

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας σε σύνθετα πολυστρωματικά υλικά εποξειδικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα (CFRP), με χρήση πεπιεσμένου αέρα ως ψυκτικό μέσο κοπής

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΟΥΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Πτυχιούχος Επιστήμονας Υλικών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Α. Μαρκόπουλος Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας σε σύνθετα πολυστρωματικά υλικά εποξειδικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα (CFRP), με χρήση πεπιεσμένου αέρα ως ψυκτικό μέσο κοπής

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΟΥΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Πτυχιούχος Επιστήμονας Υλικών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Μαρκόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λ. Ζουμπουλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας η οποία υπήρξε περισσότερο αφορμή και μέσο για ένα ταξίδι γνώσης και επιμόρφωσης και προπάντων ευκαιρία για να διεισδύσω βαθύτερα στον κόσμο της Μηχανολογίας και ειδικότερα των κατεργασιών, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια και τους φίλους μου για την υπομονή τους, την εμπιστοσύνη τους σε εμένα και τις αποφάσεις μου, καθώς και για τις θετικές τους σκέψεις όλον αυτόν τον καιρό.

Ευχαριστώ για τη στήριξη, την καθοδήγηση και την υπομονή του, τον επιβλέποντα Επίκουρο καθηγητή Δρ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας μεταπτυχιακής ερευνητικής εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές στις φάσεις ολοκλήρωσής της.

Τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή, Δρ. Δημήτριο Μανωλάκο στο πρόσωπο του οποίου είχα την τύχη να βρω τον καλύτερο δυνατό σύμμαχο και συνεργάτη στην προσπάθεια υλοποίησης των στόχων μου.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα την ψυχή του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δηλαδή τους φοιτητές, φίλους και συνεργάτες του, όσους πέρασαν αλλά και όσους παραμένουν, τους υποψήφιους διδάκτορες Ιωάννη Παπαντωνίου και Νικόλαο Κάρκαλο, τον Νικόλαο Μελισσά και τον Κωνσταντίνο Κερασιώτη για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχαν κάθε φορά που τη χρειάστηκα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Επιδράσεις των συνθηκών φρεζαρίσματος σε σύνθετα πολυστρωματικά υλικά εποξειδικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα (CFRP), με χρήση πεπιεσμένου αέρα ως ψυκτικού μέσου κοπής.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εστιάζει στην μελέτη των επιπτώσεων των παραμέτρων κοπής κατά το φρεζάρισμα της επιφάνειας σε δοκίμια ορθογωνικής γεωμετρίας, η οποία θεωρείται κατεργασία αποβολής υλικού υψηλής ακριβείας με μεγάλη συχνότητα χρήσης κατά την κατασκευή εξαρτημάτων. Πιο συγκεκριμένα, αφορά τις φθορές που προκαλούνται στο υπό κατεργασία υλικό, τις δυνάμεις που δέχεται το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή και τέλος την ακρίβεια διαστάσεων κοπής, την τραχύτητα της επεξεργασμένης επιφάνειας αλλά και τα χρονικά οφέλη που μπορούμε να αποκομίσουμε εκτελώντας την κατεργασία, σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής και την πρόωση του κοπτικού εργαλείου.

Το υπό μελέτη υλικό που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις ενισχυτικής φάσης ινών άνθρακα, με μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Για να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης με τις εφαρμογές του στη σύγχρονη βιομηχανία, επιλέχτηκαν για μελέτη 3 διαφορετικές διαστρωματώσεις, 2 μονοδιευθυντικές (Unidirectional) ως προς τον X και Y άξονα του υλικού και μια πλεκτή (Woven), διαγώνιας διαστρωμάτωσης με διεύθυνση ινών +45°/-45°. Ο λόγος χρήσης των διαστρωματώσεων αυτών ήταν η μελέτη των επιδράσεων που έχουν οι παράμετροι κοπής ανάλογα με τις διευθύνσεις που βρίσκονται οι ίνες άνθρακα μέσα στο υλικό.

Ένας σημαντικός παράγοντας στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται η χρήση παροχής πεπιεσμένου αέρα, ως ψυκτικό μέσο τόσο του κατεργαζόμενου υλικού όσο και του κοπτικού εργαλείου, αλλά και ως μέσου αποβολής των αποβλίττων που παράγονται κατά τη διάρκεια της κοπής. Δεδομένου του ότι τα απόβλιττα (chips) δεσμεύουν ένα μέρος της θερμότητας που παράγεται λόγω τριβής, ενώ παράλληλα δημιουργούν προβλήματα προσάρτησης πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητά του, θεωρείται πως η συγκεκριμένη προσθήκη έχει σημαντικό ρόλο στην βελτίωση των παραγόμενων εξαρτημάτων μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου αποβάλλοντας περισσευούμενη θερμότητα και μάζα στην επιφάνεια κοπής του υλικού.

Ο πειραματικός σχεδιασμός έγινε μέσω μελέτης της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με το αντικείμενο και το υπό μελέτη υλικό. Οι παράμετροι κοπής που επιλέχθηκαν μέσω του θεωρητικού μοντέλου Taguchi, στο σύνολό τους 16, αφορούν ένα συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο τύπου Router End Mill 8mm σε διάμετρο. Τα τελικά αποτελέσματα εξήχθησαν μέσω πειραματικού εξοπλισμού του Τομέα Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και ακολούθησε η αξιολόγηση και τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την άνωθεν διαδικασία.

ABSTRACT

Effects of milling conditions on carbon fiber reinforced epoxy laminate (CFRP) composite materials, using compressed air as a cooling agent.

This postgraduate thesis focuses on the study of the impact of cutting parameters when milling the surface on rectangular geometry specimens, which is considered to be a high precision material disposal process with a high frequency of use in component manufacturing. More specifically, it concerns the damage caused to the machined material, the forces the cutting tool receives during cutting and finally the cutting dimension accuracy, the roughness of the treated surface and the time benefits that can be obtained by performing the machining, depending on the rotation speed and propulsion of the cutting tool.

The material under study consists of successive layers of carbon fiber reinforcement, with an epoxy resin matrix. To provide a measure of comparison with its applications in the modern industry, 3 different layouts, 2 Unidirectional X and Y axes of material and a Woven, $45^{\circ}/-45^{\circ}$ diagonal fiber strand were selected for this study. The reason for using these layouts was to examine the effects of the cutting parameters according to the directions of the carbon fibers inside the material.

An important factor in this work is the use of compressed air supply, both as a refrigerant for both the processed material and the cutting tool, as well as for the disposal of material chips generated during cutting. Since chips block part of the heat produced by friction, while at the same time creating adhesion problems on the surface of the cutter thus reducing its efficiency, it is considered that this addition plays an important role in improving the components produced through this particular method, eliminating excessive heat and removing mass off the cutting surface of the material.

Experimental design was done by studying the existing literature on the subject and material under study. The selected from the Taguchi theoretical model cutting parameters, all 16, relate to a specific Router End Mill, 8mm diameter cutting tool. The final results were extracted through experimental equipment of the Laboratory of Manufacturing Technology of the NTUA, followed by the evaluation and the conclusions drawn from the above procedure.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
1.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	6
1.1.1 Εισαγωγή	6
1.1.2 Μηχανική Συμπεριφορά	8
1.1.3 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών	10
1.2 Ινώδη Σύνθετα Υλικά	13
1.2.1 Είδη Ινώδους Ενίσχυσης	13
1.2.1.1 Σύνθετα Υλικά Συνεχούς/Ευθυγραμμισμένης Ινώδους Ενίσχυσης, Μηχανικές Ιδιότητες	14
1.2.1.2 Μήκος Ίνας στο Σύνθετο	15
1.2.2 Τύποι Υφασμάτων Ινώδων Συνθέτων	16
1.2.3 Εφαρμογές των Ινωδών Συνθέτων Υλικών	18
1.3 Ινες Άνθρακα	19
1.3.1 Δομή των Ινών Άνθρακα	19
1.3.2 Ίνες Άνθρακα με Βάση το ΡΑΝ	
1.3.3 Ίνες Άνθρακα με Βάση την Πίσσα	21
1.4 Πολυμερικές Μήτρες	23
1.4.1 Θερμοσκλυρημένα Πολυμερή	24
1.4.2 Εποξειδικές Ρητίνες	25
1.4.3 Θερμοπλαστικές Ρητίνες	27
1.5 Μέθοδος Κατασκευής Σύνθετων Υλικών με τη Βοήθεια Αυτόκλειστου Φούρνου (Autoc Molding)	lave Bag 28
1.5.1 Τυπική Διάταξη Ενός Αυτόκλειστου Φούρνου	
1.5.2 Προετοιμασία Πριν την Εισαγωγή στον Αυτόκλειστο Φούρνο	
1.5.3 Συνθήκες Μορφοποίησης Εντός του Αυτόκλειστου Φούρνου	31
1.5.4 Ανάλυση των Συνθηκών Κατά τη Μορφοποίηση	
1.6 Μηχανές Αριθμητικού Ελέγχου CNC (Computer Numerical Control)	
1.6.1 Αριθμητικός Έλεγχος μέσω Η/Υ	
1.6.2 Άξονες Κίνησης Μηχανών CNC	
1.6.3 Εξαρτήματα/Μέρη Οριζόντιας Εργαλειομηχανής/Φρέζας CNC	
1.6.4 Ηλεκτρονικά Συστήματα Μηχανών CNC	
1.6.4.1 Βηματικοί Κινητήρες	
1.6.4.2 Κινητήρες Τύπου Servo	
1.6.5 Μηχανικά Υποσυστήματα Μηχανών CNC	41
1.6.5.1 Συστήματα Κίνησης Τράπεζας	41

1.6.5.2 Σ	Ευστήματα Συγκράτησης Εργαλείων Κατεργασίας	
1.6.6 Пр	ρογραμματισμός Μηχανών CNC	
1.6.7 Ev	τολές G Code	
КЕΦА	ΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	
ΚΕΦΑΛ	ΛΑΙΟ 3 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	
3.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	53
3.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	66
КЕФАЛ	ΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	73
4.1	Ακρίβεια Διαστάσεων Κοπής	74
4.2	Μέση Τιμή Τραχύτητας Επιφάνειας Κοπής (Ra, mm)	77
4.3	Δεδομένα Δυναμόμετρου - Μέγιστες Τιμές Δυνάμεων Κοπής	
4.4	Δεδομένα Στερεοσκοπίας – Μικροσκοπίας	
4.4.1 Συ	νθήκη Κοπής Α1	
4.4.2 Συ	νθήκη Κοπής Α2	
4.4.3 Συ	νθήκη Κοπής Α3	
4.4.4 Συ	νθήκη Κοπής Α4	
4.4.5 Συ	νθήκη Κοπής Β1	
4.4.6 Συ	νθήκη Κοπής Β2 (Προτεινόμενη από τον Κατασκευαστή)	
4.4.7. Σι	υνθήκη Κοπής Β3	
4.4.8. Σι	υνθήκη Κοπής Β4	
4.4.9. Σι	υνθήκη Κοπής Γ1	
4.4.10 Σ	ωνθήκη Κοπής Γ2	
4.4.11 Σ	ωνθήκη Κοπής Γ3	
4.4.12 Σ	ωνθήκη Κοπής Γ4	
4.4.13 Σ	ωνθήκη Κοπής Δ1	
4.4.14 Σ	ωνθήκη Κοπής Δ2	
4.4.15 Σ	ωνθήκη Κοπής Δ3	
4.4.16 Σ	ωνθήκη Κοπής Δ4	
ΚΕΦΑΛ	ΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1	Παρατηρήσεις	
5.2	Συμπεράσματα	
5.3	Προοπτικές	
ΒΙΒΛΙΟ	ΟΓΡΑΦΙΑ	
ВІОГРА	ΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	

κεφαλαίο 1 Θεωρητικό μερός

1.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1.1 Εισαγωγή

Πολλές από τις τεχνολογίες του σήμερα απαιτούν υλικά με ασυνήθιστους συνδυασμούς ιδιοτήτων οι οποίοι δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από τα συμβατικά κράματα μετάλλων, τα κεραμικά και τα πολυμερή υλικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές για υλικά τα οποία απαιτούνται στην αεροδιαστημική, στις υποβρύχιες χρήσεις και στις μεταφορές. Για παράδειγμα, οι μηχανικοί αεροσκαφών ψάχνουν συνεχώς για δομικά υλικά τα οποία έχουν χαμηλές πυκνότητες, είναι ανθεκτικά, δύσκαμπτα και αντέχουν στην απόξεση και την κρούση και δεν διαβρώνονται εύκολα. Αυτός είναι ένας μάλλον τρομαχτικός συνδυασμός χαρακτηριστικών. Συνήθως τα ανθεκτικά υλικά είναι σχετικά πυκνά, και με μειωμένη αντοχή σε κρούση επί το πλείστο. [1]

Γενικά ως **σύνθετο υλικό** (composite material ή composite, Γερμ.: Verbundwerkstoff, Composite) χαρακτηρίζεται το υλικό που προκύπτει από τον συνδυασμό δυο ή περισσότερων άλλων υλικών, τα οποία διαφέρουν ως προς την σύνθεση, τη μορφή και τις ιδιότητές τους και που βρίσκονται ως διασπορά μικροσκοπικής ή μακροσκοπικής κλίμακας. Όπως συνήθως συμβαίνει με τους ορισμούς «φυσικών» εννοιών υπάρχει δυσκολία σαφούς οριοθετήσεως τους. Έτσι, για παράδειγμα ένα μείγμα πολυμερών δεν χαρακτηρίζεται ως σύνθετο υλικό, αλλά ως πολυμέιγμα (polyblend). Τα κράματα μετάλλων δεν χαρακτηρίζονται ως σύνθετα υλικά, αν και αποτελούνται από δυο ή περισσότερα υλικά, όμως αυτά είναι καταμερισμένα σε μικροσκοπική κλίμακα (κάτω του 0.1 mm).

Ένα τυπικό σύνθετο υλικό αποτελείται από μια συνεχή μήτρα (ή φέρον υλικό) (matrix) του ενός συστατικού, μέσα στην οποία είναι διεσπαρμένο το δεύτερο συστατικό με τη μορφή σωματιδίων ή ινών. Ανάλογα με τη φύση της μήτρας τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε σύνθετα μεταλλικής, κεραμικής ή πολυμερικής μήτρας. Η τελευταία είναι και η συνηθέστερη, όπως επίσης συνήθες είναι η ενισχυτική φάση να αποτελείται επίσης από πολυμερές, όπως π.χ. οι αραμιδικές ίνες και οι ίνες άνθρακα.

Ανάλογα με το είδος υλικού μήτρας, το υλικό της ενισχυτικής φάσης και της διάταξης της ενίσχυσης στο χώρο μέσα στη μήτρα, ακόμα και το μέγεθος της ενίσχυσης (νάνο-μίκρομάκρο) τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται και κατηγοριοποιούνται έτσι ώστε να έχουμε ένα πολύτιμο εργαλείο για να επιλέξουμε το κατάλληλο υλικό, για την εκάστοτε εφαρμογή σε μελλοντική χρήση. Πιο κάτω, παρατίθεται σε σχετικό διάγραμμα μια τέτοια κατηγοριοποίηση. [2]



Εικόνα 1.1: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών [3]



Εικόνα 1.2: Επιφάνεια της περιοχής θράυσης ως παράδειγμα, που απεικονίζει τη μήτρα και την ενισχυτική φάση ενός CVI-SiCSiC-composite material [4]



Εικόνα 1.3: Κατηγορίες σύνθετων υλικών [5]

1.1.2 Μηχανική Συμπεριφορά

Επειδή τα σύνθετα υλικά θεωρούνται από την κατασκευή τους ανισότροπα μέσα, αναφερόμαστε στη γενικευμένη μορφή του Νόμου του Hooke για να καταλήξουμε σε κείνη τη μορφή ανισοτροπίας που μας εξυπηρετεί. Σε μια διάσταση ή στο επίπεδο η ορθή και η διατμητική τάση συσχετίζονται με την αντίστοιχη τους ορθή και διατμητική παραμόρφωση μέσω των σχέσεων του Νόμου του Hooke:

$$σ = E^* ε$$
και $τ = G^* γ$

Στη γενική όμως εντατική κατάσταση στο χώρο εμφανίζονται όλες οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, δηλαδή οι τανυστές σ_{ij} και ε_{ij} εμφανίζουν όλα τα στοιχεία τους για ένα σώμα.



Εικόνα 1.4: Εντατική κατάσταση σώματος

Επειδή πάντα είμαστε μέσα στο πλαίσιο της γραμμ. θεωρίας ελαστικότητας, χωρίς να χάνεται η γενίκευση του προβλήματος μπορούμε να πούμε ότι κάθε τάση συνδέεται γραμμικά με κάθε παραμόρφωση μέσω μιας σειράς γραμμικά ανεξάρτητων σταθερών αλλά και αντίστροφα, κάθε παραμόρφωση συνδέεται γραμμικά με κάθε τάση μέσω μιας σειράς σταθερών που είναι γραμμικά ανεξάρτητες. Στην πρώτη περίπτωση οι σταθεροί συντελεστές θα λέγονται ελαστικές σταθερές ή σταθερές δυσκαμψίας, ενώ στη δεύτερη λέγονται σταθερές ενδοτικότητας. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει το εξής σύστημα εξισώσεων 36 ελαστικών σταθερών:

$$\begin{split} \sigma_{\chi} &= A_1 * \epsilon_{\chi} + B_1 * \epsilon_y + C_1 * \epsilon_z + D_1 * \gamma_{xy} + E_1 * \gamma_{xz} + F_1 * \gamma_{yz} \\ \sigma_y &= A_2 * \epsilon_{\chi} + B_2 * \epsilon_y + C_2 * \epsilon_z + D_2 * \gamma_{xy} + E_2 * \gamma_{xz} + F_2 * \gamma_{yz} \end{split}$$

$$\tau_{yz} = A_6 \ast \epsilon_{\chi +} B_6 \ast \epsilon_y + C_6 \ast \epsilon_z + D_6 \ast \gamma_{xy} + E_6 \ast \gamma_{xz} + F_6 \ast \gamma_{yz}$$

Η αλλιώς, η τανυστική μορφή εξίσωσης στο καρτεσιανό σύστημα, με c_{ijkl} αναφερόμενος ως τανυστής 4^{ης} τάξης (τανυστής δυσκαμψίας):

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} * \varepsilon_{kl}$$
, i, j, k, l, = x,y,z

Αντίστροφα μπορεί να εκφραστεί το παραπάνω σύστημα για τις παραμορφώσεις, συναρτήσει του τανυστή ενδώσεως S του σύνθετου υλικού, αναφερόμενο ως σύστημα παραμορφώσεων τανυστικής μορφής στο καρτεσιανό σύστημα:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl} * \sigma_{kl}$$
, i, j, k, l, = x,y,z

Και ο τανυστής ενδώσεως είναι 4^{ης} τάξεως, με τους c_{ijkl} και s_{ijkl} να είναι συμμετρικοί, οπότε το πλήθος των $81=3^4$ στοιχείων τους υποβιβάζεται σε 36. Εάν το υλικό στο οποίο αναφερόμαστε έχει και τις 36 ελαστικές του σταθερές ανεξάρτητες μεταξύ τους τότε έχουμε ένα **τρικλινές** μέσο το οποίο δεν παρουσιάζει συμμετρίες και χαρακτηρίζεται ως **ανισότροπο.**

Τα σύνθετα υλικά γενικότερα παρουσιάζουν συμμετρίες ως προς συγκεκριμένους άξονες ή επίπεδα, βάσει των οποίων ο τανυστής δυσκαμψίας απλοποιείται σε μορφή και μειώνονται οι ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές. Στην εντελώς απλή περίπτωση όπου ένα υλικό έχει κάθε διεύθυνση στο χώρο ως διεύθυνση συμμετρίας τότε έχουμε ένα **ισότροπο** υλικό και αρκούν δυο μόνο ελαστικές σταθερές για την περιγραφή του: το μέτρο ελαστικότητας Ε και ο λόγος Poisson ν. Η αμέσως ανώτερη τάξη ελαστικής συμμετρίας είναι το **μονοκλινές (αελοτροπικό)**, όπου το μέσον έχει ένα απίπεδο συμμετρίας και κάθε διεύθυνση έχει τις ίδιες ιδιότητες με τη συμμετρική της ως προς το επίπεδο αυτό. Εάν το υλικό όμως έχει επιπλέον ένα ακόμα επίπεδο συμμετρίας κάθετο στο προηγούμενο, δηλαδή το υλικό παρουσιάζει συνολικά δυο κάθετα επίπεδα συμμετρίας, τότε λέγεται **ορθότροπο.** Τα περισσότερα σύνθετα υλικά μονής στρώσης χαρακτηρίζονται από τέτοια συμμετρία. Ο τανυστής δυσκαμψίας ενός ορθότροπου υλικού έχει 9 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές.

Μια άλλη περίπτωση ελαστικής συμμετρίας είναι αυτή που το υλικό παρουσιάζει έναν άξονα ως προς τον οποίο όλες οι κάθετες διευθύνσεις είναι συμμετρικές ως προς τις ελαστικές ιδιότητες. Πρόκειται για ακόμα ανώτερη τάξη ελαστικής συμμετρίας από αυτή του ορθότροπου μέσου, η οποία ονομάζεται **εγκαρσίως ισότροπο μέσον** και ο τανυστής δυσκαμψίας του έχει 6 ελαστικές σταθερές.

Συνηθισμένες περιπτώσεις εκγρασίως ισοτρόπων μέσων στα σύνθετα υλικά είναι οι ίνες του άνθρακα, του Kevlar και οι περισσότεροι γενικά τύποι ινών εκτός από αυτών του γυαλιού που είναι ισότροπες. [6]



Εικόνα 1.5: Τύποι συμμετριών μέσα σε ένα υλικό [7]

1.1.3 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά συντροφεύουν την ανθρωπότητα από τα πρώτα βήματά της στις κατασκευές, μέχρι και σήμερα, από τις πιο απλές εφαρμογές έως τις πιο εξεζητημένες. Ως τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο θεωρούνται οι πλίνθοι λάσπης και άχυρου από τους Εβραίους, όπου έδιναν μεγαλύτερη ευελιξία στις κατασκευές λόγω της ευκολίας τους να μορφοποιηθούν και να τοποθετηθούν σε διάφορες θέσεις, διατηρώντας παράλληλα σχετική ακαμψία στην κατασκευή, θερμική μόνωση και μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου, και σύνθετα από ξύλο και πίσσα από τους Αιγύπτιους, με κατάλληλο προσανατολισμό για τη μεταφορά των δυνάμεων μέσα στο υλικό από τις ίνες του ξύλου. Προχωρώντας, είχαμε μεγάλη αύξηση της χρήσης των σύνθετων υλικών μέσα στον 20° και 21° αιώνα, σε πεδία όπως η αεροδιαστημική και η ναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιοιατρική καθώς και στον κόσμο των σπορ και του θεάματος.

Η μεγαλύτερη ιστορικά χρήση των σύνθετων υλικών παρατηρήθηκε τα τελευταία 30 με 35 έτη, ξεκινώντας αργά από πιο πριν σε απλοϊκές φαινομενικά κατασκευές όπως δοχεία και δεξαμενές, κατασκευασμένες με περιέλιξη ινών και ικανές να συγκρατήσουν περιεχόμενα υπό υψηλή πίεση. Προχωρώντας, από τη δεκαετία του '60-70 έχουμε εφαρμογές σύνθετων υλικών με ίνες βορίου και αργότερα άλλων ινών (αραμιδίου, άνθρακα, γυαλιού) σε αεροσκάφη, αντικαθιστώντας σταδιακά κάποια μηχανικά μέρη από κράματα αλουμινίου. Πλέον η χρήση τους έχει καταστεί απαραίτητη για την κατασκευή ενός αεροσκάφους ή διαστημοπλοίου, λόγω του ότι προσφέρουν υψηλή δομική αντοχή, ελαστικότητα ή ακαμψία στα σημεία που απαιτείται και σημαντικά χαμηλότερο βάρος, πράγμα που οδηγεί σε ευέλικτα, αποδοτικότερα σε καύσιμο, γρηγορότερα και ισχυρότερα αεροσκάφη.



Εικόνα 1.6: Δείγμα της εκτεταμένης χρήσης σύνθετων υλικών στο πολεμικό αεροσκάφος F-35 [7]

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, παρόλο που η χρήση των σύνθετων υλικών περιορίζονταν σε «εξωτικές» κατασκευές-υπεραυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων και αγωνιστικά, πλέον φτάνουν σε ένα βαθμό και στα καθημερινά αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες κ.α. Υπάρχουν εταιρίες οι οποίες χρησιμοποιούν δομικά μέρη του αμαξώματος (έως και ολόκληρους σκελετούς) από ινώδη σύνθετα, εξαρτήματα όπως άξονες μετάδοσης και τροχούς, με τις πιο οικονομικές εφαρμογές να αφορούν εξωτερικά πάνελ από σύνθετα κοκκώδους ή ινώδους τυχαίου προσανατολισμού ενίσχυσης, με σκοπό τη μείωση και τη μετατόπιση του κέντρου βάρους σε σχέση με τα αντίστοιχα μεταλλικά, την αυξημένη αντοχή σε κρούσεις και την εξοικονόμηση καυσίμου. Φαίνεται λοιπόν πως εκτός από εφαρμογές με σκοπό τις υψηλές επιδόσεις, έχουμε προχωρήσει και στην επίλυση πιο πρακτικών προβλημάτων.



Εικόνα 1.7: Εξωτερικά πάνελ κατασκευασμένα από σύνθετο υλικό SMC (Sheet Moulding Compound) της Alfa Romeo 4C [7]

Εκτός από τα σπορ και τις παραπάνω εφαρμογές, αξίζει να σημειωθεί και η εκτεταμένη πλέον χρήση των υλικών αυτών σε ιατρικές εφαρμογές, αντικαθιστώντας τα μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενα υλικά (αλουμίνιο, τιτάνιο, χάλυβας) και διευκολύνοντας ακόμα περισσότερο τη ζωή του ασθενούς. Μια τέτοια χρήση που βρίσκει όλο και περισσότερο έδαφος η χρήση συνθέτων είναι τα προσθετικά μέλη, όπου δίνουν ξανά τη δυνατότητα αυτονομίας σε άτομα που λόγω συγκυριών την είχαν απωλέσει. [7] Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 1.8: Σύγκριση μεταλλικού προσθετικού μέλους (δεξιά) με αντίστοιχο μέλος από σύνθετο υλικό (αριστερά) σε περίπτωση ακρωτηριασμού κάτω άκρων [8]

1.2 Ινώδη Σύνθετα Υλικά

Γενικά σε τεχνολογικές εφαρμογές, τα σημαντικότερα και πιο διαδεδομένα σύνθετα υλικά διαθέτουν ενισχυτική φάση σε μορφή ινών. Οι στόχοι σχεδιασμού ενός τέτοιου συνθέτου αποσκοπεί στην σχέση υψηλής αντοχής και/ή δυσκαμψίας σε σχέση με το μικρό τους βάρος. Αυτά τα χαρακτηριστικά τους εκφράζονται από τους όρους της «ειδικής αντοχής» και του «ειδικού μέτρου ελαστικότητας». Οι παράμετροι αυτοί αντιστοιχούν στους λόγους εφελκυστικής αντοχής ως προς το ειδικό βάρος και στο μέτρο ελαστικότητας ως προς το ειδικό βάρος κατ' ακολουθία. Πλέον, με τη χρήση υλικών μήτρας και ενισχυτικής φάσης χαμηλών πυκνοτήτων και υψηλών τιμών ειδικής αντοχής/μέτρου ελαστικότητας μπορούμε και κατασκευάζουμε έχοντας όλα τα πλεονεκτήματα σχεδόν ενός μετάλλου, χωρίς την επιπλέον μάζα με τα προβλήματα που αυτή συνεπάγεται.

Ένα αξιοπρόσεκτο χαρακτηριστικό των υλικών (το οποίο εξηγείται λόγω της μικρότερης διάδοσης ατελειών μέσα στη μάζα του υλικού, σε σχέση με τεμάχια μεγαλύτερου όγκου), είναι το ότι οι ίνες μικρής διαμέτρου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε σχέση με το αντίστοιχο υλικό από το οποίο αποτελούνται. Η πιθανότητα παρουσίας κρίσιμης, για την ακεραιότητα του υλικού σε τάσης κοντά στο όριο θραύσης, ατέλειας στις ίνες ελαχιστοποιείται, πράγμα το οποίο εκμεταλλευόμαστε προς όφελος των ινωδών συνθέτων. Ένα επιπλέον πλεονέκτημά τους αποτελεί και το ότι διαθέτουν μεγάλες αντοχές σε εφελκυστικές τάσεις.

Για να μπορέσουμε να τις κατηγοριοποιήσουμε, καταλήξαμε στο διαχωρισμό τους ως προς τη διάμετρό τους. Έτσι έχουμε τις κατηγορίες των συρμάτων, των ινών και των βελονών, με τις τελευταίες να διαθέτουν υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας, ο οποίος συνεπάγεται κορυφαίες μηχανικές ιδιότητες αλλά και πολύ υψηλό κόστος. Όσον αφορά την εξεταζόμενη διαμόρφωση, δηλαδή τις ίνες, πρόκειται είτε για πολυκρυσταλλικά είτε άμορφα υλικά μικρών διαμέτρων και είναι είτε πολυμερικές, είτε κεραμικές, είτε μεταλλικές (π.χ. αραμίδιο, βόριο, άνθρακας, γυαλί, τιτάνιο). Τέλος όσον αφορά τα σύρματα διαθέτουν μεγάλες διαμέτρους και χρησιμοποιούνται ως περιελίξεις δοχείων, ελαστικών αυτοκινήτων κ.α. Αποτελούνται από μεταλλικά υλικά, με τα πιο διαδεδομένα να είναι το αλουμίνιο και το ατσάλι. [7]

1.2.1 Είδη Ινώδους Ενίσχυσης

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που καθορίζουν τα είδη των ινωδών ενισχυτικών φάσεων μέσα σε ένα σύνθετο. Αυτοί αφορούν την ταξινόμηση μέσα στη μήτρα, τον προσανατολισμό αναφορικά με τις πλησιέστερες, την συγκέντρωση και την κατανομή μέσα στη μήτρα. Κάθε παράγοντας ξεχωριστά επηρρεάζει και εντέλει καθορίζει το τι συμπεριφορά θα έχει αργότερα μέσα στην κατασκευή μας το σύνθετο υλικό που διαθέσαμε. Για να επιτύχουμε τις βέλτιστες στο σύνολο ιδιότητες του σύνθετου, στοχεύουμε σε μια ομοιόμορφη κατανομή των ινών μέσα σε αυτό. Απο εκεί και έπειτα, μπορούμε να κάνουμε ένα διαχωρισμό των ειδών ανάλογα (κατά τον διαμήκη άξονα του συνθέτου) την ευθυγράμμιση/τυχαία διάταξη των ινών στο σύνθετο και την συνέχεια/ασυνέχεια τους μέσα σε αυτό. Μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν και σύνθετα με ασυνεχείς αλλά ευθυγραμμισμένες ίνες (το σύνηθες είναι συνεχείς/ευθυγραμμισμένες), με τη πιο διαδεδομένη μορφή τους να διαθέτουν ασυνεχείς/τυχαία πρασανατολισμένες ή ασυνεχείς/μερικά προσανατολισμένες. Στην περίπτωση που εξετάζουμε εδώ, θα αναφερθούμε σε σύνθετο υλικό συνεχούς και ευθυγραμμισμένης ινώδους ενίσχυσης. [7]

1.2.1.1 Σύνθετα Υλικά Συνεχούς/Ευθυγραμμισμένης Ινώδους Ενίσχυσης, Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες τέτοιων σύνθετων εξαρτώνται από παράγοντες όπως η συμπεριφορά τάσης/παραμόρφωσης της ενισχυτικής φάσης και της μήτρας, ο λόγος κατ' όγκο περιεκτικότητας της μήτρας σε ενισχυτική φάση και η διεύθυνση εφαρμογής τάσεων στο υλικό. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως αυτά τα σύνθετα είναι πλήρως ανισότροπα στις ιδιότητές τους, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα τη διεύθυνση στην οποία μετρώνται. Για λόγους ευκολίας μελετάται η συμπεριφορά τους σε εφαρμογή τάσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση των ινών. Επίσης, ως συνήθη παραδείγματα λαμβάνονται οι περιπτώσεις όλκιμης/ψαθυρής ίνας και μήτρας αντία της μήτρας (ψαθυρές μήτρες), αστοχία του συνθέτου πριν την αστοχία της μήτρας λόγω παραμορφώσεων θραύσης των ινών και παραμορφώσεις θραύσης ινών/μήτρας αρκετά κοντινές σε τιμές, με διαφορετικές τιμές τάσεων όμως η κάθε μια. Σχηματικά μπορούμε να δούμε τέτοια διαγράμματα περιπτώσεων σύνθετων υλικών στην Εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9: Διαγράμματα τάσεων/παραμορφώσεων για διάφορους συνδυασμούς μήτρας/ενισχυτικής φάσης, όπου σ Ι=εφελκυστικές αντοχές ινώδους φάσης, σ Μ=μητρικής φάσης, σ Ολ.=συνθέτου υλικού και ε Μ, ε Ι, ε Ολ. εφελκυστικές παραμορφώσεις θραύσης.

