2), σε τελικό προϊόν σύμφωνα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του. Γενικά σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις που στο τελικό προϊόν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, αυτή έχει επέλθει μετά από μια κατεργασία με αφαίρεση υλικού.



Σχήμα 4.2: Οι διαδικασίες διαμόρφωσης από αριστερά προς τα δεξιά: χύτευση, σφυρηλάτηση, απότμηση, όλκη και έλαση.

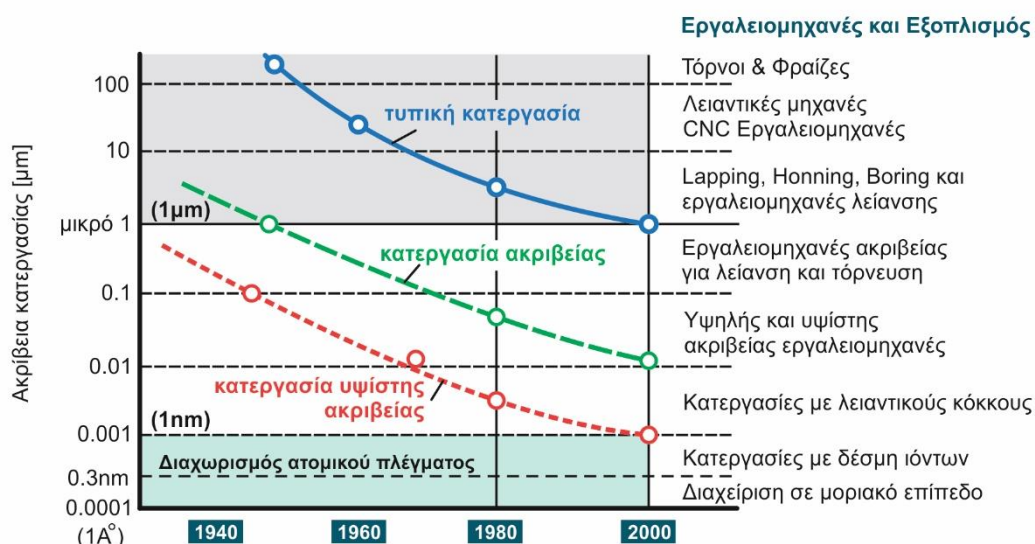
Η πλειοψηφία των βιομηχανικών εφαρμογών των κατεργασιών κοπής αφορά μεταλλικά προϊόντα και εφαρμόζεται με τη βοήθεια ειδικών μηχανήματων που προσφέρουν την ισχύ η οποία απαιτείται για την κοπή. Οι μηχανές αυτές ονομάζονται εργαλειομηχανές και κάθε μια από αυτές έχει και διαφορετική φιλοσοφία υλοποίησης της κοπής, προσφέροντας συγκεκριμένη ανά κατεργασία κινηματική ανάμεσα στους δύο βασικούς παράγοντες της κοπής: το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Ένα βασικό κριτήριο για την ταξινόμηση των κατεργασιών κοπής, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 4.3 είναι η μορφή του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, με βάση το κριτήριο αυτό, οι κατεργασίες κοπής διακρίνονται σε εκείνες στις οποίες το κοπτικό εργαλείο έχει γεωμετρικά καθορισμένη κόψη και σε εκείνες στις οποίες η κόψη είναι γεωμετρικά ακαθόριστη.



Σχήμα 4.3: Οι διαδικασίες αφαίρεσης υλικού από αριστερά προς τα δεξιά: διάτρηση, τórνευση, πλάνιση, φρεζάρισμα, πριόνισμα.

Στην ξέφρενη πορεία των τεχνολογικών εξελίξεων τα τελευταία 50 χρόνια η έρευνα το κατεργασιών κοπής επικεντρώθηκε στην διερεύνηση της σχέσης εργαλείου – κατεργαζόμενου τεμαχίου, του μηχανισμού μορφοποίησης του αποβλήτου, των μηχανισμών φθοράς και της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων καθώς και το χαρακτηρισμό της τελικά κατεργασμένης επιφανειακής στοιβάδας. Σήμερα, υπάρχει πλέον η ανάγκη για επανεξέταση όλου του φάσματος των τεχνολογιών κοπής, ώστε να διασφαλιστεί ότι αυτές ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας και κατ' επέκταση της κοινωνίας. Με την ενδελεχή μελέτη των τεχνολογιών παραγωγής, αλλά και του management, που επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγική διαδικασία, προέκυψαν δυνατότητες για ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών, που κατέληξα στη μείωση των διαστάσεων των παραγόμενων προϊόντων, στη βελτίωση της ποιότητας, σε «σφιχτότερες» ανοχές και κατασκευαστική ακρίβεια, σε μείωση του κόστους και του βάρους των προϊόντων. Το διάγραμμα, το οποίο δημιουργήθηκε από τον Taniguchi, παρουσιάζει την εξέλιξη της στις τεχνολογίες παραγωγής σε σχέση με την ακρίβεια στην κατεργασία που επιτυγχάνεται και φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ακρίβεια κατεργασίας των μηχανουργικών τεχνολογιών κατά την πορεία των χρόνων.

Την τελευταία δεκαετία, η υψηλής ακρίβειας εργαλειομηχανές που ελέγχονται με ψηφιακή καθοδήγηση από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, μπορούν να τοποθετούν το κοπτικό εργαλείο σε σχέση με το κατεργαζόμενο κομμάτι με ακρίβεια τοποθέτησης της τάξης του 1 nm. Παράλληλα, Η επιτυγχανόμενη ακρίβεια πραγματοποιείται πλέον, όχι μόνο με τη χρήση κοπτικών εργαλείων ή εργαλείων λείανσης ή απόξεσης, αλλά και με ενεργειακές μεθόδους όπως

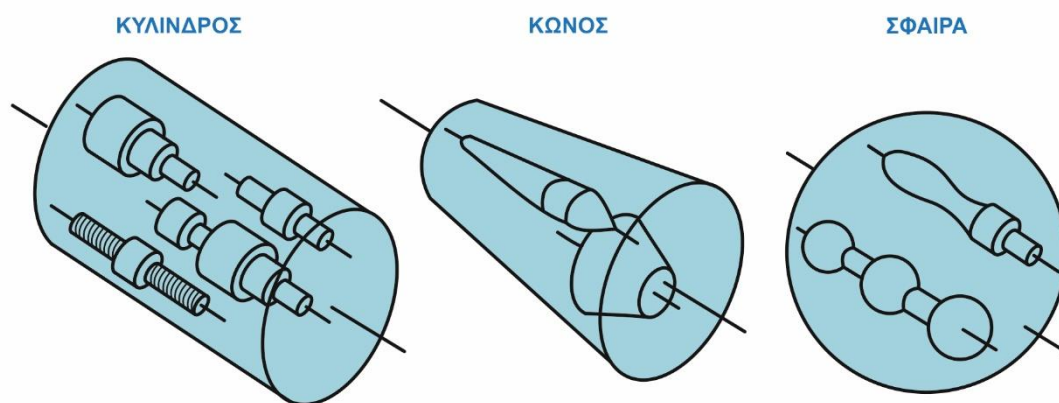
η κατεργασία με δέσμη όντων, με δέσμη ηλεκτρονίων καθώς και με τεχνικές σάρωσης της κατεργασμένης επιφάνειας και διαχείριση σε επίπεδο μορίων.

Από την άλλη μεριά, η συνεχής ερευνητική δραστηριότητα των στον τομέα των υλικών ανακαλύπτει σήμερα νέους τύπους υλικών που τροφοδοτούν την βιομηχανία, ικανοποιώντας την σύγχρονη ανάγκη για χαμηλής πυκνότητας υλικά, άρα και μειωμένου βάρους (όπως τα σύνθετα ινοπλισμένα υλικά που μελετώνται στο Κεφάλαιο 2), με υψηλή όμως αντοχή και μεγάλη κατεργασιμότητα.

4.3 Τόρνευση

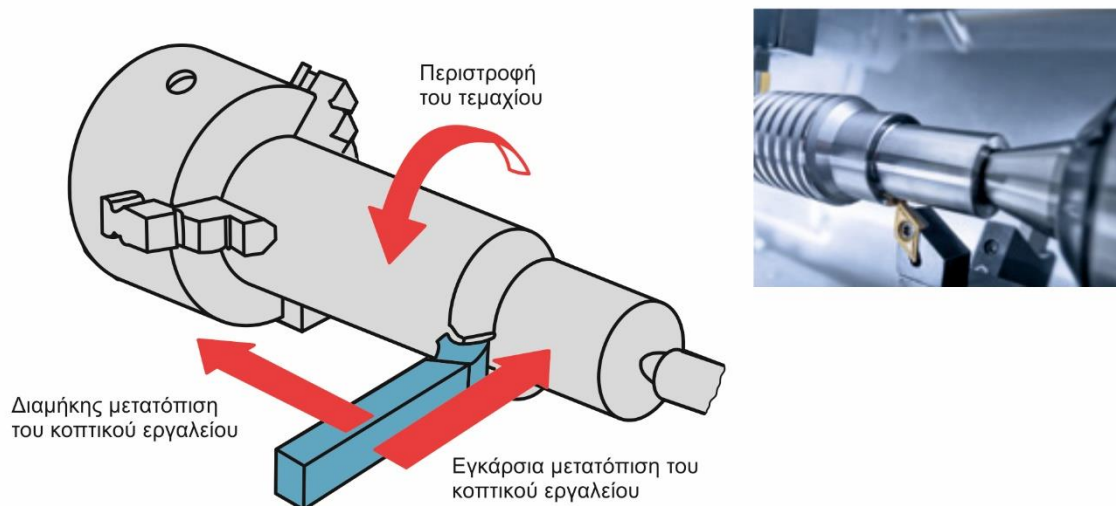
Τα δοκίμια που της παρούσας Διπλωματικής, κατασκευάστηκαν με τη διαδικασία της τόρνευσης. Παρακάτω γίνεται μια επεξήγηση της συγκεκριμένης διαδικασίας κοπής.

Με τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής κατά κανόνα με κυκλική διατομή. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι γεωμετρίες, που μπορούν να κατασκευαστούν με την κατεργασία της τόρνευσης.



Σχήμα 4.5: Γεωμετρίες κατασκευασμένες με τη διαδικασία της τόρνευσης.

Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Με αυτόν τον τρόπο συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκου μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές κατά την τόρνευση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6. Το εγκάρσιο βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο αποτελεί και το βάθος κοπής. Η ταχύτητα της κύριας κίνησης κοπής είναι η περιστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 4.6: Οι κινήσεις που του εργαλείου και του τεμαχίου κατά τη διαδικασία της τόννευσης.

Οι διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει το κατεργαζόμενο τεμάχιο με την τόννευση, απαιτούν διαφορετικό συνδυασμό κινήσεων, όπως και χρησιμοποίηση του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται, εξαρτάται από το είδος της παραγόμενης επιφάνειας αλλά και από το εάν η τόννευση είναι εξωτερική ή εσωτερική στο κομμάτι.

Οι μορφές τόννευσης, οι οποίες υλοποιούνται με ειδικά κάθε φορά κοπτικά εργαλεία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω και παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6:

- Απλή τόννευση: πρόκειται για διαμήκη τόννευση γενικού περιγράμματος που περιλαμβάνει ευθείες ή τόξα αλλά και την κωνική τόννευση, όπως και την τόννευση για σπάσιμο γωνίας και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κυλινδρικών, κωνικών ή διάφορων μορφών τεμαχίων όπως άξονες, άτρακτοι, κλπ.
- Τόννευση προσώπου: είναι εγκάρσια τόννευση στο πρόσωπο του τεμαχίου με στόχο τη δημιουργία επίπεδης επιφάνειας, κάθετης στον άξονά του.
- Τόννευση μορφής: είναι τόννευση με εργαλείο μορφής που αποτυπώνει τη μορφή του στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Χρησιμοποιείται για κατεργασία ειδικών λειτουργικών μορφών ή και για αισθητικούς λόγους.
- Boring: έχει στόχο τη διεύρυνση οπών ή κυλινδρικών κοιλοτήτων που έχουν κατεργαστεί με πρότερη κατεργασία ή τη δημιουργία εσωτερικών εκ περιστροφής αυλακώσεων.
- Διάτρηση : είναι διάτρηση οπής η οποία στη συνέχεια μπορεί να ακολουθηθεί από boring ώστε να διευρυνθεί ή να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας της.
- Απότμηση: πρόκειται για την αποκοπή του έτοιμου κατεργασμένου τεμαχίου ώστε πιθανά να επαναληφθεί η διαδικασία σε νέο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Σπειρωτόμηση: η κοπή εσωτερικού ή εξωτερικού σπειρώματος.
- Τόννευση ρίκνωσης: η κατεργασία δημιουργίας ρίκνωσης σε κυλινδρικές επιφάνειες τεμαχίων για την αποφυγή ολίσθησης, στις θέσεις εκείνες που χρησιμοποιούνται ως λαβές, χειριστήρια, κ.λπ.

