



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Σχολή Μηχανικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΣΕ
ΙΝΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ



ΦΟΙΤΗΤΕΣ: Γεωργιάλας Κωνσταντίνος (Α.Μ. 6191)
Βενέτης Κωνσταντίνος (Α.Μ. 6223)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ
ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ
Δεκέμβριος 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο "*Μηχανουργικές κατεργασίες κοπής σε ινώδη σύνθετα υλικά*" εκπονήθηκε στο εργαστήριο CAM & CNC του τμήματος Εργαλειομηχανών του πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Πιο συγκεκριμένα η παρούσα εργασία εστιάζει στην μελέτη των σύνθετων υλικών και κατά κύριο λόγο στις μηχανικές ιδιότητες αυτών μετά από την κατεργασία της διάτρησης.

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στους καθηγητές του τμήματός μας κ. Σπυρίδων Γραμματικόπουλο και κ. Σωτήριο Τσίρκα για τον χρόνο που μας αφιέρωσαν καθώς και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Τέλος θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για την εμπιστοσύνη και κατανόηση που έδειξαν στις επιλογές που κάναμε αυτά τα χρόνια καθώς και για την στήριξη που είχαμε όλο αυτό το διάστημα της φοιτητικής μας ζωής.

Σας ευχαριστούμε πολύ
Κώστας Γεωργογάλας &
Κωστας Βενέτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υλικά υπάρχουν στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων από αρχαιοτάτων χρόνων μέχρι και σήμερα. Στις μέρες μας έχει αυξηθεί τόσο η τεχνολογία τους όπου μηχανικοί και επιστήμονες καταφέρνουν να συνδυάσουν διάφορα μέταλλα, κεραμικά ή πολυμερή υλικά για την δημιουργία σύνθετων υλικών. Στόχος αυτών είναι να βελτιωθούν οι συνδυασμοί των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών. Με λίγα λόγια ένα σύνθετο υλικό καταφέρνει να έχει καλύτερες ιδιότητες από τα παραδοσιακά υλικά.

Αυτή η εξάπλωση λοιπόν των σύνθετων υλικών βοήθησε πρώτον στην ανακάλυψη νέων μεθόδων κατεργασίας και δεύτερον οδήγησε στην βελτίωση των ήδη υπάρχων παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας . Ορισμένες από αυτές τις κατεργασίες όπως αναφέρονται και μέσα στο κείμενο είναι η τórνευση , η λείανση , η διάτρηση και το φρεζάρισμα.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε και θα αναλύσουμε τις κατεργασίες κοπής των σύνθετων δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην κατεργασία της διάτρησης.

Όλα τα παραπάνω αναλύονται εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα γίνεται πλήρης αναφορά στο τί είναι τα σύνθετα υλικά, πως ταξινομούνται και που εφαρμόζονται καθώς και με ποιές κατεργασίες ασχολούνται.

ABSTRACT

Composite materials present in the daily lives of people from ancient times until today. Nowadays has grown so their technology where engineers and scientists manage to combine different metals, ceramic or polymer materials to create composites. The aim of these is to improved combinations of mechanical properties of materials. In short a composite material manages to have better qualities than traditional materials.

This spread well composite materials helped first in discovering new treatment methods and secondly led to improvement of the already existing traditional machining methods. Some of these treatments as referred to in the text is the turning, grinding, drilling and milling.

In this work we will deal with and analyze composite cutting processes with a greater emphasis on drilling processing.

All the above are presented in detail in the following sections. Concrete is made complete reference on what is composite materials, that are ordered and applied and with what processes are involved.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 "ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ" | 1 |
| 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ..... | 1 |
| 1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ..... | 5 |
| 1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ- ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ) ... | 5 |
| 1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ | 7 |
| 1.4.1 Φυσικά – Συνθετικά σύνθετα | 7 |
| 1.4.2 Σύνθετα πολυμερούς μήτρας..... | 9 |
| α) Θερμοσκληρυνόμενες..... | 10 |
| β) Θερμοπλαστικές | 11 |
| γ) Ελαστομερείς..... | 11 |
| 1.4.3 Σύνθετα μεταλλικής μήτρας..... | 12 |
| 1.4.4 Σύνθετα κεραμικής μήτρας..... | 12 |
| 1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ..... | 13 |
| 1.5.1 Ανάλογα με το μέγεθος του ενισχυτικού υλικό | 14 |
| 1.5.2 Με βάση την προέλευση του υλικού | 14 |
| 1.5.3 Ανάλογα με το είδος της ενίσχυσης | 15 |
| α) Κοκκώδη..... | 15 |
| β) Ινώδη..... | 15 |
| γ) Διαστρωματωμένα | 17 |
| 1.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ..... | 18 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 "ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ" | 23 |
| 2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ | 23 |
| 2.2 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ | 25 |