Το υλικό θα αρχίσει να αστοχεί, όταν οι ίνες ή η μήτρα θα αστοχήσουν αντίστοιχα μέσω θραύσης. Παρόλα αυτά, η αστοχία ενός ινώδους συνθέτου δεν είναι πάντα καταστροφική. Αυτό εξηγείται, μέσω της παραδοχής ότι δεν υπάρχει πάντα ολοκληρωτική θραύση του συνόλου των ινών μέσα στον όγκο του συνθέτου, εφόσον υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις στην τάση θραύσης των ψαθυρών ινωδών υλικών. Επίσης, στην περίπτωση που η μήτρα μπορεί να παραμορφωθεί εκτενέστερα ακόμα και όταν έχει επέλθει η θραύση των ινών, το υλικό μπορεί να υποστηρίξει ακόμα (ως ενα βαθμό) κάποια φορτία της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι οι ίνες μπορεί να είναι ακόμα εγκλωβισμένες μέσα στη μήτρα, αποτελώντας ουσιαστικά ασυνεχή ενισχυτική φάση με μικρότερες ικανότητες πρόσληψης φορτίου μεν, αλλά υπαρκτές. [6]

1.2.1.2 Μήκος Ίνας στο Σύνθετο

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διαθέτουν κάποια χαρακτηριστικά, όσον αφορά τη μηχανική τους, τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρονται οι εφαρμοζόμενες φορτίσεις από τη μήτρα στην ινώδη ενίσχυση. Ένας παράγοντας μεγάλης σημασίας για το εάν θα είναι επιτυχής αυτή η μεταφορά ή όχι είναι το πόσο ισχυρός θα είναι ο διεπιφανειακός δεσμός μεταξύ ινών/μήτρας.

Στην περίπτωση που έχουμε μια εφαρμοζόμενη τάση η οποία ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή, ο διεπιφανειακός δεσμός χάνεται στα άκρα της επαφής μήτρας/ίνας, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται εφελκυστικές παραμορφώσεις στη μήτρα. Για να αποτραπεί κάτι τέτοιο, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα *κρίσιμο μήκος ίνας l*_c το οποίο θα αποτρέπει τέτοιου είδους παραμορφώσεις, αυξάνοντας ουσιαστικά την αντοχή και τη δυσκαμψία του σύνθετου υλικού. Το l_c βρίσκεται πάντα σε συνάρτηση με τη διάμετρο των ινών **d** και από την εφελκυστική τους αντοχή **σ***_f. Φυσικά, μέσα σε αυτή τη συνάρτηση ιδιοτήτων δε μπορεί να λείπει και η αντοχή του δεσμού ίνας/μήτρας (ή την τιμή τάσης διάτμησης της μήτρας, σε περίπτωση που αστοχεί πρώτη) **τ**_c, όπως στον παρακάτω τύπο εύρεσης κρίσιμου μήκους ίνας μέσα στο σύνθετο:

$$lc = \sigma *_f d / 2\tau_c$$

Για έναν συνδυασμό μήτρας και ενισχυτικής φάσης υαλονημάτων ή ανθρακονημάτων, το κρίσιμο μήκος ίνας είναι κοντά στο 1 mm, διάσταση η οποία αντιστοιχεί στις 20 με 150 φορές της διαμέτρου της. Στην περίπτωση που εφαρμοστεί μια τάση σε μια ίνα, με μήκος ακριβώς όσο το κρίσιμο μήκος της, τότε έχουμε ένα προφίλ τάσης/απόστασης, όπως φαίνεται στην περίπτωση (a) της Εικόνας 1.10, δηλαδή πετυχαίνουμε το μέγιστο φορτίο στο αξονικό κέντρο της ίνας. Εάν

τώρα αυξήσουμε το μήκος της ίνας, η ενίσχυση γίνεται αποτελεσματικότερη, όπως φαίνεται στην περίπτωση (b) από την κατανομή μηχανικής τάσης και αξονικής θέσης. Το αντίθετο ισχύει για μικρότερα μήκη ίνας από το κρίσιμο, όπως φαίνεται την περίπτωση (c). Όταν πρόκειται για ίνες με μήκος l >> lc (με λόγο συχνά στο l = 15lc) ονομάζονται συνεχείς, και ασυνεχείς όσες έχουν λόγους μήκους μικρότερους του lc, όπου και παρατηρείται παραμόρφωση της μήτρας γύρω από την ίνα με τρόπο που δεν ευνοεί την μεταφορά των φορτίων σε αυτήν, μη μπορώντας πλέον να προσφέρει ενίσχυση στο υλικό (αυτό ισχύει κατ' ουσία στα κοκκώδη σύνθετα υλικά). [9]



Εικόνα 1.10: Γραφικές παραστάσεις κατανομής τάσης αντοχής ίνας/μήκους ίνας σε σχέση με το κρίσιμο μήκος le.

1.2.2 Τύποι Υφασμάτων Ινώδων Συνθέτων

Στην πρώτη περίπτωση, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ινώδες σύνθετο χρησιμοποιώντας θυσάνους λεπτών νημάτων με διαφορετικές ονομασίες, ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαδικασία. Σε ίνες άνθρακα και KEVLAR/NOMEX η κατασκευή τους γίνεται σε δέματα από εκατοντάδες χιλιάδες ελεύθερα νήματα, με την ονομασία «tow» (στουπί). Στις ίνες γυαλιού γίνονται πλεξούδες των 102 ή 204 νημάτων, τα οποία δένονται μεταξύ τους δίχως στρέψη σε τύμπανα. Στην περίπτωση συστροφής των νημάτων το υλικό ονομάζεται «yarn», το οποίο διατίθεται και σε φύλλα.

Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε τις ταινίες μονής διεύθυνσης (μονοδιευθυντικές/tows). Σε αυτές, γίνεται προ εμποτισμός με ρητίνη σχετικά υψηλού ιξώδους ή με θερμοπλαστικό πολυμερές προκειμένου να παραμείνουν οι ίνες διατεταγμένες στη θέση τους.

Στην τρίτη περίπτωση έχουμε τα υφαντά ενισχυτικών ινών, με τον επιπλέον διαχωρισμό τους σε πέντε τύπους, ανάλογα την πλέξη που έχει χρησιμοποιηθεί. Ο πρώτος τύπος αφορά την απλή πλέξη «plain weave», που είναι και η πιο συνηθισμένη, και που οι διαμήκεις και εγκάρσιοι

θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα (0°/90°) μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ σε επίπεδα το ένα πάνω στο άλλο. Ο δεύτερος τύπος αφορά τη διαγώνια πλέξη «twill», και χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφανείας σε σύγκριση με την πρώτη και από την διαγώνια γραμμή, απ' όπου φέρει και το όνομά της,. Επίσης, η μορφή του υφάσματος αυτού είναι διαφορετική στην εμπρόσθια και οπίσθια όψη του.

Ο τρίτος τύπος πλέξης αφορά τα πλεκτά «satin», όπου η εμπρόσθια επιφάνεια κυριαρχείται από τους διαμήκεις θυσάνους ινών (warp), ενώ διαφέρει στις όψεις του όπως και το ύφασμα τύπου «twill», και βρίσκει μεγάλη απήχηση στην κατασκευή σύνθετων υλικών. Ο τέταρτος τύπος αφορά την καλαθωτή πλέξη «basket weave», όπου αποτελεί μια παραλλαγή της απλής πλέξης και αποτελείται από δύο ή περισσότερους θυσάνους, διασταυρούμενους εγκάρσια με άλλους δυο ή περισσότερους θυσάνους ινών. Σε σύγκριση με την απλή είναι ισχυρότερη αλλά λιγότερο σταθερή εξαιτίας μια σχετικής χαλαρότητας στη διάταξη των ινών. Τέλος, αναφέρεται και η πλέξη τύπου «LENO», χαρακτηριζόμενη και ως "κλειδωμένη", στην οποία περιορίζονται στο ελάχιστο οι κινήσεις των θυσάνων.

Σε όλες τις πλέξεις το κοινό σημείο είναι οι διασταυρώσεις των ινών στις 90°. Υπάρχουν όμως και πλέξεις με διαγώνια τοποθετημένες ίνες, σε γωνίες των 45 και 60 μοιρών. Τα νήματα δεσμεύονται στις θέσεις τους συχνά με τη βοήθεια πολύ λεπτών ινών από ίνες υάλου ή πολυεστέρα, με σκοπό την κατασκευή ισχυρότερων συνθέτων εξαιτίας του ευθύγραμμου προσανατολισμού των ενισχυτικών ινών. [6]



Εικόνα 1.11: Απεικόνιση των παραπάνω τύπων υφαντών ενισχυτικών ινών [10]

1.2.3 Εφαρμογές των Ινωδών Συνθέτων Υλικών

Τα ινώδη σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογές σε διαφόρους τομείς της Μηχανικής και παίζουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του τρόπου ζωής μας. Είναι σημαντικό να αναφερθούν αυτοί οι τομείς και να υπάρξει διαχωρισμός μεταξύ αυτών, προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν ανά τομέα χρήσης.

Ξεκινώντας από τη Ναυπηγική Τεχνολογία, τα ινώδη σύνθετα υλικά έχουν αντικαταστήσει σχεδόν εντελώς τα παραδοσιακά υλικά όπως το ξύλο. Συνδυάζοντας χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση, και ευκολία στην κατασκευή ολόκληρων κομματιών του σκάφους μέσω χύτευσης σε καλούπια, έγιναν η προτιμότερη επιλογή των βιομηχανιών κατασκευής μικρών σκαφών και σκαφών αναψυχής. Εάν προστεθεί και το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους επισκευής σε περίπτωση αστοχίας ή ζημιάς, τότε καταλαβαίνουμε το λόγο που επεκτάθηκε τόσο η χρήση τους. Αξίζει να σημειωθεί μια εξειδικευμένη χρήση αυτών των υλικών σε ναρκαλιευτικά, εξαιτίας του μη μαγνητικού τους χαρακτήρα, πράγμα το οποίο έδινε ζωτικό πλεονέκτημα στα σκάφη αυτά.

Ένας άλλος τομέας χρήσης αφορά τις οικοδομές, όπου επεκτείνεται συνεχώς η χρήση των GRP, αντικαθιστώντας τις χαλύβδινες ενισχύσεις σκυροδέματος και άλλα κομμάτια της οικοδομής. Οι λόγοι είναι το μικρό βάρος λόγω χαμηλής πυκνότητας των υλικών αυτών, που δίνει το πλεονέκτημα στη μεταφορά τους και τη συναρμολόγηση, καθώς και η σημαντική αντοχή τους σε διάβρωση, με τη ταυτόχρονη ιδιότητα χύτευσης σε διάφορες γεωμετρίες και χρώματα. Παραδείγματα εκτενούς χρήσης των βρίσκονται σε ημιδιάφανους θόλους κτιρίων και ημικαμπύλων επιφανειών, καθώς και ως μέσα στήριξης της κατασκευής και της μεταφοράς των φορτίων που δέχεται, είτε σε περίπτωση σεισμού/θεομηνίας, είτε απλά από το βάρος της ίδιας της κατασκευής. Στην πιο απλή περίπτωση, χρησιμοποιούνται ως υλικά για τη κατασκευή επίπλων, μερών της κουζίνας, του μπάνιου κ.τ.λ.

Μια από τις πιο γνωστές χρήσεις των Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) αφορά τις μεταφορές, είτε χερσαίες (οχήματα) είτε αεροσκάφη, με τις πιο ακραίες να αφορούν τα σκάφη εξερεύνησης του διαστήματος. Ο λόγος χρήσης οφείλεται στο όφελος του περιορισμού της χρήσης καυσίμων λόγω μικρότερου βάρους, και υπό περιπτώσεις στο μικρότερο κόστος κατασκευής, ιδιαίτερα όταν αφορά κομμάτια ευρείας παραγωγής με εύκολες γεωμετρίες. Συγκεκριμένα παραδείγματα χρήσης τους έχουν αναφερθεί και παραπάνω σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Μια επίσης γνωστή και ευρεία χρήση των GFRP αφορά τα ηλεκτρικά είδη, όπου συνήθως προτιμώνται τα ινώδη με ενίσχυση από ίνες υάλου E-class (Electrical). Ο συγκεκριμένος τύπος έχει κατασκευαστεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, σε περιπτώσεις όπου πρέπει να υπάρχει μόνωση. Παραδείγματα ηλεκτρικά μονωμένων εξαρτημάτων, απλής ή πολύπλοκης γεωμετρίας είναι οι ηλ. διανομείς, οι υποδοχείς ηλ. λαμπτήρων, διάφορα κελύφη ηλ. συσκευών αλλά και οι μονώσεις των καλωδίων μεταφοράς ηλ. ρεύματος. Τέλος, σημαντική χρήση των GFRP έχει παρατηρηθεί και στις κατασκευές δεξαμενών, σωλήνων αναρρόφησης/μεταφοράς υδάτων, δοχείων αποθήκευσης τοξικών ουσιών και οποιασδήποτε τέτοιας μορφής κατασκευές που απαιτούν σημαντική αντοχή σε διάβρωση. Η εύκολη χύτευση μειώνει σημαντικά το κόστος κατασκευής, ενώ η ευκολία μεταφοράς και τοποθέτησης λόγω μικρού ειδικού βάρους τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές με ιδιομορφίες στο μέρος που θα λειτουργούν (μεγάλο ύψος, περίπλοκη τοπολογία), προφέροντας ταυτόχρονο και πλεονεκτήματα μηχανολογικής φύσεως, όπως η μείωση του αριθμού των συνδέσεων που οδηγεί στη μεγαλύτερη αντοχή της κατασκευής σε μηχανικές καταπονήσεις. [6]

1.3 Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα στο μεγαλύτερο ποσοστό τους σήμερα, κατασκευάζονται από δυο κύριες πρώτες ύλες, το PAN (πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο) και την πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο. Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες πηγές για την κατασκευή τους, όπως το βαμβάκι, η ρητίνη φαινικού οξέος, διάφορα πολυμερή, συνθετικό μετάξι και υδρογονάνθρακες. Όσο αφορά το μέλλον, εξελίσσονται νέες μέθοδοι παραγωγής κοντών ινών από αέριους υδρογονάνθρακες, ενώ σε καλό δρόμο βρίσκονται πλέον και οι προσπάθειες ανακύκλωσης των ινών και επαναχρησιμοποίησής τους σε νέα σύνθετα, με σκοπό να είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμα σε μερικά χρόνια. [6]

1.3.1 Δομή των Ινών Άνθρακα

Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε τάσεις και μέτρο ελαστικότητας Ε, έχουν διαμέτρους 7-8 μm και αποτελούνται από κρυσταλλίτες γραφίτη, σε μια αλλοτροπική του μορφή που αναφέρεται ως «άνθρακας turbo-static». Γενικά σε ένα μονοκρύσταλλο άνθρακα τα άτομα βρίσκονται σε εξαγωνική διάταξη, σε επίπεδα τοποθετημένα διαδοχικά, με το ένα να βρίσκεται πάνω στο άλλο σε σειρά ABAB. Τα άτομα σε κάθε επίπεδο συνδέονται μεταξύ τους μέσω ισχυρού ομοιοπολικού δεσμού, με τις διατεταγμένες στρώσεις να συγκρατούνται σε τάξη μέσω δυνάμεων Van der Waals, κάτι το οποίο υποδηλώνει την έντονη ανισοτροπία μηχανικών ιδιοτήτων που διαθέτει αυτό το υλικό. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας Ε παράλληλα στον c-άξονα (κάθετα στις επίπεδες στρώσεις) έχει τιμή κοντά στα 30 GPa, με την απόσταση ανάμεσα στις διαδοχικές στρώσεις να κυμαίνεται στα 0.335 nm. Ο «άνθρακας turbo-static» έχει ομοιότητες με τον κρυσταλλικό γραφίτη, διαφέροντας όμως στο γεγονός ότι οι επίπεδες στρώσεις δε παρουσιάζουν κανονική διάταξη κατά τον c-άξονα, και στο ότι οι μεταξύ τους απόσταση κυμαίνεται στα 0,34 nm.

Ο κύριος λόγος που οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, υψηλά μέτρα Young και αντοχή στις υψηλές τάσεις, οφείλεται στον αρκετά υψηλό

προσανατολισμό που διαθέτουν (και πρέπει να διαθέτουν) οι επίπεδες στρώσεις γραφίτη κατά τη διεύθυνση του άξονα της ίνας, παρόλο που στην πραγματικότητα πρόκειται για πολύ μικρές και άτακτα επί το πλείστο διατεταγμένες κρυσταλλικές μονάδες, με παρουσία ασυνεχειών δομής. Οι αποστάσεις (οι οποίες κυμαίνονται περίπου στα 10 nm) μεταξύ των κρυσταλλογραφικών επιπέδων των στρώσεων του γραφίτη, μπορούν να ταυτοποιηθούν μέσω στης τεχνικής XRD (X-Ray Diffraction). Αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί το ίδιο για διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα προς τη διεύθυνση της ίνας. [6]

1.3.2 Ίνες Άνθρακα με Βάση το ΡΑΝ

Αρχικά, η πρώτη ύλη PAN (πρόδρομη) στροβιλίζεται μαζί με πολυμερισμένο ακρυλονιτρίλιο και συμμονομερές, προκειμένου να διαλυθεί με σκοπό τη δημιουργία ενός παχύρρευστου διαλύματος, ελεύθερου από αέρια/ξένα σωματίδια. Αντλείται στη συνέχεια σε ένα στερεωτικό λουτρό το οποίο αφαιρεί το διαλυτό υπόλειμμα των στερεών νημάτων από PAN. Για την παρασκευή χιλιάδων συνεχόμενων νημάτων ταυτοχρόνως, γίνεται χρήση ενός περιστρεφόμενου «spinnerette» (αναφέρεται και ως σουρωτήρι), με αριθμό οπών μέχρι και 320 χιλιάδες. Το σύνολο αυτών των νημάτων συμπλέκεται σε μια μάζα η οποία υπόκειται σε τανυσμό, θέρμανση, πλύση, στέγνωμα και περιτύλιξη σε κυλίνδρους ή χρήση για περεταίρω περιτύλιξη μαζί με περισσότερα νήματα.

Ο ειδική πρόδρομη ύλη PAN αποτελείται από ακρυλικές ίνες (χρησιμοποιούνται σε είδη ρουχισμού/χαλιά). Η μετατροπή των ινών αυτών σε ίνες άνθρακα γίνεται σε 2 ή 3 στάδια, ανάλογα με τον τύπο ίνας που πρέπει να προκύψει. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την οξείδωση των ινών, η οποία μετατρέπει το PAN σε μια δομή με κλιμακωτή μορφή, όμοια με μια σειρά δακτυλίων ενωμένων μεταξύ τους που σχηματίζουν εντέλει τη δομή της ίνας. Το ακρυλονιτρίλιο περιγράφεται από τον χημικό τύπο: $CH_2 = CH - CN$, ενώ το PAN αποτελείται ουσιαστικά από μια μακριά αλυσίδα μορίων ακρυλονιτρίλιου, συνδεδεμένων μέσω ομάδων CN που ενώνονται με τις αντίστοιχές τους CN εκατέρωθεν. Αφότου έχει οξειδωθεί, η ίνα PAN δεν είναι εύφλεκτη.

Η διαδικασία της οξείδωσης λαμβάνει χώρα με ταυτόχρονο εφελκυσμό των ινών υπό την παρουσία ατμοσφαιρικού αέρα, σε θερμοκρασία 200-300 °C. Ύστερα ακολουθεί η διαδικασία της πυρόλυσης σε ατμόσφαιρα αζώτου στους 1000 ή 1500 °C, με σκοπό την παραγωγή ινών HS, VHS και IM. Για την παραγωγή ινών HM και UHM με υψηλά μέτρα Young οι ίνες θερμαίνονται έως τους 2000 και 3200 °C. Γενικότερα για να κατασκευαστούν ίνες υψηλού μέτρου Young απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης.



Εικόνα 1.12: Αναπαράσταση της δομής ίνας

άνθρακα, όπως λαμβάνεται από ένα μικροσκόπιο SEM (αριστερά), και από μια διάταξη XRD (δεξιά) [11] [12]

Το πόσο ισχυρές θα είναι οι ίνες άνθρακα αφότου κατασκευαστούν θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από το πόσο προσανατολισμένες θα είναι οι στρώσεις των επιπέδων γραφίτη μέσα σε αυτές. Οποιαδήποτε ατέλεια μέσα στη δομή τους, όπως τα κενά αέρα απροσδιόριστου σχήματος που διατάσσονται κατά μήκος της ίνας, επιφανειακές ατέλειες και οι μακροκρύσταλλοι, μπορούν αργότερα να αποτελέσουν τους λόγους που επήλθε η αστοχία σε μετέπειτα εφαρμογή τάσης στην κατασκευή, λειτουργώντας ως σημεία συγκέντρωσής τους.

Το πως διατάσσονται τα κρυσταλλικά επίπεδα του γραφίτη στη διατομή της ίνας αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα για την τελική της αντοχή, τις εγκάρσιες και τις διατμητικές ιδιότητες της. Μπορούμε να πάρουμε ως παράδειγμα τις ίνες άνθρακα με βάση το PAN, που διαθέτουν μια λεπτή επιδερμική επιφάνεια σε αντίθεση με το κέντρο τους που περιέχει κρυσταλλίτες τυχαίου προσανατολισμού, εν αντιθέσει με τις ίνες με βάση την πίσσα που διαθέτουν μια ακτινική διάταξη. Αντιδιαμετρικά, αυτά τα δυο είδη ινών παρουσιάζουν τις διαφορές σε μηχανικές ιδιότητες ως προέκταση των διαφορών που έχουν οι μικροδομές τους. [6]

1.3.3 Ίνες Άνθρακα με Βάση την Πίσσα

Μια επίσης σημαντική πρώτη ύλη για την κατασκευή ινών άνθρακα είναι η πίσσα, καθώς κια το κάρβουνο. Ως αρχική ιδέα ξεκίνησε με το σκεπτικό πως θα ήταν η αμέσως επόμενη λύση μετά το PAN ελέω μικρότερου κόστους, λόγω του γεγονότος ότι η πίσσα αποτελεί παραπροϊόν του πετρελαίου. Αυτό τελικά δεν είχε λογική βάση όπως αποδείχθηκε, εξαιτίας του κόστους καθαρισμού και μετατροπής της πίσσας σε ίνας που ουσιαστικά εξίσωνε τις τιμές των τελικών προϊόντων. Οι ίνες από πίσσα όμως διαθέτουν μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό. Ενώ αρχικά υστερούσαν σε αντοχή για το ίδιο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις ίνες PAN σήμερα δεν υπάρχουν διαφορές, αν και στον τομέα της αεροναυπηγικής αναγκαστικά πλέον δίνεται μεγάλη βάση στις διαφορές τους σε ειδικό βάρος και ειδικό μέτρο ελαστικότητας, μιας και ο κύριος εχθρός μιας ιπτάμενης κατασκευής είναι η επιπλέον μάζα. Σε περιπτώσεις πάντως όπου επιθυμούμε και προστασία από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συνεπώς ένα υλικό που να είναι και ελαφρύ, και ανθεκτικό στα φορτία και μονωτής, προτιμώνται οι ίνες από PAN.

Κατά τη διάρκεια του 1989, πέντε εταιρίες ανακοίνωσαν την παραγωγή ινών άνθρακα από πίσσα. Οι εταιρίες αυτές ήταν η Dupont, η Osaka Gas Co., η Nippon Petrochemical, η Petoca και η Toa Nenryo Kogyu, με τα αντίστοιχα μοντέλα: PRD-172, Donacarbo-F, Granoc, Carbonic και Tonen. Τα μέτρα ελαστικότητας των ινών αυτών κυμαίνονταν στα 150 με 900 GPa, ενώ η αντοχή τους σε εφελκυσμό, όπου συγκριτικά με την αντοχή σε θλίψη ήταν πολύ μεγαλύτερη, ανερχόταν στα 3 περίπου GPa με πυκνότητες στα 2.15 gr/cc. Επίσης, διέθεταν χαμηλή ειδική αντίσταση της τάξης των 2 με 5 μΩ, αλλά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (200W/m °K).

Τύπος Ίνας/ Πρώτη Ύλη	Μέτρο Young (GPa)	Αντοχή (GPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ειδική Αντίσταση (μΩ.m)
Pitch/P-100	724	2.2	2.15	2.5
PAN/HM-45	441	1.76	1.9	7.8
Pitch/P-55	380	2.1	2	7.5
PAN/HMS	370	2.75	1.86	10
PAN/T650-	290	4.83	1.787	13
42 DAN/T200	220	2.2	1.76	10
PAN/1500	250	5.2	1.70	18
Pitch/P25W	160	1.4	1.9	13

Πίνακας 1.1: Σύγκριση ιδιοτήτων ινών άνθρακα αναλόγως το προγονικό υλικό

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως οι συγκεκριμένες ίνες είχαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε κατασκευές με απαιτήσεις στις ηλεκτρικές/θερμικές ιδιότητες, απ' ότι σε εκείνες με μηχανολογικό ενδιαφέρον, με εξαίρεση κατασκευές κρίσιμης δυσκαμψίας. Έτσι, έχουμε περιπτώσεις όπως οι δορυφόροι και οι διαστημικές κατασκευές, οι οποίες έχουν ως απαίτηση το μεγαλύτερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας και προτιμώνται οι ίνες από πίσσα. Στον αντίποδα, υπάρχουν οι εφαρμογές σε αεροσκάφη, όπου ο σημαντικότερος παράγοντας για τη μακροζωία και την ομαλή λειτουργία του αεροσκάφους είναι η αντοχή και η επιμήκυνση σε θραύση (αντοχή/μέτρο) των ινών, οπότε προτιμώνται ίνες από PAN. [6]

1.4 Πολυμερικές Μήτρες

Η μητρική φάση των ινώδων συνθέτων μπορεί να είναι είτε μέταλλο, είτε κεραμικό, είτε όπως στην περίπτωση που εξετάζουμε πολυμερές. Η χρήση των μετάλλων και των πολυμερών ως μήτρες γίνεται κυρίως για λόγους αύξησης της ολκιμότητας του τελικού υλικού, ενώ των κεραμικών για αύξηση της δυσθραυστότητας.

Για τα ινώδη σύνθετα, η μήτρα πρέπει να επιλεχθεί με μεγάλη προσοχή λόγω των πολλών ρόλων που έχει να καλύψει. Αρχικά, η σύνδεση των ινών οφείλεται στη μητρική φάση, η οποία επενεργεί ως το μέσον μέσα από το οποίο όλα τα φορτία διανέμονται επιτυχώς στην ενισχυτική φάση (οι ίνες στη συγκεκριμένη περίπτωση) κατά κύριο λόγο, κατακρατώντας από μέρους της ένα μικρό ποσοστό φόρτισης. Σε πολλές περιπτώσεις, το μητρικό υλικό είναι όλκιμο, με την ενισχυτική φάση να διαθέτει μεγαλύτερο μέτρο Young από τη μήτρα.

Ο δεύτερος ρόλος της μήτρας, είναι να προστατεύει την ενισχυτική φάση από επιφανειακές βλάβες που οφείλονται είτε σε μηχανική είτε σε χημική καταπόνηση (εκτριβή, έκθεση σε οξέα κ.α.), μιας και αυτές οι καταπονήσεις εισάγουν το ενδεχόμενο μελλοντικής αστοχίας λόγω επιφανειακών ατελειών και ρωγμών σε χαμηλότερη εφελκυστική τάση από εκείνη του ορίου. Επίσης, η μήτρα ως μαλακό και πλαστικό υλικό εμποδίζει τη διάδοση ψαθυρών ρωγμών μέσα στο υλικό από ίνα σε ίνα, αποτρέποντας μια επικείμενη καταστροφική αστοχία σε βάθος χρόνου, και λειτουργώντας εντέλει ως μέσο αποτροπής διαδόσεων ρωγμής. Ακόμα και στην περίπτωση που υπάρξει αστοχία μερικών ινών μέσα στο σύνθετο, η συνολική θραύση θα αποτραπεί, έως το σημείο που πλέον έχει αστοχήσει το μεγαλύτερο μέρος της ενισχυτικής φάσης σε γειτονικά σημεία.

Για να ισχύσουν βέβαια όλα τα παραπάνω, είναι απαραίτητο να υπάρχει συνοχή μεταξύ ινών/μήτρας στη μορφή δυνάμεων συγκόλλησης/πρόσφυσης/διαβροχής, έτσι ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα διέλκυσης των ινών υπό φορτίο. Η αντοχή του δεσμού αυτού είναι μια σπουδαία παράμετρος στην επιλογή ενός συνδυασμού μήτρας/ενίσχυσης, μιας και η αντοχή του τελικού υλικού εξαρτάται από αυτό το μέγεθος του δεσμού. Χωρίς αυτόν, η διάδοση φορτίου από τη μήτρα στις ίνες είναι πρακτικά αδύνατη.

Γενικά, τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας αποτελούνται από μια μήτρα πολυμερούς μεγάλου μοριακού βάρους και χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και σε πολλές ποσότητες, όσον αφορά τις ιδιότητές τους στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που θα βρίσκονται, την ευκολία παραγωγής και το κόστος. [13]

1.4.1 Θερμοσκλυρημένα Πολυμερή

Αρχικά, ένα θερμοσκλυρημένο θερμοπλαστικό παράγεται από μια χημική αντίδραση δύο σταδίων. Κατά το πρώτο στάδιο, παράγονται μακρομοριακές αλυσίδες με δυνατότητα αντίδρασης αναμεταξύ τους (προπολυμερές). Στο δεύτερο στάδιο, το οποίο λαμβάνει χώρα κατά τη μορφοποίησή τους υπό την παροχή θερμότητας και πίεσης, δημιουργούνται σταυροδεσμοί (Crosslinks). Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται μεταξύ των μακρομορίων, οδηγώντας έτσι σε ένα τελικό αποτέλεσμα υλικού του οποίο είναι άκαμπτο και στερεό αφότου ψυχθεί.



Εικόνα 1.13: Τύποι διακλαδώσεων σε πολυμερικές αλυσίδες

Η δομή ενός θερμοσκλυρημένου πολυμερούς έχει τη μορφή πλέγματος, με τα μακρομόρια να έχουν περιπλεχθεί (συνήθως αναφέρεται το παραπάνω ως «μακαρονάδα») και να έχουν πλέον ελάχιστους βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Αυτό το χαρακτηριστικό τους, είναι υπαίτιο για την πιο χαρακτηριστική ιδιότητά τους, την αντίσταση στην υγροποίηση μετά από αναθέρμανση. Στην περίπτωση που ένα θερμοσκλυρημένο αναθερμανθεί και μάλιστα σε υψηλή θερμοκρασία, τότε αποσυντίθεται. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που δεν είναι κατάλληλα ως ανακυκλωμένα υλικά, λόγω του ότι δεν έχουν τη δυνατότητα να επαναμορφοποιηθούν μέσω θέρμανσης και πίεσης.

Εφόσον η διαδικασία δημιουργίας των σταυροδεσμών είναι χημικής φύσεως, τα θερμοσκλυρημένα πολυμερή δεν επηρεάζονται έντονα από τη θερμοκρασία, ενώ παραμένουν ταυτόχρονα άκαμπτα. Μερικά παραδείγματα αυτών είναι η φαινολ-φορμαλδεϋδη, η μελαμίνηφορμαλδεϋδη, η ουρία-φορμολδεϋδη, οι εποξικές ρητίνες (ή εποξειδικές), οι ακόρεστοι πολυεστέρες (unsaturated polyesters, UP). Αυτά τα πολυμερή αποτελούν τη ραχοκοκκαλιά για ένα πλήθος εφαρμογών που βασίζονται στο υψηλό σημείο τήξης τους, τη μεγάλη χημική και θερμική διαστολή, τη μεγάλη ακαμψία, την επιφανειακή σκληρότητα, τη διαστατική σταθερότητα και τη μη αναφλεξιμότητα τους. [13]

1.4.2 Εποξειδικές Ρητίνες

Η εποξειδική ρητίνη είναι ένας τύπος συνθετικής ρητίνης που περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία και με συνεχή ανάπτυξη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συγκολλητικό, σε επικαλύψεις, ως πλαστικά χύτευσης, μητρική φάση για σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες, ενώ χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανολογικούς, ηλεκτρικούς, χημικούς, αεροδιαστημικούς, αυτοκινητοβιομηχανικούς, κτιριακούς και άλλους βιομηχανικούς τομείς. Είναι ο τύπος οργανικού προπολυμερούς που αναφέρεται σε μόρια που περιέχουν δύο ή περισσότερες εποξειδικές ομάδες, και μπορεί να βρίσκεται στο άκρο, στη μέση της μοριακής αλυσίδας ή σε μια δακτυλιοειδή δομή. Λόγω της ενεργής έποξυ-ομάδας μοριακής δομής, μπορούν να διασυνδεθούν με πολλούς παράγοντες σκλήρυνσης και να σχηματίσουν αδιάλυτο, δύστηκτο τρισδιάστατο πολυμερές δομής δικτύου.

Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της οικογένειας των εποξειδικών ρητινών αφορούν όλα τα παρακάτω. Αρχικά, υπάρχει μία ποικιλία συστημάτων ρητινών-σκλυρηντών που μπορούν να προσαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπου η εκάστοτε εφαρμογή μπορεί να κυμαίνεται από υγρό πολύ χαμηλού ιξώδους έως υψηλού σημείου τήξης στερεό. Επίσης, με την επιλογή μιας ποικιλίας υλικών σκλήρυνσης, το σύστημα εποξειδικής ρητίνης μπορεί να σκληρύνει μέσα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, από 0 ° C έως 180 ° C.