Η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις κινήσεις του τεμαχίου και του εργαλείου για τη τόννευση, είναι ο τόννος. Ο τόννος είναι μια από τις περισσότερο παραγωγικές εργαλειομηχανές και το 40% των κατεργασιών κοπής των μετάλλων γίνονται σε αυτόν. Το

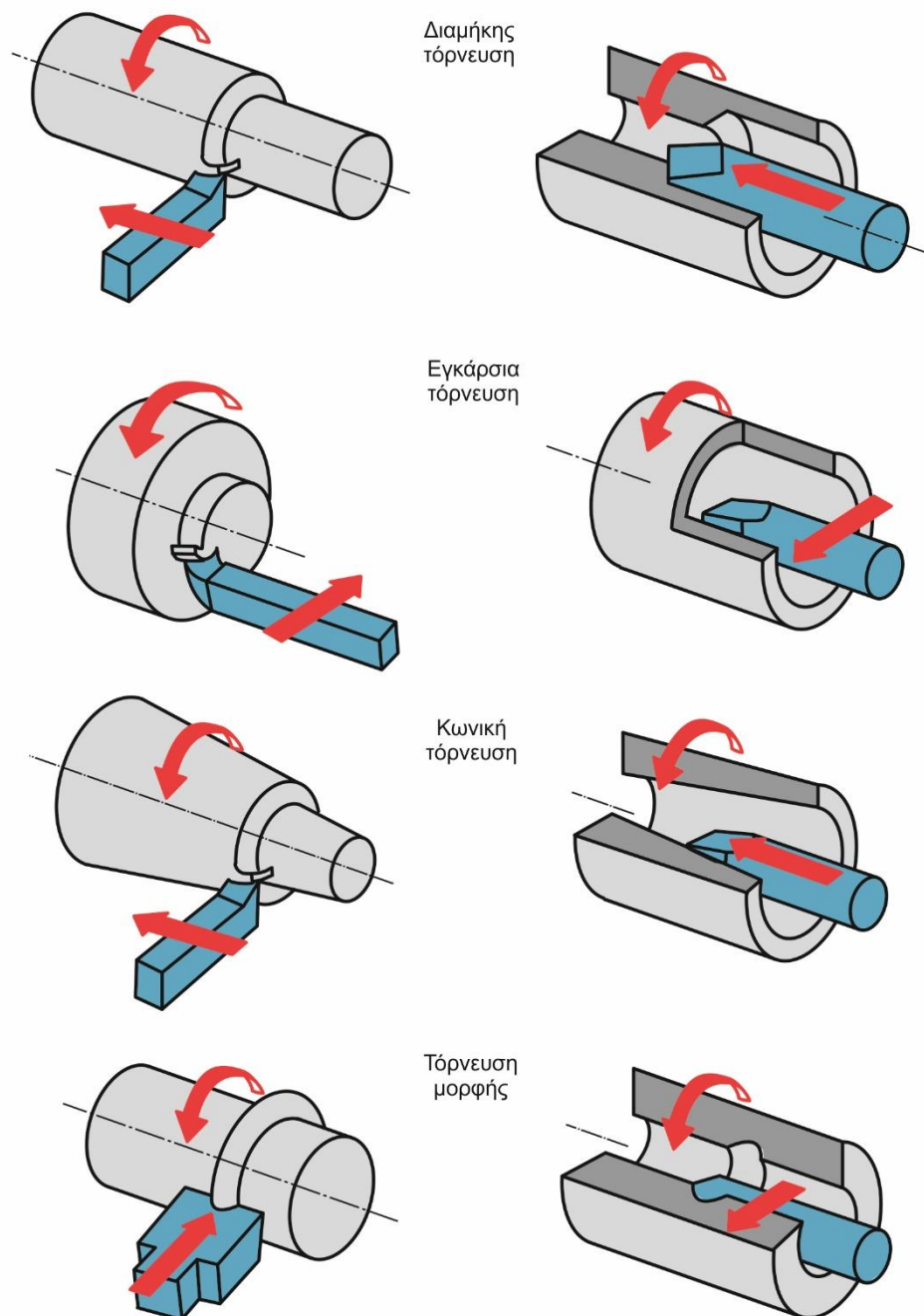
μέγεθος του τórνου εκτιμάται βασικά από δυο χαρακτηριστικά: i) τη μέγιστη διάμετρο τεμαχίου που μπορεί να δεθεί στους σφικτήρες και να περιστρέφει γύρω από τους οδηγούς ii) το μήκος κρεατιού, το οποίο, είναι αναγκαίο να επισημανθεί, πως δεν αντιστοιχεί και στο μέγιστο μήκος τεμαχίου προς κατεργασία, αφού και αυτό καθορίζεται από την απόσταση των κέντρων του κιβωτίου ταχυτήτων και του κεντροφορέα. Άλλα χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο είναι ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός στροφών που μπορεί να επιτευχθεί, το πλήθος των ταχυτήτων, η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα και το συνολικό του βάρος.

Οι τórνοι, όπως και οι περισσότερες εργαλειομηχανές, μπορεί να είναι συμβατικοί, που σημαίνει ότι καθοδηγούνται από τον χειριστή τους, ο οποίος κάνει όλες τις απαραίτητες κινήσεις και ρυθμίσεις για την κατεργασία ή είναι τórνοι ψηφιακά καθοδηγούμενοι όπου οι κινήσεις αλλά και οι ρυθμίσεις απαιτούν πολύ μικρή συμμετοχή του παραδοσιακού χειριστή, μια και τις αναλαμβάνει μια ηλεκτρονική μονάδα καθοδήγησης που τη χειρίζεται προγραμματιστής. Η τεχνολογία όμως της κοπής κατά βάση παραμένει η ίδια. Έτσι, οι επιλεγόμενες ταχύτητες κοπής, οι προώσεις, τα κοπτικά εργαλεία κ.λπ., καθορίζονται και στις δύο περιπτώσεις με βάσει την υπάρχουσα γνώση και εμπειρία. Η αυτοματοποίηση αυτή των κατεργασιών που γίνεται τις τελευταίες δεκαετίες, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να καταργήσει την αναγκαιότητα της γνώσης των υλικών, των κατάλληλων συνθηκών κοπής, της συμπεριφοράς της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και γενικά αυτού που ονομάζεται τεχνολογία κοπής.

Οι τórνοι με ψηφιακή καθοδήγηση προγραμματίζονται κυρίως σε δύο άξονες:

- Στον άξονα X που ελέγχει την εγκάρσια κίνηση του εργαλείου.
- Τον άξονα Z που ελέγχει τη διαμήκη κίνηση το εργαλείου.

Επειδή στα τεμάχια που κόπηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία έγινε χρήση του κεντροφορέα, είναι αναγκαίο να περιγράψει συντόμως. Ο κεντροφορέας ή κουκουβάγια (tailstock), λοιπόν, χρησιμοποιείται για την υποστήριξη μεγάλου μήκους τεμαχίων ή επίσης για διάτρηση ή γλύφανση με τη χρησιμοποίηση του κατάλληλου εργαλείου. Ο κεντροφορέας έχει τη δυνατότητα κίνησης στο μήκος του κρεατιού του τórνου και μπορεί να ασφαλίσει σε οποιαδήποτε θέση με τη χρήση ενός συστήματος ασφάλισης. Ο κώνος στον οποίο ασφαλίζει η πόντα του κεντροφορέα, δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούνται στη θέση της πόντας, κεντροτρύπανα ή άλλα κοπτικά εργαλεία. Οι Σύγχρονοι κεντροφορείς, όπως αυτός στην Εικόνα, περιλαμβάνει εδράσεις ακριβείας ενώ κατασκευάζονται από σφυρήλατους χαλυβες εργαλείων με μεγάλη αντίσταση σε φθορά.



Σχήμα 4.6: Διάφορα είδη τόννευσης.

4.4 Ο αριθμητικός έλεγχος (NC)

Μια μορφή NC χρησιμοποιήθηκε κατά τις πρώτες μέρες της βιομηχανικής επανάστασης, από το 1725, όταν πλεκτομηχανές στην Αγγλία χρησιμοποιούσαν διάφορες κάρτες για να σχηματίζουν διάφορα σχήματα σε υφάσματα. Ακόμη νωρίτερα, σε καθεδρικούς ναούς στην Ευρώπη και σε μερικές εκκλησίες στην Αμερική χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενα τύμπανα με καρφίδες σε προκαθορισμένες θέσεις για να ελέγχουν τις καμπάνες.

Η αρχή της μαζικής παραγωγής, που αναπτύχθηκε από τον Eli Whitney, μετέφερε πολλές λειτουργίες και εργασίες, που αρχικά εκτελούνταν από ειδικευμένους τεχνίτες, στην εργαλειομηχανή. Καθώς αναπτύσσονταν καλύτερες και ακριβέστερες εργαλειομηχανές, το σύστημα της εναλλασσόμενης παραγωγής υιοθετήθηκε γρήγορα από τη βιομηχανία έτσι ώστε να παράγονται μεγάλες ποσότητες όμοιων εξαρτημάτων. Στο δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα,

αναπτύχθηκε μια μεγάλη ποικιλία εργαλειομηχανών για τις βασικές λειτουργίες κοπής μετάλλου, όπως η τόνρευση. Καθώς αναπτύσσονταν καλύτερες μονάδες υδραυλικού και ηλεκτρονικού ελέγχου, έγινε δυνατός ο καλύτερος έλεγχος των ολισθητήρων των μηχανών.

Η Αμερικανική Πολεμική Αεροπορία βρήκε ότι τα πολύπλοκα σχέδια και σχήματα των ανταλλακτικών των αεροπλάνων (λεπίδες των ελικοπτέρων ή εξαρτήματα των πυραύλων) προκαλούσαν προβλήματα στους κατασκευαστές, οι οποίοι δεν μπορούσαν να τηρήσουν τα χρονοδιαγράμματα. Έτσι, πολύ σύντομα το MIT κατασκεύασε την πρώτη κατακόρυφη άτρακτο για κατασκευή εξαρτημάτων με ταυτόχρονες κινήσεις κοπής της μηχανής σε τρεις άξονες.

4.4.1 Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

Οι κινήσεις μια εργαλειομηχανής που κατασκευάζει ένα προϊόν μπορεί να δύο ειδών, είτε σημείου προς σημείο (κινήσεις σε ευθεία γραμμή), είτε συνεχούς διαδρομής (κινήσεις περιγράμματος).

Το Καρτεσιανό, ή ορθογώνιο, επιτρέπει την περιγραφή οποιουδήποτε σημείο να περιγραφεί με μαθηματικούς όρους από οποιοδήποτε άλλο σημείο κατά μήκος τριών κάθετων μεταξύ τους αξόνων. Αυτό ταιριάζει τέλεια στις εργαλειομηχανές επειδή η κατασκευή τους βασίζεται σε τρεις άξονες κίνησης και σε έναν άξονα περιστροφής. Το σύστημα συντεταγμένων στηρίζεται υπερβολικά στην χρήση ορθογώνιων συντεταγμένων επειδή ο προγραμματιστής μπορεί να προσδιορίσει ακριβώς κάθε σημείο μιας κατασκευής.

Όταν σε ένα εξάρτημα προσδιορισθούν τα σημεία, χρησιμοποιούνται δύο τεμνόμενες ευθείες, μια κατακόρυφη και μια οριζόντια. Οι ευθείες αυτές πρέπει να είναι κάθετες μεταξύ τους και το σημείο όπου τέμνονται ονομάζεται αρχή ή σημείο μηδέν.

Μερικές κατευθυντήριες οδηγίες για να κατανοεί ο οποιοσδήποτε καλύτερα την κατασκευή ενός εξαρτήματος, από τον μηχανικό μέχρι τον χειριστή της μηχανής είναι:

1. Χρήση σημείου αναφοράς πάνω στο ίδιο το εξάρτημα. Με τον τρόπο αυτό γίνεται καλύτερος και ευκολότερος ποιοτικός έλεγχος.
2. Χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων με καθορισμό των επιπέδων X, Y, Z, για να οριστούν όλες οι επιφάνειες του εξαρτήματος
3. Δημιουργία επιπέδου αναφοράς κατά μήκος των επιφανειών το εξαρτήματος που είναι παράλληλα με τους άξονες της μηχανής.
4. Αυστηρός ορισμός των διαστάσεων του εξαρτήματος έτσι ώστε να είναι εύκολο να καθοριστεί το σχήμα του εξαρτήματος, χωρίς υπολογισμούς και υποθέσεις.