| | |
|--|----|
| α) Τόρνευση..... | 25 |
| β) Φρεζάρισμα..... | 27 |
| γ) Λείανση | 29 |
| δ) Διάτρηση..... | 31 |
| 2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ..... | 32 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 "ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ" | 37 |
| 3.1. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ | 37 |
| 3.1.1. Είδη τόρνευσης..... | 37 |
| 3.1.2. Συνθήκες Κατεργασίας..... | 41 |
| 3.1.3. Κοπτικά Εργαλεία | 42 |
| 3.2. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ..... | 44 |
| 3.3. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΛΕΙΑΝΣΕΩΝ..... | 48 |
| 3.3.1. Λειαντική κατεργασία | 49 |
| 3.3.2. Δυνάμεις κοπής και ειδική ενέργεια κοπής..... | 51 |
| 3.3.3. Ποιότητα Κατεργασίας | 53 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 "ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ" | 57 |
| 4.1. ΚΟΠΗ ΜΕ LAZER..... | 57 |
| 4.2. ΥΔΡΟΚΟΠΗ | 64 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 "ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ" | 68 |
| 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 68 |
| 5.2. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ | 69 |
| 5.3. ΔΥΝΑΜΗ ΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ ΣΤΡΕΨΗΣ..... | 71 |
| 5.4. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ..... | 74 |
| 5.5. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ | 77 |
| 5.6. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 78 |

| | |
|---|------------|
| 5.7. ΑΠΟΦΥΛΛΩΣΗ..... | 79 |
| 5.8. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ..... | 84 |
| 5.8.1. Εξώθηση ενός ισότροπου φύλλου | 85 |
| 5.8.2 Επίδραση της γεωμετρίας τρυπανιών στην αποκόλληση | 87 |
| 5.8.3. Εξώθηση ενός ανισότροπου φύλλου..... | 92 |
| 5.8.4. Συνιστώμενες πρακτικές..... | 93 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 "Συμπεράσματα-Επίλογος" | |
| 6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 97 |
| 6.2. ΕΠΙΛΟΓΟΣ..... | 99 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 | |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 100 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

" ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ "

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Διαχρονικά στην ιστορία της ανθρωπότητας, η σταδιακή εξέλιξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με την ανάγκη κάλυψης νέων αναγκών οδήγούσε στη δημιουργία νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Ιδιαίτερα, όμως, κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια εκρηκτική ανάπτυξη δημιουργίας νέων υλικών που, κυρίως, οφείλεται στην εξέλιξη της επιστήμης των πολυμερών. Έτσι, κατά το διάστημα αυτό, έχουν κάνει την εμφάνισή τους υλικά με ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Η ύπαρξη των υλικών αυτών δεν είναι όμως, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποκλειστικά επίτευγμα των τελευταίων δεκαετιών. Είναι φανερό ότι ο άνθρωπος γνώριζε πολύ νωρίτερα ότι μπορεί να συνδυάσει δύο ή περισσότερα υλικά για να πετύχει κάποιες ιδιαίτερες ιδιότητες που τον εξυπηρετούσαν. Αναζητώντας την ιστορία των σύνθετων υλικών, στην ουσία, είναι σαν να ρίχνουμε μια ματιά στην ταυτόχρονη ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Οι ιδιότητες αυτές, κατά τα παλαιότερα χρόνια, έβρισκαν εφαρμογές κυρίως στο χώρο των κατασκευών, της ναυσιπλοΐας, της κατασκευής όπλων και της γραφικής ύλης.¹

Από τους προϊστορικούς και πρώτους ιστορικούς χρόνους, όπου τα σπίτια ήταν φτιαγμένα από λάσπη και άχυρο (Εικόνα 1.1), μέχρι και τον 19ο αιώνα, η κατασκευή και η χρήση των συνθέτων υλικών βασιζόταν σε εμπειρικούς κανόνες και μια στοιχειώδη τεχνογνωσία. Στην Αρχαία Αίγυπτο, οι Ισραηλίτες πρόσθεταν άχυρα στα τούβλα για τη βελτίωση της δομικής τους συμπεριφοράς (Έξοδος). Στην Μεσοποταμία, περί το 2500 π.Χ., λύθηκε το πρόβλημα της επικάλυψης των τούβλινων τοίχων με την ενσωμάτωση πέτρας ή κώνων από πηλό σε κρίσιμα σημεία του τοιχίου, ενώ ταυτόχρονα τα διακοσμούσαν. Στην ίδια περιοχή γύρω στο 1000 π.Χ. εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό

τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους εφαρμόστηκε η ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. ¹



Εικόνα 1.1 : Λεπτομέρεια από κτίσμα. Διακρίνονται τα πλέγματα από το άχυρο μέσα στο τούβλο από πηλό ¹

Περί το 1000 πχ στη Δυτική Ασία και στην Κίνα, κατασκευάστηκε ένα σύνθετο τόξο με αλληπάλληλες στρώσεις κεράτου. Είχε σχεδιαστεί να είναι μικρού μεγέθους και συγχρόνως ισχυρό, έτσι ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιείται από τον αναβάτη άρματος. Η περίοδος άνθισης και επιβολής των Μογγόλων στους γειτονικούς λαούς συνδυάστηκε με την κατασκευή ενός είδος τόξου που περιείχε μεγαλύτερη ποικιλία υλικών και ήταν ιδιαίτερα ευλύγιστο και ελαφρύ καθιστώντας το έτσι, πολύτιμο όπλο στα χέρια των ιππέων τους. Το τόξο αυτό ήταν κατασκευασμένο από ένα είδος κεράτου συνδεδεμένο με διάφορες στρώσεις από τένοντες ζώων. Οι Ιάπωνες πολεμιστές Σαμουράι χρησιμοποιούσαν πολυστρωματικά μέταλλα για να προσδώσουν στα σπαθιά τους επιθυμητές ιδιότητες. Στην αρχαία Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν σύνθετες κατασκευές για όπλα, όπως οι ασπίδες. Το σώμα της ασπίδας κατασκευαζόταν από κλαδιά ιπιάς, τα οποία μπλέκονταν μεταξύ τους και από στρώματα δερμάτων βοδιών, τα οποία στερεώνονταν από μεταλλική ταινία. Στην εξέλιξή τους κατασκευάζονταν ολόκληρες από μεταλλικά φύλλα. Συνδύαζε την υψηλή δυσκαμψία σχήματος με την πολύ υψηλή αντοχή σε διάτρηση από τα εχθρικά δόρατα και βέλη. Ο Όμηρος στην Ιλιάδα περιγράφει την ασπίδα του Αχιλλέα, λέγοντας ότι την αποτελούσαν επτά εναλλασσόμενες στρώσεις από δέρμα-χρυσό και σίδηρο. Η ασπίδα μπορεί να συγκριθεί μόνο με τους σημερινούς προηγμένους θώρακες των μοντέρνων αρμάτων μάχης και τα αλεξίσφαιρα γιλέκα. Η δομή των κατασκευών αυτών είναι πολύστρωτη από διαφορετικά υλικά (υφάσματα ινών αραμιδιού και πολυεστερικών φιλμ για τα αλεξίσφαιρα γιλέκα και συνδυασμοί χάλυβα

– χαλκού – κεραμικών για τα άρματα). Τέλος, στις πανοπλίες και τα ξίφη του Μεσαίωνα γινόταν χρήση της ίδιας τεχνικής. ¹

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες ιστορίες ανάπτυξης έχει ένα άλλο φυσικό σύνθετο υλικό, το χαρτί. Ο πάπυρος αποτέλεσε την πρώτη βασική γραφική ύλη στην αρχαιότητα. Η χρήση του διήρκεσε μέχρι το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Το ομώνυμο υδρόφοβο φυτό, αφθονούσε στις όχθες του Νείλου, αλλά και στις αρχαίες Συρακούσες (Εικόνα 1.2). Οι κατασκευαστές χώριζαν το παχύ τριγωνικό του στέλεχος σε φύλλα, τα οποία αποτελούσαν τους κυλίνδρους του παπύρου. Έπειτα, εφάρμοζαν αυτές τις λωρίδες σταυροειδώς, τη μία με την άλλη, τις κολλούσαν και τις χτυπούσαν μ' ένα ξύλινο σφυράκι, ώστε να δημιουργηθεί μια επιφάνεια όσο το δυνατόν πιο ενιαία. Μ' ένα ελαφρό κολλάρισμα, μπορούσε κανείς να γράψει στον πάπυρο, ο οποίος, πρέπει να σημειωθεί, είχε μεγάλη αντοχή και διάρκεια. ¹