Μια άλλη ιδιότητα αφορά την ισχυρή πρόσφυση. Ο εγγενής πολικός υδροξυλικός και αιθερικός δεσμός εποξειδικής ρητίνης καθιστούν την ύπαρξη υψηλής πρόσφυσης με διάφορες ουσίες. Η χαμηλή συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση της εποξειδικής ρητίνης βοηθάει επίσης στο να σχηματιστεί μια ισχυρή συγκόλληση με μικρή εσωτερική τάση. Επειδή δεν υπάρχει απελευθέρωση πτητικών παραπροϊόντων στην αντίδραση σκλήρυνσης, έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για χύτευση υπό υψηλή πίεση ή χρόνο για την απομάκρυνση των πτητικών παραπροϊόντων, που ενισχύει περαιτέρω την αντοχή συγκόλλησης του συστήματος εποξειδικής ρητίνης. Διαθέτει χαμηλή συρρίκνωση διότι είναι διαφορετική από άλλες θερμοσκληρυνόμενες πολυμερείς ρητίνες, δεν παράγει παραπροϊόντα σε διαδικασία σκλήρυνσης και υπάρχει υψηλός βαθμός συσχέτισης στο υγρό. Η σκλήρυνση πραγματοποιείται με άμεση αντίδραση προσθήκης, επομένως έχει μικρή συστολή. Για ένα μη τροποποιημένο σύστημα, ο ρυθμός συρρίκνωσης του είναι μικρότερος από 2%, ενώ η σκλήρυνση της γενικής φαινολικής ρητίνης και ρητίνης πολυεστέρα έχει σημαντική συστολή. Όσον αφορά τα μηχανολογικά, τα συστήματα εποξειδικής ρητίνης έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Τα συστήματα εποξειδικής ρητίνης έχον καλές ηλεκτρικές επιδόσεις σε μεγάλα έυρη συχνοτήτων και θερμοκρασίας, και γενικότερα είναι ένα καλό μονωτικό υλικό με υψηλή διηλεκτρική απόδοση και ανθεκτική στη διαρροή διαφευγόντων ρευμάτων. Τέλος, η σκληρυμένη εποξειδική ρητίνη έχει ισχυρή χημική σταθερότητα. Στο εποξειδικό σύστημα, ο βενζολικός δακτύλιος και το λιπαρό υδροξύλιο είναι βασικά λιγότερο ευαίσθητα στη διάβρωση βάσης και είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στα οξέα. Μπορούμε να κάνουμε μια σύγκριση της σταθερότητας τους σε NaOH μεταξύ εποξειδικής ρητίνης και φαινολικής ρητίνης με ασθενή οξύτητα ή στον εστερικό δεσμό πολυεστερικής ρητίνης.



Εικόνα 1.14: Αντιδράσεις σε ΝαΟΗ ασθενούς οξύτητας

Η αντίδραση της φαινολικής ρητίνης με υδροξείδιο του νατρίου παράγει φαινολικό νάτριο που διαλύεται εύκολα, σπάζοντας τις αλυσίδες. Για ρητίνη πολυεστέρα, η υδρόλυση εστέρα παράγει αλκοόλη και άλας νατρίου. Η χημική σταθερότητα του σκλυρημένου εποξειδικού συστήματος είναι αυξημένη λόγω της πυκνής δομής του, ειδικά για την αντοχή σε διαλύτες. Συλλέγοντας τις παραπάνω επιδόσεις, το σύστημα εποξειδικής ρητίνης έχει εξαιρετική διαστασιακή σταθερότητα και ανθεκτικότητα. Τέλος, τα συστήματα εποξειδικής ρητίνης διαθέτουν αντίσταση στην ανάπτυξη μυκήτων, δίνοντάς τους έτσι τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε δύσκολες τροπικές συνθήκες.

Υπάρχουν πολλά είδη εποξειδικής ρητίνης. Σύμφωνα με τη μοριακή δομή τους, έχουν πέντε κύριες κατηγορίες, οι γλυκιδυλαιθέρες ($R-och_2ch-ch_2$), οι γλυκιδυλικοί εστέρες ($R-co_2-ch_2ch-ch_2$), οι γλυκιδυλαμίνες ($R-NH-ch_2ch-ch_2$), οι τύποι των γραμμικών αλειφατικών ενώσεων (o, o) και οι αλεικυκλικές ενώσεις (h_{H}^{H} , h_{H}^{H}). Οι πρώτοι τρείς τύποι είναι εποξειδικές ρητίνες συμπύκνωσης από επιχλωρυδρίνη και ενώσεις που περιέχουν ενεργά άτομα υδρογόνου όπως φαινόλες, αλκοόλες, οργανικά οξέα και αμίνες κλπ. Οι δυο τελευταίοι τύποι κατασκευάζονται από εποξειδική ολεφίνη με διπλούς δεσμούς (c-c), από υπεροξικό οξύ ή υπεροξείδιο του υδρογόνου σε χαμηλή θερμοκρασία. Το πιο χρησιμοποιημένο σε σύνθετα υλικά είναι η πρώτη κατηγορία έποξυ-γλυκιδυλαιθέρα, του οποίου ο κύριος τύπος είναι εποξική ρητίνη δις (4-υδροξυφαινυλ) προπανίου (επονομαζόμενη εν συντομία έποξυ ρητίνη δισφαινόλης A) η οποία προέρχεται από την πολυσυμπύκνωση 4,4 'διυδροξυδιφαινυλπροπάνιου (με μικρή ονομασία δισφαινόλη A) με επιχλωρυδρίνη. [13]

Οι εποξειδικές ρητίνες κατατάσσονται σύμφωνα με τα διάφορα κύρια συστατικά τους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.2.

Κωδικός	Ονομασία Πολυμερούς	Κωδικός	Ονομασία Πολυμερούς
Ε	Εποξυ-ρητίνη δις (4-υδροξυφαινυλο) προπανίου	N	Εποξειδική ρητίνη φαινολοφθαλεϊνης
ET	Οργανική εποξειδική ρητίνη διφαινόλης- προπανίου τροποποιημένη με τιτάνιο	S	Τέτρα-φαινολική εποξειδική ρητίνη
EG	Τροποποιημένη οργανοπυριτιακή εποξειδική ρητίνη διφαινόλης-προπανίου	J	Εποξειδική ρητίνη ρεσορκινόλης
EX	Εποξειδική ρητίνη διφαινόλης-προπανίου τροποποιημένη με βρώμιο	Α	Τρικυανική εποξειδική ρητίνη
EL	Εποξειδική ρητίνη διφαινόλης-προπανίου τροποποιημένη με χλώριο	R	Εποξειδική ρητίνη διοξειδίου του δικυκλοπενταδιενίου
Ei	Εποξειδική ρητίνη πλευρικής αλυσίδας διφαινόλης προπανίου	Y	Εποξειδική ρητίνη διοξειδίου του βινυλοκυκλοεξενίου
F	Φαινολική ρητίνη	YJ	Εποξειδική ρητίνη αντικατεστημένου διμεθυλίου του διοξειδίου του βινυλοκυκλοεξενίου
В	Εποξειδική ρητίνη γλυκερόλης	D	Εποξειδική ρητίνη εποξειδωμένου πολυβουταδιενίου
L	Οργανική εποξική ρητίνη φωσφόρου	W	Εποξειδική ρητίνη διοξειδίου του δις- κυκλοπεντενυλαιθέρα
H	3,4-εποξυομάδα-6-μεθυλο κυκλοεξανοκαρβοξυλικά οξέα Μεθυλεστέρας 3 ', 4'-εποξυ-6- μεθυλοκυκλοεξανίου	Zg	Λιπαρό γλυκερίδιο
G	Εποξειδική ρητίνη πυριτίου	Ig	Ναφθενικός γλυκιδυλεστέρας

Πίνακας 1.2: Τύποι και ονομασίες των εμπορικών εποξειδικών ρητινών/εστέρων/φαινολικών ρητινών [14]

1.4.3 Θερμοπλαστικές Ρητίνες

Παρόλο που δεν έχουν χρήση στην παρούσα εργασία, θα πρέπει να αναφερθεί και η ύπαρξη των θερμοπλαστικών ρητινών. Σε αυτές τα μακρομόρια που απαρτίζουν το υλικό συνδέονται ασθενώς μεταξύ τους μέσω δυνάμεων Van der Waals, με αποτέλεσμα να μένουν περιπλεγμένα. Στην περίπτωση που υπάρξει παροχή θερμότητας σε αυτό το σύστημα οι δυνάμεις αυτές θα εξασθενήσουν, με αποτέλεσμα το υλικό να αρχίσει να μαλακώνει και στο τέλος αυξάνοντας την παροχή να μετατρέπεται σε ένα ιξώδες ρευστό. Από τη στιγμή όμως που αρχίσει να ψύχεται τότε επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση, όπου θεωρητικά (μέχρι να αρχίσει η υποβάθμιση του υλικού λόγω θραύσεων των δεσμών μακρομορίων) θα μπορούσε να επαναλάβει αυτή τη διαδικασία επ' απείρω.

Τα θερμοπλαστικά υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα το ποσοστό κρυσταλλικότητας που διαθέτουν στον όγκο τους, σε κρυσταλλικά και άμορφα. Όσον αφορά τα κρυσταλλικά θερμοπλαστικά, διαθέτουν μια τάξη στη διευθέτηση των μακρομορίων τους (όχι όμως σε ολόκληρη την έκτασή τους λόγω περίπλοκης δομής, κρυσταλλική και άμορφη φάση συνυπάρχουν), ενώ τα άμορφα από σχετική αταξία. Υπάρχουν μερικά θερμοπλαστικά, όπως το nylon και το πολυαιθυλένιο, που ενώ παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό κρυσταλλικότητας περιγράφονται ως ημικρυσταλλικά, ενώ παράλληλα υπάρχουν και πλαστικά που είναι εντελώς άμορφα όπως το πολυστυρένιο και τα ακρυλικά. Η παρουσία της κρυσταλλικότητας σε θερμοπλαστικά με τέτοια δυνατότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, τον τρόπο κατασκευής και το χρόνο ψύξης που ακολουθεί ύστερα από τη θέρμανση μέχρι το σημείο τήξης (όσο πιο αργή η ψύξη, τόσο ευνοείται η παρουσία κρυστάλλωσης στο υλικό).

Στα πλαστικά όπου είναι υπαρκτή η κρυσταλλικότητα, παρατηρείται υψηλότερη πυκνότητα απ' ότι στα άμορφα εξαιτίας της μεγαλύτερης συσσώρευσης των μακρομορίων τους. Επίσης, διαθέτουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό όμως από το βαθμό κρυσταλλικότητας. Επιγραμματικά, οι κύριες ιδιότητες των κρυσταλλικών θερμοπλαστικών είναι η ακαμψία σε χαμηλές θερμοκρασίες (χαμηλότερες του σημείου Tg υαλώδους μετάπτωσης), ο χαμηλός συντελεστής τριβής, η δυσθραυστότητα και η αντοχή λόγω δυνατότητας υψηλών παραμορφώσεων, η δυνατότητα ενίσχυσης (όπως και στα θερμοσκλυρημένα) και η υψηλή αντοχή σε ερπυσμό. Επίσης, σε σχέση με τα άμορφα τα κρυσταλλικά παρουσιάζουν αδιαφάνεια λόγω σκέδασης του φωτός μέσα στον όγκο τους στα επίπεδα διάταξης των μακρομορίων, καθώς και σημαντική συρρίκνωση κατά τη μορφοποίησή τους.

Τα σημαντικότερα θερμοπλαστικά που βρίσκουν χρήση στις κατασκευές είναι το πολυαιθυλένιο, το πολυπροπυλένιο, το πολυστυρένιο, το PVC (πολυβυνιλοχλωρίδιο), οι πολυακετάλες, το PMMA, το nylon (ή αλλίως πολυαμίδιο), τα πολυκαρβονικά πλαστικά και το PTFE (Polytetrafluothylene). [13]

1.5 Μέθοδος Κατασκευής Σύνθετων Υλικών με τη Βοήθεια Αυτόκλειστου Φούρνου (Autoclave Bag Molding)

Στην παρούσα εργασία, τα σύνθετα υλικά που παράχθηκαν και οδηγήθηκαν σε κατεργασία και περαιτέρω μελέτη δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο κατασκευής με αυτόκλειστο φούρνο. Σε σύγκριση με το σύνολο των bag molding τεχνικών, η μέθοδος του αυτόκλειστου αποτελεί την πιο δαπανηρή λύση, χωρίς τη δυνατότητα υψηλού ρυθμού παραγωγής και μεγάλων ποσοτήτων προϊόντων. Στον αντίποδα όμως, παρέχει υψηλή αξιοπιστία και πιστότητα καλουπιού-προϊόντος, όπως και υψηλή ποιότητα, και γι' αυτό χρησιμοποιείται κατά κόρον στην αεροδιαστημική βιομηχανία και οπουδήποτε απαιτούνται οι παραπάνω προδιαγραφές.

Σε γενικές γραμμές, ολόκληρη η τεχνική αφορά ένα καλούπι όπου επάνω του γίνεται η στρώση του σύνθετου υλικού, με την παροχή πίεσης και θερμότητας μέσα σε ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο ελεγχόμενου περιβάλλοντος, προκειμένου να μορφοποιηθεί το σύνθετο στη γεωμετρία του καλουπιού, ύστερα από καθορισμένο χρόνο παραμονής στο φούρνο και συγκεκριμένους κύκλους θέρμανσης/ψύξης του θαλάμου, και συνεπώς του υλικού υπό

μορφοποίηση, έτσι ώστε να αποκτήσει τα μηχανολογικά χαρακτηριστικά που επιθυμεί και έχει ορίσει ο χειριστής/κατασκευαστής. [6]

1.5.1 Τυπική Διάταξη Ενός Αυτόκλειστου Φούρνου

Το κύριο τμήμα ενός αυτόκλειστου φούρνου αποτελείται από ένα θάλαμο πίεσης από χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Στο εσωτερικό, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμικής ενέργειας όπως και οι ανάγκες του φούρνου σε παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, τοποθετούνται φύλλα από μονωτικό υλικό υψηλών θερμοκρασιών (συνήθως κεραμικό), με τις προδιαγραφές να ορίζουν την μέγιστη θερμοκρασία στο εξωτερικό του στους 60 °C με παρουσία μόνωσης και μέγιστης εσωτ. θερμοκρασίας. Εξαιτίας της ευπάθειας του κεραμικού σε τυχόν παραγόμενα αέρια και ατμούς, υπάρχει εξωτερική επικάλυψη με φύλλα αλουμινίου ή ανοξείδωτου χάλυβα. Αφότου τοποθετηθεί η μόνωση στο εσωτερικό, εγκαθίσταται ένας δακτυλιοειδής αγωγός ως διέξοδος για τον ατμό που θα κυκλοφορήσει μέσα στον αυτόκλειστο (exhaust). Προαιρετικά, για την ευκολότερη εισαγωγή/εξαγωγή του καλουπιού στο εσωτερικό, υπάρχει τροχήλατο φορείο όπου γίνεται η τοποθέτηση του.



Εικόνα 1.15: Σχεδιάγραμμα ενός τυπικού αυτόκλειστου φούρνου, με τα επιμέρους εξαρτήματά του [15]

Στην περίπτωση παραγωγής μικρών σε διαστάσεις τεμαχίων, γίνεται συνήθως χρήση μικρών φούρνων με θέρμανση ηλ. αντιστάσεων. Σε μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές όμως, γίνεται χρήση άλλων συστημάτων όπως η θέρμανση μέσω καύσης υδρογονανθράκων, των οποίων τα θερμά καυσαέρια κυκλοφορούν μέσα σε χαλύβδινες σπείρες που βρίσκονται στο εσωτερικό του φούρνου, πετυχαίνοντας μέγιστες θερμοκρασίες έως και 450-540 °C. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες της τάξης των 150-175 °C υπάρχει και η μέθοδος θέρμανσης ατμού με αντίστοιχη κυκλοφορία διαμέσου ανοξείδωτων σπειρών/αυλών από χάλυβα.

Για να υπάρξει ομοιόμορφη θέρμανση του προς μορφοποίηση υλικού, η κυκλοφορία του αέριου μέσου μετάδοσης θερμότητας πρέπει να γίνεται ανεμπόδιστα και ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο του εσωτερικού του φούρνου. Αυτό συνήθως επιτυγγάνεται μέσω κυκλοφορητών ελεγχόμενης ροής αέρα, η οποία μπορεί να καθοριστεί εξαρχής από τον χειριστή. Τα συνήθη αέρια μέσα είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, το διοξείδιο του άνθρακα και το αέριο Άζωτο σε ειδικές περιπτώσεις που απαιτείται αδρανής ατμόσφαιρα. Υπάρχουν δυο περιπτώσεις παροχής πίεσης μέσα στο φούρνο. Η πρώτη αφορά την άντληση του περιεχόμενου αέρα μέσω αντλίας κενού από το καλούπι του σύνθετου, προκειμένου να δημιουργηθεί υποπίεση και να συμπιέσει το εξωτερικό πλαστικό περίβλημα μορφοποίησης τις στρώσεις με τη ρητίνη αναμεταξύ τους. Η δεύτερη αφορά την παροχή αερίου μέσα στο φούρνο μέσω αντλίας με σκοπό τη δημιουργία υπερπίεσης, η οποία θα αρχίσει να συμπιέζει από έξω προς τα μέσα τις τις ενδιάμεσες στρώσεις του συνθέτου μέσω του εξωτερικού πλαστικού περιβλήματος. Στις πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις, υπάρχουν συστήματα αυτόκλειστων φούρνων που συνδυάζουν και τις δυο περιπτώσεις ταυτόχρονα. Για να υπάρχει η προβλεπόμενη ισορροπία και η παρακολούθηση των συνθηκών μέσα στο φούρνο/καλούπι, γίνεται εκτενής χρήση Η/Υ, θερμοζευγών μέτρησης ακριβείας στην επιφάνεια συνθέτου/καλουπιού, καθώς και συστημάτων PID (proportionalintegral-derivative) controllers, έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να γίνεται καταγραφή των συμβάντων/συνθηκών και να παράγεται, πιστοποιημένα πλέον, ένα τελικό προϊόν με καθορισμένες ιδιότητες. [6]

1.5.2 Προετοιμασία Πριν την Εισαγωγή στον Αυτόκλειστο Φούρνο

Προτού γίνει η εισαγωγή του καλουπιού με το προς παραγωγή σύνθετο μέσα στο φούρνο, ακολουθείται μια σειρά βημάτων, η οποία θα καθορίσει και την τελική επιτυχία ή την αποτυχία της κατασκευής, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά μορφοποίησης και τον τρόπο που χρησιμοποιήθηκαν/εφαρμόστηκαν.

Το πρώτο βήμα, και ένα από τα καθοριστικότερα, είναι η λείανση και ο καθαρισμός της επιφάνειας του καλουπιού, είτε μεταλλικού είτε πλαστικού, όπου θα γίνει η επίστρωση. Η αποτυχία εξασφάλισης έστω και ενός από αυτούς τους δύο παράγοντες οδηγεί στην αποτυχία της τελικής κατασκευής και απόρριψης του παραγόμενου προϊόντος. Γι' αυτό το λόγο, εφόσον γίνει η λείανση της επιφάνειας όπου θα εναποτεθεί το σύνθετο με σμυριδόπανα και άλλους λειαντικούς παράγοντες, ακολουθεί ενδελεχής καθαρισμός με ακετόνη ή άλλο οργανικό πτητικό διαλύτη. Στη συνέχεια, η επιφάνεια αυτή επιστρώνεται με υγρό συνήθως (ή κερί) αντικολλητικό μέσο, ή με κάποιο αντικολλητικό φύλλο όπως το Upilex.

Μετά το πέρας των παραπάνω, επιστρώνεται στην επιφάνεια εργασίας του καλουπιού ένα φύλλο από nylon, το λεγόμενο και ως peel-ply, με σκοπό να δοθεί καλή επιφάνεια στο τελικό σύνθετο. Αφότου γίνει αυτό, ακολουθεί η στρώση της ενισχυτικής φάσης στην οποιαδήποτε μορφή της (είτε σε ίνες, είτε σε ύφασμα κ.α.). Προκειμένου να μην υπάρξει ανεπιθύμητη επικόλληση της επόμενης στρώσης μετά την ενισχυτική φάση, εφαρμόζεται ένα φύλλο αντικολλητικών ιδιοτήτων γνωστό και ως separator (συνήθως Teflon). Για να αποφευχθεί η περίσσεια ρητίνης στο σύνθετο, εφαρμόζεται ένα φύλλο από ίνες γυαλιού (το λεγόμενο bleeder) με σκοπό να απορροφήσει τη ρητίνη που ρέει από το σύνθετο προς τα έξω. Μαζί με το bleeder εφαρμόζεται και ένα φύλλο διαπνοής τυχόν εκβαλλόμενων αερίων από τη ρητίνη, με ονομασία air breather. Όλες οι παραπάνω στρώσεις περικλείονται από ένα φιλμ πολυμερούς με ονομασία vacuum bag, το οποίο στερεώνεται περιφερειακά του συνθέτου εκτός της επιφάνειας εργασίας του καλουπιού με ειδική ταινία ελαστομερικής σιλικόνης υψηλής θερμικής αντοχής και υψηλών δυνατοτήτων μονώσεως διαρροής του όλου συστήματος, με ονομασία tacky tape. [6]



Εικόνα 1.16: Διάταξη των στρώσεων μορφοποίησης επάνω στην επιφάνεια εργασίας ενός καλουπιού/tool [16]

1.5.3 Συνθήκες Μορφοποίησης Εντός του Αυτόκλειστου Φούρνου

Έστω ότι έχουμε προετοιμάσει ένα σύνθετο προς μορφοποίηση με το καλούπι του, και το έχουμε εισάγει στο φούρνο προκειμένου να εκκινηθεί η διαδικασία. Τη χρονική στιγμή που εκκινούμε τον φούρνο, μπορούμε να ορίσουμε χρόνο t=0. Από εκείνη τη στιγμή και έπειτα ξεκινάει η εφαρμογή κενού στο καλούπι/σύνθετο, ενώ ταυτόχρονα η θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο αρχίζει να αυξάνεται, έως ότου να βρεθεί σε μια προκαθορισμένη τιμή Τ.

Μετά το πέρας συγκεκριμένου χρόνου, εφαρμόζεται πλέον μια καθορισμένη τιμή πίεσης στο θάλαμο P, η οποία θα παραμείνει σταθερή για όσο χρόνο έχει καθορίσει ο χειριστής/κατασκευαστής (εξαρτάται από τις προδιαγραφές που θέλει να ορίσει ο κατασκευαστής του συνθέτου όσον αφορά την ύπαρξη εγκλεισμάτων/φυσαλίδων εκλυόμενων αερίων ρητίνης στο εσωτερικό του συνθέτου). Καθώς η ρητίνη απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον, φτάνει στο σημείο υαλώδους μετάπτωσής της Tg και το ξεπερνά, μειώνοντας παράλληλα το ιξώδες της, βοηθώντας την έτσι να διαχυθεί σε ολόκληρο τον όγκο του συνθέτου. Με το πέρας του χρόνου όμως, το ιξώδες αρχίζει και αυξάνεται πάλι, εξαιτίας των αντιδράσεων πολυμερισμού που λαμβάνουν χώρα εκείνη τη στιγμή στα μονομερή της ρητίνης. Πρέπει εδώ να
σημειωθεί πως ο χρόνος πολυμερισμού πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός, λόγω του γεγονότος ότι πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση. Υπάρχουν περιπτώσεις συνθέτων μεγάλου όγκου, κάτι το οποίο συνεπάγεται και δυσκολία στην αποβολή θερμότητας στο περιβάλλον κατ' αυτή τη διεργασία (λόγω χαμηλής θερμ. αγωγιμότητας), όπου τα μέγιστα όρια θερμοκρασίας ξεπεράστηκαν στο εσωτερικό του υλικού με αποτέλεσμα την καταστροφή του.

Ύστερα από τα παραπάνω, ακολουθεί η σταδιακή ψύξη του συνθέτου/καλουπιού με προκαθορισμένο και όχι ανεξέλεγκτο ρυθμό. Ο ρυθμός ψύξης του θαλάμου ορίζεται και πάλι εξαρχής από τον κατασκευαστή/χειριστή. Μετά το πέρας της ψύξης του θαλάμου, σταματά πλέον και η εφαρμογή πίεσης μέσα σε αυτόν, έτσι ώστε να ανοιχθεί και να αφαιρεθεί το τελικό προϊόν συνθέτου υλικού από το εσωτερικό του. [6]

1.5.4 Ανάλυση των Συνθηκών Κατά τη Μορφοποίηση

Μέσω της προηγούμενης ανάλυσης των σταδίων μορφοποίησης μέσα σε έναν αυτόκλειστο φούρνο, μπορούν να εξαχθούν διαγραμματικές καμπύλες που υποδεικνύουν την πορεία της πίεσης και της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου, αλλά και στην επιφάνεια του συνθέτου για μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων. Εδώ αξίζει να σημειωθεί, πως κατά τη μορφοποίηση μπορούν να υπάρξουν διάφορα «σκαλοπάτια» θερμοκρασιών και πιέσεων επάνω στο σύνθετο, με τελικό σκοπό την επιμέρους παραμετροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του παραγόμενου συνθέτου.

Οι προκύπτουσες καμπύλες πίεσης, κενού και θερμοκρασίας μπορεί να είναι διαφορετικές από υλικό σε υλικό, από κατασκευαστή σε κατασκευαστή αλλά και από τελική εφαρμογή σε άλλη. Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως, είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστή μέσω προσδιορισμού η περίσσεια της μάζας της ρητίνης που ρέει εκτός καλουπιού, έτσι ώστε να προσδιοριστεί εντέλει και η τελική αναλογία ρητίνης/ενίσχυσης μέσα στο σύνθετο. Είναι σύνηθες να διαφεύγει ένα ποσοστό ρητίνης της τάξης του 10% στα σύνθετα τύπου prepreg. Η ρητίνη που διαφεύγει εκτός καλουπιού έχει τη θετική δράση να παρασύρει μαζί και τις τυχόν υπάρχουσες φυσαλίδες εγκλωβισμένου αέρα/εκλυόμενου αερίου από το σύνθετο, μειώνοντας έτσι το ποσοστό του κατ' όγκο σε σπηλαιώσεις και κενά (voids).



Εικόνα 1.17: Τυπικό διάγραμμα θερμοκρασίας/πίεσης για τη μορφοποίηση ενός συνθέτου υλικού μέσα σε autoclave oven [17]

Όσον αφορά τη θεωρητική μελέτη για το πως είθισται να πραγματοποιείται η μορφοποίηση συνθέτου εντός του αυτόκλειστου, υπάρχουν αρκετά μαθηματικά μοντέλα (όπως των A. Loss & G. Springer) τα οποία αναφέρονται στις επιμέρους διεργασίες της, σε θερμικό, ροϊκό επίπεδο και από την άποψη ύπαρξης κενών στο σύνθετο. Το θερμικό περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο στο σύνθετο σαν χρονική συνάρτηση εξαρτώμενη από τη γεωμετρία του, το ροϊκό υπολογίζει τη ροή ρητίνης εκτός του συνθέτου και την τελική κατανομή πάχους του, ενώ το μοντέλο κενών καθορίζει την κατανομή, το μέγεθος, την πίεση και τη θερμοκρασία των κενών μέσα στο σύνθετο, σε συνάρτηση πάντα με τη θέση τους στο χώρο και το χρόνο μορφοποίησης. [6]

1.6 Μηχανές Αριθμητικού Ελέγχου CNC (Computer Numerical Control)

Η λέξη NC που αντιπροσωπεύει τον αριθμητικό έλεγχο αναφέρεται στον έλεγχο ενός μηχανήματος ή μιας διαδικασίας που χρησιμοποιεί συμβολικούς κώδικες που αποτελούνται από χαρακτήρες και αριθμούς. Η λέξη CNC τέθηκε σε ισχύ κατά τη δεκαετία του εβδομήντα όταν οι μικροεπεξεργαστές και οι μικροϋπολογιστές αντικατέστησαν ολοκληρωμένα κυκλώματα ελέγχου IC (Integrated Controllers) που χρησιμοποιούνται για μηχανές NC. Η ανάπτυξη του αριθμητικού ελέγχου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις αεροπορικές δυνάμεις των Ηνωμένων Πολιτειών. Η ιδέα του NC προτάθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1940 από τον John Parsons ο οποίος πρότεινε μια μέθοδο αυτόματου ελέγχου μηχανής που θα οδηγούσε έναν εργαλείο

κομμάτια. Το 1949, η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ παραχώρησε στην Parsons σύμβαση για την ανάπτυξη νέου τύπου εργαλειομηχανών που θα μπορούσε να επιταχύνει τις μεθόδους παραγωγής.

Ο Parsons αναθέτει υπεργολαβικά στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) να αναπτύξει μια πρακτική εφαρμογή της ιδέας του. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί του M.I.T. δημιούργησαν ένα σύστημα ελέγχου για μια μηχανή φρεζαρίσματος δύο αξόνων που χρησιμοποίησε μια διάτρητη χαρτοταινία ως μέσο εισόδου. Αυτό το πρωτότυπο παρήχθη με τη μετασκευή μιας χειροκίνητης φρέζας με σερβομηχανισμούς αριθμητικού ελέγχου για τους τρεις άζονες της μηχανής. Μέχρι το 1955, αυτά τα μηχανήματα ήταν διαθέσιμα σε βιομηχανίες με μερικές μικρές τροποποιήσεις.

Οι κατασκευαστές εργαλειομηχανών άρχισαν σταδιακά να αναπτύσσουν τα δικά τους έργα για να εισαγάγουν εμπορικές μονάδες NC. Επίσης, ορισμένοι χρήστες του κλάδου, ιδιαίτερα οι κατασκευαστές ατράκτων, εργάστηκαν για να κατασκευάσουν μηχανές ψηφιακού ελέγχου για να ικανοποιήσουν τις δικές τους ιδιαίτερες ανάγκες παραγωγής. Η Πολεμική Αεροπορία συνέχισε την ενθάρρυνση της ανάπτυξης NC με τη χορηγία πρόσθετης έρευνας στο MIT για να σχεδιάσει μια γλώσσα προγραμματισμού μέρος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των μηχανών N.C.

Σε σύντομο χρονικό διάστημα, όλοι οι μεγάλοι κατασκευαστές εργαλειομηχανών παρήγαγαν μερικές μηχανές με NC, αλλά μέχρι αργά τη δεκαετία του 1970 η NC βασίστηκε σε υπολογιστές που χρησιμοποιούνταν ευρέως. Το NC ωρίμασε ως τεχνολογία αυτοματισμού όταν η βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών ανέπτυξε νέα προϊόντα. Αρχικά αναπτύχθηκαν κυκλώματα μικροσκοπικών λυχνιών, αλλά οι μονάδες ελέγχου ήταν ογκώδεις και όχι πολύ αξιόπιστες. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν κυκλώματα στερεάς κατάστασης και τελικά διαμορφωμένα ή ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η μονάδα ελέγχου έγινε μικρότερη, πιο αξιόπιστη και λιγότερο δαπανηρή. [18]

1.6.1 Αριθμητικός Έλεγχος μέσω Η/Υ

Οι μηχανές CNC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανεξάρτητες μονάδες ή σε ένα δίκτυο μηχανών όπως ευέλικτα κέντρα μηχανών. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί ένα εκτελεστικό πρόγραμμα για την επεξεργασία των κωδικών στους ηλεκτρικούς παλμούς που ελέγχουν το μηχάνημα. Σε οποιαδήποτε μηχανή CNC, το εκτελεστικό πρόγραμμα βρίσκεται στη ROM και σε όλους τους NC κωδικούς σε RAM. Οι πληροφορίες στη ROM είναι γραμμένες στα ηλεκτρονικά τσιπ και δεν μπορούν να διαγραφούν και ενεργοποιούνται κάθε φορά που είναι ενεργοποιημένο το μηχάνημα. Τα περιεχόμενα στη μνήμη RAM χάνονται όταν ο ελεγκτής είναι απενεργοποιημένος. Ορισμένοι χρησιμοποιούν ειδικό τύπο μνήμης RAM που ονομάζεται μνήμη CMOS, η οποία διατηρεί το περιεχόμενό της ακόμη και όταν η συσκευή είναι απενεργοποιημένη.

Μερικά από τα κυρίαρχα πλεονεκτήματα των μηχανών CNC είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνεχώς και πρέπει να απενεργοποιηθούν μόνο για περιστασιακή συντήρηση. Αυτά τα μηχανήματα απαιτούν λιγότερο εξειδικευμένους ανθρώπους να λειτουργούν σε αντίθεση με τους μηχανικούς τόρνους / φρέζες κλπ. Οι μηχανές CNC μπορούν να ενημερωθούν βελτιώνοντας το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των μηχανών. Η εκπαίδευση για τη χρήση των μηχανών CNC μπορεί να γίνει με τη χρήση «εικονικού λογισμικού».

Η διαδικασία κατασκευής μπορεί να προσομοιωθεί ουσιαστικά και δεν χρειάζεται να κατασκευαστεί ένα πρωτότυπο ή ένα μοντέλο. Αυτό εξοικονομεί χρόνο και χρήμα. Μόλις προγραμματιστούν, αυτά τα μηχανήματα μπορούν να αφεθούν και δεν απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση, εκτός από τη φόρτωση και εκφόρτωση εργασίας. Ο χειριστής μηχανών CNC χρειάζεται μόνο βασική εκπαίδευση και δεξιότητες, αρκετή για να εποπτεύσει διάφορα μηχανήματα. Τέλος, αυτά τα μηχανήματα μπορούν να κατασκευάσουν πολλά εξαρτήματα με την απαιτούμενη ακρίβεια χωρίς κόπωση, όπως στην περίπτωση χειροκίνητων μηχανών. Οι εξοικονομήσεις στο χρόνο που επιτυγχάνονται με τις μηχανές CNC είναι αρκετά σημαντικές.