4.4.2 Τα πλεονεκτήματα του NC

Ο NC αναπτύσσεται με ταχύτητα που συνεχώς αυξάνει και η χρήση του θα συνεχίσει να μεγαλώνει επειδή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην βιομηχανία. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού είναι η μεγαλύτερη ασφάλεια του χειριστή και η μεγαλύτερη απόδοσή του, η ελάττωση των άχρηστων υλικών, ο μειωμένος χρόνος προετοιμασίας για την παραγωγή, η μείωση της πιθανότητας σφάλματος, η μεγάλη ακρίβεια, η δυνατότητα πολύπλοκων μηχανουργικών εργασιών, το μικρότερο κόστος εργαλείων, η ασφάλεια της εργαλειομηχανής, η μικρότερη ανάγκη επίβλεψης, η μεγαλύτερη χρήση της μηχανής και οι μικρότερες απαιτήσεις χώρου. Όλα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα, πως η χρήση των CNC εργαλειομηχανών είναι περισσότερο απαραίτητη από ποτέ.

4.5 Συνθήκες κοπής κατά την τόννευση

Οι συνθήκες κοπής στην τόννευση είναι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής. Η σωστή επιλογή των συνθηκών κατεργασίας εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από το υλικό του τεμαχίου και το υλικό του κοπτικού εργαλείου.

Η ταχύτητα κοπής αφορά τις στροφές περιστροφής της ατράκτου σε σχέση με την διάμετρο του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Εκφράζει τον ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση κοπής (περιστροφική). Η ταχύτητα κοπής συμβολίζεται **V_c** και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \quad (1)$$

Όπου, D η διάμετρος του κατεργαζόμενου τεμαχίου, n η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου και η μαθηματική σταθερά $\pi=3.14$.

Η επιλογή της ταχύτητας κοπής γίνεται με προσοχή είτε από υπάρχουσες βιβλιογραφίες είτε από τα εγχειρίδια των κοπτικών εργαλείων που υπάρχουν στην διάθεση του χρήστη. Η επιλογή της σωστής ταχύτητας κοπής έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες της καλής παραγωγικής διαδικασίας. Η επιλογή χαμηλής ταχύτητας κοπής οδηγεί σε μεγάλους χρόνους κατεργασίας και επομένως την μη βέλτιστη παραγωγικότητα. Αντίθετα, υψηλότερη ταχύτητα κοπής έχει ως αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά ή και την καταστροφή του κοπτικού. Επιπλέον επιδρά αρνητικά στην ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου.

Παρατίθεται ένα παράδειγμα υπολογισμού των στροφών δοθείσας της ταχύτητας κοπής:

Έστω ότι η ταχύτητα κοπής είναι $V_c = 150 \text{ m/min}$ και η διάμετρος του τεμαχίου είναι 60 mm . Τότε η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου υπολογίζεται ως εξής:

Από την σχέση 1 προκύπτει $n = 1000 \cdot V_c / (\pi \cdot D) = 1000 \cdot 150 / (3.14 \cdot 60) \text{ m/min} = 796 \text{ rpm}$.

4.6 Η εργαλειομηχανή CTX310

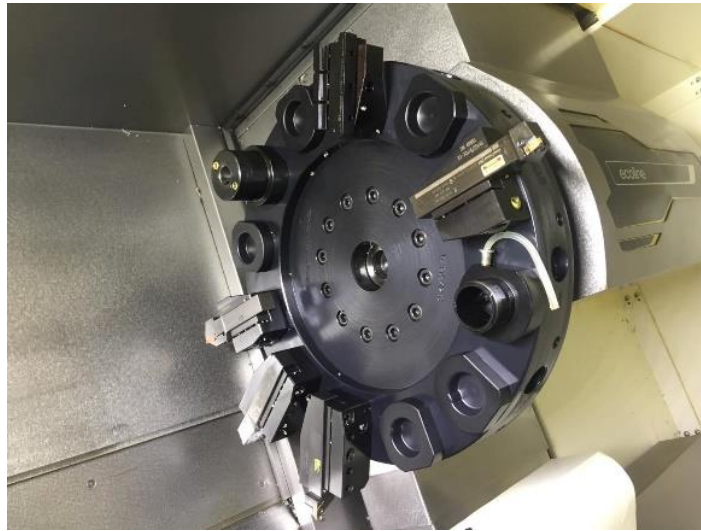
Η εργαλειομηχανή, στην οποία έγινε ο προγραμματισμός, είναι ο τόννος DMG CTX310 ecoline που φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Η μηχανή είναι ένα σύγχρονο κέντρο τόννευσης που μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της παραγωγής. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη παρουσίαση της εργαλειομηχανής. Τα μήκη των διαδρομών της είναι 182.5 mm στον κάθετο άξονα X και 455 mm στον οριζόντιο άξονα Z. Δύναται να κατεργαστεί τεμάχια μέγιστης διαμέτρου 200 mm και μέγιστου μήκους 455 mm . Η κίνηση δίνεται από σερβοκινητήρες οι οποίου μετακινούν τις οριζόντιες και τις κάθετες γλίστρες που υποστηρίζουν τον εργαλειοφόρα. Η μέγιστη ταχύτητα κίνησης στον άξονα X και Z είναι 30 m/min . Το τσοκ φαίνεται στο Σχήμα 4.8 και ο εργαλειοφόρας στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.7: Η εργαλειομηχανή DMG CTX310 ecoline.





Σχήμα 4.8: Ο σφιγκτήρας (τσοκ) της εργαλειομηχανής DMG CTX310 ecoline.





Σχήμα 4.9: Ο εργαλειοφορέας της εργαλειομηχανής DMG CTX310 ecoline.

4.7 Κατασκευή ακραξονίων

4.7.1 Τεμάχιο 1

1 ^η Φάση		Υλικό εργαλείου: HSS		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075			
Κώδικας εργα- λείου		Είδος κατεργασίας		Στροφές (RPM)		Πρόωση (mm/rev)	
T04		Διάτρηση		400		0.036	
Κωδ. Εργαλείου: Τρυπάνι HSS DRILL Φ08 Werko							
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία διάτρησης αρχικής οπής στα 8 mm. Έχει προηγηθεί διάτρηση μικρής οπής με τον κεντραδόρο, ώστε να εισέλθει ανεμπόδιστα το εργαλείο μεγαλύτερης διαμέτρου στο τεμάχιο							
							
Τμήμα προγράμματος							
N01		G90 G18 G71 G54					
N02		WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-107,-80,55)					
N03		T04 D01 M06					
N04		G00 X0 Z10					
N05		S400 F0.36 M03					
N06							
N07		CYCLE83(20,0,10,-					
		60,,,4,100,0.1,0.1,10,1,0,1.2,1.4,0.1,2,0,1,11211112)					
N08		M30					

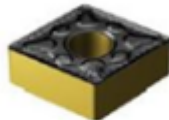

Πίνακας 4.1: 1^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

2 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: HSS		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T04	Διάτρηση	400	0.036
Κωδ. Εργαλείου: Τρυπάνι HSS DRILL Φ14 Werko		 	
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία διάτρησης αρχικής οπής στα 14 mm.			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-107,-80,55)		
N03	T04 D01 M06		
N04	G00 X0 Z10		
N05	S400 F0.36 M03		
N06			
N07	CYCLE83(20,0,10,-		
	60,,,4,100,0.1,0.1,10,1,0,1.2,1.4,0.1,2,0,1,11211112)		
N08	M30		

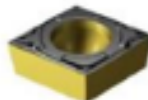
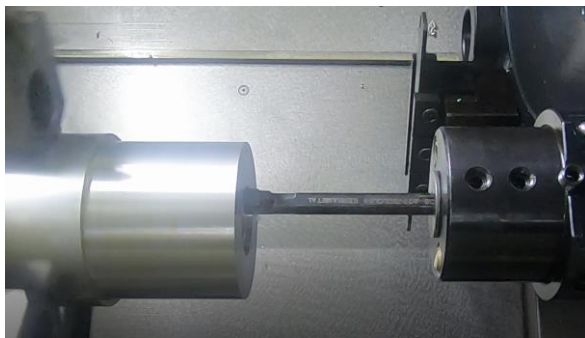
Πίνακας 4.2: 2^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

3 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: HSS		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργα- λείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)		Πρόωση (mm/rev)
T04	Διάτρηση	400		0.036
Κωδ. Εργαλείου: Τρυπάνι HSS DRILL Φ20 Werko				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία διάτρη- σης αρχικής οπής στα 20 mm.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-107,-80,55)			
N03	T04 D01 M06			
N04	G00 X0 Z10			
N05	S400 F0.36 M03			
N06				
N07	CYCLE83(20,0,10,-			
N08	65,,,4,100,0.1,0.1,10,1,0,1.2,1.4,0.1,2,0,1,11211112)			
	M30			

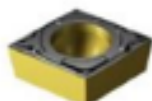
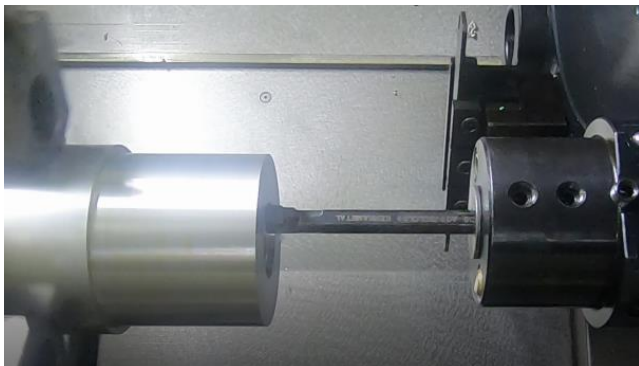
Πίνακας 4.3: 3^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

4 ^η Φάση		Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργα- λείου		Είδος κατεργασίας		Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12		Εκχόνδριση εξωτερικής ε- πιφάνειας		400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225					
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12					
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόν- δρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου από 60 mm σε 55 mm. αυτό επιτυγχάνεται με συνεχή δια- μήκη περάσματα πάχους 1mm. η ακτίνα της μύτης του εργαλείου είναι 0.8 mm, η γωνία μύτης του εργα- λείου είναι 80° και η διάμετρος του εγγεγραμμένου κύ- κλου είναι 12 mm.					
					
Τμήμα προγράμματος					
N01		G90 G18 G71 G54			
N02		WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)			
N03		T12 M06			
N04		S400 M04			
N05		G00 Z5			
N06		X60			
N07		CYCLE951(60,0,55,-162,55,-162,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)			
N08		M30			

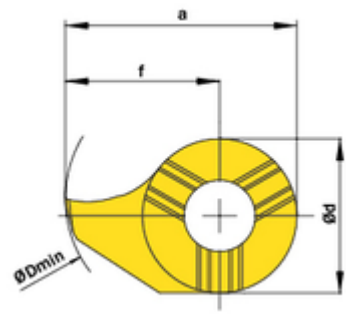
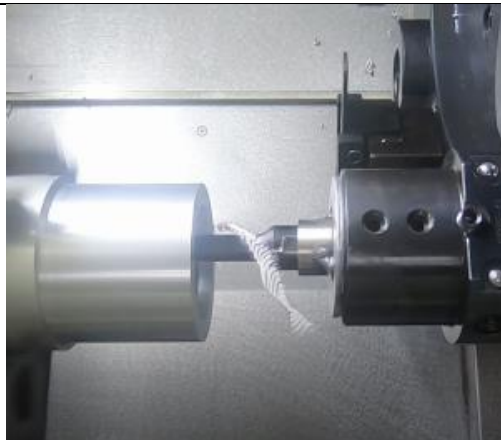
Πίνακας 4.4: 4^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

5 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)	
T09	Εσωτερική τόννευση	300	0.05	
Κωδ. Εργαλείου: Kennametal CCMT060202LF				
Κωδ. Μανέλας: Kennametal A08JSCLCL06				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εσωτερικής τόννευσης για διάνοιξη της οπής διαμέτρου 30 mm, το συνολικό βάθος της συγκεκριμένης οπή είναι 16 mm και σε κάθε πέρασμα αφαιρείται υλικό πάχους 0.2 mm. Η ακτίνα της μύτης του εργαλείου είναι 0.2 mm, η γωνία μύτης εργαλείου είναι 80° και το άκρο κοπής 6.35 mm.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-107,-80,55)			
N03	T09 M06			
N04	G00 X0 Z10			
N05	S300 F0.5 M04			
N06	CYCLE951(20,0,30,-16,30,-16,3,0.5,0,0,11,0,0,0,10,0.5,0,2,0)			
N07	M30			
N08				