Εικόνα 1.2 : Πάπυρος και το ομώνυμο φυτό ¹

Στον 20ο αιώνα, ο συνδυασμός μεταλλικών ράβδων, τσιμέντου και αδρανών οδήγησε στο σχεδιασμό του οπλισμένου σκυροδέματος. Η εξέλιξη των σύνθετων υλικών δεν παρουσιάζει τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης διαμέσου των αιώνων. Μέχρι τον 19ο αιώνα μ.Χ η εξέλιξη αυτή είναι πολύ μικρή και τα σύνθετα υλικά του 19ου αιώνα δεν διαφέρουν πολύ από αυτά των Αρχαίων Αιγυπτίων, Αρχαίων Ελλήνων, κ.λπ., ούτε σε ποιότητα ούτε σε τεχνική κατασκευής. Η πραγματική εκρηκτική εξέλιξη των σύνθετων υλικών σημειώνεται τον 20ο αιώνα και ιδιαίτερα κατά τα τελευταία 30 χρόνια παράλληλα με την εξέλιξη των πολυμερών. Η εμφάνιση των πολυμερικών υλικών είχε σαν αποτέλεσμα την αντικατάσταση των μετάλλων σε πολλές κατασκευές και αυτό οφείλεται στη συμπεριφορά τους, την επάρκειά τους και το χαμηλό κόστος

τους. Στις αρχές της δεκαετίας του 20ου αιώνα, η Χημεία έπαιξε έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στην ανάπτυξη των πολυμερικών υλικών, δημιουργώντας μια νέα επιστήμη, την επιστήμη των πολυμερών, που στη συνέχεια αναπτύχθηκε τόσο από τους ακαδημαϊκούς, όσο και από τους βιομηχανικούς ερευνητές. Τα συνθετικά πολυμερή ερευνήθηκαν στην Ευρώπη στις αρχές του 20ου αιώνα. Προηγμένα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται μαζικά το 1935 με τη χρήση ινών υαλοβάμβακα ως ενισχυτικό πληρωτικό μέσο σε πλαστικά υλικά. Αυτά τα πρώιμα πλαστικά χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε πολεμικές επιχειρήσεις. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 κατασκευάστηκαν τα πρώτα διαφανή πλαστικά (με ενίσχυση ινών γυαλιού), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή πλαστικών επικαλύψεων (καρίνα) στα σκάφη, για σκελετούς αυτοκινήτων και καμπίνες φορτηγών. Η ιστορία των πολυμερικών σύνθετων υλικών ξεκινάει με την παραγωγή της εποξειδικής ρητίνης το 1939. Το 1963, κατόπιν καταλλήλων βελτιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στις ίνες άνθρακα, οδήγησαν στη χρήση αυτών σε ειδικές εφαρμογές, όπου το κόστος δεν αποτελούσε αποτρεπτικό παράγοντα, όπως στο σχεδιασμό αεροσκαφών και παραγωγή αθλητικών ειδών. Στην τελευταία δεκαετία του 20ου αιώνα, οι αραμιδικές ίνες, οι ίνες άνθρακα καθώς και άλλα υλικά ενισχύουν τα υλικά μήτρας, αφού επιδεικνύουν εξαιρετικά υψηλά μέτρα ελαστικότητας. Μετά τις εξελίξεις αυτές, η εφαρμογή των Σύνθετων Υλικών επεκτάθηκε σχεδόν σε όλους τους τομείς της σύγχρονης ζωής (Εικόνα 1.3).^{1,2}



Εικόνα 1.3 : Νεροχύτης κουζίνας από μαρμαρόσκονη και ρητίνη²

1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ

Για να σχεδιάσουν σύνθετα υλικά, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί έχουν συνδυάσει διάφορα μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή για να παράγουν μια νέα γενιά υλικών. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά έχουν δημιουργηθεί για να βελτιωθούν οι συνδυασμοί των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών όπως η δυσκαμψία, η δυσθραυστότητα αλλά και η αντοχή σε υψηλές και θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Τα Σύνθετα Υλικά είναι πολυφασικά υλικά τα οποία μπορούν να οριστούν ως ένας συνδυασμός από δύο ή περισσότερα υλικά που είναι ευδιάκριτα με φυσικό τρόπο και εύκολα διαχωρίσιμα με μηχανικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα βάση του Agarwal έχουμε τον εξής ορισμό <<Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους>>. ^{3,4}