Παρόλα αυτά, οι μηχανές CNC διαθέτουν και μειονεκτήματα. Οι μηχανές CNC είναι γενικά ακριβότερες από τις χειροκίνητες μηχανές. Ακόμη, έχουμε αύξηση της ηλεκτρικής συντήρησης, υψηλή αρχική επένδυση και υψηλό κόστος λειτουργίας ανά ώρα από τα παραδοσιακά συστήματα. Μια παράπλευρη απώλεια είναι ότι λιγότεροι εργαζόμενοι υποχρεούνται να χειρίζονται μηχανές CNC σε σύγκριση με χειροκίνητα μηχανήματα. Η επένδυση σε μηχανές CNC μπορεί να οδηγήσει σε ανεργία.

Το CNC εφαρμόστηκε αρχικά σε μηχανήματα επεξεργασίας, ενώ πλέον επεκτάθηκαν σε ρομποτικούς άξονες, μηχανές συγκόλλησης, EDM (Electric Discharge Machining), κοπτήρες φλόγας αλλά και για εξοπλισμό όπως: Φρέζες CNC και κέντρα κατεργασίας, CNC τόρνους και κέντρα τόρνευσης, CNC EDM (Electric Discharge Machining), CNC μηχανές λείανσης. Μηχανές κοπής CNC (λέιζερ, πλάσματος, ηλεκτρονίων ή φλόγας), Μηχανές κατασκευής CNC (πρέσες διάτρησης λαμαρίνας, μηχανές κάμψης/στράντζες), Μηχανές συγκόλλησης με CNC και μηχανές μετρονομίας CNC. [18]

1.6.2 Άξονες Κίνησης Μηχανών CNC

Υπάρχουν οι μηχανές CNC 2 και 3 αξόνων: Οι τόρνοι CNC για παράδειγμα είναι μηχανές 2 αξόνων. Θα υπάρχουν δύο άξονες κατά μήκος των οποίων θα πραγματοποιηθεί η κίνηση. Ο εργαλειοφορέας θα κινείται διαμήκως στο τραπέζι (άξονας Z) και η διασταυρούμενη πρόωση του εργαλείου θα γίνεται εγκάρσια στον εργαλειοφορέα (κατά μήκος του άξονα X). Σε μηχανές 3 αξόνων, θα υπάρχει ένας ακόμα άξονας, κάθετος στους δύο παραπάνω άξονες. Με τον ταυτόχρονο έλεγχο όλων των 3 αξόνων, μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκες επιφάνειες. Μια άλλη κατηγορία αποτελούν οι μηχανές CNC 4 & 5 αξόνων: Αυτές οι μηχανές CNC παρέχουν δυνατότητες επεξεργασίας πολλών αξόνων πέραν των τυπικών κινήσεων των εργαλείων CNC με τρεις άξονες. Μια φρέζα 5 αξόνων περιλαμβάνει τους τρεις άξονες X, Y και Z, τον άξονα A που αφορά περιστροφική κλίση του άξονα και τον άξονα B, ο οποίος μπορεί να είναι μια περιστροφική άτρακτος. Τα πλεονεκτήματα που μπορούμε να αποκομίσουμε από την πρόσθεση επιπλέον αξόνων κίνησης ενός κέντρου κατεργασίας είναι μειωμένος χρόνος ολοκλήρωσης της μηχανικής κατεργασίας πολύπλοκων εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας μια ενιαία ρύθμιση. Εκτός από την εξοικονόμηση χρόνου, μπορεί επίσης να επιτευχθεί βελτιωμένη ακρίβεια καθώς εξαλείφονται τα σφάλματα εντοπισμού θέσης μεταξύ των ρυθμίσεων. Επιπλέον, μπορούμε να επιτύχουμε βελτιωμένο φινίρισμα επιφάνειας και διάρκεια ζωής εργαλείου, με κλίση του εργαλείου για να διατηρείται η βέλτιστη επαφή εργαλείου/τεμαχίου καθ' όλη την κατεργασία, βελτιωμένη πρόσβαση σε δυσπρόσιτες επιφάνειες κομματιών αλλά και βαθιές τρύπες, όπου με την κλίση του εργαλείου και τα σφάλματα μπορεί να μειωθούν καθώς η κύρια δύναμη κοπής θα είναι κατά μήκος του άξονα του εργαλείου.

Η μηχανική κατεργασία πολλών αξόνων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κατεργασία επιφανειών τεμαχίων που βρίσκουν χρήση στη βιομηχανία αεροδιαστημικής και αυτοκινητοβιομηχανίας. [18]

1.6.3 Εξαρτήματα/Μέρη Οριζόντιας Εργαλειομηχανής/Φρέζας CNC

Κάθε οριζόντια φρέζα/εργαλειομηχανή CNC αποτελείται ουσιαστικά από τα ακόλουθα μέρη και εξαρτήματα. Τα κύρια μέρη της είναι η Βάση, το Σώμα, το Κιβώτιο ταγυτήτων, η Κύρια άτρακτος και το Συγκρότημα Τράπεζας. Η βάση είναι μια άκαμπτη, βαριά πλάκα με νευρώσεις που βαστάζει τα υπόλοιπα δομικά μέρη της εργαλειομηγανής. Στις μικρές είναι ενοποιημένη με το κυρίως σώμα. Το σώμα (κορμός, ορθοστάτης) περιέχει στο εσωτερικό του το κιβώτιο ταχυτήτων, και το μπροστινό τμήμα του είναι επίπεδο, κατακόρυφο και φέρει ισχυρούς ολισθητήρες (γλίστρες), πάνω στους οποίους μετακινείται το συγκρότημα της τράπεζας. Στο πάνω τμήμα φέρει 2 εξωτερικά και 1 εσωτερικό έδρανα για τη στήριξη της κύριας ατράκτου, ενώ στην ανώτατη θέση του ο πρόβολος εφοδιάζεται με 1 ή 2 κουζινέτα για τη στήριξη του εργαλειοφόρου άξονα. Στο πίσω τμήμα του βρίσκεται ο ηλεκτροκινήρας για την κίνηση του κιβωτίου ταχυτήτων. Η κύρια άτρακτος είναι διάτρητη καθ' όλο το μήκος της και στηρίζεται σε 2 ή 3 έδρανα (συνήθως ρουλεμάν), προβλέπονται όμως και αξονικά έδρανα για την παραλαβή των οριζοντίων δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Το μπροστινό τμήμα της (κεφαλή) διαμορφώνεται σε μορφή κόλουρου κώνου (κώνος Morse ή κώνος 7:24). Ο κώνος Morse εξασφαλίζει συγκεντρικότητα και παραλαμβάνει τη μεταφερόμενη ροπή στρέψης, ενώ ο κώνος 7:24 εξασφαλίζει μόνο συγκεντρικότητα. Ένας άξονας έλξης (ντίζα) διαπερνά την άτρακτο και κοχλιώνεται στο κόλουρο-κωνικό άκρο του εργαλειοφόρου άξονα, εξασφαλίζοντάς του έτσι συγκράτηση, σταθερότητα και συγκεντρικότητα μέσα στην άτρακτο. Το συγκρότημα τράπεζας αποτελείται από το φορείο για την κατακόρυφη κίνηση (κ. κονσόλα, γόνατο), το φορείο για την εγκάρσια κίνηση και την κυρίως τράπεζα. Για την εξασφάλιση της κατακόρυφης κίνησης, η κονσόλα/γόνατο κινείται πάνω στους κατακόρυφους ολισθητήρες στο μέτωπο του σώματος της μηχανής, ενώ για την εξασφάλιση της εγκάρσιας κίνησης, το φορείο εγκαρσιας κίνησης κινείται πάνω σε οριζόντιους ολισθητήρες της κονσόλας που διατάσσονται κάθετα προς το μέτωπο του σώματος. Στην κυρίως τράπεζα στερεώνεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το οποίο

κινείται οριζόντια και παράλληλα προς το μέτωπο της μηχανής πάνω στους ολισθητήρες του εγκάρσιου φορείου.

Η συσκευή εισαγωγής προγράμματος είναι το μέσο για την εισαγωγή του προγράμματος G Code στη μηχανή CNC. Η μονάδα ελέγχου μηχανής (Machine Control Unit, MCU) είναι η καρδιά ενός συστήματος CNC. Χρησιμοποιείται για να διαβαστούν οι κωδικοποιημένες οδηγίες, να αποκωδικοποιηθούν, για την υλοποίηση των κινήσεων του εργαλείου κατεργασίας (γραμμική, κυκλική και ελικοειδής) και για τη δημιουργία εντολών κίνησης των αξόνων. Ακόμη, αναλαμβάνει την τροφοδοσία των εντολών κίνησης του άξονα στα κυκλώματα του ενισχυτή για την κίνηση των μηχανισμών του άξονα, τα σήματα ανάδρασης της θέσης και της ταχύτητας για κάθε άξονα κίνησης και την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση των βοηθητικών λειτουργιών ελέγχου, όπως η αλλαγή ψυκτικού υγρού ή ατράκτου και η αλλαγή εργαλείου.

Όσον αφορά το σύστημα μετάδοσης κίνησης, αυτό αποτελείται από κυκλώματα ενισχυτή, κινητήρες και τους οδηγούς κίνησης. Η μονάδα MCU τροφοδοτεί τα σήματα ελέγχου (θέση και ταχύτητα) κάθε άξονα στα κυκλώματα του ενισχυτή. Τα σήματα ελέγχου ενισχύονται για να ενεργοποιηθούν οι κινητήρες κίνησης, οι οποίοι με τη σειρά τους περιστρέφονται με τις οδηγούς για να τοποθετήσουν στην επιθυμητή θέση την τράπεζα εργασίας του μηχανήματος.

Οι μηχανές CNC διαθέτουν ειδικά χειριστήρια, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διαφόρων τύπων εργαλείων κατεργασίας. Ανεξάρτητα από τον τύπο του εργαλείου κατεργασίας που χρησιμοποιείται, διαθέτουν οπωσδήποτε μια τράπεζα και έναν άξονα για τον έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας. Η τράπεζα του μηχανήματος ελέγχεται κατά τους άξονες X και Y, ενώ ο κινητήρας περιστροφής του εργαλείου κατεργασίας (Spindle motor) κινείται κατά μήκος του άξονα Z. Οι άξονες του μηχανήματος ορίζονται σύμφωνα με τον "κανόνα του δεξιού χεριού": Όταν ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει προς την κατεύθυνση του θετικού άξονα X, ο δείκτης δείχνει προς τον θετικό άξονα Y και το μεσαίο δάχτυλο προς τον θετικό άξονα Z.

Είναι σύνηθες, οι μηχανές CNC να διαθέτουν ένα σύστημα ανάδρασης το οποίο αναφέρεται επίσης ως σύστημα μέτρησης. Χρησιμοποιεί μορφοτροπείς θέσης και ταχύτητας για να παρακολουθεί συνεχώς τη θέση στην οποία βρίσκεται το εργαλείο κοπής σε οποιαδήποτε στιγμή. Η μονάδα MCU χρησιμοποιεί τη διαφορά μεταξύ σημάτων αναφοράς και σημάτων ανάδρασης για τη δημιουργία σημάτων ελέγχου για τη διόρθωση σφαλμάτων θέσης και ταχύτητας. [18]

1.6.4 Ηλεκτρονικά Συστήματα Μηχανών CNC

Οι μονάδες κίνησης που χρησιμοποιούνται στις μηχανές CNC είναι δύο τύπων, οι ηλεκτροκινητήρες AC (Alternating Current), DC (Direct Current) ή Stepper και τα υδραυλικά ή πνευματικά συστήματα. Οι ηλεκτροκινητήρες είναι μακράν το πιο συνηθισμένο μέσο για την μετάδοση ισχύος σε ένα σύστημα γραμμικής κίνησης. Οι βηματικοί κινητήρες και οι σερβοκινητήρες είναι οι δημοφιλείς επιλογές σε μηχανήματα γραμμικής κίνησης λόγω της ακρίβειας και της δυνατότητας ελέγχου τους. Έχουν ευνοϊκά χαρακτηριστικά ταχύτητας/ροπής και είναι σχετικά φθηνοί. [18]

1.6.4.1 Βηματικοί Κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες μετατρέπουν τα ψηφιακά σήματα παλμού και κατεύθυνσης σε περιστροφική κίνηση και ελέγχονται εύκολα. Αν και οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με αναλογικά ή ψηφιακά σήματα ανάδρασης, χρησιμοποιούνται συνήθως χωρίς ανατροφοδότηση (ανοιχτός βρόχος). Οι βηματικοί κινητήρες απαιτούν τάση οδήγησης κινητήρα και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου. Ο ρότορας ενός τυπικού υβριδικού βηματικού κινητήρα έχει δύο μαλακά κύπελλα σιδήρου που περιβάλλουν έναν μόνιμο μαγνήτη ο οποίος είναι μαγνητισμένος αξονικά. Τα κύπελλα ρότορα έχουν 50 δόντια στις επιφάνειές τους και καθοδηγούν τη ροή μέσα από το κενό αέρος του ρότοραστάτορα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δόντια ενός σετ (Phase A) είναι μετατοπισμένα από τα δόντια του άλλου (Phase B) με το μισό βήμα του δοντιού για έναν κινητήρα με βήμα δύο σταδίων.



Εικόνα 1.17: Σχηματικό διάγραμμα του εσωτερικού ενός απλουστευμένου βηματικού κινητήρα [19]

Ο στάτορας γενικά έχει τον ίδιο αριθμό δοντιών με τον ρότορα, αλλά μπορεί να έχει δύο δόντια λιγότερα, ανάλογα με το σχεδιασμό του κινητήρα. Όταν τα δόντια στον πόλο του στάτορα ενεργοποιούνται με τη βόρεια πολικότητα, τα αντίστοιχα δόντια στο ρότορα με νότια πολικότητα ευθυγραμμίζονται με αυτά. Ομοίως, τα δόντια στο πόλο του στάτορα ενεργοποιούμενα με τη νότια πολικότητα προσελκύουν αντίστοιχα δόντια στο ρότορα που ενεργοποιούνται με τη βόρεια πολικότητα. Αλλάζοντας την πολικότητα των γειτονικών δοντιών του στάτορα το ένα μετά το άλλο σε μια περιστρεφόμενη αλληλουχία, ο ρότορας αρχίζει να γυρίζει αντίστοιχα καθώς τα δόντια του προσπαθούν να ευθυγραμμιστούν με τα δόντια του στάτορα. Η ισχύς των μαγνητικών πεδίων μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια από την ποσότητα ρεύματος διαμέσου των περιελίξεων, έτσι η θέση του ρότορα μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια από αυτές τις ελκυστικές και απωθητικές δυνάμεις. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στη χρήση βηματικών κινητήρων. Δεδομένου ότι η μέγιστη δυναμική ροπή λαμβάνει χώρα σε χαμηλές συχνότητες παλμών (χαμηλές ταχύτητες), οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να επιταχύνουν εύκολα ένα φορτίο. Οι βηματικοί κινητήρες έχουν μεγάλη ροπή συγκράτησης και ακαμψία, επομένως δεν υπάρχει συνήθως ανάγκη γιασυμπλέκτες και φρένα (εκτός αν ενεργεί μεγάλο εξωτερικό φορτίο, όπως η βαρύτητα). Οι βηματικοί κινητήρες είναι εγγενώς ψηφιακοί. Ο αριθμός των παλμών προσδιορίζει τη θέση ενώ η συχνότητα των παλμών προσδιορίζει την ταχύτητα. Επιπλέον πλεονεκτήματα είναι ότι είναι φθηνά, εύκολα και με ακρίβεια ελεγχόμενα συστήματα, ενώ δεν διαθέτουν ψήκτρες που να απαιτούν συντήρηση λόγω τριβής. Επίσης, προσφέρουν εξαιρετική διάχυση θερμότητας και είναι πολύ ισχυροί κινητήρες με υψηλές ροπές κίνησης για το μέγεθός τους. Η ψηφιακή φύση των βηματικών κινητήρων εξαλείφει επίσης τις παραμέτρους συντονισμού.

Υπάρχουν μειονεκτήματα βέβαια που σχετίζονται με τους κινητήρες αυτούς. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα είναι ότι η ροπή μειώνεται καθώς η ταχύτητα αυξάνεται. Επειδή οι περισσότεροι βηματικοί κινητήρες λειτουργούν με ανοικτό βρόχο χωρίς συσκευές ανίχνευσης θέσης, ο κινητήρας μπορεί να σταματήσει ή να χάσει τη θέση του αν η ροπή φορτίου υπερβαίνει την διαθέσιμη ροπή του κινητήρα. Τα συστήματα βηματικού κινητήρα ανοιχτού βρόχου δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υψηλής απόδοσης ή υψηλού φορτίου, εκτός εάν μειωθούν σημαντικά. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι μπορεί να απαιτείται απόσβεση όταν η αδράνεια του φορτίου είναι πολύ υψηλή για να αποφευχθεί η ταλάντωση του άξονα κινητήρα σε σημεία συντονισμού. Τέλος, οι βηματικοί κινητήρες ενδέχεται να εκτελούν ανεπαρκείς εφαρμογές υψηλής ταχύτητας. Η μέγιστη ταχύτητα βημάτων / δευτερολέπτου του κινητήρα και του συστήματος μετάδοσης κίνησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη προσεκτικά. [18]

1.6.4.2 Κινητήρες Τύπου Servo

Οι σερβοκινητήρες είναι πιο ισχυροί από τους βηματικούς κινητήρες, αλλά δημιουργούν ένα πιο δύσκολο πρόβλημα ελέγχου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου η ταχύτητα, η ισχύς, το επίπεδο θορύβου, καθώς και η ταχύτητα και η ακρίβεια θέσης είναι σημαντικές. Οι σερβοκινητήρες δεν λειτουργούν χωρίς ανατροφοδότηση αισθητήρα. Είναι σχεδιασμένοι και προορίζονται να εφαρμοστούν σε συνδυασμό με resolvers, ταχύμετρα ή κωδικοποιητές (κλειστός βρόχος). Υπάρχουν διάφοροι τύποι σερβοκινητήρες DC τύπου brush βρίσκονται συνήθως στις μηχανές CNC χαμηλής ή μέσης εμβέλειας. Η "βούρτσα" αναφέρεται σε βούρτσες που περινρία στο ρότορα του περιστρεφόμενου πυρήνα του κινητήρα. Η κατασκευή αποτελείται από ένα εξωτερικό στάτορα μαγνητών και ένα εσωτερικό ρότορα σπειροειδούς. Κάθε πηνίο μετατοπίζεται γωνιακά ο ένας από τον άλλο, έτσι ώστε όταν η ροπή από ένα πηνίο έχει πέσει, το ρεύμα μεταβαίνει αυτόματα σε ένα άλλο πηνίο το οποίο είναι κατάλληλα τοποθετημένο για να παράγει μέγιστη ροπή. Η μεταγωγή επιτυγχάνεται μηχανικά από τις βούρτσες και από ένα διακόπτη όπως φαίνεται παρακάτω.

Υπάρχουν ξεκάθαρα πλεονεκτήματα για τη χρήση σερβοκινητήρων DC. Είναι πολύ ανέξοδες να εφαρμοστούν. Ο κινητήρας λειτουργεί με τις βούρτσες και φαίνεται σαν μια απλή

συσκευή που ελέγχεται εύκολα. Μεταξύ των μειονεκτημάτων είναι το γεγονός ότι είναι θερμικά αναποτελεσματικά, επειδή η θερμότητα πρέπει να διαχέεται μέσω των εξωτερικών μαγνητών. Αυτή η κατάσταση μειώνει την αναλογία ροπής προς όγκο και η απόδοση του κινητήρα μπορεί να υποστεί αναποτελεσματική. Επίσης, ο κινητήρας τύπου brush θα απαιτήσει συντήρηση, καθώς οι βούρτσες θα φθαρούν και θα πρέπει να αντικατασταθούν. Οι brush σερβοκινητήρες λειτουργούν συνήθως κάτω από 5000 σ.α.λ.

Ο τύπος brushless DC προσφέρει υψηλότερο επίπεδο απόδοσης. Είναι συχνά αναφερόμενοι ως κινητήρες συνεχούς ρεύματος "από μέσα" λόγω του σχεδιασμού τους. Οι περιελίξεις ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες βρίσκονται στο εξωτερικό τμήμα του κινητήρα (στάτορας) και ο ρότορας κατασκευάζεται από μόνιμους μαγνήτες όπως φαίνεται παρακάτω. Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες συνεχώς εφαρμόζονται σε μηχανήματα CNC υψηλής τεχνολογίας, αλλά το μέλλον μπορεί να δει μεσαίες μηχανές που χρησιμοποιούν τεχνολογία χωρίς ψήκτρες λόγω της μείωσης του κόστους.



Εικόνα 1.18: Αριστερά, μέρη και εξαρτήματα ενός κινητήρα τύπου AC Servo και δεξιά ενός DC brushless Servo [20] [21]

Οι σερβοκινητήρες AC είναι μια άλλη ποικιλία που προσφέρει απόδοση υψηλής απόδοσης. Η φυσική τους κατασκευή είναι παρόμοια με εκείνη του κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες. Ωστόσο, δεν υπάρχουν μαγνήτες στο μοτέρ εναλλασσόμενου ρεύματος. Αντ' αυτού, τόσο ο ρότορας όσο και ο στάτορας κατασκευάζονται από πηνία. Και πάλι, δεν υπάρχουν ψύκτρες ή επαφές οπουδήποτε στο μοτέρ, πράγμα που σημαίνει ότι δεν χρειάζονται συντήρηση. Είναι σε θέση να παρέχουν πολύ υψηλή ροπή σε πολύ υψηλές ταχύτητες, διαθέτουν μικρό βάρος και δεν υπάρχει δυνατότητα απομαγνήτισης.

Ωστόσο, λόγω της ηλεκτρονικής μεταγωγής, είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και δαπανηρές κατασκευές στο να ελεγχθούν αποτελεσματικά. Ίσως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της χρήσης σερβοκινητήρων είναι ότι χρησιμοποιούνται σε μορφή κλειστού βρόχου, η οποία επιτρέπει πολύ ακριβείς πληροφορίες θέσης και επιτρέπει επίσης την επίτευξη υψηλής ροπής εξόδου σε υψηλές ταχύτητες. Ο κινητήρας θα τραβήξει το απαιτούμενο ρεύμα για να διατηρήσει την επιθυμητή πορεία, ταχύτητα ή ροπή και ελέγχεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και όχι με τους περιορισμούς του κινητήρα. Οι σερβοκινητήρες θέτουν τεράστια ροπή στρέψης σε ή κοντά σε συνθήκες στάσης. Παρέχουν ομαλή και αθόρυβη λειτουργία και, ανάλογα με την ανάλυση του μηχανισμού ανάδρασης, μπορούν να έχουν πολύ μικρές αναλύσεις. Μεταξύ των μειονεκτημάτων των σερβοκινητήρων είναι το αυξημένο κόστος, το πρόσθετο στοιχείο ανάδρασης και η αυξημένη πολυπλοκότητα του ελέγχου. Το χαρακτηριστικό κλειστού βρόχου μπορεί να είναι ένα μειονέκτημα για την περίπτωση όταν υπάρχει ένα φυσικό εμπόδιο που εμποδίζει τη διαδρομή κίνησης. Αντί να σταματήσει, ο σερβοκινητήρας θα συνεχίσει να τροφοδοτεί ρεύμα για να ξεπεράσει το εμπόδιο. Ως αποτέλεσμα, το υλικό του συστήματος, τα ηλεκτρονικά ελέγχου, ο ενισχυτής σήματος και ο κινητήρας ενδέχεται να καταστραφούν, εκτός εάν ληφθούν μέτρα ασφαλείας. [18]

1.6.5 Μηχανικά Υποσυστήματα Μηχανών CNC

1.6.5.1 Συστήματα Κίνησης Τράπεζας

Οι μονάδες μετάδοσης κίνησης των τραπεζών σε εργαλεία NC είναι γενικά οι μηχανισμοί ολισθητήρων μορφής V, επίπεδοι, μορφής χελιδονοουράς, κυλινδρικοί, συνδυασμός των ανωτέρω, αντιτριβής (με σφαίρες ή/και κυλίνδρους), με υδροστατική λίπανση και κυλίνδρους. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μηχανισμών που χρησιμοποιούνται σε εργαλεία NC, οι οποίοι παρέχουν χαμηλή φθορά, υψηλότερη απόδοση, χαμηλή τριβή και καλύτερη αξιοπιστία.

Το συγκρότημα ολισθητήρων με σφαίρες έχει το παξιμάδι με φλάντζα συνδεδεμένο στον κινούμενο θάλαμο και τον κοχλία με τη σταθερή χύτευση. Έτσι, το κινούμενο μέλος θα κινηθεί κατά την περιστροφική κίνηση της βίδας. Σε αυτούς τους τύπους βιδών, οι σφαίρες περιστρέφονται μεταξύ της βίδας και του περικοχλίου και μετατρέπουν την τριβή ολίσθησης (όπως συμβαίνει με το συμβατικό παξιμάδι & βίδα) στην τριβή κύλισης. Κατά συνέπεια, η φθορά θα μειωθεί και η αξιοπιστία του συστήματος θα αυξηθεί. Το παραδοσιακό σπείρωμα τύπου ACME που χρησιμοποιείται σε συμβατικές εργαλειομηχανές έχει απόδοση που κυμαίνεται από 20% έως 30%, ενώ η απόδοση των ολισθητήρων με σφαίρες μπορεί να φθάσει το 90%.

Υπάρχουν δύο τύποι βιδών. Στον πρώτο τύπο, οι σφαίρες επιστρέφονται μέσω ενός εξωτερικού σωλήνα μετά από λίγα σπειρώματα. Σε έναν άλλο τύπο, οι σφαίρες επιστρέφονται στην αρχή μέσω ενός καναλιού μέσα στο παξιμάδι μετά από ένα μόνο σπείρωμα. Για να γίνει η κίνηση της τράπεζας αμφίδρομη, η αντίδραση μεταξύ της βίδας και του περικοχλίου πρέπει να είναι ελάχιστη. Μία από τις μεθόδους για την επίτευξη μηδενικής αντίδρασης είναι η τοποθέτηση δύο παξιμαδιών. Τα παξιμάδια προφορτίζονται κατά ποσό που υπερβαίνει το μέγιστο φορτίο λειτουργίας. Αυτά τα παξιμάδια είτε αναγκάζονται να διαχωρίζονται είτε να συμπιέζονται μεταξύ τους, έτσι ώστε οι σφαίρες σε ένα από τα παξιμάδια να έρχονται σε επαφή με την αντίθετη πλευρά των σπειρωμάτων. Το πρόβλημα παρόλα αυτά είναι ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ελάχιστη διάμετρος της σφαίρας (60 έως 70% της βίδας), περιορίζοντας την ταχύτητα κίνησης της βίδας.

Στα συστήματα τύπου κυλινδρικού ολισθητήρα τώρα, οι κύλινδροι είναι κοχλιοτομημένοι με ένα μόνο σπείρωμα εκκίνησης. Τα δόντια κόβονται στα άκρα του κυλίνδρου, τα οποία εμπλέκονται με το εσωτερικό δόντι που κόβεται μέσα στο παξιμάδι. Οι κύλινδροι βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις και διατηρούνται στις θέσεις τους με πείρους ή διαχωριστικούς δακτυλίους. Δεν υπάρχει αξονική κίνηση των κυλίνδρων σε σχέση με το παξιμάδι και είναι ικανές να μεταδίδουν υψηλό φορτίο σε γρήγορη ταχύτητα.

Υπάρχει όμως και η περίπτωση των συστημάτων κυλινδρικού ολισθητήρα, όπου οι κύλινδροι σε αυτή την περίπτωση δεν είναι κοχλιοτομημένοι και είναι εφοδιασμένοι με μία κυκλική αύλακα και τοποθετούνται περιφερειακά μέσα σε ένα κλωβό. Υπάρχει κάποια αξονική κίνηση των κυλίνδρων σε σχέση με το παξιμάδι. Κάθε κύλινδρος κινείται κατά απόσταση ίση με το βήμα της βίδας για κάθε περιστροφή της βίδας ή του παξιμαδιού και μετακινείται σε μία αξονική εσοχή που κόβεται μέσα στο παξιμάδι και αποσυμπλέκεται από τα σπειρώματα πάνω στη βίδα και το παξιμάδι, με τον άλλο κύλινδρο να παρέχει την κινητήρια δύναμη . Οι κύλινδροι στην εσοχή μετακινούνται πίσω από ένα ακραίο έκκεντρο στο παξιμάδι. Τα συστήματα τύπου κυλινδρικού ολισθητήρα είναι πιο αργά στη λειτουργία, αλλά είναι ικανά να μεταδίδουν υψηλά φορτία με μεγαλύτερη ακρίβεια. [18]

1.6.5.2 Συστήματα Συγκράτησης Εργαλείων Κατεργασίας

Υπάρχουν δύο τύποι ρυθμίσεων αλλαγής εργαλείων: χειροκίνητα και αυτόματα. Τα κέντρα επεξεργασίας ενσωματώνουν αυτόματη άτρακτο εναλλαγής εργαλείων (ATC), και είναι η αυτόματη δυνατότητα αλλαγής εργαλείων που διαφοροποιεί τα κέντρα κατεργασίας CNC από μηχανές φρεζαρίσματος CNC.

Ο χρόνος αλλαγής εργαλείου ανήκει σε μη παραγωγικό χρόνο, επομένως θα πρέπει να ελαχιστοποιείται. Επίσης, το εργαλείο πρέπει να είναι τοποθετημένο με ακρίβεια στον εργαλειοφόρο άξονα, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή κατεργασία και πρέπει να διατηρεί την ίδια σχέση με το τεμάχιο εργασίας κάθε φορά. Αυτό είναι γνωστό ως επαναληψιμότητα του εργαλείου. Οι μηχανές φρεζαρίσματος με CNC έχουν κάποιο τύπο ταχέως μεταβαλλόμενου συστήματος εργαλείων, το οποίο γενικά περιλαμβάνει έναν εργαλειοφόρο άξονα ταχείας αποδέσμευσης. Ο σφιγκτήρας είναι ένας διαφορετικός μηχανισμός συγκράτησης εργαλείου ο οποίος θα είναι μέσα στον άξονα και θα λειτουργεί είτε υδραυλικά είτε με πνευματικό τρόπο. Τα κοπτικά εργαλεία που τοποθετούνται μέσα στον σφιγκτήρα του εργαλειοφόρου άξονα μπορούν να απελευθερωθούν πιέζοντας ένα κουμπί που απελευθερώνει το υδραυλικό τσοκ. [18]

1.6.6 Προγραμματισμός Μηχανών CNC

Η κατεργασία ενός τεμαχίου περιλαμβάνει τη σχετικής κίνηση μεταξύ του εργαλείου κοπής και του τεμαχίου εργασίας. Στα εργαλειομηχανές αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη μετακίνηση του εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας είτε το αντίστροφο. Για να ορίσουμε τη σχετική κίνηση δύο αντικειμένων, πρέπει να οριστούν κατευθύνσεις αναφοράς. Αυτές οι κατευθύνσεις αναφοράς εξαρτώνται από τον τύπο εργαλειομηχανών και ορίζονται με την εξέταση ενός φανταστικού συστήματος συντεταγμένων στο εργαλείο εργαλειομηχανών. Ένα πρόγραμμα που καθορίζει την κίνηση του εργαλείου / τεμαχίου σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων είναι γνωστό ως *Part Program*.

Ένα Part Program απαιτεί τη δημιουργία ορισμένων σημείων αναφοράς. Τρία σημεία αναφοράς καθορίζονται είτε από τον κατασκευαστή είτε από τον χρήστη. Το πρώτο από αυτά είναι η αρχή συντεταγμένων μηχανής, όπου αποτελεί ένα σταθερό σημείο που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή εργαλειομηχανών και συνήθως δεν μπορεί να αλλάξει. Κάθε κίνηση εργαλείου μετράται από αυτό το σημείο. Ο ελεγκτής θυμάται πάντα την απόσταση εργαλείων από την προέλευση του μηχανήματος.

Το σημείο αλλαγής εργαλείου είναι σημείο από όπου το εργαλείο ξεκινάει για την κίνηση του κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος και επιστρέφει στο τέλος του κύκλου. Αυτό μπορεί να είναι οποιοδήποτε σημείο εντός του χώρου εργασίας του εργαλείου το οποίο είναι αρκετά μακριά από το τμήμα. Στην περίπτωση του τόρνου CNC είναι ένα σημείο όπου πραγματοποιείται η αλλαγή εργαλείου.

Η επαρχή κίνησης του εργαλείου κατεργασίας μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του χώρου κατεργασίας του μηχανήματος. Η καθιέρωση της αρχής συντεταγμένων προγράμματος είναι επίσης γνωστή ως μηδενική μετατόπιση, μηδενικό στοιχείο ή σημείο αναφοράς. Συνήθως πρέπει να οριστεί προέλευση μέρους για κάθε νέα εγκατάσταση. Η μηδενική μετατόπιση επιτρέπει τη μετεγκατάσταση του τμήματος. Μερικές φορές η ακρίβεια μέρους επηρεάζεται από τη θέση της προέλευσης του μέρους.

Ένα αντικείμενο στο χώρο μπορεί να έχει έξι βαθμούς ελευθερίας σε σχέση με ένα φανταστικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Τρεις από αυτές αφορούν γραμμικές κινήσεις και άλλες τρεις περιστροφικές. Η κατεργασία ενός απλού τεμαχίου δεν απαιτεί όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Με την αύξηση των βαθμών ελευθερίας, η πολυπλοκότητα του τεμαχίου και του προγραμματισμού αυξάνεται. Ο αριθμός βαθμού ελευθερίας καθορίζει τους απαραίτητους για χρήση άξονες της μηχανής.