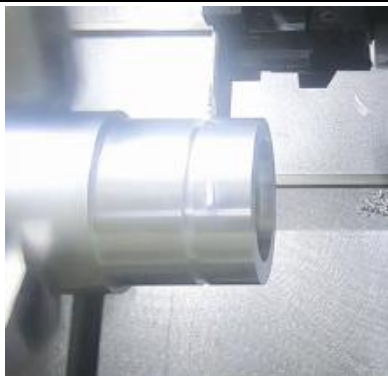
Πίνακας 4.5: 5^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

6 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργα- λείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)	
T09	Εσωτερική τórνευση	300	0.05	
Κωδ. Εργαλείου: Kennametal CCMT060202LF				
Κωδ. Μανέλας: Kennametal A08JSCLCL06				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εσω- τερικής τórνευσης για διάνοιξη της οπής διαμέτρου 40 mm, το συνολικό βάθος της συγκεκριμένης οπή είναι 4 mm και σε κάθε πέρασμα αφαιρείται υλικό πάχους 0.2 mm. Η ακτίνα της μύτης του εργαλείου είναι 0.2 mm, η γωνία μύτης εργαλείου είναι 80° και το άκρο κοπής 6.35 mm.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-107,-80,55)			
N03	T09 M06			
N04	G00 X0 Z10			
N05	S300 F0.5 M04			
N06	CYCLE951(30,0,40,-4,40,-4,3,0.5,0,0,11,0,0,0,10,0.5,0,2,0)			
N07	M30			

Πίνακας 4.6: 6^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

7 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075			
Κώδικας εργα- λείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)			
T09	Εσωτερική αυλάκωση	300	0.075			
Κωδ. Εργαλείου: D14.0200.02.16 NR X400						
Κωδ. Μανέλας: Kennametal A08JSCLCL06						
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εσωτε- ρικής αυλάκωσης συνολικού πλάτους 4 mm.						
						
Τμήμα προγράμματος						
N01	G90 G18 G71 G54					
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-107,-80,55)					
N03	T09 M06					
N04	G00 X20 Z5					
N05	S300 F0.75 M03					
N06	G01 Z-10					
N07	G01 X32					
N08	G01 X29					
N09	Z-11					
N10	G01 X32					
N11	G01 X29					
N12	Z-12					
N13	G01 X32					
N14	G01 X29					
N15	Z-13					
N16	G01 X32					
N17	G01 X29					
N18	Z-14					
N19	G01 X32					
N20	G01 X25					
N21	Z70					
N22	M30					


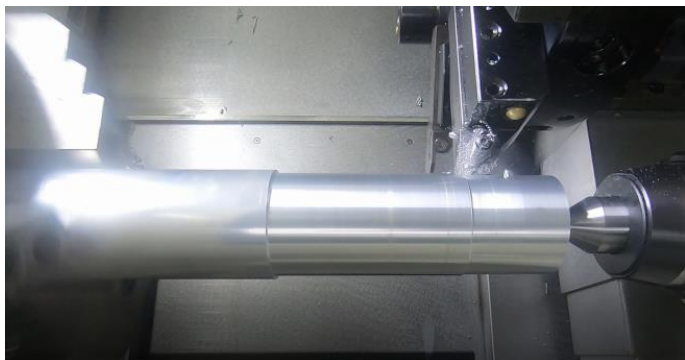
Πίνακας 4.7: 7^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

8 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating PVD(Ti,Al)N	Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T11	Αποκοπή	400	0.75
Κωδ. Εργαλείου: Sandvick N123H2-0400-0004-TF1125			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn LF123H25-2020BM			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η αποκοπή του τελικού τεμαχίου από το υπόλοιπο ακατέργαστο υλικό.			
 			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)		
N03	T11 M06		
N04	S400 M04		
N05	G00 Z-20 X60		
N06	G01 X0		
N07	G00 Z100		
N08	X20		
N09	M30		

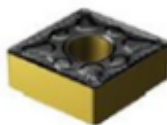
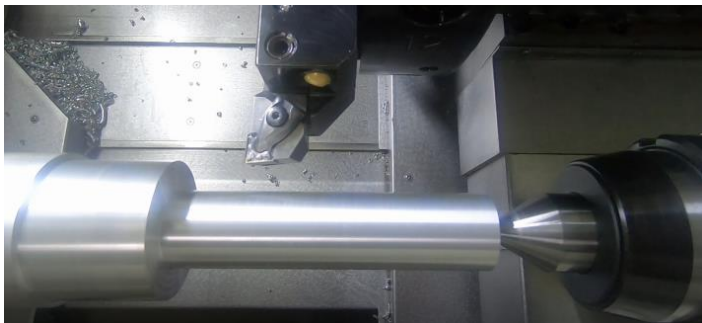
Πίνακας 4.8: 8^η φάση κατεργασίας 1^{ου} τεμαχίου.

4.7.2 Τεμάχιο 2

Για το συγκεκριμένο τεμάχιο λόγω του μεγάλου μήκους του έγινε χρήση του κεντροφορέα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται αποφυγή των ανεπιθύμητων δονήσεων κατά την κατεργασία.

1 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)	
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1	
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225				
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου από 60 mm σε 55 mm. αυτό επιτυγχάνεται με συνεχή διαμήκη περάσματα πάχους 1mm. η ακτίνα της μύτης του εργαλείου είναι 0.8 mm, η γωνία μύτης του εργαλείου είναι 80° και η διάμετρος του εγγεγραμμένου κύκλου είναι 12 mm.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)			
N03	T12 M06			
N04	S400 M04			
N05	G00 Z5			
N06	X55			
N07	CYCLE951(60,0,55,-162,55,-162,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)			
N08	M30			


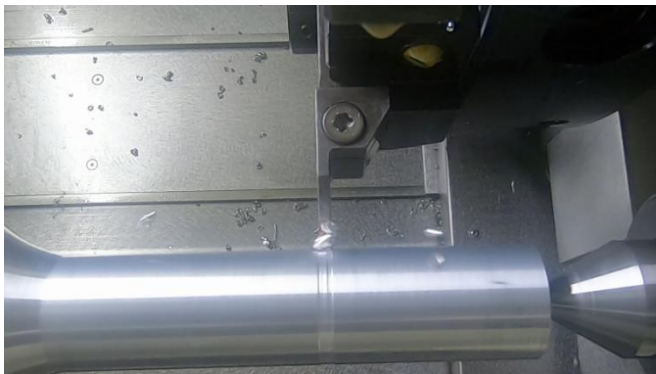
Πίνακας 4.9: 1^η φάση κατεργασίας 2^{ου} τεμαχίου.

2 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN	Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου από 55 mm σε 31 mm. αυτό επιτυγχάνεται με συνεχή διαμήκη περάσματα πάχους 1mm. η ακτίνα της μύτης του εργαλείου είναι 0.8 mm, η γωνία μύτης του εργαλείου είναι 80° και η διάμετρος του εγγεγραμμένου κύκλου είναι 12 mm.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)		
N03	T12 M06		
N04	S400 M04		
N05	G00 Z5		
N06	X55		
N07	CYCLE951(55,0,31,-127,31,-127,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)		
N08	M30		

Πίνακας 4.10: 2^η φάση κατεργασίας 2^{ου} τεμαχίου.

3 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN	Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου για τη δημιουργία καμπυλότητας (σφαιρικής γεωμετρίας) στο τεμάχιο ακτίνας 40 mm. Για τη συγκεκριμένη κατεργασία είναι υποχρεωτική η χρήση υπορουτίνας στο κυρίως σώμα του προγράμματος.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)		
N03	T12 M06		
N04	S400 M04		
N05	G00 Z5		
N06	X60		
N07	CYCLE95("ΚΟΥΚΟΥ-		
N08	VAGIA_KAMPILI",1,0,0,0.2,1,1,0.2,9,0.5,0,5,0,2)		
	M30		
Τμήμα υποπρογράμματος			
N01	G90		
N02	X31		
N03	Z-127		
N04	G02 X55 Z-150 CR=50 F1		
N05	M17		

Πίνακας 4.11: 3^η φάση κατεργασίας 2^{ου} τεμαχίου.

4 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating PVD(Ti,Al)N		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T11	Αυλάκωση	400	0.035
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik N123H2-0400-0004-TF1125			
Κωδ. Μανέλας: CoroCut LF123H25-2020BM			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία συνεχών αυλακώσεων πλάτους 4mm η κάθε μια, ανά 3 mm , μέχρι τη δημιουργία αυλακιού συνολικού μήκους 51mm. Το εργαλείο εκχόνδρισης δεν μπορούσε να εισέλθει ώστε να μειώσει τη διάμετρο με συνεχή διαμήκη περάσματα, διότι η μικρή του κλίση θα συγκρουόταν με τη μεγαλύτερη διάμετρο στο αρχικό τμήμα του τεμαχίου.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	CYCLE62("MEGALOAYLAKI",0,,)CY-CLE952("GROOVE",,"",101311,0.3,,0,1,0.1,0.1,0,0,0.1,0,1,0,0,,,,,2,2)		
Τμήμα υποπρογράμματος			
N01	G90		
N02	Z-62		
N03	X68		
N04	G01		
N05	X56 Z-59		
N06	G01 Z-55		
N07	G01		
N08	X68		
N09	Z-52		
N10	M17		

Πίνακας 4.12: 4^η φάση κατεργασίας 2^{ου} τεμαχίου.


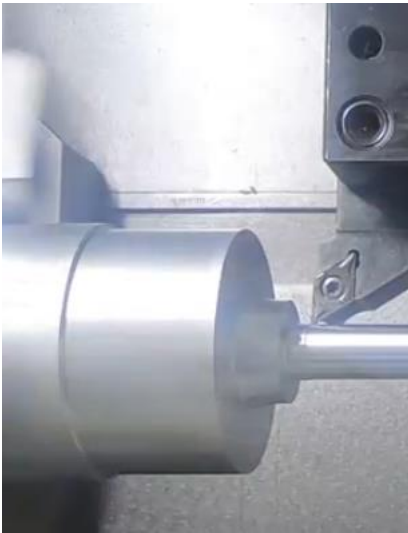
5 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)	
T11	Αποκοπή	400	0.1	
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225				
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται αποκοπή του τεμαχίου.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)			
N03	T11 M06			
N04	S400 M04			
N05	G00 Z-170			
N06	X60			
N07	G01 X0			
N08	M30			

Πίνακας 4.13: 5^η φάση κατεργασίας 2^{ου} τεμαχίου.

4.7.3 Τεμάχιο 3

1 ^η Φάση		Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργα- λείου		Είδος κατεργασίας		Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12		Εκχόνδριση εξωτερικής ε- πιφάνειας		400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225					
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12					
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόν- δρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου από 60 mm στα 55 mm.					
					
Τμήμα προγράμματος					
N01		G90 G18 G71 G54			
N02		WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)			
N03		T12 M06			
N04		S400 M04			
N05		G00 Z5			
N06		X60			
N07		CYCLE951(60,0,55,-162,55,-162,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)			
N08		M30			

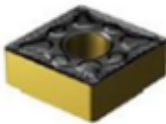
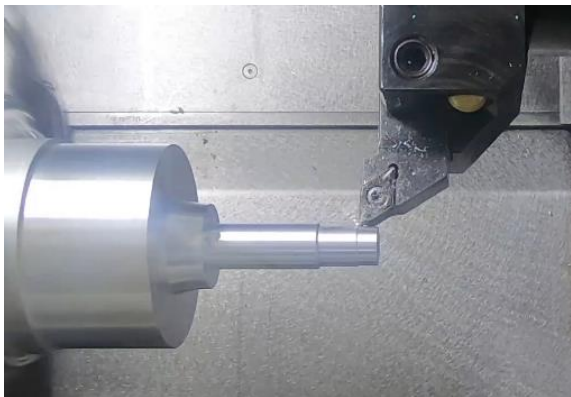
Πίνακας 4.14: 1^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.

2 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN	Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας για περαιτέρω μείωση της εξωτερικής επιφάνειας.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)		
N03	T12 M06		
N04	S400 M04		
N05	G00 Z5		
N06	X60		
N07	CYCLE951(55,0,10,-40,10,-40,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)		
N08	M30		


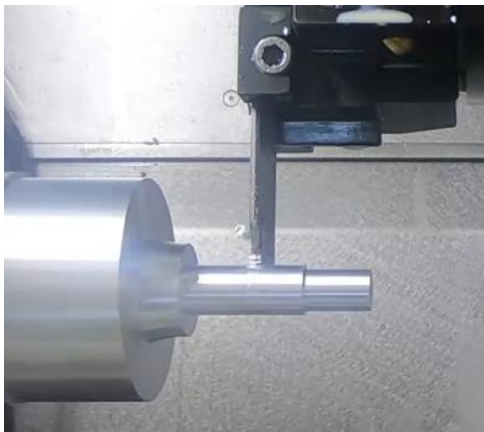
Πίνακας 4.15: 2^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.

3 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN	Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου για τη δημιουργία καμπυλότητας (σφαιρικής γεωμετρίας) στο τεμάχιο ακτίνας 8 mm. Για τη συγκεκριμένη κατεργασία είναι υποχρεωτική η χρήση υπορουτίνας στο κυρίως σώμα του προγράμματος.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)		
N03	T12 M06		
N04	S400 M04		
N05	G00 Z5		
N06	X60		
N07	CYCLE95("KAMPILI_MEI-		
N08	WSIS",1,0,0,0.2,1,1,0.2,9,0.5,0,5,0,2)		
	M30		


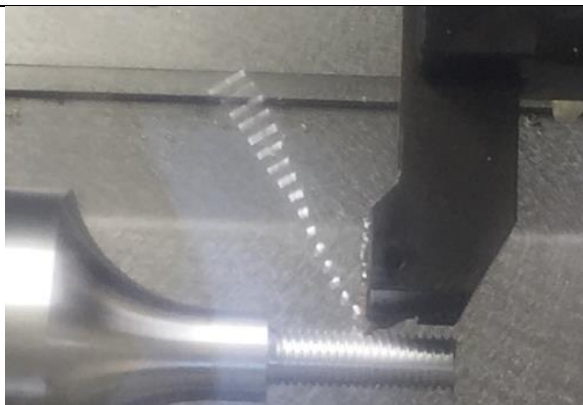
Πίνακας 4.16: 3^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.

4 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)	
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1	
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225				
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου για τη προετοιμασία για τη δημιουργία σπειρώματος M10.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)			
N03	T12 M06			
N04	S400 M04			
N05	G00 Z5			
N06	X60			
N07	CYCLE951(14,0,9.8,-10,9.8,-10,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)			
N08	M30			

Πίνακας 4.17: 4^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.

5 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating PVD(Ti,Al)N		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T11	Αυλάκωση	400	0.075
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik N123H2-0400-0004-TF1125			
Κωδ. Μανέλας: CoroCut LF123H25-2020BM			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία συνεχών αυλακώσεων πλάτους 4mm η κάθε μια, ανά 3 mm , μέχρι τη δημιουργία αυλακιού συνολικού μήκους 51mm. Το εργαλείο εκχόνδρισης δεν μπορούσε να εισέλθει ώστε να μειώσει τη διάμετρο με συνεχή διαμήκη περάσματα, διότι η μικρή του κλίση θα συγκρουόταν με τη μεγαλύτερη διάμετρο στο αρχικό τμήμα του τεμαχίου.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)		
N03	G97 S400 M4		
N04	T03 M06		
N05	CYCLE930(13,-		
N06	29,4,4,12,,0,0,0,4,3,4,3,0,0,10,130,,1,,0.1,0,0,0,2,101000)		
N07	G01 X90 F0.5		
N08	Z20		
N09	G00 X100		
N10	Z150		
N11	M30		

Πίνακας 4.18: 5^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.

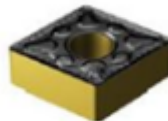
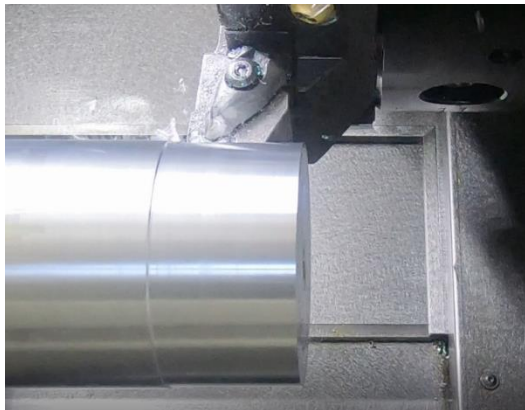
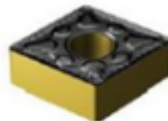
6 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating PVD (Ti, Cr, Al)N + (Ti, Al)N		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T05	Σπειρωτόμηση	400	1.337
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik GC1020			
Κωδ. Μανέλας: CoroThread 266RFG-2020-16			
<p>Στην παρούσα φάση εκτελείται η κατεργασία της σπειροτόμησης, στην συγκεκριμένη κατεργασία χρησιμοποιούνται κύκλο σπειρωμάτων καθώς και εργαλείο σπειρωμάτων. Στον κύκλο έχουν οριστεί όλα τα στοιχεία του σπειρώματος όπως η αρχική και τελική διάμετρος, το βάθος του σπειρώματος ίσο με 9,3 καθώς αφορά σπείρωμα M10. Ακόμα έχει οριστεί το πάχος για κάθε πέρασμα ίσο με 0.150mm ενώ έχει επιλεγεί κατεργασία η οποία θα εκτελέσει και φινίρισμα στο τέλος. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι το εργαλείο για να επιτύχει το ζητούμενο βήμα του σπειρώματος θα πρέπει να κινείται με πρόωση ίση με το βήμα.</p>			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G71 G54 G18 G90		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-70,-45,9.8)		
N03	T05 M06		
N04	S200 M03		
N05	G00 X30		
N06	Z30		
N07	CYCLE99(0,9.8,-		
N08	0.6,,10,0.5,0.9,0,0.6,0,4,1,1.5,1310101,2,10,0.25,0,0,0,1,0,0.5		
N09	19615,1,,,"ISO_METRIC","M10",2,0)		
N10	G01 X50		
N11	G00 Z100		
N12	M30		

Πίνακας 4.19: 6^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.

5 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)		Πρόωση (mm/rev)
T11	Αποκοπή	400		0.75
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225				
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται αποκοπή του τεμαχίου.				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)			
N03	T11 M06			
N04	S400 M04			
N05	G00 Z-90			
N06	X60			
N07	G01 X0			
N08	M30			

Πίνακας 4.20: 6^η φάση κατεργασίας 3^{ου} τεμαχίου.



4.7.4 Τεμάχιο 4

1 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN	Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075			
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)		
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής ε- πιφάνειας	400	0.1		
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225					
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12					
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόν- δρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου από 60 mm στα 55 mm.					
					
Τμήμα προγράμματος					
N01	G90 G18 G71 G54				
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)				
N03	T12 M06				
N04	S400 M04				
N05	G00 Z5				
N06	X60				
N07	CYCLE951(60,0,55,-162,55,-162,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)				
N08	M30				

Πίνακας 4.21: 1^η φάση κατεργασίας 4^{ου} τεμαχίου.



2 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075	
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)	
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής επιφάνειας	400	0.1	
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225				
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12				
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόνδρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου για περαιτέρω μείωση της εξωτερικής διαμέτρου στα 16 mm				
				
Τμήμα προγράμματος				
N01	G90 G18 G71 G54			
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)			
N03	T12 M06			
N04	S400 M04			
N05	G00 Z5			
N06	X60			
N07	CYCLE951(55,0,16,-40,16,-40,1,1,0,0,11,0,0,0,1,1,0,2,0)			
N08	M30			

Πίνακας 4.22: 2^η φάση κατεργασίας 4^{ου} τεμαχίου.

3 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T12	Εκχόνδριση εξωτερικής ε- πιφάνειας	400	0.1
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται η κατεργασία εκχόν- δρισης της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου για τη δημιουργία καμπυλότητας (σφαιρικής γεωμετρίας) στο τεμάχιο ακτίνας 26 mm. Για τη συγκεκριμένη κα- τεργασία είναι υποχρεωτική η χρήση υπορουτίνας στο κυρίως σώμα του προγράμματος. Το τελικό πέ- ρασμα χρησιμεύει για φινίρισμα της επιφάνειας. Χρη- σιμοποιείται το ίδιο εργαλείο, αλλά το πέρασμα γίνεται με πολύ μικρότερη πρόωση για την επίτευξη καλύτε- ρης επιφάνειας του τεμαχίου			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,55)		
N03	G00 X100		
N04	Z100		
N05	T12 M06		
N06	G00 Z20		
N07	X90		
N08	G97 S400 M04		
N09	CYCLE95("KAMPILI",1,0,0,0.2,1,1,0.2,9,0.,5,0,2)		

N10	G00 X100
N11	Z150
N12	M30
Τμήμα υποπρογράμματος	
N01	G90
N02	X16
N03	Z-40
N04	G02 X55 Z-65 CR=26 F1
N05	M17

Πίνακας 4.23: 3^η φάση κατεργασίας 4^{ου} τεμαχίου.

4 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating PVD (Ti, Cr, Al)N + (Ti, Al)N		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T05	Σπειρωτόμηση	400	1.337
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik GC1020			
Κωδ. Μανέλας: CoroThread 266RFG-2020-16			
<p>Στην παρούσα φάση εκτελείται η κατεργασία της σπειροτόμησης, στην συγκεκριμένη κατεργασία χρησιμοποιούνται κύκλο σπειρωμάτων καθώς και εργαλείο σπειρωμάτων. Στον κύκλο έχουν οριστεί όλα τα στοιχεία του σπειρώματος όπως η αρχική και τελική διάμετρος, το βάθος του σπειρώματος ίσο με 9,3 καθώς αφορά σπείρωμα M10. Ακόμα έχει οριστεί το πάχος για κάθε πέρασμα ίσο με 0.150mm ενώ έχει επιλεχτεί κατεργασία η οποία θα εκτελέσει και φινίρισμα στο τέλος. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι το εργαλείο για να επιτύχει το ζητούμενο βήμα του σπειρώματος θα πρέπει να κινείται με πρόωση ίση με το βήμα.</p>			
			
			
Τμήμα προγράμματος			

N01	G71 G54 G18 G90
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-70,-45,9.8)
N03	T05 M06
N04	S200 M03
N05	G00 X30
N06	Z30
N07	CYCLE99(0,9.8,-
N08	30,,10,0.5,0.9,0,30,0,4,1,1.5,1310101,2,10,0.25,0,0,0,1,0,0.519615,1
N09	,,,"ISO_METRIC","M10",2,0)
N10	G01 X50
N11	G00 Z100
N12	M30

Πίνακας 4.24: 4^η φάση κατεργασίας 4^{ου} τεμαχίου.

5 ^η Φάση	Υλικό εργαλείου: Coating CVD Ti(C,N) + Al2O3 + TiN		Υλικό τεμαχίου: Αλουμίνιο τύπου 7075
Κώδικας εργαλείου	Είδος κατεργασίας	Στροφές (RPM)	Πρόωση (mm/rev)
T11	Αποκοπή	400	0.75
Κωδ. Εργαλείου: Sandvik CNMG 12 04 08 – PM 4225			
Κωδ. Μανέλας: CoroTurn RC DCLNL 2020K 12			
Στη συγκεκριμένη φάση γίνεται αποκοπή του τεμα- χίου.			
			
Τμήμα προγράμματος			
N01	G90 G18 G71 G54		
N02	WORKPIECE(,,,"CYLINDER",192,0,-290,-240,60)		
N03	T11 M06		
N04	S400 M04		
N05	G00 Z-80		
N06	X60		
N07	G01 X0		
N08	M30		

Πίνακας 4.25: 5^η φάση κατεργασίας 4^{ου} τεμαχίου.

4.8 Τελικά τεμάχια

Μετά από την κατασκευή των ακραζονίων και την κατασκευή των ανθρακονημάτων σύνθετων υλικών, το τελικό τεμάχιο προκύπτει με τη σύνδεση τους. Η μέγιστη διάμετρος του κάθε ακραζονίου είναι 55 mm, ενώ η εσωτερική διάμετρος των αξόνων είναι 55 mm. Έτσι τα δυο τεμάχια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ, με το να εισέλθει το μεταλλικό ακραζόνιο στα άκρα του ανθρακονημάτινου άξονα. Έτσι, το σύνθετο υλικό μπορεί να εναρμονιστεί και να γίνει μέρος μια μεγαλύτερης εφαρμογής. Παρακάτω, στις Σχήμα 4.8 έως 4.11, φαίνονται τα τελικά τεμάχια, μετά τη συγκόλληση των επιμέρους υλικών.