Η παρεμβολή των αξόνων σημαίνει ταυτόχρονη κίνηση δύο ή περισσοτέρων διαφορετικών αξόνων για τη δημιουργία απαιτούμενου περιγράμματος. Για τυπικό μηχανισμό τόρνου ο βαθμός ελευθερίας είναι 2 και έτσι ονομάζεται μηχανή 2 αξόνων. Για την τυπική μηχανή φρεζαρίσματος υπάρχει βαθμός ελευθερίας 2&½, πράγμα που σημαίνει ότι δύο άξονες μπορούν να παρεμβληθούν κάθε φορά και ο τρίτος παραμένει ανεξάρτητος.

Σε περίπτωση εργαλειομηχανών CNC η περιστροφή του άξονα αναφοράς δεν είναι δυνατή. Η αρχή μπορεί να ρυθμιστεί επιλέγοντας τρία επίπεδα αναφοράς X, Y και Z. Τα επίπεδα μπορούν να ρυθμιστούν αγγίζοντας το εργαλείο στις επιφάνειες του τεμαχίου εργασίας και ρυθμίζοντας τις επιφάνειες ως X = x, Y = y και Z = z.

Σε περίπτωση εργαλειομηχανών CNC η περιστροφή του άξονα αναφοράς δεν είναι δυνατή. Η αρχή μπορεί να ρυθμιστεί επιλέγοντας τρία επίπεδα αναφοράς X, Y και Z. Τα αεροπλάνα μπορούν να ρυθμιστούν αγγίζοντας το εργαλείο στις επιφάνειες του τεμαχίου εργασίας και ρυθμίζοντας τις επιφάνειες ως X = x, Y = y και Z = z.

Ο προγραμματιστής και ο χειριστής πρέπει να χρησιμοποιούν ένα σύστημα κωδικοποίησης για την αναπαραγωγή πληροφοριών, τις οποίες ο ελεγκτής μπορεί να ερμηνεύσει και να εκτελέσει. Ένα συνηθισμένο σύστημα κωδικοποίησης είναι το δυαδικό κωδικοποιημένο δεκαδικό σύστημα ή σύστημα BCD. Αυτό το σύστημα είναι επίσης γνωστό ως κώδικας EIA (Electronics Industries Association). Το νεότερο σύστημα κωδικοποίησης είναι το ASCII και έχει γίνει κωδικός ISO λόγω της ευρείας αποδοχής του. [18]

1.6.7 Εντολές G Code

Η μηχανή CNC χρησιμοποιεί ένα σύνολο κανόνων για την εισαγωγή, επεξεργασία, λήψη και έξοδο δεδομένων. Αυτοί οι κανόνες είναι γνωστοί ως σύνταξη CNC, μορφή προγραμματισμού ή μορφή ταινίας. Η μορφή καθορίζει τη σειρά και τη διάταξη των καταχωρημένων πληροφοριών. Αυτή είναι μια περιοχή όπου οι έλεγχοι διαφέρουν πολύ. Υπάρχουν κανόνες για τις μέγιστες και ελάχιστες αριθμητικές τιμές και τα μήκη λέξεων που μπορούν να εισαχθούν, ενώ η διάταξη των χαρακτήρων και της λέξης είναι σημαντική. Το μπλοκ οδηγιών αποτελείται από μία ή περισσότερες λέξεις. Μια λέξη αποτελείται από μια διεύθυνση ακολουθούμενη από αριθμούς. Για τη διεύθυνση χρησιμοποιείται ένα από τα γράμματα από το Α έως το Ζ. Η διεύθυνση ορίζει τη σημασία του αριθμού που ακολουθεί. Με άλλα λόγια, η διεύθυνση καθορίζει τι αντιπροσωπεύει ο αριθμός. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι μια οδηγία για να μετακινηθεί το εργαλείο κατά μήκος του άξονα Χ ή για να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο εργαλείο.

Ο όρος «προπαρασκευαστικό» στο NC σημαίνει ότι «προετοιμάζει» το σύστημα ελέγχου να είναι έτοιμο για την εφαρμογή των πληροφοριών που ακολουθούν στην επόμενη ομάδα οδηγιών. Μια προπαρασκευαστική λειτουργία ορίζεται σε ένα πρόγραμμα από τη λέξη G που ακολουθείται από δύο ψηφία. Οι προπαρασκευαστικές λειτουργίες αποκαλούνται επίσης κώδικες G και καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας της λειτουργίας.

Τέλος, οι διάφορες λειτουργίες χρησιμοποιούν το γράμμα M, ακολουθούμενο από δύο ψηφία. Εκτελούν μια ομάδα οδηγιών όπως ενεργοποίηση / απενεργοποίηση του ψυκτικού υγρού, ενεργοποίηση / απενεργοποίηση του άξονα, αλλαγή εργαλείου, διακοπή προγράμματος ή λήξη προγράμματος. Συχνά αναφέρονται ως λειτουργίες μηχανής ή λειτουργίες M. [18]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Παρόλο που τα εξαρτήματα από σύνθετα υλικά όλων των ειδών συχνά μορφοποιούνται κοντά στο τελικό σχήμα, κάποια κατεργασία είναι συχνά αναπόφευκτη. Σε πολλές περιπτώσεις, προστίθεται επιπλέον υλικό με τελικό σκοπό τη συμμόρφωση των υλικών σε σύνθετα σχήματα καλουπιών, καθώς για τον εντοπισμό και την τοποθέτηση συνδέσμων. Μπορεί για παράδειγμα να προκύψει διόγκωση της ρητίνης μετά από τη χύτευση και σκλήρυνση του συστήματος ρητίνης-ινών, δημιουργώντας προμορφώματα. Αυτό το πλεόνασμα υλικού πρέπει να αφαιρεθεί με μηχανική κατεργασία. Η μηχανική κατεργασία είναι επίσης μια απαραίτητη διαδικασία για τη διαμόρφωση εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά και για φινίρισμα εξαρτημάτων σφιχτής ανοχής. Μερικές από τις συνήθεις διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας που χρησιμοποιούνται είναι η κοπή των άκρων, το φρεζάρισμα, η διάτρηση, η διάνοιξη κωνικών οπών και η εκτριβή. Στην τρέχουσα κατασκευή αεροσκαφών, η εκτριβή και η διάτρηση είναι κρίσιμες για το φινίρισμα των άκρων των πλαισίων του παραγόμενου εξαρτήματος, ή κατά τη διάνοιξη οπών για την ακριβή συνένωση ήλων/οπών. [22][23][24][25][26]

Τα σύνθετα υλικά αντικαθιστούν συνεχώς τα κοινά μηχανολογικά υλικά λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, όπως η υψηλή αναλογία αντοχής / βάρους, υψηλή ειδική ακαμψία, βελτιωμένη αντίσταση στην κόπωση και αντίσταση ερπυσμού. Ένα σύνθετο υλικό είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων χημικά διακριτών και αδιάλυτων φάσεων. Η λέξη σύνθετο στον όρο σύνθετα υλικά σημαίνει ότι δύο ή περισσότερα από δύο υλικά συνδυάζονται σε μακροσκοπική κλίμακα για να σχηματίσουν ένα χρήσιμο τρίτο υλικό του οποίου οι ιδιότητες και η δομική απόδοση είναι ανώτερες από εκείνες των συστατικών που δρουν ανεξάρτητα. Τα σύνθετα υλικά έχουν βρεθεί σε όλο και ευρύτερες εφαρμογές σε αεροσκάφη, διαστημικά οχήματα, υπεράκτιες κατασκευές, σωληνώσεις, ηλεκτρονικά, αυτοκίνητα, σκάφη και αθλητικά είδη. Γενικά, μία φάση των σύνθετων υλικών είναι φάση μήτρας ή συνεχής φάση η οποία μπορεί να είναι πλαστική, μέταλλο ή κεραμική και άλλη φάση είναι διεσπαρμένη φάση ή φάση ενίσχυσης που μπορεί να είναι γυαλί, γραφίτης, βόριο, αραμίδια και διάφορα άλλα οξείδια, καιρίδια και νιτρίδια. Η φάση της μήτρας είναι συνήθως περισσότερο όλκιμη και λιγότερο σκληρή φάση είναι ενώ η διασκορπισμένη φάση είναι συνήθως περισσότερο όλκιμη και λιγότερο

Ωστόσο, η μηχανική κατεργασία των προϊόντων από FRP (Fiber Reinforced Polymers) παρατηρείται ότι είναι δύσκολη λόγω του υψηλού βαθμού ετερογένειας και ορθοτροπίας. Εξαγωγή ινών, καύση μήτρας, διαχωρισμός της μήτρας που οδηγεί σε αποκόλληση και υποεπιφανειακή βλάβη και μετατόπιση των ινών από το επίπεδο σε συνδυασμό με υψηλή φθορά εργαλείου, οι κίνδυνοι για την υγεία κ.λπ. είναι μερικές από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε στη μηχανική κατεργασία των συνθέτων. Αν και πολλές ερευνητικές προσπάθειες καταβάλλονται για την κατανόηση της μηχανουργικής κατεργασίας των σύνθετων υλικών FRP, το επίπεδο σαφήνειας φαίνεται να απέχει πολύ από το συμπέρασμα, καθώς το πρόβλημα είναι πολύ πιο σύνθετο από την κατεργασία μετάλλων λόγω των αποκρίσεων του υλικού υπό τη λειτουργία κατεργασίας. Επιπλέον, η δημοσιευμένη βιβλιογραφία στο αρχείο των σύνθετων υλικών είναι ασήμαντη σε μέγεθος σε σύγκριση με την κατεργασία μετάλλων. [28]

Για να μπορέσει να καλυφθεί αυτό το γνωσιακό κενό, όσον αφορά τα σύνθετα υλικά έχουν γραφεί βιβλία για τις διαθέσιμες επιλογές κατεργασίας των συνθέτων υλικών γενικώς [29], καθώς και για το κατά πόσο είναι εφικτή και βιώσιμη η επιλογή κατεργασίας συνθέτων υλικών, είτε με χρήση τρυπανιών, είτε μέσω λείζερ, είτε με άλλες μεθόδους όπως η υδροκοπή

[30][31]. Στη συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθούμε σε ότι αφορά τις μηχανικές κατεργασίες αποβολής υλικού, ξεκινώντας από τη διάτρηση και το φρεζάρισμα. Όσον αφορά τη διάτρηση, είναι μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες κοπής και είναι ένας οικονομικός τρόπος απομάκρυνσης μεγάλων ποσοτήτων υλικού σε μια κοιλότητα. Από σύνθετα υλικά και τις κύριες εφαρμογές τους σε εξαρτήματα με συναρμογές υψηλής ακρίβειας, υπάρχει ανάγκη να διανοιχθούν οπές στα σύνθετα υλικά για την μετέπειτα ήλωση στα σημεία αυτά.

Η διάτρηση των σύνθετων υλικών επηρεάζεται κυρίως από την τάση των υλικών να κινηθούν έξω λόγω της πίεσης των δυνάμεων μηχανουργικής κατεργασίας. Για να παραχθεί καλή επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων οπών πρέπει να περιγράφονται από λίγες ζημιές όπως το σχίσιμο των άκρων, η απομάκρυνση της ίνας / της μήτρας, αποκόλληση κλπ. Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες μέθοδοι για τη διάνοιξη οπών στα σύνθετα υλικά, αλλά η συμβατική διάτρηση είναι η πιο καλά αναπτυγμένη μέθοδος και που χρησιμοποιείται συχνά για την παραγωγή οπών. [32]

Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες, κρίθηκε απαραίτητο να αναπτυχθούν διαδικασίες για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων κοπής σε σύνθετα υλικά, λόγω του γεγονότος ότι μια ακατάλληλη επιλογή θα μπορούσε να οδηγήσει σε απαράδεκτη υποβάθμιση του υλικού εργασίας. Παράγοντες όπως παράμετροι κοπής, γεωμετρία εργαλείου και το υλικό πρέπει να είναι προσεκτικά επιλεγμένο με στόχο την καλύτερη απόκτηση απόδοσης επί της λειτουργίας διάτρησης, δηλ. καλύτερη ποιότητα οπών, που αντιπροσωπεύει ελάχιστη ζημιά στο μηχανουργικό εξάρτημα και ικανοποιητική κατεργασμένη επιφάνεια. Η προσοχή επικεντρώνεται στο υλικό,τις συνθήκες διάτρησης και τη γεωμετρία του εργαλείου, καθώς και την επίδρασή τους στη ζημιά που προκαλείται στην οπή που παράγεται, στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και ροπές κατεργασίας, στις σχετικές παραμέτρους (ισχύς και ειδική πίεση κοπής) μαζί με την ποιότητα οπών, με έμφαση στην αποκόλληση.

[33][34][35][36][37][38][39][40][41][42][43][44][45]

Για την επιλογή του κατάλληλου διατρητικού εργαλείου έχουν γίνει διάφορες μελέτες σχετικά. Μια από αυτές αναφέρει πως για τη μείωση των κρίσιμων φορτίων, δείχθηκε ότι η γεωμετρία του τρυπανιού (ειδικά της γωνίας ελευθερίας της ακμής του κονδυλιού) και η πρόωση είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι. Μείωση του μεγέθους της άκρης του σμίλου ή η εκτέλεση μίας πρόσθετης λείανσης κάνει πιο αποτελεσματική την κοπή κοντά στον άξονα περιστροφής του εργαλείου και συνεπώς μειώνουν τις πιθανότητες αποκόλλησης των στρώσεων. [46]

Επίσης, σε έρευνα που σύγκρινε αποτελέσματα μεταξύ ενός κανονικού τρυπανιού, ενός web-thinned και ενος tripod, αναφέρεται ότι το τρυπάνι tripod λειτουργεί καλύτερα σε σχέση με άλλα τρυπάνια και αυτή η γεωμετρία έχει βρεθεί ότι παράγει ελεγχόμενες δυνάμεις κατεργασίας και ροπή.

Παρατηρήσεις σχετικά με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται υποδηλώνουν κρίσιμο ρυθμό τροφοδοσίας 0,01 mm / Rev, και πάνω από το οποίο υπάρχει μια ταχεία αύξηση των δυνάμεων κατεργασίας. Από τη μελέτη αποκόλλησης μέσω σάρωσης υπερήχων, μπορεί να φανεί ότι τα τρυπάνια tripod παράγουν τρύπες ανώτερης ποιότητας. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί μια κρίσιμη ώθηση των 100N και πάνω από όπου παρατηρείται αύξηση της διαστρωματικής αποκόλλησης. Μία γεωμετρία τρυπανιού που μειώνει την επίδραση εσοχής της άκρης του σμίλου είναι προτιμότερη. Ιδιαίτερα η χρήση μιας πιλοτικής οπής που σχετίζεται με το εργαλείο

διάτρησης έχει παρουσιάσει καλά αποτελέσματα. Η πιλοτική οπή ακυρώνει τα αρχικά φορτία που θα εμφανίζονταν τοπικά, μειώνοντας τον κίνδυνο αποκόλλησης.[48]

Μια άλλη έρευνα σχετικά με τη διάτρηση σε CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) αναφέρει πως και οι δυνάμεις που παράγονται κατά την πρόωση του κονδυλιού και η ροπή είναι υπεύθυνες για αποκόλληση κατά τη διάτρηση των σύνθετων υλικών που υπάρχουν και δεν υπάρχει ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο που συμπεριλαμβάνει τις δυνάμεις πρόωσης, της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής. Όλα τα κλασικά διαθέσιμα μοντέλα έχουν διαμορφώσει τη δύναμη πρόωσης ή τη ροπή στρέψης ανεξάρτητα με το ρυθμό τροφοδοσίας. Μέχρι τώρα, κανένα γράφημα μηχανουργικής επεξεργασίας δεν καλύπτει τους διάφορους τύπους πολυμερών σύνθετων υλικών με μεταλλικά υλικά, αλλά κάποιος μπορεί να βρει κάποια ίχνη στη μηχανική κατεργασία ορισμένων τύπων σύνθετων υλικών. Έτσι απαιτούνται πολλά ερευνητικά έργα για την ανάπτυξη διαγραμμάτων κατεργασίας που επιτρέπουν την επιλογή της κατάηλληλης συνθήκης κοπής για μειωμένες ζημιές στη διάτρηση σύνθετων υλικών αλλά και των εργαλείων. Η στρατηγική μεταβλητού ποσοστού πρόωσης στην οποία ο ρυθμός τροφοδοσίας μειώνεται προς την έξοδο της τρύπας απευθύνεται για διάτρηση σύνθετων υλικών με ελεύθερη αποκόλληση. Τέλος, δεν υπάρχει εργασία στη βιβλιογραφία όπου η δύναμη ωθήσεως και ροπή ελέγχεται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια της διάτρησης. [49]

Επιπλέον έρευνες δοκιμής των εμπορικών εργαλείων κοπής για να βρεθεί η καλύτερη γεωμετρία κοπής και υλικό κοπής για μηχανική κατεργασία συνθέτων υλικών δείχνουν ότι η καλύτερη επιλογή είναι τα κονδύλια με μεγάλη γωνία ελικώσεως, μικρή γωνία σφηνός και πολύ σκληρό υλικό κοπής όπως το PCD ή επικάλυψη διαμαντιού σε ένα υπόστρωμα καρβιδίου. Οι δυνάμεις κοπής ήταν πολύ μικρές κατά την κατεργασία των υλικών. Η καλύτερη δυνατή επιφάνεια του σύνθετου υλικού αποκτήθηκε μόνο όταν το εργαλείο είχε μεγάλη γωνία ελικώσεως σε εργαλεία του σύνθετου υλικού αποκτήθηκε μόνο όταν το εργαλείο είχε μεγάλη γωνία ελικώσεως σε εργαλεία καρβιδίου αλλά έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής. Τα εργαλεία PCD έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά υπάρχει ένα πρόβλημα με τη μικρή γωνία ελικώσεως, διότι οι ρωγμές ήταν μεγαλύτερες για εργαλεία PCD. Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή τυποποιημένων εμπορικά διαθέσιμων εργαλείω χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό δύο νέων ειδικών εργαλείων. Τα νέα σχεδιασμένα εργαλεία έχουν σχεδίαση διπλής έλικας για την ελαχιστοποίηση του μεγέθους των αποβλίττων. [50]

Προχωρώντας τώρα στη διαδικασία φρεζαρίσματος σε σύνθετα υλικά, και πιο συγκεκριμένα σε υλικά πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα (CFRP) που είναι και το κύριο θέμα ενασχόλησης της παρούσας εργασίας, μέσω μιας ανασκόπησης στις επιστημονικές βάσεις δεδομένων μπορούμε να εξάγουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Ένα από αυτά αφορά την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας κοπτικού εργαλείου, έτσι ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα στο πέρας της κατεργασίας. Μέχρι στιγμής, οι έρευνες που αναφέρονται σε αυτό τον παράγοντα εξετάζουν εργαλεία γεωμετρίας flute, με επιλογές υλικών όπως HSS (High Speed Steel), Cemented Carbide, επιστρώσεις PCD κ.α. Εκεί υπάρχει η κατάληξη ότι τα εργαλεία με ελικοειδείς σχεδιασμούς, δηλαδή κατά κύριο λόγο με τις περισσότερες επιφάνειες κοπής γενικότερα προσφέρουν καλύτερες επιφάνειες φινιρίσματος, λιγότερες ζημιές στο υλικό και μικρότερες φθορές εξαιτίας μικρότερων δυνάμεων κοπής, με το υλικό κατασκευής του εργαλείου να παίζει πρωταρχικό ρόλο στην τελική του φθορά. [51]. Υπάρχει άμεση εξάρτηση των chips (αποβλήτων κατεργασίας) από τον προσανατολισμό των ινών μέσα στο σύνθετο υλικό. Ειδικότερα, παρατηρείται μείωση του μεγέθους τους σε προσανατολισμό ινωδους ενισχυτικής φάσης υπό γωνίες 0°-45°, το οποίο φαίνεται να διατηρείται σταθερό έως και σε γωνίες της τάξης των 90°.Στις 0°, παρατηρείται ότι η διαδικασία κοπής των ινών από το κονδύλι συντελείται μέσω μηχανισμών κάμψης και θραύσης. Μέχρι το όριο των 75° παρατηρείται συμπίεση κατά κύριο λόγο των ινών και θράυση στην αιχμή του εργαλείου, ενώ από τις 90° και άνω έχουμε παραμορφώσεις μεταξύ των στρώσεων και ανάπτυξη πολύ ισχυρών θλιπτικών δυνάμεων. Η περίοδος που συντελείται η θράυση μειώνεται και περιορίζεται τοπικά στη διεπιφάνεια υλικού/εργαλείου, όσο αυξάνεται η γωνία ελικώσεως του εργαλείου, αυξάνοντας έτσι την ποιότητα τελικής επιφάνειας [52][53][54]

Η ανάπτυξη μεγάλων δυνάμεων στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου και υλικού κοπής προκαλεί μη επιθυμητές επιπλοκές, και γενικότερα αποφεύγεται με οποιοδήποτε δυνατό μέσο κατά τη διάρκεια του φρεζαρίσματος. Στα σύνθετα υλικά τύπου CFRP, για την ανάπτυξη όσο το δυνατόν μικρότερων δυνάμεων κοπής και θερμοκρασιών (που οδηγεί στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων της μήτρας, έως και την ολική καταστροφή της λόγω καύσης) χρησιμοποιούνται με βάση τη βιβλιογραφία μικρά βάθη κοπής, αργές προώσεις εργαλείων και υψηλές ταχύτητες περιστροφής τους. Αναφέρεται συγκεκριμένα, ότι τον σημαντικότερο ρόλο στο να αποφευχθούν οι παραπάνω επιπλοκές τον παίζουν οι αργές ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου κατά την διάρκεια της κατεργασίας, παρόλο ου επηρρεάζουν αρνητικά το συνολικό χρόνο κατεργασίας και ανεβάζοντας το τελικό της κόστος. Ένας ακόμα παράγοντας που φάινεται να επηρρεάζεται είναι και η τραχύτητα επιφανείας. Εάν επιθυμούμε μεγάλη τραχύτητα τότε πρέπει να γίνει χρήση περασμάτων κοπής μεγάλου βάθους (με παραγόμενα απόβλητα/chips μεγάλου μεγέθους, τα οποία απορροφούν και αποβάλλουν ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας λόγω τριβής), ενώ για μικρές τραχύτητες γίνεται χρήση μικρού βάθους κοπής, με υψηλές ταχύτητες περιστροφής εργαλείου. [55][56][57][58]

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι και η φθορά των εργαλείων κοπής, και λαμβάνεται υπόψην για λόγους και μηχανουργικής άποψης και τελικού ποιοτικού αποτελέσματος, αλλά και για οικονομικούς λόγους, μιας και το κόστος αγοράς εργαλείων κοπής συνθέτων υλικών είναι αρκετά υψηλό και ο ωφέλιμος χρόνος ζωής τους περιορισμένος. Για παράδειγμα, στα εργαλεία καρβιδίου ένας παράγοντας που μπορεί να μειώσει το χρόνο ζωής τους είναι οι υψηλές ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής, με τα εργαλεία επίστρωσης Cubic Boron Nitride να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Η φθορά των εργαλείων οδηγεί σε ανάπτυξη μεγάλης τραχύτητας επιφανείας και μεγάλων δυνάμεων κοπής, με διεύθυνση αντίθετη ως προς εκείνη της διεύθυνσης κίνησης του κοπτικού εργαλείου. Για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα με όσο το δυνατόν λιγότερη τραχύτητα επιφανείας, οδηγούμαστε στη χρήση εργαλείων επίστρωσης PCD, τα οποία ενδείκνυνται και για το τελικό φινίρισμα του υλικού. [59][60][61][62][63]

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί και η σημαντικότητα του ψυκτικού μέσου που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ενός συνθέτου υλικού CFRP. Το ψυκτικό μέσο είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχία της κατεργασίας, καθώς είναι υπεύθυνο για την αποβολή των αναπτυσσόμενων θερμικών φορτίων που καταστρέφουν τη μήτρα του συνθέτου που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου/τεμαχίου και αργότερα σε ολόκληρο τον όγκο τους, σε εξάρτηση πάντα με την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού. [64] Επίσης, συμβάλλει στο να μην υπάρξουν ζημιές στο κοπτικό εργαλείο και στο σύνθετο υλικό εξαιτίας προσκόλλησης των αποβλίττων (chips) σε κάποιο από τα δύο, αυξάνοντας τον ωφέιμο χρόνο ζωής του πρώτου και τη ποιότητα της τελικής επιφάνειας και των μηχανικών ιδιοτήτων του δεύτερου. Για τους παραπάνω λόγους, γίνεται μελέτη για την επίπτωση των ψυκτικών υγρών στις κατεργασίες CFRP, αλλά και η αντικατάστασή τους από την ψύξη πεπιεσμένου αέρα για λόγους κόστους υλικών, αλλά και για μικρότερες περιβαλλόντικές επιπτώσεις. [65][66][67][68]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

3.1.1 Σκοπός Πειράματος

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα CFRP βρίσκουν πολλές μηχανολογικές εφαρμογές, λόγω της προσαρμογής τους στις απαιτούμενες συνθήκες, του χαμηλού βάρους τους σε σχέση με τα παραδοσιακά μεταλλικά μηχανολογικά υλικά, της αντοχής σε διάβρωση κ.α. Μεταξύ των μηχανολογικών κατεργασιών που επιλέγονται για την τελική μορφοποίησή τους, στη συγκεκριμένη εργασία μελετάμε τη συμπεριφορά του υλικού αυτού κατά το φρεζάρισμα με τη βοήθεια κοπτικού εργαλείου (κονδύλι), με παράλληλη παροχή πεπιεσμένου αέρα ως ψυκτικό μέσο και αποβολέα υπολλειμάτων.

Επειδή δεν υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία για το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται εδώ, και συνυπολογίζοντας και την παρουσία του πεπιεσμένου αέρα ως βοηθητικό μέσο, θέσαμε ως σκοπό τη μελέτη του τελικού προιόντος κατεργασίας φρεζαρίσματος υπό συνδυασμούς ορισμένων ταχυτήτων πρόωσης (f_r) /περιστροφής κοπτικού (v_c), μελετώντας τελικά τις επιπτώσεις και τα οφέλη του κάθε συνδυασμού στο κατεργαζόμενο υλικό σε συνάρτηση με τις παραπάνω συνθήκες. Για να γίνει πιο εμφανές το αποτέλεσμα της κατεργασίας ανάλογα με τις διευθύνσεις των ινών και εκείνης που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στον όγκο του κατεργαζόμενου υλικού, αποφασίστηκε να γίνει μελέτη σε 2 μονοδιευθυντικά υλικά CFRP (unidirectional), με διεύθυνση ινών παράλληλη ως προς την κίνηση του κοπτικού το ένα, και κάθετη διεύθυνση το άλλο (0° και 90° αντίστοιχα), και σε ένα με πλέξη χιαστί διάταξης (woven) διάταξης ινών 45°/-45°.

3.1.2 Χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων

Τα δοκίμια CFRP που χρησιμοποιήθηκαν για τη διένεξη του πειράματος, ήταν ήδη μορφοποιημένα και παραχωρήθηκαν προς πειραματική χρήση από τον Τομέα Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Ο χώρος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα αποτελεί εργαστηριακό περιβάλλον, με παρουσία κανονικών περιβαλλοντικών συνθηκών (Μέση Θερμοκρασία Περιβάλλοντος: 298,15 K (25 °C, 77 °F), Ατμοσφαιρική Πίεση: 100 kPa (1 bar, 14,504 psi, 0,98692 atm).

Η εργαλειομηχανή που επιλέχθηκε ήταν εργαλειομηχανή υποβοηθούμενη από υπολογιστικό σύστημα αριθμητικού ελέγχου (φρέζα CNC), ενώ η συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων της κατεργασίας πραγματοποιήθηκαν με χρήση ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων. Τα υλικά κατασκευής των συνθέτων που επιλέχθηκαν αποτελούνται από τη ρητίνη (θερμοσκληρυνόμενο μονομερές), τον σκληρυντή ο οποίος χρησιμεύει για τον πολυμερισμό (σκλήρυνση) της ρητίνης και τέλος από τις ίνες άνθρακα. Ο εξοπλισμός ο οποίος έλαβε μέρος καθ' όλη την πειραματική διαδικασία αναφέρεται και περιγράφεται παρακάτω.

3.1.2.1 Πειραματικός εξοπλισμός

CNC $\Phi\rho \acute{\epsilon} \zeta \alpha$ Okuma® MX-45 VAE 3 Axis + Gerardi GSS 10 SK40 Spindle Speeder

Το κέντρο κατεργασίας CNC Okuma® MX-45 VAE της εταιρίας Okuma έχει δυνατότητα μεταφορικής κίνησης της τράπεζας στους δύο άξονες X,Y με μέγιστες αποστάσεις κοπής 560 mm στον άξονα X και 460 mm στο άξονα Y, και μεταφορικής κίνησης της ατράκτου στον άξονα Z με μέγιστο δυνατό ύψος 450 mm. Η άτρακτος έχει 7,5 KW δύναμη, μπορεί να περιστρέφεται έως 7000 rpm και μέγιστη ροπή να είναι 95 N*m στις 770 rpm. Επίσης μπορεί να μεταφέρεται στους άξονες X/Y με μέγιστη ταχύτητα 36 m/min σε γρήγορη μετακίνηση. Οι δύο άξονες περιστροφής του τραπεζιού επιτρέπουν την κατεργασία τεμαχίων πολύπλοκης μορφής και η ψύξη στη περιοχή της κοπής καθώς και η απαραίτητη λίπανση εξασφαλίζεται από σύστημα παροχής και ανακύκλωσης ψυκτικού υγρού, καθώς και από ακροφύσιο παροχής πεπιεσμένου αέρα. Το σύστημα ελέγχου καθώς και το λογισμικό της Okuma καθιστά εφικτό τον προγραμματισμό και την παρακολούθηση των εντολών κώδικα και συντεταγμένων που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο στη διάρκεια των κατεργασιών. [69]



Εικόνα 3.1: Κέντρο κατεργασίας Okuma® MX-45 VAE

Επειδή το μέγιστο όριο περιστροφής της ατράκτου δεν ήταν αρκέτο για την εκτέλεση του πειράματος, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός κιβωτίου πολλαπλασιασμού σχέσης μετάδοσης πλανητικών γραναζιών. Το συγκεκριμένο, γνωστό και ως spindle speeder είναι το μοντέλο GSS 10 SK40 της εταιρίας Gerardi, με σχέση μετάδοσης 1:6 και μέγιστη ταχύτητα περιστροφής τις 22000 RPM. Παρακάτω, στην Εικόνα 3.2 βρίσκεται η σχηματική περιγραφή του και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.



Εικόνα 3.2: Γράφημα χαρακτηριστικών και σχηματικής αναπαράστασης του Gerardi GSS 10 SK40 Spindle Speeder

Κοπτικό Εργαλείο Ταχυχάλυβα YG RTI104080 End Mill Router

Το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο της YG, κατασκευάζεται από ταχυχάλυβα με αδαμάντινη επίστρωση στην επιφάνεια κοπής, για μεγαλύτερη αντοχή στη διατριβή. Η γεωμετρία του είναι ειδικά σχεδιασμένη για κατεργασία συνθέτων υλικών τύπου CFRP, με σχεδιασμό τύπου Plain Shank στο άκρο του διαμετρικής ανοχής h6 και ανοχή κοπής ανάμεσα στα 0.02 με 0.08 mm. Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιήθηκε το κοπτικό τύπου RTI104080 διαμέτρου 8 mm, με δυνατότητα βάθους κοπής L_1 έως και 24 mm και συνολικό μήκος L_2 τα 75 mm. Ως βέλτιστες συνθήκες κοπής, η εταιρία αναφέρει για ταχύτητα περιστροφής τις 7950 RPM, με ταχύτητα πρόωσης τα 2620 mm/min και με ταχύτητα κοπής



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση γεωμετρίας κοπτικού εργαλείου RTI104080



Εικόνα 3.4: Κοπτικό εργαλείο RTI104080, διαμέτρου 8 mm

Πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο, Kistler Type 9257 A

Το πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο Type 9257 A της εταιρίας Kistler κάνει δυναμικές μετρήσεις στα 3 αξονικά διανύσματα μιας δύναμης, Fx, Fy και Fz, με την βοήθεια τριών αισθητήρων στα άκρα του. Μπορεί να μετρήσει δυνάμεις κοπής σε κατεργασίας τόρνευσης, διάτρησης, φρεζαρίσματος κλπ. Το εύρος τιμών που μπορεί να μετρήσει είναι -5KN έως 5KN και το μέγεθος του είναι 170 x 100 x 60 mm.



Εικόνα 3.5:Πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο Kistler, στερεωμένο και ευθυγραμμισμένο επάνω στην τράπεζα κοπής της φρέζας

Για την αποφυγή οποιασδήποτε ζημιάς αλλά και ακρίβειας στη μεταφορά των δυνάμεων κοπής στο δυναμόμετρο, κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επάνω στο δοκίμιο CFRP, κατασκευάστηκε μια πλάκα στερέωσης από συμπαγές ξύλο. Οπές διανοίχτηκαν με τη βοήθεια φρέζας CNC για τη στερέωση της επάνω στο δυναμόμετρο, ικανές να χωρέσουν βίδες τύπου hex διαμέτρου 8 mm, 8.8 grade. Τα δοκίμια προσαρμόζονταν με βίδες επάνω στη βάση, σε συγκεκριμένη θέση ακριβώς στο κέντρο του δυναμομέτρου. Οι τρύπες στερέωσης των δοκιμίων είχαν διάμετρο 6 mm και απόσταση μεταξύ των κέντρων τους L= 50 mm.



Εικόνα 3.6: Η πλάκα στερέωσης δοκιμίων, προσαρμοσμένη στο κέντρο της τράπεζας του δυναμομέτρου

Ενισχυτές σήματος Kistler Type 5011 και Type 5006

Οι ενισχυτές σήματος 5011 (μπλέ χρώματος, αριστερά) και Type 5006 (γκρίζου χρώματος, κέντρο) της εταιρίας Kistler είναι μονοκάναλοι και μετατρέπουν το ηλεκτρικό φορτίο που παράγεται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες σε αναλογικό σήμα τάσης. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του οργάνου είναι η συνεχής ρύθμισης εύρους τιμών από ± 10 έως ± 999 000 pC. Οι τιμές που εισάγονται διατηρούνται σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας. Η καταγραφή έγινε με το λογισμικό LabView σε ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium IV 1,61 GHz, μέσω διασύνδεσής του με τους ενισχυτές από ένα Arduino board.



Εικόνα 3.7: Δύο ψηφιακοί ενισχυτές σήματος Kistler 5011 (μπλέ χρώματος, αριστερά) και ένας αναλογικός Type 5006 (γκρίζου χρώματος, κέντρο)

Στερεοσκόπιο MZ6 Leica, Ψηφιακό Παχύμετρο TesaCal IP6S

Το στερεοσκόπιο MZ6 της εταιρίας Leica παρέχει την δυνατότητα επιθεώρησης ποιότητας και ακρίβεια εργασίας υπό ιδανικές συνθήκες. Το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο Leica MZ6, έχει συντελεστές μεγέθυνσης της τάξης 0,63 έως 4, διαθέτει ζεύξεις με δυνατότητα εμπλοκής σε συγκεκριμένες μεγεθύνσεις, αλλά προσφέρει και δυνατότητα συνεχούς ζουμ σε όλο το εύρος μεγέθυνσης.

Το ψηφιακό παχύμετρο IP6S της εταιρίας TesaCal, παρέχει ακρίβεια μέτρησης έως και δύο δεκαδικά ψηφία (εκατοστά χιλιοστού), με μέγιστη κλίμακα μέτρησης τα 30.5 cm. Διαθέτει ράουλο κύλισης για μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολία κύλισης του βραχίονα μέτρησης, καθώς και βίδα ασφάλισης για τη σταθεροποίηση του.



Εικόνα 3.8: Στερεοσκόπιο Leica MZ6 (αριστερά), ψηφιακό παχύμετρο TesaCal IP6S (κάτω)

Οπτικό Μικροσκόπιο Leica TCS SP2

Το Leica TCS SP2 είναι φασματικό ομοαξονικό μικροσκόπιο με ψηφιακή εκπομπή 405 UV 3CH + DIC 400-800nm που έχει σχεδιαστεί για την παρατήρηση και ανάλυση εικόνων υψηλής ανάλυσης με φθορίζοντα σήματα. Η ομοεστιακή αρχή χρησιμοποιεί μια οπή (confocal aperture) για την εξάλειψη του φωτός εκτός εστίασης επισημασμένων με φθορισμό δειγμάτων (δηλ. να παρέχουν "οπτική τομή"). Τα λέιζερ παρέχουν έντονο φωτισμό σημείων που σαρώνουν το εκάστοτε δοκίμιο και ο φθορισμός σε κάθε σημείο ποσοτικοποιείται και χρησιμοποιείται για την κατασκευή μιας αναπαράστασης της φωτεινότητας του αντικειμένου. Αυτή η μέθοδος παρέχει υψηλή ανάλυση για τα επίπεδα x και y καθώς και κάθετα (z επίπεδο).

Το SP2 είναι ένα εξελιγμένο ομοεστιακό σύστημα με εννέα γραμμές διέγερσης λέιζερ που καλύπτουν το φάσμα από υπεριώδη ακτινοβολία, το ορατό φως και έως σχεδόν IR. Οι ακόλουθες γραμμές λέιζερ είναι διαθέσιμες: 405nm, 458, 476, 488, 496, 514, 543, 594 και 633, όλες οι ίνες συζευγμένες και ελέγχονται από τις AOTF. Διαθέτει σαρωτή λέιζερ με σάρωση γραμμής μέχρι 2000 Hz, ταχύτητα σάρωσης πλαισίου 40 fps σε 512x32 εικονοστοιχεία, ανίχνευση ανάλυσης μέχρι 4096x4096 εικονοστοιχεία και ζουμ σε 32x. Είναι δυνατή η φασματική σάρωση / απεικόνιση και η γραμμική ανάμιξη, δίνοντας την ικανότητα να διαχωρίζονται σε μεγάλο βαθμό αλληλεπικαλύψεις παρόμοιων χρωματισμένων φθοροφόρων δοκιμίων.



Εικόνα 3.9: Οπτικό μικροσκόπιο Leica TCS SP2

Camera HD webcam C270 Logitech

Η κάμερα HD webcam C270 της εταιρίας Logitech δίνει τη δυνατότητα καταγραφής φωτογραφιών και βίντεο με οπτικό πεδίο 60°. Η ανάλυση φωτογραφιών είναι 3 Megapixel και του βίντεο 1280 x 720 pixels ώστε να είναι εφικτή η παρατήρησή τους. Η κάμερα έχει λαμβάνει φωτογραφίες με 360p, 480p και 720p με καταγραφή 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Η camera εφαρμόστηκε στους προσοφθάλμιους φακούς του στερεοσκοπικού μικροσκοπίου Leica MZ6, καθώς και στον προσοφθάλμιο του οπτικού μικροσκοπίου Leica TCS SP2 και με βοήθεια λογισμικού που περιλαμβάνει η camera πραγματοποιήθηκε η καταγραφή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή Intel Core i3 2,92GHz.

Δισκοτόμος Struers Discotom-2 και Λειαντική Συσκευή Struers LaboPol-5

Ο δισκοτόμος Struers Discotom-2 προσφέρει ένα υψηλής απόδοσης λειαντικό κοπτικό μηχάνημα με χρήση λειαντικού υγρού ή χωρίς, για την τομή μεταλλουργικών δειγμάτων. Το μηχάνημα προσφέρει πλήρως κεκλεισμένο θάλαμο κοπής με εξωτερική δεξαμενή ανακύκλωσης λειαντικού υγρού και διπλά καρφιά ασφάλισης δείγματος. Για δείγματα μέχρι 50mm σε μέγεθος προσφέρει υψηλής ποιότητας ψυχρή κοπή.



Εικόνα 3.10: Δισκοτόμος Struers Discotom-2 και τρόπος ασφάλισης δειγμάτων

Για τη λείανση των δειγμάτων ύστερα από την κοπή τους και τη μετέπειτα παρατήρηση τους στο μικροσκόπιο, χρησιμοποιήθηκε η λειαντική συσκευή Struers LaboPol-5. Η αυτοματοποιημένη μηχανή λείανσης Struers Labopol 5 προσφέρει απλή λειτουργία για τη λείανση χαμηλού όγκου μεταλλουργικών δειγμάτων για την επιστήμη των υλικών είτε με χρήση λειαντικού υγρού ή χωρίς.. Ο δίσκος λείανσης του διαθέτει υποδέχεται γυαλόχαρτα διαμέτρου 200 mm και η ταχύτητα περιστροφής του είναι ρυθμιζόμενη, με έυρος 50-500 RPM.



Εικόνα 3.11: Η λειαντική συσκευή Struers LaboPol-5

Συσκευή Καταγραφής και Μέτρησης Τραχύτητας Επιφανειών (Τραχύμετρο) Taylor-Hobson Surtonic 3+

Ο μετρητής τραχύτητας Taylor-Hobson Surtonic 3+ παρέχει μια αριθμητική εκτίμηση της τραχύτητας (αλλά όχι της κυματοειδούς ή καμπυλότητας) με τη μέθοδο Ra (μέσος όρος τραχύτητας). Μετράει τις επιφανειακές ανωμαλίες που οφείλονται στην τραχύτητα και δεν ανταποκρίνεται στις ευρύτερες παρατυπίες που προκαλούνται από κυματισμό ή καμπυλότητα.

Είναι ένα φορήτό μετρητικό όργανο, τροφοδοτούμενο από ηλεκτρική πηγή τάσης 9V, διαθέτει ένα μοχλό κίνησης που διασχίζει την ανύψωση σε όλη την επιφάνεια που πρόκειται να μετρηθεί, καθώς και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα για τον υπολογισμό και την εμφάνιση της τιμής Ra. Η ανύψωση είναι ένας μορφοτροπέας τύπου μεταβλητής αντίστασης, διαθέσιμος σε πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις.



Εικόνα 3.12: Φορητό τραχύμετρο Taylor-Hobson Surtonic 3+ μέσα στη βαλίτσα μεταφοράς του

3.1.2.2 Δοκίμια CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, παραχωρήθηκαν πολύστρωτα δοκίμια CFRP τύπου prepreg (προ εμποτισμένα με ρητίνη), τριών διαφορετικών διαστρωματώσεων, κατασκευασμένα με τη μέθοδο αυτόκλειστου φούρνου υπό πίεση (autoclave). Ο σκοπός ήταν ότι κάθε είδος πολύστρωτου έπρεπε να διαφέρει ως προς τη διεύθυνση των ινών, αλλά και την πλέξη τους. Οι ενισχυτικές ίνες στα πολύστρωτα δοκίμια με ίνες άνθρακα είναι σε μορφή υφάσματος πυκνής πλέξης και ισοσταθμισμένης διαμόρφωσης, οι οποίες στερεοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας εποξική ρητίνη σε 6 διαφορετικές συμμετρικές διαστρωματικές ακολουθίες.

Το ύφασμα είναι το Hexcel HexForce® carbon fabric G0939 (ίνες άνθρακα HexTow AS4C GP HTA-3K σε πλέξη τύπου 4H satin) με πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας ίση με 220 gr/m². Η εποξική ρητίνη είναι η Rutapox L 20 ρητίνη με σκληρυντή Rutadur SL. [71][72]

Η περιεκτικότητα ινών κατ' όγκο, V_f, όλων των CFRP δοκιμίων είναι 58.2%. Οι διαστρωματικές ακολουθίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι: $[0^{\circ}]_{18}$, $[90^{\circ}]_{18}$, $[+45^{\circ}_{5}/-45^{\circ}_{5}]_{S}$. Στον Πίνακα 3.1 αναγράφονται οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά αυτών των δοκιμίων.

Αύξων Αριθμός Δοκιμίου	Διαστρωματική Ακολουθία	Αριθμός Στρώσεων Ινών	Πλάτος w (mm)	Πάχος t (mm)
CT-C7-X	[0°] ₁₈	18	35	3,8
CT-C7-Y	[90°] ₁₈	18	35	3,8
CT-C8-W	$[+45^{\circ}_{5}/-45^{\circ}_{5}]_{s}$	20	35	4,2

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις και κατασκευαστικά χαρακτηριστικα των δοκιμίων CFRP

Ρητίνη Rutapox L 20 + Σκληρυντής Rutadur SL

Η εποξειδική ρητίνη Rutapox®L 20 με σκληρυντή από την οικογένεια SL 25, SL 50, SL 75, SL παράγει μίγμα στρωματοποίησης χαμηλού ιξώδους με εξαιρετική διαβροχή και πρόσφυση, χαρακτηριστικά στις ίνες γυαλιού, άνθρακα και αραμιδίου. Η διάρκεια ζωής (pot life) αυτών των συστημάτων αυξάνεται με τη σειρά που δίνεται: δηλαδή το SL 25 είναι το γρηγορότερο, ενώ το SL το πιο αργό.

Αυτά τα συστήματα βρίσκουν ιδιαίτερες εφαρμογές στην κατασκευή ανεμοπλάνων και σκαφών. Αφότου προηγηθεί η διαδικασία σκλήρυνσης (procuring) σε θερμοκρασία δωματίου, είναι απαραίτητη η αύξηση της θερμοκρασίας στους 50-60 ° C για τη διαδικασία της μετασκλήρυνσης (postcuring) για να προκύψουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Η διάρκεια ζωής ρητίνης και σκληρυντή στους 20 - 25 ° C σε σφραγισμένους περιέκτες σε θερμοκρασία δωματίου ανέρχεται στο 1 έτος. Στον Πίνακα 3.2 αναφέρονται οι ιδιότητες του συγκεκριμένου συστήματος ρητίνης, στον Πίνακα 3.3 οι ιδιότητες του σκληρυντή και στον Πίνακα 3.4 οι μηχανικές ιδιότητες της σκληρυμένης ρητίνης.

			Ιδιότητες	Μονάδες	Rutadur
Ιδιότητες	Μονάδες	L 20		Μέτρησης	SL
	Μέτρησης		Πυκνότητα	g/cm3	0,95 ±
Πυκνότητα στους 20 °C	g/cm3	1,15 ± 0,01	στους 20 °C		0,02
Ιξώδες στους 20 ℃	mPa*s	900 ± 150	Ιξώδες στους 20 °C	mPa*s	85 ± 10
Ισοδύναμο εποξειδίου	g/equiv.	179 ± 4	Αμινικό ισοδύναμο	g/equiv.	60
Πίνακας 3.2, 3.3: Τεχνικές προδιαγραφές ρητίνης			ς , , , ,		
			Αναλογία	100 pbw	34
Rutapox®L 20 και σκληρυντή Rutadur SL			ανάμιξης	L-20	

Ιδιότητες	Μονάδες Μέτρησης	L20+Rutadur SL
Αντοχή σε κάμψη	MPa	125
Αντοχή εφελκυσμού	MPa	55
Αντοχή σε συμπίεση	MPa	130
Δοκιμή σκληρότητας Rockwell H10	MPa	152
Δοκιμή σκληρότητας Rockwell H60	MPa	144
Αντοχή σε κρούση	MPa	35 - 40

Πίνακας 3.4: Μηχανικές ιδιότητες συστήματος ρητίνης Rutapox L 20 με σκληρυντή Rutadur SL, με διαδικασία σκλήρυνσης: 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου και 15 ώρες μετασκλήρυνσης @ 60 ° C

Ύφασμα ινών άνθρακα Hexcel HexForce® G0939

Οι ενισχύσεις HexForce® διατίθενται σε μια σειρά από ύφανση υφάσματος - από υφάσματα πολυαξονικά μέχρι και πλέξεις κατά παραγγελία- που προσφέρει μια σειρά παγκοσμίως πιστοποιημένων αεροδιαστημικών / βιομηχανικών προϊόντων σε άνθρακα, γυαλί και αραμίδια και ειδικές ίνες. Τα χαρακτηριστικά του υφάσματος αυτού περιγράφονται στον Πίνακα 3.5.

Περιγραφή	Μονάδες Μέτρησης ςι	Μονάδες Μέτρησης
Τύπος νημάτων (50 % στημόνι/ 50% υφάδι)	HexTow AS4C GP 3K (5.4 yarn/cm 5.4 picks/cm)	
Ονομαστικό βάρος	220 g/m²	6.49 oz/sqi²

	Πλάτος	1260 mm	49.6 in	
	Πάχος	0.22 mm	0.009 in	
Πίνακας 3.5: Τε	χνικά χαρακτ	τηριστικά για το ύφ	οασμα Hexcel	HexForce® G0939

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.2.1 Πειραματικός Σχεδιασμός (D.O.E.)

Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όσον αφορά τις μηχανουργικές κατεργασίες για την κατασκευή εαξρτημάτων από CFRP υλικά, επιλέχθηκε η κατεργασία του φρεζαρίσματος. Για τη διαδικασία αυτή προτείνεται η χρήση εργαλειομηχανής ψηφιακού αριθμητικού ελεγχου CNC, όπως και έγινε στην παρούσα εργασία, με τη χρήση όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση κοπτικού εργαλείου ειδικά σχεδιασμένου για χρήση σε CFRP.

Η κατασκευάστρια εταιρία του κοπτικού αυτού, έδινε ως προτεινόμενες συνθήκες (Normal) για τη λειτουργία του εργαλείου της την ταχύτητα περιστροφής των 7958 RPM, την ταχύτητα πρόωσης των 2620 mm/min και εντέλει την ταχύτητα κοπής των 200 m/min. Με βάση τη βιβλιογραφία και τα χαρακτηριστικά του εργαλείου, για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα σε θέμα τελικού φινιρίσματος και προκύπτουσων δυνάμεων κοπής, επιλέχθηκε το βάθος κοπής των 1,5 mm.

Για να υπάρξει μια πιο εμφανής διαφοροποίηση ανάμεσα στις διάφορες στρατηγικές κοπής, ως προς τα αποτελέσματα που παράγουν και το χρόνο εκτέλεσης της κατεργασίας (ο οποίος παίζει μεγάλο ρόλο στο τελικό κόστος ευρείας παραγωγής), επιλέχθηκε μια διαφοροποίηση της τάξης του ±25% στις ταχύτητες κοπής (άρα και ταχύτητας περιστροφής) και πρόωσης, δημιουργώντας έναν πίνακα στρατηγικής κοπής 2x5 στοιχείων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6. Για τον υπολογισμό της εκάστοτε ταχύτητας περιστροφής (spindle speed) μέσω της ταχύτητας κοπής (cutting speed), χρησιμοποιήθηκε ο μαθηματικός τύπος:

$$n = Vc \div \pi \div D \times 1000$$

όπου n: ταχύτητα περιστροφής εργαλείου, Vc: ταχύτητα κοπής, D: διάμετρος εργαλείου.

Ισχύουν για τις διευθύνσεις ινών 0, ±45,90				
		Cutting Speed (m/min)	Spindle Speed (RPM)	Feed (mm/min)
*Με Italic οι δοκιμαζόμενες		± 25% Variation from Normal Cutting Speed/Feed Speed		
		300	11937	3930
		250	9947	3275
	Normal>	200	7958	2620
		150	5968	1965
		100	3979	1310

Πίνακας 3.6: Στρατηγική κοπής πειράματος

Ο πειραματικός σχεδιασμός (Design Of Experiment- DOE) πραγματοποιήθηκε με την χρήση της μεθόδου Taguchi μέσω του λογισμικού Minitab 17. Προκειμένου να μελετηθεί ολόκληρο το φάσμα των παραμέτρων διεργασίας με ένα μικρό αριθμό πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Taguchi, η οποία χρησιμοποιεί ένα ειδικό σχέδιο ορθογώνιων συστοιχιών. Η προσέγγιση Taguchi είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος από τον παραδοσιακό σχεδιασμό μεθόδων πειραματισμού, όπως η παραγοντική ανάλυση, ο οποίος καταναλώνει πόρους και χρόνο. Με αυτή τη μέθοδο ο αριθμός των πειραμάτων, για την αξιολόγηση της επιρροής των ανεξαρτήτων μεταβλητών σε ορισμένες ιδιότητες ή χαρακτηριστικά ποιότητας, είναι αισθητά μειωμένος σε σύγκριση με την προσέγγιση πλήρους παραγοντικών πειραμάτων. Για παράδειγμα, μια διαδικασία με 3 μεταβλητές, κάθε μία με 3 καταστάσεις, θα απαιτούσε 33 = 27 πειράματα για τον έλεγχο όλων των μεταβλητών (πλήρης παραγοντική ανάλυση).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή διαθέσαμε στο Minitab 17 για τον πίνακα τιμών 2 στήλες των 5 σειρών η καθεμία, ο αριθμός των συνολικών πειραμάτων ανήλθε στα 16, για καθεμία από τις δοκιμαζόμενες διαστρωματώσεις δοκιμίων. Στον Πίνακα 3.7 αναγράφονται οι κωδικοί του κάθε πειράματος ξεχωριστά, με τις ανάλογες τιμές ταχύτητας πρόωσης/περιστροφής, αλλά και την αναγωγή της ταχύτητας που έπρεπε να περιστρέφεται η άτρακτος (Eq. to Spindle Speeder), έτσι ώστε να προκύπτει στο κοπτικό εργαλείο η σωστή ταχύτητα μέσω του πολλαπλασιασμού στροφών που παρείχε το spindle speeder της Gerardi, με σχέση μετάδοσης εισαγωγής-εξαγωγής 1:6.

Κ <u>ωδικός</u>	Cutting Tool Speed (RPM)	Feed Speed (mm/min)	Spindle Speed Eq. to Spindle Speeder (RPM/6)
A1	6000	1965	1000
A2	7958	1965	1326
A3	9947	1965	1658
A4	11937	1965	1989
B1	6000	2620	1000
B2	7968	2620	1326
B3	9947	2620	1658
B4	11937	2620	1989
Г1	6000	3275	1000
Г2	7968	3275	1326
Г3	9947	3275	1658
Г4	11937	3275	1989
Δ1	6000	3930	1000
Δ2	7968	3930	1326
Δ3	9947	3930	1658
Δ4	11937	3930	1989

Πίνακας 3.7: Κωδικοί και χαρακτηριστικά των 16 πειραμάτων που εκτελέστηκαν για κάθε δοκίμιο
Για την εισαγωγή αυτών των δεδομένων στα υπολογιστικά συστήματα της εργαλειομηχανής, έπρεπε πρώτα να σχεδιαστεί η γεωμετρία των δοκιμίων και στη συνέχεια η πορεία που θα ακολουθούσε το κοπτικό εργαλείο μέσα σε αυτά. Γι' αυτό το λόγο, σχεδιάστηκε σε πρόγραμμα CAD (SolidWorks 2016 x64) η γεωμετρία των δοκιμίων που θα προκύπταν μετά την κατεργασία και στη συνέχεια σε πρόγραμμα CAM (SolidCAM 2017) σχεδιάστηκε η πορεία του κοπτικού εργαλείου με τις αντίστοιχες ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής που θα ακολουθούσε. Αφότου ολοκληρώθηκε η παραπάνω διαδικασία, προέκυψε σε μορφή .txt ο κώδικας G&M που θα εισαγόταν στην εργαλειομηχανή.

Για την κατεργασία που ακολούθησε, χρησιμοποιήθηκαν 2 κώδικες όπου ο πρώτος εμπεριείχε τις τρεις πρώτες ταχύτητες περιστροφής ατράκτου, ενώ ο δεύτερος εμπεριέιχε μόνο την τελευταία. Αυτό έγινε για λόγους ευκολίας, επειδή το μήκος των δοκιμίων επέτρεπε την εγχάραξη μόνο τριών αυλακώσεων κοπής, οπότε για να προκύψουν τα τέσσερα διαφορετικά πειράματα έπρεπε να ακολουθηθεί η παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 3.13: Σχέδιο γεωμετρίας των δοκιμίων σε αρχείο CAD σε σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks και ο τελικός κώδικας G&M που προέκυψε από το λογισμικό κατεργασιών SolidCAM

3.2.2 Κατεργασία των Δοκιμίων και Καταγραφή των Δυνάμεων Κατεργασίας

Σε όλα τα στάδια των πειραμάτων, έγινε εγκατάσταση πιεζοηλεκτρικού δυναμόμετρου Kistler Type 9257 A. Το δυναμόμετρο τοποθετήθηκε στο τραπέζι της φρέζας και πάνω του δέθηκε η ξύλινη βάση, η οποία έχει σκοπό την σταθερή συγκράτηση των πολυστρωματικών πλακών. Το δυναμόμετρο συνδέθηκε με τρείς ενισχυτές οι οποίοι μετατρέπουν το ηλεκτρικό φορτίο που παράγεται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες σε αναλογικό σήμα τάσης. Στη συνέχεια οι ενισχυτές ήταν συνδεδεμένοι με ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium IV 1,61 GHz και η καταγραφή έγινε με το λογισμικό LabView. Για κάθε πείραμα που αφορούσε μια συγκεκριμένη διαστρωμάτωση δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκίμια συνολικά στα οποία η κατεργασία έγινε με βάση τα δεδομένα που παρείγε ο κώδικας G&M, αφότου έγινε η εισαγωγή του στην εργαλειομηγανή. Κατά την κατεργασία υπήρχε ταυτόχρονη παροχή πεπιεσμένου αέρα μέσω ειδικού ακροφυσίου στην άτρακτο της εργαλειομηχανής, με συνθήκες κοπής σύμφωνα με τους ανάλογους συνδυασμούς που έδωσε η μέθοδος Taguchi, και με βηματοδότηση των 50 mm μεταξύ των αυλακώσεων που εξασφάλισε ότι δεν συνέβη καμία παρεμβολή μεταξύ διαδοχικών κατεργασιών. Κάνοντας τις πρώτες δοκιμές κατεργασίες έγινε εφικτή η μείωση των νεκρών γρόνων. Το πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο έκανε καταγραφή των δυνάμεων κοπής σε τρεις διευθύνσεις (Fx, Fy, Fz). Οι δυνάμεις αποθηκεύτηκαν και επεξεργάστηκαν στο Excel, εκεί δημιουργήθηκαν διαγράμματα χρόνου (Sec)- δύναμης (N) και βρέθηκαν- καταγράφηκαν οι μέγιστες τιμές.



Εικόνα 3.14: Υπολογισμός ακριβούς απόστασης επιφάνειας δοκιμίου/αιχμής κοπτικού με ρολόιμηδενιστή (αριστερά) και εκκίνηση-εκτέλεση του πειράματος (δεξιά)

3.2.3 Καταγραφή Αποτελεσμάτων Κατεργασίας

Μετά το πέρας της κατεργασίας, τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογραφίας, όπου και ακολούθησαν οι πρώτες μετρήσεις και κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τη διαστρωμάτωση του υλικού. Αρχικά μετρήθηκαν με το ψηφιακό παχύμετρο τα πλάτη των αυλακώσεων που δημιούργησε το κοπτικό εργαλείο, για να μπορέσουμε αργότερα να κρίνουμε κατά πόσο είναι ακριβής όσον αφορά τις προκύπτουσες ανοχές διαστασιολογικά, η εκάστοτε συνθήκη κοπής. Οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις περιοχές για να υπάρχει μια ακριβέστερη απεικόνιση: στην περιοχή εισαγωγής του κοπτικού, τη μέση και την περιοχή εξαγωγής του από τον όγκο του δοκιμίου.

Στη συνέχεια, έγινε μεγέθυνση και καταγραφή των αυλακώσεων έτσι ώστε να είναι εμφανείς οι φθορές και οι άκοπες ίνες που δημιουργήθηκαν ανάλογα με τη διαστρωμάτωση των δοκιμίων. Η μεγέθυνση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια στερεοσκόπιου MZ6 Leica και η καταγραφή έγινε με την κάμερα HD webcam C270 Logitech, η οποία είναι συνδεδεμένη με το στερεοσκόπιο. Κατά την μεγέθυνση των οπών, το στερεοσκόπιο ρυθμιζόταν στη κλίμακα μεγέθυνσης 2.5. Αναλυτικότερα ως προς την καταγραφή η κάμερα ήταν σταθερά ρυθμισμένη στην ανάλοση εικόνας 480p, και οι εικόνες αποθηκευτήκαν με τη μορφή jpg. Για να καλυφθεί ολόκληρο το μήκος των αυλακώσεων, έγινε εστίαση σε 3 περιοχές: την περιοχή εισαγωγής του κοπτικού (πράσινα όρια εκατέρωθεν), τη μέση (πορτοκαλί όρια εκατέρωθεν της αυλάκωσης) και την περιοχή εξαγωγής του από τον όγκο του δοκιμίου (κόκκινα όρια εκατέρωθεν της αυλάκωσης). Αυτές οι περιοχές απεικονίστηκαν σε 3 διαφορετικές φωτογραφίες, οι οποίες στη συνέχεια ενώθηκαν μέσω προγράμματος επεξεργασίας εικόνων Paint 3D έτσι ώστε να απεικονιστεί ολόκληρη η περιοχή.

Η επόμενη μέτρηση αφορούσε την τραχύτητα επιφανείας των αυλακώσεων, με την κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων να γίνεται βάσει τη διαστρωμάτωση της ενισχυτικής φάσης των υπό κατεργασία δοκιμίων, όπου και μετρήθηκε με τη βοήθεια του τραχύμετρου. Προτού γίνει η οποιαδήποτε μέτρηση, εκτελέστηκε η διαδικασία calibration του οργάνου με ένα πρότυπο δοκίμιο που περιείχε η συσκευασία του τραχυμέτρου. Από αυτήν προέκυψε ότι το όργανο είχε μια απόκλιση της τάξης των 0,36 Ra (μm), εφόσον η ένδειξη που παρουσίασε ήταν τα 5,64, ενώ το πρότυπο δοκίμιο είχε αναγραφόμενη τραχύτητα τα 6,00 mm. Ως μήκος αποβολής Lc (μήκος παλινδρομικής κίνησης άξονα μέτρησης), το όργανο είχε ρυθμιστεί στα 0,25 mm. Για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια της μέτρησης, πάρθηκαν 5 διαδοχικές μετρήσεις συνολικά από όλο το μήκος της αυλάκωσης (35 mm), σε τυχαία σημεία.

3.2.4 Μελέτη Αστοχίας Διαστρωματικής Αποκόλλησης (Delamination) και Fiber Pull Out Ενδιάμεσων Στρώσεων

Από τη βιβλιογραφία, υπάρχουν ενδείξεις πως σε κατεργασίες φρεζαρίσματος υπάρχουν περιπτώσεις αστοχίας που περιλαμβάνουν την αποκόλληση των στρώσεων ινώδους ενισχυτικής φάσης, με κύρια αίτια την αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά και την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το «τράβηγμα» των ινών ή αλλιώς fiber pull out και την διαστρωματική αποκόλληση ή αλλιώς delamination, που προκύπτει από τις προκύπτουσες δυνάμεις κοπής, είτε στο επίπεδο των Χ,Υ αξόνων.

Για να μελετηθεί αυτό το φαινόμενο, έπρεπε τα δοκίμια να τεμαχιστούν στη μέση, κάθετα στον άξονα των αυλακώσεων (Εικόνα 3.15), με τη βοήθεια του δισκοτόμου. Η κοπή τους έγινε χωρίς λιπαντικό μέσο, με τη βοήθεια κεραμικού δίσκου.



Εικόνα 3.15: Κατεργασμένο δοκίμιο CFRP με αυλακώσεις, ύστερα από εγκάρσια κοπή στο δισκοτόμο

Για να μελετηθούν οι παραπάνω αναφερόμενες αστοχίες, ήταν αναγκαίο να λειανθούν οι επιφάνειες που προηγήθηκε η κοπή με τον δισκοτόμο έτσι ώστε να γίνουν πιο ευδιάκριτες αργότερα στο μικροσκόπιο. Για αυτό το λόγο ακολούθησε λείανση σε περιστροφικό λειαντικό μηχάνημα, χωρίς λιπαντικό μέσο, και με ταχύτητα λείανσης τις 300 RPM με διαδοχικά γυαλόχαρτα (800 grit, 1000, και 2000 για τελικό φινίρισμα).

Τέλος, όλα τα δοκίμια μελετήθηκαν στο μικροσκόπιο σε 4 περιοχές το κάθε ένα: την επιφάνεια της περιοχής εισαγωγής του κοπτικού, τις επιφάνειες στα μέσα του δοκιμίου που έγινε η κοπή με το δισκοτόμο και την επιφάνεια της περιοχής εξαγωγής του κοπτικού. Η διαδικασία της μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή φωτός στο εξεταζόμενο δοκίμιο, στο

φάσμα του ορατού φωτός από λάμπα βολφραμίου. Ο αντικειμενικός φακός που χρησιμοποιήθηκε ήταν μεγέθυνσης 10x και με χαρακτηριστικά 0,25 BD N Plan ∞/-/A. Η ανάλυση των εικόνων που πάρθηκαν από την ψηφιακή κάμερα που προσαρμόστηκε στον προσοφθάλμιο ήταν 4128x3096. Στις φωτογραφίες αυτές, των οποίων η ανάλυση έγινε μέσω του προγράμματος ανοιχτού κώδικα ImageJ, ορίστηκαν ως κλίμακα σύγκρισης ευθύγραμμες ενδείξεις κίτρινου χρώματος των 0,5 mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΉΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

4.1 Ακρίβεια Διαστάσεων Κοπής

4.1.1 Δοκίμια CT-C7-X

Στον παρακάτω Πίνακα 4.1 παρατίθενται οι τιμές πλάτους κοπής, συγκριτικά πάντα με τη διάσταση διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου (8 mm), που λήφθηκαν από τις διαστάσεις των αυλακώσεων που έγιναν επάνω στα δοκίμια τύπου CT-C7-X. Οι μετρήσεις έγιναν στην περιοχή εισαγωγής του κοπτικού (αριστερή τιμή), στο κέντρο της αυλακώσεως (μέση τιμή) και στην περιοχή εξαγωγής του κοπτικού (δεξιά τιμή). Η σήμανση Factory Spec υποδεικνύει τη συνθήκη κοπής B2, με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού συνθήκες κοπής.

Δοκίμιο	Εισαγωγή Κοπτικού	Κέντρο	Εξαγωγή	
C7X	Διαστάσ	εις (mm)		
A1	7,96	7,97	7,95	
A2	7,95	7,95	7,95	
A3	7,96	7,95	7,95	
A4	7,96	7,94	7,93	
B1	7,95	7,95	7,95	
B2	7,96	7,96	7,94	(Factory Spec)
B3	7,95	7,94	7,94	
B4	7,94	7,95	7,95	
Г1	7,95	7,95	7,95	
Г2	7,95	7,95	7,95	
ГЗ	7,93	7,96	7,94	
Г4	7,94	7,94	7,94	
Δ1	7,95	7,95	7,95	
Δ2	7,95	7,95	7,95	
Δ3	7,95	7,95	7,95	
Δ4	7,95	7,95	7,95	

Πίνακας 4.1

Από τον Πίνακα, μπορούμε να εξάγουμε το αποτέλεσμα πως οι συνθήκες κοπής με τα πιο σταθερά παραγόμενα αποτελέσματα σε όλο το μήκος της αυλακώσεως, είναι οι A2, B1, Γ1, Γ2, Γ4, Δ1, Δ2, Δ3 και Δ4. Όσον αφορά όμως την ακρίβεια των διαστάσεων κοπής, δηλαδή το πόσο κοντά διαστασιολογικά με τη διάμετρο των 8 mm του κοπτικού βρίσκονται οι τρεις παραγόμενες τιμές πλάτους κοπής, έχουμε τις συνθήκες κοπής A1, Γ1, Γ2, Δ1, Δ2. Δ3 και Δ4. Παρόλα αυτά, δε παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ του συνόλου των τιμών του Πίνακα 4.1, και θα μπορούσαν να κριθούν ως σημαντικές υπό περιπτώσεις όπου η ακρίβεια συναρμογής είναι αναγκαίο να βρίσκεται ανάμεσα στα ±0,05 mm.