Σχήμα 4.8: το 1^ο τεμάχιο συνδεδεμένο με το ανθρακονημάτινο άξονα.



Σχήμα 4.9: το 2^ο τεμάχιο συνδεδεμένο με το ανθρακονημάτινο άξονα.



Σχήμα 4.10: το 3^ο τεμάχιο συνδεδεμένο με το ανθρακονημάτινο άξονα.



Σχήμα 4.11: το 4^ο τεμάχιο συνδεδεμένο με το ανθρακονημάτινο άξονα.

5. Σύνοψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει αρχικά μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, αλλά εξηγεί με μεγάλη λεπτομέρεια τον τρόπο παραγωγής των ινοπλισμένων πολυμερών αξόνων με την τεχνική της περιέλιξης ινών γύρω από μια μεταλλική μήτρα. Στη συνέχεια αναλύεται ο ακριβής τρόπος παραγωγής των τεμαχίων που κατασκευάστηκαν για τη συγκεκριμένη Διπλωματική εργασία.

Ο επόμενος και βασικός στόχος της εργασίας ήταν να καταπιαστεί με τον προγραμματισμό και την κατεργασία ακραζονίων, τα οποία χρησιμεύουν ως συνδετικός κρίκος των ανθρακονημάτων αξόνων με μια μεγαλύτερη εφαρμογή. Οι κατεργασίες έγιναν με προγραμματισμό του κάθε τεμαχίου με τη χρήση του κώδικα κατά Siemens καθώς και την κατεργασία με την βοήθεια του λογισμικού CAD/CAM του προγράμματος NX12 της Siemens. Η κατασκευή των ακραζονίων έγινε στο κέντρο τόννευσης του εργαστηρίου CTX 310 Ecoline.

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής εργασίας έγιναν κατανοητά τα πλεονεκτήματα των κατεργασιών με ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές, καθώς μειώνεται ο χρόνος παραγωγής των επιθυμητών τεμαχίων, αλλά παράλληλα μειώνεται και η πιθανότητα σφάλματος κατά την κατεργασία, καθώς όλες οι παράμετροι ελέγχονται ψηφιακά και δεν επεμβαίνει ο χειριστής κατά τη διάρκεια της κοπής του υλικού.

Όστοςο η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας εξαρτάται από τον εκάστοτε προγραμματιστή και από την εμπειρία που αυτός διαθέτει ώστε να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Ακόμη παρατηρείται πως η γνώση των συνθηκών κατεργασίας είναι απαραίτητη και πρέπει να συνδυάζεται σωστά με τα εκάστοτε υλικά και εργαλεία, ώστε να μεγιστοποιείται ο χρόνος ζωής του εργαλείου και να επιτυγχάνονται οι ζητούμενες ανοχές και ποιότητες επιφάνειας.

Όσον αφορά τα συμβατικά μεταλλικά υλικά, υπάρχουν πάντα περιθώρια βελτίωσης της σύνταξης του προγραμματισμού, αλλά και περαιτέρω ανάλυσης και διερεύνησης σύγχρονων και πολυπλοκότερων εντολών, κύκλων κατεργασίας ακόμα και χρήση μακροεντολών για τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με την πλέξη συνεχών ινών, παρουσιάζουν πολύ μεγάλα περιθώρια βελτίωσης στον τρόπο κατασκευής τους, ώστε να γίνεται καλύτερος έλεγχος της μηχανικής τους αντοχής, ή να γίνεται εντοπισμός σφαλμάτων κατά τη κατασκευή του ή κατά τη διάρκεια του έργου που προσφέρουν στην εφαρμογή που συμμετέχουν. Για παράδειγμα ο καλύτερος έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων τους μπορεί να γίνει με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών, ενώ ο εντοπισμός σφαλμάτων στις στρώσεις του υλικού μπορεί να γίνει με χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών (Fiber Bragg Gratings) σε συνδυασμό με πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων (Piezoelectric Transducers). Ο εντοπισμός των σφαλμάτων μπορεί να οδηγήσει στη μελέτη για την αυτοίαση του ινοπλισμένου συνθέτου υλικού.

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό, πως τα αντικείμενα με τη μελέτη των οποίων ασχολείται η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία έχουν μεγάλα περιθώρια για μελλοντική έρευνα.

6. Παράρτημα κώδικα

Παρακάτω παρατίθενται οι ολοκληρωμένοι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ανθρακονημάτων αξόνων, καθώς στο Κεφάλαιο 3 δίνεται μόνο ένα μικρό δείγμα αυτών με τις βασικές παραμέτρους.

Τεμάχιο 1
Filament Winding Segment, created: 2/8/2019
=====
=====
TITLE: HELICAL Layer
MANDREL: Tube
MANDREL FILE: t.mdr
UNITS: mm
OFFSET: X0.0000 Y250.0000 Z545.0000 V-
26.5507 U0.0000 W0.0000
MOVE: Relative
CYCLES: 10
STARTING POINT: AUTO
FIND PATH: YES
START BUTTON: YES
OPTIMIZATION: NO
CYCLE LENGTH: 100.00
=====
=====
N10 X4.9635 Y0.0157 Z0.0000 V-2.5097 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N20 X4.9635 Y0.0627 Z0.0000 V-2.5059 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N30 X4.9635 Y0.1408 Z0.0000 V-2.4943 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N40 X4.9635 Y0.2493 Z0.0000 V-2.4750 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N50 X4.9635 Y0.3878 Z0.0000 V-2.4483 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N60 X4.9635 Y0.5553 Z0.0000 V-2.4142 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N70 X4.9635 Y0.7507 Z0.0000 V-2.3729 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N80 X4.9635 Y0.9730 Z0.0000 V-2.3248 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N90 X4.9635 Y1.2206 Z0.0000 V-2.2701 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N100 X4.9635 Y1.4921 Z0.0000 V-2.2091 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N110 X4.9635 Y1.7859 Z0.0000 V-2.1422 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N120 X4.9635 Y2.1000 Z0.0000 V-2.0698 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N130 X4.9635 Y2.4326 Z0.0000 V-1.9924 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N140 X4.9635 Y2.7817 Z0.0000 V-1.9105 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N150 X4.9635 Y3.1449 Z0.0000 V-1.8246 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N160 X4.9635 Y3.5202 Z0.0000 V-1.7351 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N170 X4.9635 Y3.9052 Z0.0000 V-1.6426 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N180 X4.9635 Y4.2976 Z0.0000 V-1.5478 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N190 X4.9635 Y4.6948 Z0.0000 V-1.4512 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N200 X4.9635 Y5.0945 Z0.0000 V-1.3533 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N210 X4.9635 Y5.4942 Z0.0000 V-1.2549 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N220 X4.9635 Y5.8915 Z0.0000 V-1.1564 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N230 X4.9635 Y6.2838 Z0.0000 V-1.0586 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N240 X4.9635 Y6.6688 Z0.0000 V-0.9619 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N250 X4.9635 Y7.0441 Z0.0000 V-0.8671 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N260 X4.9635 Y7.4074 Z0.0000 V-0.7746 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N270 X4.9635 Y7.7564 Z0.0000 V-0.6852 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N280 X4.9635 Y8.0890 Z0.0000 V-0.5992 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N290 X4.9635 Y8.4031 Z0.0000 V-0.5173 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N300 X4.9635 Y8.6969 Z0.0000 V-0.4399 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N310 X4.9635 Y8.9684 Z0.0000 V-0.3675 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N320 X4.9635 Y9.2161 Z0.0000 V-0.3007 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N330 X4.9635 Y9.4383 Z0.0000 V-0.2397 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N340 X4.9635 Y9.6338 Z0.0000 V-0.1849 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N350 X4.9635 Y9.8012 Z0.0000 V-0.1368 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N360 X4.9635 Y9.9397 Z0.0000 V-0.0955 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N370 X4.9635 Y10.0483 Z0.0000 V-0.0614 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N380 X4.9635 Y10.1263 Z0.0000 V-0.0347 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N390 X4.9635 Y10.1733 Z0.0000 V-0.0154 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N400 X4.9635 Y10.1890 Z0.0000 V-0.0039 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N410 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N420 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N430 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N440 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N450 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N460 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N470 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N480 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N490 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N500 X72.2069 Y148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N510 X4.9635 Y10.1890 Z0.0000 V0.0039 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N520 X4.9635 Y10.1733 Z0.0000 V0.0154 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N530 X4.9635 Y10.1263 Z0.0000 V0.0347 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N540 X4.9635 Y10.0483 Z0.0000 V0.0614 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N550 X4.9635 Y9.9397 Z0.0000 V0.0955 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N560 X4.9635 Y9.8012 Z0.0000 V0.1368 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N570 X4.9635 Y9.6338 Z0.0000 V0.1849 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N580 X4.9635 Y9.4383 Z0.0000 V0.2397 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N590 X4.9635 Y9.2161 Z0.0000 V0.3007 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N600 X4.9635 Y8.9684 Z0.0000 V0.3675 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N610 X4.9635 Y8.6969 Z0.0000 V0.4399 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N620 X4.9635 Y8.4031 Z0.0000 V0.5173 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N630 X4.9635 Y8.0890 Z0.0000 V0.5992 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N640 X4.9635 Y7.7564 Z0.0000 V0.6852 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N650 X4.9635 Y7.4074 Z0.0000 V0.7746 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N660 X4.9635 Y7.0441 Z0.0000 V0.8671 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N670 X4.9635 Y6.6688 Z0.0000 V0.9619 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N680 X4.9635 Y6.2838 Z0.0000 V1.0586 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N690 X4.9635 Y5.8915 Z0.0000 V1.1564 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N700 X4.9635 Y5.4942 Z0.0000 V1.2549 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N710 X4.9635 Y5.0945 Z0.0000 V1.3533 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N720 X4.9635 Y4.6948 Z0.0000 V1.4512 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N730 X4.9635 Y4.2976 Z0.0000 V1.5478 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N740 X4.9635 Y3.9052 Z0.0000 V1.6426 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N750 X4.9635 Y3.5202 Z0.0000 V1.7351 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N760 X4.9635 Y3.1449 Z0.0000 V1.8246 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N770 X4.9635 Y2.7817 Z0.0000 V1.9105 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N780 X4.9635 Y2.4326 Z0.0000 V1.9924 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N790 X4.9635 Y2.1000 Z0.0000 V2.0698 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N800 X4.9635 Y1.7859 Z0.0000 V2.1422 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N810 X4.9635 Y1.4921 Z0.0000 V2.2091 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N820 X4.9635 Y1.2206 Z0.0000 V2.2701 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N830 X4.9635 Y0.9730 Z0.0000 V2.3248 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N840 X4.9635 Y0.7507 Z0.0000 V2.3729 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N850 X4.9635 Y0.5553 Z0.0000 V2.4142 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N860 X4.9635 Y0.3878 Z0.0000 V2.4483 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N870 X4.9635 Y0.2493 Z0.0000 V2.4750 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N880 X4.9635 Y0.1408 Z0.0000 V2.4943 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N890 X4.9635 Y0.0627 Z0.0000 V2.5059 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N900 X4.9635 Y0.0157 Z0.0000 V2.5097 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N910 X158.8494 Y0.0000 Z0.0000 V53.1014
U0.0000 W0.0000 T0.8001
N920 X4.9635 Y-0.0157 Z0.0000 V2.5097 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N930 X4.9635 Y-0.0627 Z0.0000 V2.5059 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N940 X4.9635 Y-0.1408 Z0.0000 V2.4943 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N950 X4.9635 Y-0.2493 Z0.0000 V2.4750 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N960 X4.9635 Y-0.3878 Z0.0000 V2.4483 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N970 X4.9635 Y-0.5553 Z0.0000 V2.4142 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N980 X4.9635 Y-0.7507 Z0.0000 V2.3729 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N990 X4.9635 Y-0.9730 Z0.0000 V2.3248 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1000 X4.9635 Y-1.2206 Z0.0000 V2.2701 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1010 X4.9635 Y-1.4921 Z0.0000 V2.2091 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1020 X4.9635 Y-1.7859 Z0.0000 V2.1422 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1030 X4.9635 Y-2.1000 Z0.0000 V2.0698 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1040 X4.9635 Y-2.4326 Z0.0000 V1.9924 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1050 X4.9635 Y-2.7817 Z0.0000 V1.9105 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1060 X4.9635 Y-3.1449 Z0.0000 V1.8246 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1070 X4.9635 Y-3.5202 Z0.0000 V1.7351 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1080 X4.9635 Y-3.9052 Z0.0000 V1.6426 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1090 X4.9635 Y-4.2976 Z0.0000 V1.5478 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1100 X4.9635 Y-4.6948 Z0.0000 V1.4512 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N1110 X4.9635 Y-5.0945 Z0.0000 V1.3533 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1120 X4.9635 Y-5.4942 Z0.0000 V1.2549 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1130 X4.9635 Y-5.8915 Z0.0000 V1.1564 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1140 X4.9635 Y-6.2838 Z0.0000 V1.0586 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1150 X4.9635 Y-6.6688 Z0.0000 V0.9619 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1160 X4.9635 Y-7.0441 Z0.0000 V0.8671 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1170 X4.9635 Y-7.4074 Z0.0000 V0.7746 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1180 X4.9635 Y-7.7564 Z0.0000 V0.6852 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1190 X4.9635 Y-8.0890 Z0.0000 V0.5992 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1200 X4.9635 Y-8.4031 Z0.0000 V0.5173 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1210 X4.9635 Y-8.6969 Z0.0000 V0.4399 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1220 X4.9635 Y-8.9684 Z0.0000 V0.3675 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1230 X4.9635 Y-9.2161 Z0.0000 V0.3007 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1240 X4.9635 Y-9.4383 Z0.0000 V0.2397 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1250 X4.9635 Y-9.6338 Z0.0000 V0.1849 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1260 X4.9635 Y-9.8012 Z0.0000 V0.1368 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1270 X4.9635 Y-9.9397 Z0.0000 V0.0955 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1280 X4.9635 Y-10.0483 Z0.0000 V0.0614
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1290 X4.9635 Y-10.1263 Z0.0000 V0.0347
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1300 X4.9635 Y-10.1733 Z0.0000 V0.0154
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1310 X4.9635 Y-10.1890 Z0.0000 V0.0039
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1320 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1330 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1340 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1350 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637

N1360 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1370 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1380 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1390 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1400 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1410 X72.2069 Y-148.2249 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.3637
N1420 X4.9635 Y-10.1890 Z0.0000 V-0.0039
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1430 X4.9635 Y-10.1733 Z0.0000 V-0.0154
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1440 X4.9635 Y-10.1263 Z0.0000 V-0.0347
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1450 X4.9635 Y-10.0483 Z0.0000 V-0.0614
U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1460 X4.9635 Y-9.9397 Z0.0000 V-0.0955 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1470 X4.9635 Y-9.8012 Z0.0000 V-0.1368 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1480 X4.9635 Y-9.6338 Z0.0000 V-0.1849 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1490 X4.9635 Y-9.4383 Z0.0000 V-0.2397 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1500 X4.9635 Y-9.2161 Z0.0000 V-0.3007 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1510 X4.9635 Y-8.9684 Z0.0000 V-0.3675 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1520 X4.9635 Y-8.6969 Z0.0000 V-0.4399 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1530 X4.9635 Y-8.4031 Z0.0000 V-0.5173 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1540 X4.9635 Y-8.0890 Z0.0000 V-0.5992 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1550 X4.9635 Y-7.7564 Z0.0000 V-0.6852 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1560 X4.9635 Y-7.4074 Z0.0000 V-0.7746 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1570 X4.9635 Y-7.0441 Z0.0000 V-0.8671 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1580 X4.9635 Y-6.6688 Z0.0000 V-0.9619 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1590 X4.9635 Y-6.2838 Z0.0000 V-1.0586 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1600 X4.9635 Y-5.8915 Z0.0000 V-1.1564 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N1610 X4.9635 Y-5.4942 Z0.0000 V-1.2549 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1620 X4.9635 Y-5.0945 Z0.0000 V-1.3533 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1630 X4.9635 Y-4.6948 Z0.0000 V-1.4512 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1640 X4.9635 Y-4.2976 Z0.0000 V-1.5478 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1650 X4.9635 Y-3.9052 Z0.0000 V-1.6426 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1660 X4.9635 Y-3.5202 Z0.0000 V-1.7351 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1670 X4.9635 Y-3.1449 Z0.0000 V-1.8246 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1680 X4.9635 Y-2.7817 Z0.0000 V-1.9105 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1690 X4.9635 Y-2.4326 Z0.0000 V-1.9924 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1700 X4.9635 Y-2.1000 Z0.0000 V-2.0698 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1710 X4.9635 Y-1.7859 Z0.0000 V-2.1422 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1720 X4.9635 Y-1.4921 Z0.0000 V-2.2091 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1730 X4.9635 Y-1.2206 Z0.0000 V-2.2701 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1740 X4.9635 Y-0.9730 Z0.0000 V-2.3248 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1750 X4.9635 Y-0.7507 Z0.0000 V-2.3729 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1760 X4.9635 Y-0.5553 Z0.0000 V-2.4142 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1770 X4.9635 Y-0.3878 Z0.0000 V-2.4483 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1780 X4.9635 Y-0.2493 Z0.0000 V-2.4750 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1790 X4.9635 Y-0.1408 Z0.0000 V-2.4943 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1800 X4.9635 Y-0.0627 Z0.0000 V-2.5059 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1810 X4.9635 Y-0.0157 Z0.0000 V-2.5097 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1820 X158.8494 Y0.0000 Z0.0000 V-53.1014
U0.0000 W0.0000 T0.8001
=====

==

PARAMETERS 25.00 6.00 17.00 12.00 P 400.00
30.00 18 3.000 40 0.025

Τεμάχιο 2
Filament Winding Segment, created: 3/8/2019
=====
=====
TITLE: HELICAL Layer
MANDREL: Tube
MANDREL FILE: t.mdr
UNITS: mm
OFFSET: X0.0000 Y250.0000 Z545.0000 V-
40.7085 U0.0000 W0.0000
MOVE: Relative
CYCLES: 6
STARTING POINT: AUTO
FIND PATH: YES
START BUTTON: YES
OPTIMIZATION: NO
CYCLE LENGTH: 100.00
=====
=====
N10 X3.3762 Y0.0023 Z0.0000 V-0.2093 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N20 X3.3762 Y0.0091 Z0.0000 V-0.2090 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N30 X3.3762 Y0.0204 Z0.0000 V-0.2081 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N40 X3.3762 Y0.0361 Z0.0000 V-0.2064 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N50 X3.3762 Y0.0561 Z0.0000 V-0.2042 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N60 X3.3762 Y0.0803 Z0.0000 V-0.2014 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N70 X3.3762 Y0.1085 Z0.0000 V-0.1979 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N80 X3.3762 Y0.1407 Z0.0000 V-0.1939 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N90 X3.3762 Y0.1765 Z0.0000 V-0.1894 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N100 X3.3762 Y0.2157 Z0.0000 V-0.1843 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N110 X3.3762 Y0.2582 Z0.0000 V-0.1787 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N120 X3.3762 Y0.3036 Z0.0000 V-0.1726 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N130 X3.3762 Y0.3517 Z0.0000 V-0.1662 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N140 X3.3762 Y0.4022 Z0.0000 V-0.1594 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N150 X3.3762 Y0.4547 Z0.0000 V-0.1522 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N160 X3.3762 Y0.5090 Z0.0000 V-0.1447 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N170 X3.3762 Y0.5646 Z0.0000 V-0.1370 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N180 X3.3762 Y0.6213 Z0.0000 V-0.1291 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N190 X3.3762 Y0.6788 Z0.0000 V-0.1210 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N200 X3.3762 Y0.7366 Z0.0000 V-0.1129 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N210 X3.3762 Y0.7944 Z0.0000 V-0.1047 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N220 X3.3762 Y0.8518 Z0.0000 V-0.0965 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N230 X3.3762 Y0.9085 Z0.0000 V-0.0883 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N240 X3.3762 Y0.9642 Z0.0000 V-0.0802 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N250 X3.3762 Y1.0184 Z0.0000 V-0.0723 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N260 X3.3762 Y1.0710 Z0.0000 V-0.0646 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N270 X3.3762 Y1.1214 Z0.0000 V-0.0572 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N280 X3.3762 Y1.1695 Z0.0000 V-0.0500 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N290 X3.3762 Y1.2149 Z0.0000 V-0.0431 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N300 X3.3762 Y1.2574 Z0.0000 V-0.0367 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N310 X3.3762 Y1.2967 Z0.0000 V-0.0307 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N320 X3.3762 Y1.3325 Z0.0000 V-0.0251 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N330 X3.3762 Y1.3646 Z0.0000 V-0.0200 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N340 X3.3762 Y1.3929 Z0.0000 V-0.0154 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N350 X3.3762 Y1.4171 Z0.0000 V-0.0114 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N360 X3.3762 Y1.4371 Z0.0000 V-0.0080 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N370 X3.3762 Y1.4528 Z0.0000 V-0.0051 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N380 X3.3762 Y1.4641 Z0.0000 V-0.0029 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N390 X3.3762 Y1.4709 Z0.0000 V-0.0013 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N400 X3.3762 Y1.4731 Z0.0000 V-0.0003 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N410 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219

N420 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N430 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N440 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N450 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N460 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N470 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N480 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N490 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N500 X421.6056 Y183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N510 X3.3762 Y1.4731 Z0.0000 V0.0003 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N520 X3.3762 Y1.4709 Z0.0000 V0.0013 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N530 X3.3762 Y1.4641 Z0.0000 V0.0029 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N540 X3.3762 Y1.4528 Z0.0000 V0.0051 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N550 X3.3762 Y1.4371 Z0.0000 V0.0080 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N560 X3.3762 Y1.4171 Z0.0000 V0.0114 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N570 X3.3762 Y1.3929 Z0.0000 V0.0154 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N580 X3.3762 Y1.3646 Z0.0000 V0.0200 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N590 X3.3762 Y1.3325 Z0.0000 V0.0251 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N600 X3.3762 Y1.2967 Z0.0000 V0.0307 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N610 X3.3762 Y1.2574 Z0.0000 V0.0367 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N620 X3.3762 Y1.2149 Z0.0000 V0.0431 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N630 X3.3762 Y1.1695 Z0.0000 V0.0500 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N640 X3.3762 Y1.1214 Z0.0000 V0.0572 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N650 X3.3762 Y1.0710 Z0.0000 V0.0646 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N660 X3.3762 Y1.0184 Z0.0000 V0.0723 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N670 X3.3762 Y0.9642 Z0.0000 V0.0802 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N680 X3.3762 Y0.9085 Z0.0000 V0.0883 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N690 X3.3762 Y0.8518 Z0.0000 V0.0965 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N700 X3.3762 Y0.7944 Z0.0000 V0.1047 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N710 X3.3762 Y0.7366 Z0.0000 V0.1129 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N720 X3.3762 Y0.6788 Z0.0000 V0.1210 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N730 X3.3762 Y0.6213 Z0.0000 V0.1291 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N740 X3.3762 Y0.5646 Z0.0000 V0.1370 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N750 X3.3762 Y0.5090 Z0.0000 V0.1447 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N760 X3.3762 Y0.4547 Z0.0000 V0.1522 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N770 X3.3762 Y0.4022 Z0.0000 V0.1594 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N780 X3.3762 Y0.3517 Z0.0000 V0.1662 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N790 X3.3762 Y0.3036 Z0.0000 V0.1726 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N800 X3.3762 Y0.2582 Z0.0000 V0.1787 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N810 X3.3762 Y0.2157 Z0.0000 V0.1843 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N820 X3.3762 Y0.1765 Z0.0000 V0.1894 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N830 X3.3762 Y0.1407 Z0.0000 V0.1939 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N840 X3.3762 Y0.1085 Z0.0000 V0.1979 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N850 X3.3762 Y0.0803 Z0.0000 V0.2014 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N860 X3.3762 Y0.0561 Z0.0000 V0.2042 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N870 X3.3762 Y0.0361 Z0.0000 V0.2064 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N880 X3.3762 Y0.0204 Z0.0000 V0.2081 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N890 X3.3762 Y0.0091 Z0.0000 V0.2090 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N900 X3.3762 Y0.0023 Z0.0000 V0.2093 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N910 X223.8495 Y0.0000 Z0.0000 V81.4170
U0.0000 W0.0000 T1.6576