4.1.2 Δοκίμια CT-C7-Y

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2 παρατίθενται οι τιμές πλάτους κοπής, συγκριτικά πάντα με τη διάσταση διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου (8 mm), που λήφθηκαν από τις διαστάσεις των αυλακώσεων που έγιναν επάνω στα δοκίμια τύπου CT-C7-Y. Οι μετρήσεις έγιναν στην περιοχή εισαγωγής του κοπτικού (αριστερή τιμή), στο κέντρο της αυλακώσεως (μέση τιμή) και στην περιοχή εξαγωγής του κοπτικού (δεξιά τιμή). Η σήμανση Factory Spec υποδεικνύει τη συνθήκη κοπής B2, με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού συνθήκες κοπής.

	Δοκίμιο	Εισαγωγή Κοπτικού	Κέντρο	Εξαγωγή
	C7Y	Διαστάσ	Διαστάσεις (mm)	
	A1	7,95	7,94	7,95
	A2	7,95	7,94	7,96
	A3	7,94	7,94	7,95
	A4	7,93	7,93	7,93
	B1	7,93	7 <i>,</i> 95	7,95
(Factory Spec)	B2	7,95	7,95	7,95
	B3	7,92	7,94	7,94
	B4	7,94	7,94	7,94
	Г1	7,95	7 <i>,</i> 93	7 <i>,</i> 94
	Г2	7,92	7,92	7,92
	ГЗ	7,92	7,94	7,94
	Г4	7,94	7,96	7,95
	Δ1	7,95	7 <i>,</i> 95	7 <i>,</i> 95
	Δ2	7,95	7,95	7,95
	Δ3	7,95	7,96	7,96
	Δ4	7,93	7,96	7,96

Πίνακας 4.2

Από τον Πίνακα, μπορούμε να εξάγουμε το αποτέλεσμα πως οι συνθήκες κοπής με τα πιο σταθερά παραγόμενα αποτελέσματα σε όλο το μήκος της αυλακώσεως, είναι οι A4, B2, B4, Γ2, Δ1 και Δ2. Όσον αφορά όμως την ακρίβεια των διαστάσεων κοπής, δηλαδή το πόσο κοντά διαστασιολογικά με τη διάμετρο των 8 mm του κοπτικού βρίσκονται οι τρεις παραγόμενες τιμές πλάτους κοπής, έχουμε τις συνθήκες κοπής B2 (δηλαδή οι βέλτιστες κατά τον κατασκευαστή), Δ1, Δ2 και Δ3. Παρόλα αυτά, δε παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ του συνόλου των τιμών του Πίνακα 4.1, και θα μπορούσαν να κριθούν ως σημαντικές υπό περιπτώσεις όπου η ακρίβεια συναρμογής είναι αναγκαίο να βρίσκεται ανάμεσα στα ±0,05 mm.

4.1.3 Δοκίμια CT-C8-W

Στον παρακάτω Πίνακα 4.3 παρατίθενται οι τιμές πλάτους κοπής, συγκριτικά πάντα με τη διάσταση διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου (8 mm), που λήφθηκαν από τις διαστάσεις των αυλακώσεων που έγιναν επάνω στα δοκίμια τύπου CT-C8-W. Οι μετρήσεις έγιναν στην περιοχή εισαγωγής του κοπτικού (αριστερή τιμή), στο κέντρο της αυλακώσεως (μέση τιμή) και στην περιοχή εξαγωγής του κοπτικού (δεξιά τιμή). Η σήμανση Factory Spec υποδεικνύει τη συνθήκη κοπής B2, με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού συνθήκες κοπής.

Δοκίμιο	Εισαγωγή Κοπτικού	Κέντρο	Εξαγωγή	
C8W	Διαστάσ	εις (mm)		
A1	7,92	7,93	7,93	
A2	7,93	7,95	7,95	
A3	7,95	7,95	7,95	
A4	7,95	7,95	7,95	
B1	7,95	7,95	7,95	
B2	7,94	7,94	7,94	(Factory Spec)
B3	7,94	7,94	7,94	
B4	7,96	7,95	7,95	
Г1	8	7,96	7,98	
Г2	7,95	7,93	7,93	
ГЗ	7,94	7,93	7,93	
Г4	7,95	7,98	7,94	
Δ1	7,98	7,98	7,98	
Δ2	7,98	7,96	7,98	
Δ3	7,96	7,96	8,03	
Δ4	7,95	7,95	7,95	

Πίνακας 4.3

Από τον Πίνακα, μπορούμε να εξάγουμε το αποτέλεσμα πως οι συνθήκες κοπής με τα πιο σταθερά παραγόμενα αποτελέσματα σε όλο το μήκος της αυλακώσεως, είναι οι A3, A4, B1, B4, Γ1, Δ1 και Δ2. Όσον αφορά όμως την ακρίβεια των διαστάσεων κοπής, δηλαδή το πόσο κοντά διαστασιολογικά με τη διάμετρο των 8 mm του κοπτικού βρίσκονται οι τρεις παραγόμενες τιμές πλάτους κοπής, έχουμε τις συνθήκες κοπής A3, A4, B1, Δ1 και Δ4. Παρόλα αυτά, δε παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ του συνόλου των τιμών του Πίνακα 4.1, και θα μπορούσαν να κριθούν ως σημαντικές υπό περιπτώσεις όπου η ακρίβεια συναρμογής είναι αναγκαίο να βρίσκεται ανάμεσα στα ±0,05 mm.

4.2 Μέση Τιμή Τραχύτητας Επιφάνειας Κοπής (Ra, mm)

4.2.1 Δοκίμια CT-C7-X

Στον παρακάτω Πίνακα 4.4 παρατίθενται οι τιμές τραχύτητας επιφανείας, καθώς και η μέση τιμή τραχύτητας, που προκύπτουν από τις μετρήσεις που έγιναν επάνω στα δοκίμια τύπου CT-C7-X. Οι μετρήσεις έγιναν σε πέντε τυχαία, διαφορετικά μεταξύ τους σημεία σε όλο το μήκος της αυλάκωσης του δοκιμίου. Η σήμανση Factory Spec υποδεικνύει τη συνθήκη κοπής B2, με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού συνθήκες κοπής.

Δοκίμιο	Μετρ. 1	Μετρ. 2	Μέτρ. 3	Μετρ. 4	Μετρ. 5	Μέση Τιμή	
A1	0.96	1.24	1.58	1.76	1.46	1.40	
A2	1.16	1.54	1.08	1.12	1.4	1.26	
A3	0.96	1.36	0.92	1.54	1.08	1.17	
A4	2.64	0.9	1.36	0.96	0.98	1.37	
B1	1.38	1	1.44	1.2	1.4	1.28	
B2	0.92	2.02	1.36	1.3	1.6	1.44	(Factory Spec)
B3	1.1	1	1.32	0.98	0.9	1.06	
B4	1.48	1.04	1.2	1.32	0.98	1.20	
Г1	1.38	1.52	1.54	1.08	1.34	1.37	
Г2	2.18	1.36	1.74	1.58	1.94	1.76	
Г3	1.84	1.4	1.78	1.4	1.38	1.56	
Г4	1.64	1.4	2.3	1.62	1.22	1.64	
Δ1	1.48	1.12	2.08	1.3	1.58	1.51	
Δ2	1.44	1.24	1.56	1.74	1.5	1.50	
Δ3	2.06	1.4	1.5	1.92	1.58	1.69	
Δ4	1.38	1.88	1.5	2.32	1.62	1.74	

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μετρήσεων τραχύτητας επιφανείας σε mm

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι με βάση την τιμή των εργοστασιακών βέλτιστων συνθηκών κοπής B4 = 1,44 mm, τη μικρότερη τιμή τραχύτητας επιφανείας έχει η συνθήκη B3 = 1,06 Ra ενώ τη μεγαλύτερη τιμή η συνθήκη $\Gamma2 = 1,76$ mm. Κοντά στην τιμή τραχύτητας της συνθήκης B2 βρέθηκε η συνθήκη A1, A4 και $\Gamma1$.

Σε όλα τα δείγματα υπάρχουν μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας από τις παραπάνω, δε μπορούν να ληφθούν όμως υπόψιν διότι πρόκειται για μεμονωμένα σημεία όπου παρατηρήθηκαν ασυνέχειες μέσα στον όγκο του υπό κατεργασία υλικού. Παρόλα αυτά όμως από όλες τις συνθήκες κοπής στα συγκεκριμένα δοκίμια, παρατηρείται πως ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στην μετέπειτα εμφανιζόμενη τραχύτητα επιφανείας είναι η πρόωση του κοπτικού εργαλείου, όπου παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση της τραχύτητας με την αύξηση του ρυθμού που κινείται το κοπτικό μέσα στον όγκο του υλικού. Αυτά τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω ανάλυσης του στατιστικού μοντέλου Taguchi και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.



	Spindle	
	Speed	Feed
Level	(RPM)	(mm/min)
1	1.392	1.300
2	1.489	1.247
3	1.371	1.582
4	1.487	1.610
Delta	0.118	0.363
Rank	2	1

Response Table for Means

Πινακας 4.5: 3D γράφημα με τη διακύμανση των μέσων τιμών τραχύτητας ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, και ανάλυση κυρίων παραγόντων με κατάταξη (Rank, Highest = 1) του μεγέθους της βαρύτητάς τους στο πείραμα (Delta Means)

4.2.1 Δοκίμια CT-C7-Y

Στον παρακάτω Πίνακα 4.5 παρατίθενται οι τιμές τραχύτητας επιφανείας, καθώς και η CT-C7-Y. Οι μετρήσεις έγιναν σε πέντε τυχαία, διαφορετικά μεταξύ τους σημεία σε όλο το μήκος της αυλάκωσης του δοκιμίου. Η σήμανση Factory Spec υποδεικνύει τη συνθήκη κοπής B2, με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού συνθήκες κοπής.

Δοκίμιο	Μετρ. 1	Μετρ. 2	Μέτρ. 3	Μετρ. 4	Μετρ. 5	Μέση Τιμή	
A1	1.38	1.18	1.24	1.72	1.72	1.45	
A2	1.5	1.08	1.08	1.06	1.06	1.16	
A3	3.3	0.94	1.14	1.48	1.48	1.67	
A4	1.36	0.92	1.12	0.98	0.98	1.07	
B1	1.74	0.96	1.38	1.34	1.34	1.35	
B2	1.36	1.32	1.32	1.98	1.98	1.59	(Factory Spec)
B3	1.28	1.52	1.18	1.14	1.14	1.25	
B4	1.02	1.2	1.24	1.1	1.1	1.13	
Г1	1.32	1.18	1.58	1.52	1.52	1.42	
Г2	1.3	1.2	2.94	1.12	1.12	1.54	
Г3	0.94	2.38	1.22	0.88	0.88	1.26	
Г4	1.04	0.9	1.28	0.92	0.92	1.01	
Δ1	1.42	1.24	1.14	1.74	1.74	1.46	
Δ2	1.88	1.7	1.58	1.6	1.6	1.67	
Δ3	1.22	1.08	1.1	1.32	1.32	1.21	
Δ4	1.22	1.66	1.22	1.04	1.04	1.24	

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μετρήσεων τραχύτητας επιφανείας σε mm

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι με βάση την τιμή των εργοστασιακών βέλτιστων συνθηκών κοπής B4 = 1,59 mm, τη μικρότερη τιμή τραχύτητας επιφανείας έχει η συνθήκη $\Gamma 4 = 1,01$ mm ενώ τη μεγαλύτερη τιμή οι συνθήκες A3, $\Delta 2 = 1,67$ mm. Κοντά στην τιμή τραχύτητας της συνθήκης B2 βρέθηκε η συνθήκη $\Gamma 2$, αλλά και οι A3 και $\Delta 2$, παρόλο που αποτέλεσαν τα μέγιστα σημεία μετρήσεως.

Σε όλα τα δείγματα υπάρχουν μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας από τις παραπάνω, δε μπορούν να ληφθούν όμως υπόψιν διότι πρόκειται για μεμονωμένα σημεία όπου παρατηρήθηκαν ασυνέχειες μέσα στον όγκο του υπό κατεργασία υλικού. Παρόλα αυτά όμως από όλες τις συνθήκες κοπής στα συγκεκριμένα δοκίμια, παρατηρείται πως ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στην μετέπειτα εμφανιζόμενη τραχύτητα επιφανείας είναι η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, όπου παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση της τραχύτητας με την αύξηση των περιστροφών ανά λεπτό (RPM) που περιστρέφεται το κοπτικό μέσα στον όγκο του υλικού. Αυτά τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω ανάλυσης του στατιστικού μοντέλου Taguchi παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.



Response Table for Means

	Spindle	
	Speed	Feed
Level	(RPM)	(mm/min)
1	1.420	1.336
2	1.489	1.332
3	1.347	1.308
4	1.113	1.393
Delta	0.376	0.085
Rank	1	2

Πινακας 4.7: 3D γράφημα με τη διακύμανση των μέσων τιμών τραχύτητας ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, και ανάλυση κυρίων παραγόντων με κατάταξη (Rank, Highest = 1) του μεγέθους της βαρύτητάς τους στο πείραμα (Delta Means)

4.2.1 Δοκίμια CT-C8-W

Στον παρακάτω Πίνακα 4.6 παρατίθενται οι τιμές τραχύτητας επιφανείας, καθώς και η μέση τιμή τραχύτητας, που προκύπτουν από τις μετρήσεις που έγιναν επάνω στα δοκίμια τύπου CT-C8-W. Οι μετρήσεις έγιναν σε πέντε τυχαία, διαφορετικά μεταξύ τους σημεία σε όλο το μήκος της αυλάκωσης του δοκιμίου. Η σήμανση Factory Spec υποδεικνύει τη συνθήκη κοπής B2, με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού συνθήκες κοπής.

Δοκίμιο	Μετρ. 1	Μετρ. 2	Μέτρ. 3	Μετρ. 4	Μετρ. 5	Μέση Τιμή	
A1	1.3	1.06	1.08	0.88	1.06	1.08	
A2	1.26	1.36	1.14	1.46	1.46	1.34	
A3	1.64	1.28	1.04	0.92	1.32	1.24	
A4	0.9	1.08	1.3	1.3	0.86	1.09	
B1	0.96	0.94	0.9	0.98	1.06	0.97	
B2	1.06	1.34	2.02	1.52	1.14	1.42	(Factory Spec)
B3	0.94	1.16	1.64	1.04	1.16	1.19	
B4	1.42	1.16	2.88	1.1	1.38	1.59	
Г1	1.4	1.44	1.42	1.68	2.1	1.61	
Г2	1.44	3.1	1.96	0.94	1.18	1.72	
Г3	0.88	1.28	1.52	1.48	1.12	1.26	
Г4	1.2	0.96	1.64	1.18	1.72	1.34	
Δ1	1.22	1.1	1.54	1.62	1.22	1.34	
Δ2	1.44	1.14	1.14	1.06	1.24	1.20	
Δ3	0.98	1.18	1.04	1.46	1.48	1.23	
Δ4	1.16	1.5	1.6	1.76	1.12	1.43	

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μετρήσεων τραχύτητας επιφανείας σε mm

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι με βάση την τιμή των εργοστασιακών βέλτιστων συνθηκών κοπής B4 = 1,42 mm, τη μικρότερη τιμή τραχύτητας επιφανείας έχει η συνθήκη B1 = 0,97 mm ενώ τη μεγαλύτερη τιμή η συνθήκη $\Gamma 2 = 1,72$ mm. Κοντά στην τιμή τραχύτητας της συνθήκης B2 βρέθηκε η συνθήκη $\Delta 4$.

Σε όλα τα δείγματα υπάρχουν μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας από τις παραπάνω, δε μπορούν να ληφθούν όμως υπόψιν διότι πρόκειται για μεμονωμένα σημεία όπου παρατηρήθηκαν ασυνέχειες μέσα στον όγκο του υπό κατεργασία υλικού. Παρόλα αυτά όμως από όλες τις συνθήκες κοπής στα συγκεκριμένα δοκίμια, παρατηρείται πως ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στην μετέπειτα εμφανιζόμενη τραχύτητα επιφανείας είναι η πρόωση του κοπτικού εργαλείου, όπου παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση της τραχύτητας με την αύξηση του

ρυθμού που κινείται το κοπτικό μέσα στον όγκο του υλικού. Αυτά τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω ανάλυσης του στατιστικού μοντέλου Taguchi παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.





Response Table for Means

	Spindle	
	Speed	Feed
Level	(RPM)	(mm/min)
1	1.248	1.185
2	1.420	1.290
3	1.228	1.482
4	1.361	1.300
Delta	0.192	0.297
Rank	2	1

Πινακας 4.9: 3D γράφημα με τη διακύμανση των μέσων τιμών τραχύτητας ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, και ανάλυση κυρίων παραγόντων με κατάταξη (Rank, Highest = 1) του μεγέθους της βαρύτητάς τους στο πείραμα (Delta)

4.3 Δεδομένα Δυναμόμετρου - Μέγιστες Τιμές Δυνάμεων Κοπής

4.3.1 Δοκίμια CT-C7-X

Στα παρακάτω διαγράμματα αναπαριστώνται οι δυνάμεις κοπής F (Newton) στους άξονες X,Y της εκάστοτε συνθήκης κοπής, που δημιουργούνταν από το κοπτικό εργαλείο μέσα στον όγκο του υλικού στη διεπιφάνεια κοπής, όπως ανιχνεύτηκαν από το δυναμόμετρο Kistler.

Δεν υπήρξαν μετρήσιμες τιμές δυνάμεων κατά τον άξονα Ζ, πράγμα το οποίο υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του κοπτικού εργαλείου, βάσει του σχεδιασμού του από τον κατασκευαστή, να μη προξενεί μεγάλα φορτία και ζημιές κατά τον κάθετο άξονα του υλικού. Οι δυνάμεις ανιχνεύτηκαν μέσα στο χρονικό όριο των 40 sec, όπου ήταν και το προδιαγεγραμμένο χρονικό όριο μέτρησης.



Διάγραμμα 4.1: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Α1, Α2, Α3



Διάγραμμα 4.2: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής A4, B1, B2



Διάγραμμα 4.3: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Β3, Β4, Γ1



Διάγραμμα 4.4: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Γ2, Γ3, Γ4



Διάγραμμα 4.5: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Δ1, Δ2, Δ3



Διάγραμμα 4.6: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τη συνθήκη κοπής Δ4

Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές δυνάμεων που άσκησε το εργαλείο στο υλικό στον X και Y άξονα γενικά, υπάρχει και ο παρακάτω σχετικός πίνακας με τις αναγραφόμενες τιμές, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μια εύκολη σύγκριση μεταξύ των εκάστοτε συνθηκών κοπής που έλαβαν μέρος. Η συνθήκη B2 αναγράφεται με τη φράση Factory Spec, έτσι ώστε να υποδεικνύεται πως αυτές είναι οι προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού εργαλείου συνθήκες κοπής.



Πίνακας 4.10: Οι μέγιστες τιμές δυνάμεων που ασκήθηκαν στο κοπτικό εργαλείο, μαζί με το αντίστοιχο συγκριτικό διάγραμμα τιμών στους άξονες αναφοράς Χ,Υ



Πίνακας 4.11: Γράφημα διακυμάνσεων των δυνάμεων που δέχεται το κονδύλι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, και ανάλυση κυρίων παραγόντων με κατάταξη (Rank, Highest = 1) του μεγέθους της βαρύτητάς τους στο πείραμα (Delta)

Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν μέσω ανάλυσης του στατιστικού μοντέλου Taguchi και μας παρέχει ο Πίνακας 4.11, μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα για τα συγκεκριμένα δοκίμια πως οι αξονικές δυνάμεις που δέχεται το κονδύλι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυξάνονται, καθώς αυξάνεται και ο ρυθμός πρόωσης του μέσα στον όγκο του υλικού. Επίσης, παρατηρούμε πως η πρόωση ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση στη διακύμανση των αξονικών δυνάμεων, αποτελώντας την κύρια μεταβλητή σε όλες τις συνθήκες κοπής που εφαρμόζονται.

4.3.2 Δοκίμια CT-C7-Y

Στα παρακάτω διαγράμματα αναπαριστώνται οι δυνάμεις κοπής F (Newton) στους άξονες X,Y της εκάστοτε συνθήκης κοπής, που δημιουργούνταν από το κοπτικό εργαλείο μέσα στον όγκο του υλικού στη διεπιφάνεια κοπής, όπως ανιχνεύτηκαν από το δυναμόμετρο Kistler.

Δεν υπήρξαν μετρήσιμες τιμές δυνάμεων κατά τον άξονα Ζ, πράγμα το οποίο υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του κοπτικού εργαλείου, βάσει του σχεδιασμού του από τον κατασκευαστή, να μη προξενεί μεγάλα φορτία και ζημιές κατά τον κάθετο άξονα του υλικού. Οι δυνάμεις ανιχνεύτηκαν μέσα στο χρονικό όριο των 40 sec, όπου ήταν και το προδιαγεγραμμένο χρονικό όριο μέτρησης.



Διάγραμμα 4.7: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Α1, Α2, Α3



Διάγραμμα 4.8: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Α4, Β1, Β2



Διάγραμμα 4.9: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Β3, Β4, Γ1



Διάγραμμα 4.10: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Γ2, Γ3, Γ4



Διάγραμμα 4.11: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Δ1, Δ2, Δ3



Διάγραμμα 4.12: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τη συνθήκη κοπής Δ4

Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές δυνάμεων που άσκησε το εργαλείο στο υλικό στον X και Y άξονα γενικά, υπάρχει και ο παρακάτω σχετικός πίνακας με τις αναγραφόμενες τιμές, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μια εύκολη σύγκριση μεταξύ των εκάστοτε συνθηκών κοπής που έλαβαν μέρος. Η συνθήκη B2 αναγράφεται με τη φράση Factory Spec, έτσι ώστε να υποδεικνύεται πως αυτές είναι οι προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού εργαλείου συνθήκες κοπής.



Πίνακας 4.12: Οι μέγιστες τιμές δυνάμεων που ασκήθηκαν στο κοπτικό εργαλείο, μαζί με το αντίστοιχο συγκριτικό διάγραμμα τιμών στους άξονες αναφοράς Χ,Υ



Response Table for Means

	Spindle	
	Speed	Feed
Level	(RPM)	(mm/min)
1	88.88	60.64
2	75.00	83.11
3	56.41	65.51
4	65.63	76.66
Delta	32.48	22.48
Rank	1	2

Πίνακας 4.13: Γράφημα διακυμάνσεων των δυνάμεων που δέχεται το κονδύλι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, και ανάλυση κυρίων παραγόντων με κατάταξη (Rank, Highest = 1) του μεγέθους της βαρύτητάς τους στο πείραμα (Delta)

Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν μέσω ανάλυσης του στατιστικού μοντέλου Taguchi και μας παρέχει ο Πίνακας 4.13, μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα για τα συγκεκριμένα δοκίμια πως οι αξονικές δυνάμεις που δέχεται το κονδύλι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μειώνονται, καθώς αυξάνεται και η ταχύτητα περιστροφής του μέσα στον όγκο του υλικού. Επίσης, παρατηρούμε πως η ταχύτητα περιστροφής ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση στη διακύμανση των αξονικών δυνάμεων, αποτελώντας την κύρια μεταβλητή σε όλες τις συνθήκες κοπής που εφαρμόζονται.

4.3.3 Δοκίμια CT-C8-W

Στα παρακάτω διαγράμματα αναπαριστώνται οι δυνάμεις κοπής F (Newton) στους άξονες X,Y της εκάστοτε συνθήκης κοπής, που δημιουργούνταν από το κοπτικό εργαλείο μέσα στον όγκο του υλικού στη διεπιφάνεια κοπής, όπως ανιχνεύτηκαν από το δυναμόμετρο Kistler.

Δεν υπήρξαν μετρήσιμες τιμές δυνάμεων κατά τον άξονα Ζ, πράγμα το οποίο υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του κοπτικού εργαλείου, βάσει του σχεδιασμού του από τον κατασκευαστή, να μη προξενεί μεγάλα φορτία και ζημιές κατά τον κάθετο άξονα του υλικού. Οι δυνάμεις ανιχνεύτηκαν μέσα στο χρονικό όριο των 40 sec, όπου ήταν και το προδιαγεγραμμένο χρονικό όριο μέτρησης.



Διάγραμμα 4.13: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Α1, Α2, Α3



Διάγραμμα 4.14: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Α4, Β1, Β2



Διάγραμμα 4.15: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής B3, B4, Γ1



Διάγραμμα 4.16: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Γ2, Γ3, Γ4



Διάγραμμα 4.17: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τις συνθήκες κοπής Δ1, Δ2, Δ3



Διάγραμμα 4.18: Τιμές δυνάμεων που ασκεί το εργαλείο ως προς το χρόνο, στους Χ,Υ άξονες, για τη συνθήκη κοπής Δ4

Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές δυνάμεων που άσκησε το εργαλείο στο υλικό στον X και Y άξονα γενικά, υπάρχει και ο παρακάτω σχετικός πίνακας με τις αναγραφόμενες τιμές, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μια εύκολη σύγκριση μεταξύ των εκάστοτε συνθηκών κοπής που έλαβαν μέρος. Η συνθήκη B2 αναγράφεται με τη φράση Factory Spec, έτσι ώστε να υποδεικνύεται πως αυτές είναι οι προτεινόμενες από τον κατασκευαστή του κοπτικού εργαλείου συνθήκες κοπής.



Πίνακας 4.14: Οι μέγιστες τιμές δυνάμεων που ασκήθηκαν στο κοπτικό εργαλείο, μαζί με το αντίστοιχο συγκριτικό διάγραμμα τιμών στους άξονες αναφοράς Χ,Υ



Response Table for Means

	Spindle	
	Speed	Feed
Level	(RPM)	(mm/min)
1	66.73	35.34
2	61.69	73.46
3	72.60	78.06
4	62.25	76.42
Delta	10.92	42.72
Rank	2	1

Πίνακας 4.15: Γράφημα διακυμάνσεων των δυνάμεων που δέχεται το κονδύλι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, και ανάλυση κυρίων παραγόντων με κατάταξη (Rank, Highest = 1) του μεγέθους της βαρύτητάς τους στο πείραμα (Delta)

Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν μέσω ανάλυσης του στατιστικού μοντέλου Taguchi και μας παρέχει ο Πίνακας 4.15, μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα για τα συγκεκριμένα δοκίμια πως οι αξονικές δυνάμεις που δέχεται το κονδύλι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυξάνονται, καθώς αυξάνεται και ο ρυθμός πρόωσης του μέσα στον όγκο του υλικού. Επίσης, παρατηρούμε πως η πρόωση ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση στη διακύμανση των αξονικών δυνάμεων, αποτελώντας την κύρια μεταβλητή σε όλες τις συνθήκες κοπής που εφαρμόζονται.

4.4 Δεδομένα Στερεοσκοπίας – Μικροσκοπίας

Παρακάτω, παρατίθενται όλες οι λήψεις που έγιναν με τη βοήθεια του στερεοσκόπιου και του μικροσκόπιου, εμφανίζοντας μια πιο λεπτομερή εικόνα για την επιφάνεια που αφήνει το κοπτικό εργαλείο σε κάθε πέρασμά του. Επίσης, γίνεται πιο εμφανής η επίπτωση που έχει η εκάστοτε συνθήκη κοπής στο υλικό, ανάλογα και με τη διεύθυνση των ινών μέσα στον όγκο του.

Από τις εικόνες που προέρχονται από το στερεοσκόπιο για κάθε συνθήκη κοπής και σηματοδοτούνται από το κεφαλαίο γράμμα (A), οι περιοχές με πράσινη σήμανση εκατέρωθεν αποτελούν την περιοχή εισαγωγής του κοπτικού εργαλείου στο υπό κατεργασία υλικό, με πορτοκαλί σήμανση την περιοχή στο μέσο του δοκιμίου και με κόκκινη είναι οι περιοχές εξαγωγής του από το υλικό. Επίσης, οι ίνες που δεν έχουν κοπεί ή έχουν τραβηχτεί από το κοπτικό (αστοχία fiber pull-out) σηματοδοτούνται σε περιοχές στις φωτογραφίες μέσα σε μαύρους κύκλους, έτσι ώστε να είναι πιο ευκρινής ο εντοπισμός τους.

Όσον αφορά τις λήψεις από το μικροσκόπιο για την κάθε συνθήκη κοπής, παρατίθενται 4 φωτογραφίες από την κάθετη όψη του δοκιμίου. Η σειρά που παρατίθενται, από πάνω προς τα κάτω είναι η εξής: (**B**) Περιοχή εισαγωγής κοπτικού, (**Γ**)(**Δ**) Περιοχές μεσαίας διατομής του δοκιμίου και (**E**) Περιοχή εξαγωγής κοπτικού. Για την ευκολότερη κατανόηση του μεγέθους των απεικονιζόμενων σφαλμάτων κοπής (όπου υπάρχουν), έχουν προστεθεί κλίμακες των 0,5 mm (με κίτρινο χρώμα) σε κάθε λήψη ξεχωριστά.

4.4.1 Συνθήκη Κοπής Α1

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, παρατηρούνται μόνο στην Εικόνα (Ε) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ το υλικό γενικότερα εμπεριέχει σπηλαιώσεις που δεν οφείλονται όμως στην κατεργασία. Δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, επιφανειακές ασυνέχειες και ρωγμές σε καμία περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο.

Δοκίμιο CT-C7-Y



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προυπήρχαν στον όγκο του υλικού.

Δοκίμιο CT-C8-W



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ρωγμή ή ασυνέχεια επιφάνειας σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.2 Συνθήκη Κοπής Α2

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, παρατηρούνται μόνο στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ το υλικό γενικότερα εμπεριέχει σπηλαιώσεις που δεν οφείλονται όμως στην κατεργασία. Δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, επιφανειακές ασυνέχειες και ρωγμές σε καμία περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο.

Δοκίμιο CT-C7-Y



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο, εκτός από την παρατηρούμενη ασυνέχεια και τις ίνες που δεν έχουν αποκοπεί στο αριστερό άκρο της Εικόνας (Γ). Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προυπήρχαν στον όγκο του υλικού.


Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση ή ρωγμή σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Μόνο στο δεξί άκρο της Εικόνας (Δ) παρατηρείται μια ασυνέχεια επιφάνειας, όπου φαίνεται να υπάρχει απώλεια υλικού από το συγκεκριμένο σημείο. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.3 Συνθήκη Κοπής Α3

Δοκίμιο CT-C7-X







Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ρωγμή ή ασυνέχεια επιφάνειας σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.4 Συνθήκη Κοπής Α4

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, παρατηρούνται μόνο στις Εικόνες (B),(E) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ το υλικό γενικότερα εμπεριέχει σπηλαιώσεις που δεν οφείλονται όμως στην κατεργασία. Δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση και ρωγμές σε καμία περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο. Στις Εικόνες (B),(Γ) και (Δ) παρατηρείται μια

διαμήκης ασυνέχεια στην επιφάνεια κοντά στο κέντρο της αυλακώσεως, ως απώλεια υλικού συνδεόμενη με την κατεργασία που δέχθηκε το υλικό.

Δοκίμιο CT-C7-Y



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, παρατηρούνται μόνο στην Εικόνα (Γ) και (Ε) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ το υλικό γενικότερα εμπεριέχει σπηλαιώσεις που δεν οφείλονται όμως στην κατεργασία. Δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, επιφανειακές ασυνέχειες και ρωγμές σε καμία περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο.



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ρωγμή ή ασυνέχεια επιφάνειας σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.5 Συνθήκη Κοπής Β1

Δοκίμιο CT-C7-X





Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο, εκτός της Εικόνας (Α) όπου παρατηρούνται ελάχιστες ίνες που δεν έχουν αποκοπεί κοντά στην περιοχή εξαγωγής του κοπτικού εργαλείου από τον όγκο του υλικού. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προυπήρχαν στον όγκο του υλικού.



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση ή ρωγμή σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στο αριστερό άκρο της Εικόνας (Γ) παρατηρείται μια ασυνέχεια επιφάνειας που σχετίζεται με την απώλεια υλικού από την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.6 Συνθήκη Κοπής Β2 (Προτεινόμενη από τον Κατασκευαστή)

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο, εκτός της Εικόνας (Ε) όπου παρατηρούνται ίνες που δεν έχουν αποκοπεί στην αριστερή πλευρά. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προυπήρχαν στον όγκο του υλικού.





Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (Α) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.7. Συνθήκη Κοπής Β3

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (Ε) μια συστάδα ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.





Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (A) μια συστάδα ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.8. Συνθήκη Κοπής Β4

Δοκίμιο CT-C7-X







Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (Δ) μια συστάδα ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στην Εικόνα (Γ) παρατηρείται ρωγμή στο αριστερό άκρο, η οποία μελλοντικά θα μπορούσε να δράσει ως σημείο συγκέντρωσης τάσεων και να αποφέρει την καταστροφική αστοχία του υλικού υπό τάση. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.9. Συνθήκη Κοπής Γ1

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) συστάδες ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (Ε) μια συστάδα ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (Ε) στο αριστερό άκρο μια συστάδα ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.10 Συνθήκη Κοπής Γ2

Δοκίμιο CT-C7-X





Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (Ε) στο αριστερό άκρο μια συστάδα ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στην Εικόνα (Δ), στο αριστερό άκρο παρατηρείται διαστρωματική αποκόλληση η οποία ενδεχομένως να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού υπό τάση. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) μικρές σε έκταση συστάδες ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.11 Συνθήκη Κοπής Γ3

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρείται στην Εικόνα (B) στο αριστερό άκρο μια συστάδα ινών που δεν έχει αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.





Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) συστάδες ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή διαστρωματική αποκόλληση σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στην Εικόνα (Δ), στο αριστερό άκρο παρατηρείται ρωγμή η οποία ενδεχομένως να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού υπό τάση. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.12 Συνθήκη Κοπής Γ4

Δοκίμιο CT-C7-X







Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) συστάδες ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού, διαστρωματική αποκόλληση ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στην Εικόνα (Γ), στο αριστερό άκρο παρατηρείται ρωγμή η οποία ενδεχομένως να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού υπό τάση. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.13 Συνθήκη Κοπής Δ1

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) συστάδες ινών που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού, διαστρωματική αποκόλληση ή ρωγμή σε καμία περιοχή, που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.





Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία ρωγμή σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στο αριστερό άκρο της Εικόνας (Γ) και (Ε) παρατηρείται μια ασυνέχεια επιφάνειας που σχετίζεται με την απώλεια υλικού από την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στην Εικόνα (Δ), στο δεξί άκρο παρατηρείται διαστρωματική αποκόλληση στον αυχένα της αυλάκωσης, η οποία ενδέχεται να προκαλέσει την αδυναμία του υλικού να υποστηρίξει φορτία και εντέλει την αστοχία του υλικού. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.14 Συνθήκη Κοπής Δ2

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση, ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού ή ρωγμή σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.


Δοκίμιο CT-C8-W



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο παρατηρούνται στην Εικόνα (A) ίνες που δεν έχουν αποκοπεί, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία διαστρωματική αποκόλληση ή ρωγμή σε καμία περιοχή που να σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη κατεργασία. Στις Εικόνες (Γ), (Δ) και (Ε) παρατηρείται ασυνέχεια επιφάνειας/μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού στους αυχένες της αυλακώσεως. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού και δε σχετίζονται με την κατεργασία που δέχτηκε.

4.4.15 Συνθήκη Κοπής Δ3

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού.

Δοκίμιο CT-C7-Y



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού.

Δοκίμιο CT-C8-W



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο, εκτός μιας μικρής συστάδας ινών που δεν αποκόπηκαν στην περιοχή εξαγωγής του κοπτικού εργαλείου, όπως φαίνεται στην Εικόνα (Α). Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού.

4.4.16 Συνθήκη Κοπής Δ4

Δοκίμιο CT-C7-X



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο, εκτός από την αριστερή πλευρά στην Εικόνα (B), όπου παρατηρούνται ίνες που δεν έχουν αποκοπεί και ενδεχομένως εξολκήθηκαν από τον όγκο του υλικού. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού.

Δοκίμιο CT-C7-Y



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού.

Δοκίμιο CT-C8-W



Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δε παρατηρήθηκε καμία ατέλεια στην περιοχή που έδρασε το κοπτικό εργαλείο, εκτός από την δεξιά περιοχή της Εικόνας (Ε) και το κέντρο της Εικόνας (Β), όπου παρατηρήθηκε μη ελεγχόμενη απώλεια υλικού στον αυχένα της αυλακώσεως. Στη γωνία του αριστερού άκρου της αυλάκωσης που φαίνεται στην Εικόνα (Γ), παρατηρείται συστάδα ινών η οποία δεν αποκόπηκε από το κοπτικό εργαλείο, χωρίς έτσι να ολοκληρώνεται το ορθογωνικό προφίλ της αυλακώσεως. Οι σπηλαιώσεις που παρατηρούνται προϋπήρχαν στον όγκο του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των πειραμάτων που εκτελέστηκαν, επιτεύχθηκε η εξαγωγή ορισμένων παρατηρήσεων και συμπερασμάτων. Αυτά αφορούν την επίδραση που είχαν οι συνθήκες κοπής, δηλαδή η πρόωση και η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, καθώς και η παρουσία συνεχόμενης παροχής πεπιεσμένου αέρα στο κοπτικό εργαλείο ως ψυκτικό μέσο στις εξαρτημένες μεταβλητές.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές εδώ ήταν οι τρεις διαφορετικές διαστρωματώσεις της ινώδους φάσης μέσα στο σύνθετο υλικό CFRP, η ακρίβεια διαστάσεων της κοπής, η τραχύτητα επιφανείας που προκύπτει, οι δυνάμεις που ασκήθηκαν στο κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια και τέλος, τα σφάλματα που προέκυψαν μετά την κατεργασία στο υλικό και αλλοίωσαν την ποιότητα αποτελέσματος του τελικού προϊόντος.

Βάσει των παραπάνω, εξήχθησαν και τα συμπεράσματα για τις βέλτιστες και χείριστες συνθήκες κοπής, συναρτήσει όλων των μεταβλητών που τις ορίζουν. Τέλος, εξήχθη και το συμπέρασμα για το ποια συνθήκη κοπής θεωρείται η πιο συμφέρουσα και αποδοτική, από άποψη προστασίας και μακροζωίας του κοπτικού εργαλείου, ποιότητας αποτελέσματος του τελικού προϊόντος αλλά και χρόνου κατεργασίας.

5.1 Παρατηρήσεις

Με βάση τη βιβλιογραφία, για να εξασφαλιστεί η μακροζωία του κοπτικού εργαλείου πρέπει οι προκύπτουσες δυνάμεις κοπής που δέχεται να είναι όσο το δυνατόν λιγότερες, το ίδιο και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια του με το κατεργαζόμενο υλικό. Αυτό εξαρτάται από το βάθος κοπής (το οποίο ήταν σταθερό για όλα τα πειράματα στο 1,5 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου), την πρόωση που πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και την ταχύτητα περιστροφής που πρέπει να είναι υψηλή. Τα ίδια ισχύουν και για την επίτευξη χαμηλής τραχύτητας επιφανείας. Η συνθήκη κοπής Α4 επιβεβαιώνει τη βιβλιογραφία, όντας η συνθήκη με τη χαμηλότερη πρόωση (η οποία αναφέρεται ως ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση) και την υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής, έχοντας ταυτόχρονα και τα λιγότερα σφάλματα κοπής ινών μετά από την κατεργασία μέσα στο υλικό.

Η συνθήκη κοπής A1, με τις πιο αργές ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης, φαίνεται πως είναι η πιο ασφαλής επιλογή για την κατεργασία υλικού CFRP με το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο. Παράγει τις λιγότερες δυνάμεις στο κοπτικό, εξασφαλίζοντας την αντοχή του στο χρόνο, και δε παρουσιάζει σφάλματα ποιότητας στο τελικό προϊόν. Παρόλα αυτά, από άποψη χρόνου κατεργασίας είναι η πιο χρονοβόρα, κάτι το οποίο σε παραγωγές εξαρτημάτων μεγάλου όγκου θα ήταν οικονομικά ασύμφορο.

Η συνθήκη κοπής Δ1, με τη μεγαλύτερη πρόωση μεταξύ των προηγούμενων αλλά με την πιο αργή ταχύτητα περιστροφής κοπτικού αποδείχθηκε η πιο καταστροφική συνθήκη κοπής. Αυτό φαίνεται από τις προκύπτουσες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο, όπου είναι και οι μεγαλύτερες συγκριτικά, αλλά και από τα πολλά σφάλματα που εμφανίστηκαν στην ινώδη φάση με κάμψεις και θλίψεις ινών, με πολλές ίνες να μην έχουν αποκοπεί. Αυτό μελλοντικά οδηγεί σε πρόωρη φθορά του εργαλείου και αστοχίες στο τελικό προϊόν, κάτι το οποίο κρίνεται οικονομικά ασύμφορο, αλλά και από άποψη χρόνου, λόγω της εμφάνισης νεκρών χρόνων κατά τη διαδικασία για την αντικατάσταση εργαλείου και επιδιόρθωσης των τελικών προϊόντων.

Η συνθήκη κοπής B2, η οποία αποτελούσε και την προτεινόμενη από τον κατασκευαστή του κοπτικού εργαλείου, χρησιμοποιήθηκε ως ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ των υπολοίπων. Γενικότερα τα αποτελέσματα που απέδωσε κρίνονται ικανοποιητικά, αν και παρουσιάστηκαν σφάλματα στην ινώδη φάση μετά την κοπή στα δοκίμια CT-C7-X και CT-C8-W, δηλαδή εκείνα με διευθύνσεις διαστρωματώσεων κάθετα στη φορά κατεύθυνσης του κοπτικού και υπό γωνίες ±45 μοιρών.

Η συνθήκη κοπής Δ4, με τις υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης κοπτικού, εμφάνισε υψηλές τιμές τραχύτητας επιφανείας και δυνάμεων εφαρμοζόμενων δυνάμεων στο εργαλείο, καθώς και ανώμαλη επιφάνεια στα τοιχώματα των αυλακώσεων που δημιούργησε το εργαλείο στο υλικό. Αυτό εξηγείται από τη συσσώρευση αποβλήτων στην επιφάνεια του κοπτικού λόγω ανεπαρκούς ταχύτητας αποβολής τους, η οποία προέκυψε από την πολύ υψηλή ταχύτητα περιστροφής σε συνδυασμό με τη μεγάλη ταχύτητα πρόωσης, παρά την παρουσία του πεπιεσμένου αέρα στην περιοχή που λάμβανε χώρα η κοπή. Έτσι, παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα όριο αποδοτικής λειτουργίας και ευεργετικής δράσης της παροχής πεπιεσμένου αέρα, ακόμα και σε συνθήκες υψηλών ταχυτήτων πρόωσης/περιστροφής, το οποίο σε αυτή την περίπτωση φάνηκε ότι ξεπεράστηκε.

Η συνθήκη κοπής Δ3 ήταν εκείνη που απέδωσε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, και φαίνεται πως αποτελεί ακόμα πιο συμφέρουσα επιλογή από εκείνη που προτείνει ο κατασκευαστής. Η Δ3, με προτεινόμενη ταχύτητα πρόωσης τα 3930 mm/min και ταχύτητα περιστροφής τις 9947 RPM, σε σύγκριση με τα 2620 mm/min και 7958 RPM της B2, παράγει τελικά προϊόντα στις πιο ακριβείς τελικές διαστάσεις, με τις μικρότερες για το κοπτικό εργαλείο εφαρμοζόμενες δυνάμεις στους άξονες X/Y, με μικρή τραχύτητα επιφανείας για όλες τις διαστρωματώσεις, με ελάχιστα έως μηδενικά σφάλματα μετά την κατεργασία και σε λιγότερο χρόνο. Υπό οποιαδήποτε συνθήκη, ο συνδυασμός συνθηκών Δ3 φαίνεται πως υπερτερεί έναντι του προτεινόμενου από τον κατασκευαστή.

5.2 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία που παρατέθηκε, υπάρχει σύνδεση της παραγόμενης τραχύτητας επιφανείας στο υλικό που υπέστη την κατεργασία με το βάθος κοπής και των ταχυτήτων περιστροφής και πρόωσης κοπτικού εργαλείου. Για μεγάλα βάθη παρατηρείται αύξηση των τιμών τραχύτητας, ενώ παρατηρείται μείωση σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης συνδυαστικά. Στη συγκεκριμένη εργασία, αυτός ήταν ο λόγος εξαρχής που προτιμήθηκε μικρό βάθος κοπής (1,5 mm) έτσι ώστε να εξαλειφθεί σαν παράγοντας επηρεασμού των αποτελεσμάτων. Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν υπάρχει συμφωνία με τη βιβλιογραφία ότι η αύξηση του ρυθμού πρόωσης οδηγεί σε αυξημένη τραχύτητα στις διαστρωματώσεις τύπου Woven και τη μονοδιευθυντική Y, αλλά διαφωνία όσον αφορά τη μονοδιευθυντική διαστρωμάτωση ως προς τον Άξονα X, με ίνες κάθετες ως προς τη διεύθυνση της πορείας του κοπτικού. Επιπλέον, υπάρχει επίσης συμφωνία με τη βιβλιογραφία πως η πρόωση είναι ο σημαντικότερος παράγοντας επηρεασμού των αποτελεσμάτων τραχύτητας επιφανείας, όσον αφορά τις διαστρωματώσεις τύπου Woven και τη μονοδιευθυντική ως προς τον Άξονα X, εκτός της μονοδιευθυντικής ως προς τον Άξονα Y, όπου φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου.

Όσον αφορά τα σφάλματα που δημιουργήθηκαν στις ίνες του υλικού μετά την κατεργασία, υπάρχει συμφωνία με τη βιβλιογραφία, η οποία αναφέρει ότι σε σύνθετα υλικά με ίνες που έχουν τοποθετηθεί σε γωνίες μεγαλύτερες των 90 μοιρών και υπό γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση πορείας του κοπτικού, παρουσιάζονται σφάλματα και παραμορφώσεις εξαιτίας πολύ ισχυρών θλιπτικών δυνάμεων. Αυτό έγινε προφανές στα δοκίμια διαστρωμάτωσης Woven, όπου ίσχυε η παραπάνω συνθήκη για την ινώδη ενίσχυσή τους, και όπου παρουσιάστηκαν επί το πλείστο τα σφάλματα κατεργασίας που καταγράφηκαν.

Παρόλα αυτά, σε καμία δοκιμαζόμενη διαστρωμάτωση δε παρουσιάστηκαν σφάλματα κατεργασίας που έχουν να κάνουν με διαστρωματική αποκόλληση λόγω θλιπτικών δυνάμεων εκτός από μια μόνο περίπτωση, εκείνη του δοκιμίου CT-C7-Y υπό συνθήκες κοπής με ταχύτητα περιστροφής κοπτικού 7968 RPM και πρόωση 3275 mm/min. Επίσης, εντοπίστηκαν ατέλειες όπως ίνες που δεν αποκόπηκαν ή τραβήχτηκαν αλλά χωρίς μεγάλη εξάπλωση του φαινομένου στον όγκο του κατεργασμένου υλικού, και υπό ελάχιστες περιπτώσεις ρωγμές. Αυτό φανερώνει την υπεροχή του συγκεκριμένου εργαλείου σχεδιαστικά, σε σχέση με τα κοινά εργαλεία γεωμετρίας τύπου Flute, τα οποία προκαλούν τέτοιου είδους και μεγαλύτερης εκτάσεως σφάλματα σε κατεργασίες ινωδών συνθέτων υλικών βάσει βιβλιογραφίας.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκονται επίσης σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, στον ισχυρισμό πως η ταχύτητα πρόωσης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας κατεργασίας. Από τα αποτελέσματα φάνηκε πως ο υψηλός ρυθμός πρόωσης (μεγαλύτερος από εκείνον που προτείνει ο κατασκευαστής) προκαλεί σφάλματα στο υλικό και φθορά μελλοντικά στο εργαλείο, εκτός και αν ισοσταθμιστεί μέχρι ένα σημείο από υψηλή ταχύτητα περιστροφής εργαλείου. Γενικότερα, παρατηρήθηκε και επιβεβαιώθηκε πως οι κοπές με συνθήκες χαμηλής ταχύτητας και υψηλής πρόωσης είναι οι λιγότερο αποδοτικές και περισσότερο καταστροφικές.

Η παροχή πεπιεσμένου αέρα ως ψυκτικό μέσον παρουσιάστηκε να έχει ευεργετική επίδραση στην κατεργασία, και αυτό φαίνεται από το γεγονός πως δεν εμφανίστηκε στις φωτογραφίες μικροσκοπίου και στερεοσκοπίου πουθενά οποιαδήποτε αλλοίωση ή κάψιμο της πολυμερικής μήτρας υπό οποιαδήποτε συνθήκη κοπής. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι θερμοκρασίες κατεργασίας διατηρήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα και δεν υπήρξε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας λόγω καταστροφής της. Επίσης, στις περισσότερες συνθήκες κοπής προέκυπταν λείες επιφάνειες χωρίς ανωμαλίες (εκτός εκείνων που προϋπήρχαν ως κενά μέσα στον όγκο του υλικού), πράγμα το οποίο φανερώνει την συμβολή του πεπιεσμένου αέρα στην επαρκή και ταχεία αποβολή των αποβλήτων κατεργασίας μακριά από το κοπτικό εργαλείο.

Όσον αφορά την υποθετικά ευεργετική δράση της αύξησης της ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού, σε ρυθμό πρόωσης ίδιο με εκείνον που υποδεικνύει ο κατασκευαστής του, έχουμε κάποια κέρδη μόνο στις παραγόμενες στο κοπτικό δυνάμεις σε διαστρωματώσεις κατά τον X άξονα, ενώ σε τραχύτητα επιφανείας έχουμε μικρότερες τιμές μόνο στις μονοδιευθυντικές διαστρωματώσεις. Ο παράγοντας που εμφανίζει τη μεγαλύτερη βελτίωση είναι η μείωση των σφαλμάτων κατεργασίας στο υλικό, ενώ παρατηρείται αύξηση των σφαλμάτων όσο μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με την πρόωση.

Τέλος, αποδείχθηκε πως η συνθήκη κοπής Δ3 αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα από την εργοστασιακή προτεινόμενη B2. Η επιλογή της φαίνεται ως η πιο συμφέρουσα επιλογή από οικονομική άποψη, εξαιτίας της μείωσης του κόστους αντικατάστασης εργαλείου, μείωσης των σφαλμάτων και των νεκρών χρόνων στην παραγωγή και αύξησης της αποδοτικότητας συνολικά.

5.3 Προοπτικές

Η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για τη σύγχρονη βιομηχανία, καθώς αποσκοπεί στο να επιλυθούν προβλήματα που αφορούν την ευρεία παραγωγή εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά τύπου CFRP. Σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να βρεθούν λύσεις ως προς την οικονομική διαχείριση και οργάνωση τέτοιων εγχειρημάτων, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που παρουσιάστηκε άνωθεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να γίνουν αναφορικά με την αξιοποίηση και την εξέλιξη της παρούσας εργασίας, αφορούν τη χρησιμοποίηση περισσότερων κοπτικών εργαλείων ίδιου σχεδιασμού με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε εδώ. Παρά την ήδη μεγάλη απόκτηση δεδομένων από την παρούσα εργασία, για να δημιουργηθεί μια ευρεία βάση δεδομένων αναφορικά με την αποδοτική χρήση τους, θα πρέπει μελλοντικά να γίνει χρήση τέτοιων εργαλείων διαφόρων διαμέτρων και συνθηκών κοπής, έτσι ώστε να καταγραφεί η συμπεριφορά τους κατά την μηχανουργική κατεργασία συνθέτων υλικών.

Επίσης χρήσιμο θα ήταν να γίνει μια έρευνα που να αφορά τη συμπεριφορά αυτών των κοπτικών εργαλείων, , όσον αφορά ακόμα περισσότερες διαστρωματώσεις της ινώδους ενισχυτικής φάσης σε σύνθετα υλικά, παρόλο που στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η συμπεριφορά όλων των διαστρωματώσεων ινώδους ενισχυτικής φάσης που χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Για να καλυφθούν οι ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας ως προς τον σχεδιασμό πολύπλοκων γεωμετριών με απαιτήσεις ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες, γίνεται χρήση όλο και περισσοτέρων συνδυασμών διαστρωματώσεων προκειμένου να υπάρξει αποτελεσματική μετάδοση των μηχανικών φορτίων μέσα στον όγκο του υλικού. Γι' αυτό τον λόγο, κρίνεται απαραίτητο να γίνουν περαιτέρω έρευνες που να αφορούν τέτοιους συνδυασμούς διαστρωματώσεων και την απόκρισή τους κατά τη μηχανούργηση.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

[1] J.Y. Sheikh-Ahmad, Chapter 1: Introduction to Polymer Composites, in: J.Y. Sheikh-Ahmad, Machining of Polymer Composites, Springer, USA, (2009), 1-35

[2] Ι. Χρ. Σιμιτζής, Β. Ενότητα: Σύνθετα Υλικά, in: Ι. Χρ. Σιμιτζής, Τεχνολογία Προηγμένων Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών (Σημειώσεις), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2002, 64-84

[3] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf

[4] SEM-picture of MT-Aerospace AG, Augsburg, Germany

[5] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf

[6] Γ. Παπανικολάου, Δ. Μουζάκης, Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2007

[7] B. Bhattacharya, Nature and Properties of Materials, Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, Mechanical Properties of Materials 2

[8] M. S. Scholz, J. P. Blanchfield, L. D. Bloom, B. H. Coburn, M. Elkington, J.D. Fuller, M.E. Gilbert, S.A. Muflahi, M.F. Pernice, S.I. Rae, J.A. Trevarthen, S.C. White, P.M. Weaver, I.P. Bond, The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: A review, Composites Science and Technology Volume 71, Issue 16, (14 November 2011), Pages 1791-1803

[9] W. D. Callister, Κεφάλαιο 17: Σύνθετα Υλικά, in: W.D. Callister, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, (2008), 636-682

[10] http://www.flight-mechanic.com/composite-structures-fiber-forms-and-types-of-fiber/

[11] Askeland, D.R. Phule, P.P. Wright, W.J., The Science and Engineering of Materials, 4th Edition, Ch. 16. Shakelford, Toronto, Canada, (2010)

[12] https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html

[13] W. D. Callister, Κεφάλαιο 15: Δομές των Πολυμερών, in: W.D. Callister, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, (2008), 543-570

[14] Ru-Min Wang, Shui-Rong Zheng, Ya-Ping Zheng, Matrix materials, Polymer Matrix Composites and Technology, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, (2011), Pages 101-167, 547-548

[15] S. Advani, K. T. Hsiao, Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs), 1st Edition, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, (2012), Pages 414-434

[16] A. Nawaz, B. Islam, A. Ullah, W. Mao, Polyester Usage in Manufacturing of Electrical and Mechanical Products and Assemblies, Polyester: Production, Characterization and Innovative

Applications, Edition: 1, Chapter: 4, Publisher: IntechOpen, (September 2017), pp.24

[17] E. C. Botelho, R. A. Silva, L. C. Pardini, M. C. Rezende, A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures, Materials Recearch vol.9, no.3, (June 8 2006)

[18] www.nptel.ac.in., Mechanical Engineering: Computer Aided Design and Manufacturing II, Bombay/Delhi/Kampur/Kharagpur/Madras/Guwahatti/Roorkee Institutes of Technology, India, (31-12-2009)

[19] S. Theodoropoulos, D. Kandris, M. Samarakou, G. Koulouras, Fuzzy Regulator Design for Wind Turbine Yaw Control, The Scientific World Journal, Vol. 2014, (Feb. 2014), 1-9

[20] https://c9.cdu-grossefehn.de/ac-servo-motor-wiring-diagram.html

[21] <u>https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/speed-control-methods-of-speed-control-motors.html</u>

[22] D. CHANDRAMOHAN, B. MURALI, MACHINING OF COMPOSITES – A REVIEW, ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING, VOL. 12, ISSUE 3, (2014)

[23] Maria OCNĂRESCU, Paulina SPÂNU, Aurelian VLASE, Constantin OPRAN, MACHINING OF COMPOSITE MATERIALS USING TRADITIONAL METHODS Nonconventional Technologies Review – no. 3, (2008), 43-46

[24] S. Abrate and D.A. Walton, Machining of composite materials. Part I : Traditional methods, Composites Manufacturing Vol 3, No 2, (1992), 75-83

[25] R. Teti, Machining of Composite Materials, University of Naples Federico II, Italy, 1-24

[26] ANURODH MISHRA, OVERVIEW STUDY OF THE MACHINING OF COMPOSITE MATERIALS, Engineering & Technology, Vol. 4, Issue 7, (July 2016), 1-8

[27] D. Nayak, N. Bhatnagar & P. Mahajan, MACHINING STUDIES OF UNIDIRECTIONAL GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC (UD-GFRP) COMPOSITES PART 1: EFFECT OF GEOMETRICAL AND PROCESS PARAMETERS, Machining Science and Technology: An International Journal, 9:4, (2005), 481-501

[28] Jamal Y. Sheikh-Ahmad, Machining of Polymer Composites, Springer Science+Business Media, (2009)

[29] H. Hocheng, Machining technology for composite materials, Woodhead Publishing Limited, (2012)

[30] J. Paulo Davim, Machinability of Fibre-Reinforced Plastics, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, (2015)

[31] Jeff Sloan, Machining carbon composites: Risky business, Gardner Business Media Inc., (2019)

[32] M. Ramesh, A. Gopinath and C. Deepa, Machining Characteristics of Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review, Journal of Science and Technology Indian, Vol 9 (42), (November 2016)

[33] A.M. Abrao ,P.E. Faria, J.C. Campos Rubio, P. Reis, J. Paulo Davim, Drilling of fiber reinforced plastics: A review, Journal of Materials Processing Technology 186, (2007), 1–7

[34] DeFu Liu, YongJun Tang, W.L. Cong, A review of mechanical drilling for composite laminates, Composite Structures 94, (2012), 1265–1279

[35] U.A. Khashaba, Drilling of polymer matrix composites: A review, Journal of Composite Materials 47(15), (2012), 1817–1832

[36] Machining Composites Intelligently, Walter Tools S.A., USA, (9/2014)

[37] Gautam Shankar Tate, Aamir M. Shaikh, Anant Dattatray Awasare, Drilling on Glass Fiber Reinforced Composite Material for Enhancement of Drilling Quality: A Review, International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154 Volume 10, Number 1, (2017), 923-927

[38] G. S. Tate, A. M. Shaikh, V. S. Mane, 17th- 18th March 2017, Experimental and Analytical Investigation of Drilling on GFRC Material for Enhancement of Drilling Quality: A Review, Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), in: 6th National Conference RDME, (2017), M.E.S. College of Engineering, 55-60

[39] S.C. Lin, IK. Chen, Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed, Wear 194, (1996), 156-162

[40] N.S. Mohana, S.M. Kulkarni, A. Ramachandra, Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, Journal of Materials Processing Technology 186, (2007), 265–271

[41] Marilena Colt-Stoica, Dorel Anania, Cristina Mohora, Daniel Stoica, Defects in Composite Material caused by Drilling in Manufacturing Process, University Politehnica from Bucharest, (2013), 27-29 [42] I.S. Shyha, D.K. Aspinwall, S.L.Soo, S.Bradley, Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, (2009), 1008–1014

[43] J. Paulo Davim, Pedro Reis, Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study, Materials and Design 24, (2003), 315–324

[44] R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, Composites: Part A 31, (2000), 1107–1115

[45] Dhiraj Kumar, K. K. Singh & Redouane Zitoune, Experimental investigation of delamination and surface roughness in the drilling of GFRP composite material with different drills, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2:2, (2016), 47-56

[46] Mihai-Bogdan Lazar, Paul Xirouchakis, Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, International Journal of Machine Tools & Manufacture 51, (2011), 937–946

[47] D. Iliescu, D.Gehin, M.E.Gutierrez, F.Girot, Modeling and tool wear in drilling of CFRP, International Journal of Machine Tools & Manufacture 50, (2010), 204–213

[48] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites, Journal of Materials Processing Technology 185, (2007), 204–209

[49] Desh Bandhu, Sandeep Singh Sangwan and Mukesh Verma, A Review of Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Materials, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.4, No.3, (June 2014), 1749-1752

[50] Petr Masek, Pavel Zeman, Petr Kolar, DEVELOPMENT OF A CUTTING TOOL FOR COMPOSITES WITH THERMOPLASTIC MATRIX, MM Science Journal, October 2013, 422-427

[51] J.P. Davim, Pedro Reis, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, Composite Structures 59, (2003), 481–487

[52] D. Arola, M. Ramulu and D. H. Wang, Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite, Conposites: Part A 27A, (1996), 121-133

[53] Wolfgang Hintze, Dirk Hartmann, Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP, Procedia CIRP 8, (2013), 444 – 449

[54] Robert Voss, Lukas Seeholzer, Friedrich Kuster, Konrad Wegener, Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 18, (2017), 75–91

[55] Dhiraj Kumara & K.K. Singh, An approach towards damage free machining of CFRP and GFRP composite material: a review, Advanced Composite Materials, (2014), 1-15

[56] Luca Sorrentino and Sandro Turchetta, Cutting Forces in Milling of Carbon Fibre Reinforced Plastics, International Journal of Manufacturing Engineering, Volume 2014, (2014), 1-8

[57] Meltem Altin Karatas, Hasan Gokkaya, A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, Defence Technology xxx, (2018), 1-9

[58] Eckart Uhlmann, Sebastian Richarz, Fiona Sammler, Ralph Hufschmied, High Speed Cutting of carbon fibre reinforced plastics, Procedia Manufacturing 6, (2016), 113 – 123

[59] J.R. Ferreiraa, N.L. Coppini1, G.W.A. Miranda, Machining optimisation in carbon fbre reinforced composite materials, Journal of Materials Processing Technology 92-93, (1999), 135-140

[60] A. I. Azmi, R. J. T. Lin & D. Bhattacharyya, Experimental Study of Machinability of GFRP Composites by End Milling, Materials and Manufacturing Processes, 27:10, (2012), 1045-1050

[61] M. Rahman, S. Ramakrishna, J.R.S. Prakash, D.C.G. Tan, Machinability study of carbon fiber reinforced composite, Journal of Materials Processing Technology 89–90, (1999), 292–297

[62] END MACHINING OF COMPOSITE MATERIALS, Fraunhofer Institute for Production Technology IPT, Steinbachstrasse 17 52074 Aachen, Germany

[63] HIDEAKI ARISAWA, SATORU AKAMA, HARUHIKO NIITANI, High-Performance Cutting and Grinding Technology for CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 49 No. 3, (September 2012), 3-9

[64] Takeshi Yashiro, Takayuki Ogawa, Hiroyuki Sasahara, Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP, International Journal of Machine Tools & Manufacture 70, (2013), 63–69

[65] Haijin Wang, Jie Sun, Dandan Zhang, Kai Guo, Jianfeng Li, The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites, Composites: Part A, 91, (2016), 380–387

[66] WL Cong, Q Feng, ZJ Pei, TW Deines and C Treadwell, Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: using cutting fluid vs. cold air as coolant, Journal of Composite Materials.46 (14), (2011), 1745–1753

[67] M.K. Nor Khairusshima, C.H.Che Hassan, A.G.Jaharah, A.K.M.Amin, A.N.Md Idriss, Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic, Wear, 302, (2013), 1113–1123

[68] Nor Khairusshima, Muhamad Khairussaleha, Study on wear mechanism of solid carbide cutting tool in milling CFRP, J. Mater. Res., Vol. 31, No. 13, (July 14 2016), 1894-189969)

[69] Okuma Mx-45 VAE Operation Manual

[70] YG-1 Co. Routers, RTI104 Series Plain Shank Routers

[71] Rutapox°L 20 - SL set Technical Information

[72] HexForce® HS03K CARBON FABRIC G0939 SB1260 TCT, Hexcel

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο Ευάγγελος Γούλας είναι απόφοιτος από το 2017, του Τμήματος Επιστήμης των Υλικών, της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Πατρών. Εκεί παρακολούθησε τη κατεύθυνση μαθημάτων που ανήκουν στην επιστήμη και τη μηχανική των υλικών και η πτυχιακή του εργασία ήταν η μελέτη και σχεδίαση εμπρόσθιας δομής απορρόφησης δυνάμεων κατά την πρόσκρουση, σε μονοθέσιο τύπου Formula SAE.

Έχει πολυετή εμπειρία στο τομέα τη Μηχανικής τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό. Συγκεκριμένα, εργάζεται για περίπου δύο χρόνια ως Μηχανολόγος Μηχανικός στην ελληνική βιομηχανία. Εκπλήρωσε την εννιάμηνη στρατιωτική του θητεία στο Πολεμικό Ναυτικό ως Οδηγός και Συντηρητής Οχημάτων στο Τάγμα Υποστήριξης Αεροδρομίου Αεροπορίας Στρατού στην Πάχη Μεγάρων. Τέλος, έχει πραγματοποιήσει την τρίμηνη πρακτική άσκηση του στην εταιρία Gram Carbon στην Αθήνα, που κατασκευάζει αγωνιστικά πλαίσια ποδηλάτων και ολοκληρωμένα ποδήλατα αγωνιστικών προδιαγραφών από σύνθετα υλικά. Εκεί του δόθηκε η ευκαιρία να προεκτείνει την εργασία του, προς ολοκλήρωση της εκπαίδευσης του.

Είναι γνώστης της Αγγλικής γλώσσας καθώς και των λογισμικών ανάλυσης δεδομένων και διαχείρισης γραφείου MS Office. Ξέρει να χειρίζεται ποικιλία σχεδιαστικών προγραμμάτων, όπως και λογισμικά προγραμματισμού εργαλειομηχανών CNC-CAM.

Τέλος, έχει διακριθεί πολλάκις ως μέλος της ομάδας Formula SAE "UoP Racing" του Πανεπιστημίου Πατρών, κατά τη θητεία του ως μηχανικός κατασκευής αμαξώματος και συνθέτων υλικών. Διακρίθηκε συλλογικά με τη συγκεκριμένη ομάδα κατά την περίοδο 2014-2016, η οποία κατέκτησε και την πρώτη θέση στον διεθνή διαγωνισμό Formula Student Czech 2015.

Όλα τα παραπάνω τον οδήγησαν να φοιτήσει και να ολοκληρώσει το διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών» που οργανώνεται από το τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Η ακαδημαϊκή και επαγγελματική του σταδιοδρομία συνεισέφεραν να χτίσει εργασιακό ήθος και χαρακτήρα που τον καθιστά αξιόπιστο στην μετέπειτα επαγγελματική του πορεία.

Ευάγγελος Γούλας

E-Mail: vagelisgoulas156@gmail.com

Επιστήμονας Υλικών B.Sc. - Μηχανικός Υλικών M.Sc.