N920 X3.3762 Y-0.0023 Z0.0000 V0.2093 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N930 X3.3762 Y-0.0091 Z0.0000 V0.2090 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N940 X3.3762 Y-0.0204 Z0.0000 V0.2081 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N950 X3.3762 Y-0.0361 Z0.0000 V0.2064 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N960 X3.3762 Y-0.0561 Z0.0000 V0.2042 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N970 X3.3762 Y-0.0803 Z0.0000 V0.2014 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N980 X3.3762 Y-0.1085 Z0.0000 V0.1979 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N990 X3.3762 Y-0.1407 Z0.0000 V0.1939 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1000 X3.3762 Y-0.1765 Z0.0000 V0.1894 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1010 X3.3762 Y-0.2157 Z0.0000 V0.1843 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1020 X3.3762 Y-0.2582 Z0.0000 V0.1787 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1030 X3.3762 Y-0.3036 Z0.0000 V0.1726 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1040 X3.3762 Y-0.3517 Z0.0000 V0.1662 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1050 X3.3762 Y-0.4022 Z0.0000 V0.1594 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1060 X3.3762 Y-0.4547 Z0.0000 V0.1522 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1070 X3.3762 Y-0.5090 Z0.0000 V0.1447 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1080 X3.3762 Y-0.5646 Z0.0000 V0.1370 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1090 X3.3762 Y-0.6213 Z0.0000 V0.1291 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1100 X3.3762 Y-0.6788 Z0.0000 V0.1210 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1110 X3.3762 Y-0.7366 Z0.0000 V0.1129 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1120 X3.3762 Y-0.7944 Z0.0000 V0.1047 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1130 X3.3762 Y-0.8518 Z0.0000 V0.0965 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1140 X3.3762 Y-0.9085 Z0.0000 V0.0883 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1150 X3.3762 Y-0.9642 Z0.0000 V0.0802 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1160 X3.3762 Y-1.0184 Z0.0000 V0.0723 U0.0000
W0.0000 T0.0250

N1170 X3.3762 Y-1.0710 Z0.0000 V0.0646 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1180 X3.3762 Y-1.1214 Z0.0000 V0.0572 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1190 X3.3762 Y-1.1695 Z0.0000 V0.0500 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1200 X3.3762 Y-1.2149 Z0.0000 V0.0431 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1210 X3.3762 Y-1.2574 Z0.0000 V0.0367 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1220 X3.3762 Y-1.2967 Z0.0000 V0.0307 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1230 X3.3762 Y-1.3325 Z0.0000 V0.0251 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1240 X3.3762 Y-1.3646 Z0.0000 V0.0200 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1250 X3.3762 Y-1.3929 Z0.0000 V0.0154 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1260 X3.3762 Y-1.4171 Z0.0000 V0.0114 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1270 X3.3762 Y-1.4371 Z0.0000 V0.0080 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1280 X3.3762 Y-1.4528 Z0.0000 V0.0051 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1290 X3.3762 Y-1.4641 Z0.0000 V0.0029 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1300 X3.3762 Y-1.4709 Z0.0000 V0.0013 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1310 X3.3762 Y-1.4731 Z0.0000 V0.0003 U0.0000
W0.0000 T0.0250
N1320 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1330 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1340 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1350 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1360 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1370 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1380 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1390 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1400 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219
N1410 X421.6056 Y-183.9601 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T3.1219

N1420 X3.3762 Y-1.4731 Z0.0000 V-0.0003 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1430 X3.3762 Y-1.4709 Z0.0000 V-0.0013 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1440 X3.3762 Y-1.4641 Z0.0000 V-0.0029 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1450 X3.3762 Y-1.4528 Z0.0000 V-0.0051 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1460 X3.3762 Y-1.4371 Z0.0000 V-0.0080 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1470 X3.3762 Y-1.4171 Z0.0000 V-0.0114 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1480 X3.3762 Y-1.3929 Z0.0000 V-0.0154 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1490 X3.3762 Y-1.3646 Z0.0000 V-0.0200 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1500 X3.3762 Y-1.3325 Z0.0000 V-0.0251 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1510 X3.3762 Y-1.2967 Z0.0000 V-0.0307 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1520 X3.3762 Y-1.2574 Z0.0000 V-0.0367 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1530 X3.3762 Y-1.2149 Z0.0000 V-0.0431 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1540 X3.3762 Y-1.1695 Z0.0000 V-0.0500 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1550 X3.3762 Y-1.1214 Z0.0000 V-0.0572 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1560 X3.3762 Y-1.0710 Z0.0000 V-0.0646 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1570 X3.3762 Y-1.0184 Z0.0000 V-0.0723 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1580 X3.3762 Y-0.9642 Z0.0000 V-0.0802 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1590 X3.3762 Y-0.9085 Z0.0000 V-0.0883 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1600 X3.3762 Y-0.8518 Z0.0000 V-0.0965 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1610 X3.3762 Y-0.7944 Z0.0000 V-0.1047 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1620 X3.3762 Y-0.7366 Z0.0000 V-0.1129 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1630 X3.3762 Y-0.6788 Z0.0000 V-0.1210 U0.0000 W0.0000 T0.0250
Τεμάχιο 3

Filament Winding Segment, created: 3/10/2019
=====
=====
TITLE: RADIAL Layer

N1640 X3.3762 Y-0.6213 Z0.0000 V-0.1291 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1650 X3.3762 Y-0.5646 Z0.0000 V-0.1370 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1660 X3.3762 Y-0.5090 Z0.0000 V-0.1447 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1670 X3.3762 Y-0.4547 Z0.0000 V-0.1522 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1680 X3.3762 Y-0.4022 Z0.0000 V-0.1594 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1690 X3.3762 Y-0.3517 Z0.0000 V-0.1662 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1700 X3.3762 Y-0.3036 Z0.0000 V-0.1726 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1710 X3.3762 Y-0.2582 Z0.0000 V-0.1787 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1720 X3.3762 Y-0.2157 Z0.0000 V-0.1843 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1730 X3.3762 Y-0.1765 Z0.0000 V-0.1894 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1740 X3.3762 Y-0.1407 Z0.0000 V-0.1939 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1750 X3.3762 Y-0.1085 Z0.0000 V-0.1979 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1760 X3.3762 Y-0.0803 Z0.0000 V-0.2014 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1770 X3.3762 Y-0.0561 Z0.0000 V-0.2042 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1780 X3.3762 Y-0.0361 Z0.0000 V-0.2064 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1790 X3.3762 Y-0.0204 Z0.0000 V-0.2081 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1800 X3.3762 Y-0.0091 Z0.0000 V-0.2090 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1810 X3.3762 Y-0.0023 Z0.0000 V-0.2093 U0.0000 W0.0000 T0.0250
N1820 X223.8495 Y0.0000 Z0.0000 V-81.4170 U0.0000 W0.0000 T1.6576
=====
==
PARAMETERS 5.00 6.00 22.00 45.00 P 400.00
30.00 17 3.000 40 0.025

MANDREL: Tube
MANDREL FILE: t.mdr
UNITS: mm


```

OFFSET:      X0.0000 Y265.0000 Z545.0000
V0.0000 U0.0000 W0.0000
MOVE:        ABS
CYCLES:      1
STARTING POINT: AUTO
FIND PATH:   YES
START BUTTON: YES
OPTIMIZATION: NO
CYCLE LENGTH: 100.00
=====
=====
N10 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N20 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N30 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N40 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N50 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N60 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N70 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N80 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N90 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000 U0.0000
W0.0000 T0.6350
N100 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N110 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N120 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N130 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N140 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N150 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N160 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N170 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N180 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N190 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N200 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350

```

```

N210 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N220 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N230 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N240 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N250 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N260 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N270 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N280 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N290 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N300 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N310 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N320 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N330 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N340 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N350 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N360 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N370 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N380 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N390 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N400 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N410 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N420 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N430 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N440 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350
N450 X242.5532 Y19.8936 Z0.0000 V0.0000
U0.0000 W0.0000 T0.6350

```


=====

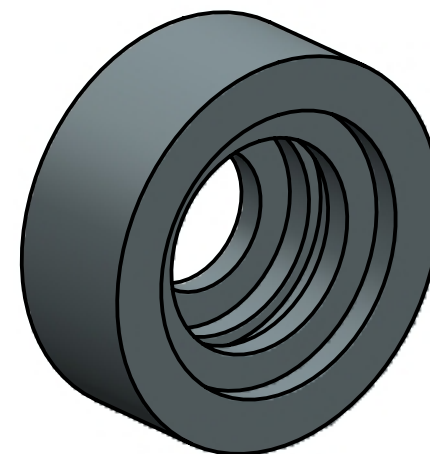
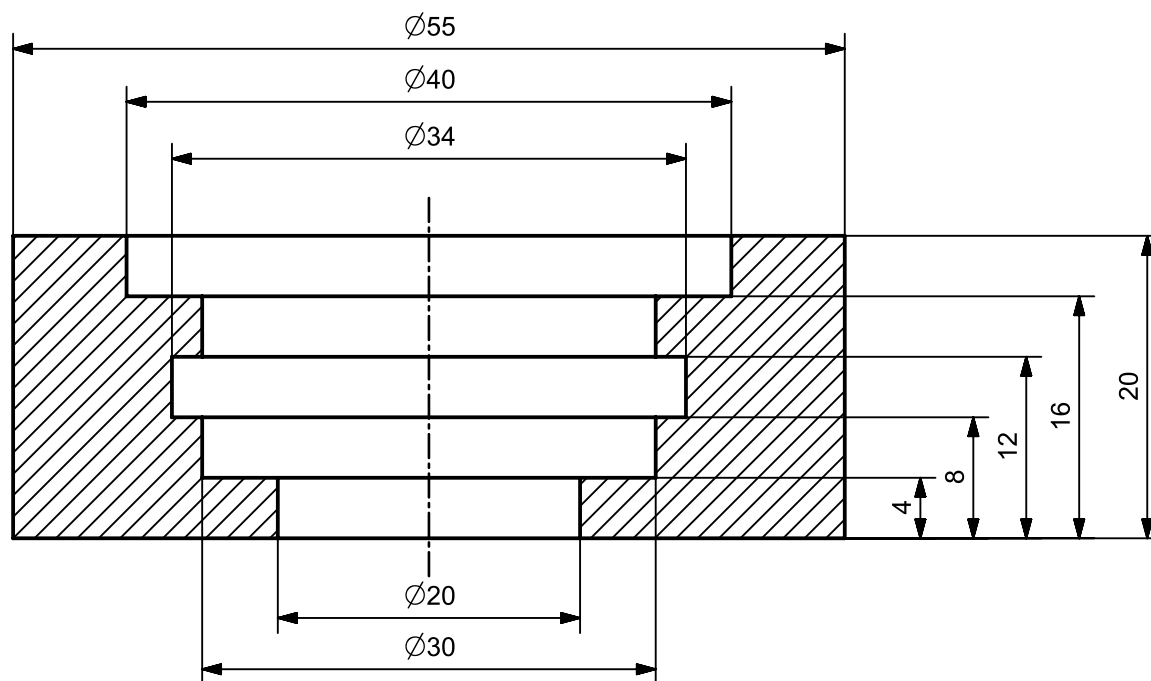
PARAMETERS RADIAL 10.00 30.00 1 0.00 0.00 P
400.00 30.00 360.00 0

7. Βιβλιογραφία

- Αντωνιάδης Αριστομένης, 2017. Μηχανουργική Τεχνολογία, Κατεργασίες κοπής, εκδόσεις Τζιόλα.
- Αντωνιάδης Αριστομένης, 2018. Μηχανολογικό Σχέδιο 3^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα.
- Steve Krar, Arthur Gill, 1993. Μηχανές Αριθμητικού Ελέγχου Τεχνολογία και Προγραμματισμός, εκδόσεις Τζιόλα.
- Bhagwan D. Agarval, Lawrence J. Broutman, K. Chandrashekhara, 2006. Analysis and Performance of Fiber Composites.
- Τιριακίδου Θωμάϊς, 2014. Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων νανοσύνθετων και μικροσύνθετων υλικών.
- Ηλίας Μπιλάλης, 2016. Experimental and Numerical Study of Composite Shafts.
- Σοφιάκης Κωνσταντίνος 2014. Προγραμματισμός τεμαχίων τόννευσης με χρήση κώδικα ψηφιακής καθοδήγησης κατά ISO.
- Ευστράτιος Μουντάκης, 2019. Ψηφιακή καθοδηγούμενη τόννευση με χρήση του λογισμικού CAD/CAM NX.
- Θ.Π. Φιλιππίδης, 2004. Σημειώσεις στο Μάθημα Μηχανική Σύνθετων Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής.
- M.M. Shokrieh, S.M. Kamali Shahri, 2014. Modeling residual stresses in composite materials.

Παράρτημα μηχανολογικών σχεδίων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα μηχανολογικά σχέδια των ακραξονίων που κατασκευάστηκαν για την Διπλωματική Εργασία, με τη σειρά με την οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.



Σχεδίαση: Νικόλαος Τιριακίδης		Ανοχές: Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
Τίτλος: 1ο Ακραξόνιο		Αριθμός: m3 411 1-4	
Κλίμ. 2:1	Ημερομηνία 18/9/2019	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1