1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα Σύνθετα Υλικά μπορούν να δημιουργηθούν με την ανάμειξη διαφορετικών υλικών με τέτοιο τρόπο ώστε οι διαφορετικές φάσεις να μην σχηματίζονται από αντιδράσεις, μετασχηματισμούς φάσεων ή άλλα φαινόμενα. Οι συνιστώσες φάσεις πρέπει να είναι χημικά ανόμοιες και να διαχωρίζονται με μια διακριτή επιφάνεια. Η βασική διαφορά μεταξύ των μιγμάτων και των Σύνθετων Υλικών είναι ακριβώς ότι τα δύο κύρια συστατικά, η μήτρα και η φάση διασποράς, στα Σύνθετα Υλικά παραμένουν αναγνωρίσιμες, πράγμα που μπορεί να μην συμβαίνει στα μίγματα. ^{3,4,5}

Οι ιδιότητες κάθε υλικού, είτε αυτό είναι απλό ή σύνθετο, μπορούν να διακριθούν σε μηχανικές και μη μηχανικές. Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι η αντοχή, η ακαμψία, η ολκιμότητα, η σκληρότητα και η συμπεριφορά του σε κόπωση, ερπυσμό, χαλάρωση και άλλα. Οι μη μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι η πυκνότητα, η θερμική συμπεριφορά, η αντίσταση σε διάβρωση και άλλα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι ότι διαθέτουν τις περισσότερες

φορές τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν και επιπλέον ιδιότητες που κανένα από τα πρώτα υλικά δεν είχε.

Με αυτόν τον τρόπο οι ιδιότητες που κάνουν τα σύνθετα υλικά ανώτερα από τα κοινά είναι:

- 1.Αντοχή
- 2.Ακαμψία
- 3.Αντίσταση στη διάβρωση
- 4.Αντίσταση στη φθορά
- 5.Χαμηλό κόστος
- 6.Μείωση του βάρους της κατασκευής
- 7.Συμπεριφορά σε κόπωση
- 8.Θερμική μόνωση
- 9.Θερμική αγωγιμότητα
- 10.Ακουστική μόνωση αντίσταση στην κόπωση και στις δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Είναι αυτονόητο ότι ένα Σύνθετο Υλικό δεν μπορεί να διαθέτει όλες τις ιδιότητες στον βέλτιστο βαθμό ταυτόχρονα. Ανάλογα, όμως, με την εφαρμογή, το επιθυμητό είναι η δημιουργία υλικού που να πλεονεκτεί και να ανταποκρίνεται καλύτερα στις συγκεκριμένες κάθε φορά ανάγκες. Αυτή ακριβώς η απαίτηση καθίσταται εφικτή στην περίπτωση των Σύνθετων Υλικών γιατί οι επιθυμητές μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλα υλικά σαν συστατικά

Από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα είναι η έλλειψη ολκιμότητας, λόγω της μηχανικής συμπεριφοράς τους στην οποία απουσιάζει πλαστική περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν “προειδοποιήσεις” όταν η κατασκευή κοντεύει να αστοχήσει.

Τέλος, η μικρή δυσκαμψία που παρουσιάζουν (μικρό μέτρο ελαστικότητας) μπορεί να θεωρηθεί άλλοτε ως πλεονέκτημα, αν επιθυμούμε από το υλικό να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς να αστοχεί, και άλλοτε ως μειονέκτημα, αν ζητείται σε κάποια σημεία της κατασκευής μεγάλη δυσκαμψία.

Ακόμα, αρκετά σύνηθες είναι το φαινόμενο του ερπυσμού (ιδίως στα σύνθετα με ενίσχυση ινών γυαλιού) υπό συνθήκες υψηλής και συνεχούς φόρτισης, η αντοχή σε τριβή είναι γενικά μικρή, η σύνδεση και εγκατάσταση εξαρτημάτων απαιτεί προσεκτική σχεδίαση των κατασκευαστικών λεπτομερειών που αυξάνει το κόστος και

τις πιθανότητες τοπικών αστοχιών, η ευπάθεια σε φωτιά των σύνθετων υλικών είναι πολύ αυξημένη και οι μέθοδοι παραγωγής είναι πολύπλοκες σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων, απαιτώντας ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος και έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό.^{1,3,6}

1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε τα Σύνθετα Υλικά διαχωρίζονται σε φάσεις. Η κύρια συνεχής φάση των Σύνθετων Υλικών είναι η μήτρα. Η μήτρα εκτελεί διάφορες κρίσιμες λειτουργίες, δηλαδή διατηρεί τα συστατικά στον κατάλληλο προσανατολισμό προσδίδοντας έτσι το σχήμα και την ακαμψία του υλικού. Επιπλέον, η μήτρα ενισχύει την κατανομή των συστατικών μέσα στο Σύνθετο υλικό και προστατεύει τη φάση διασποράς από την τριβή και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που προκαλούν την αποδόμησή της.

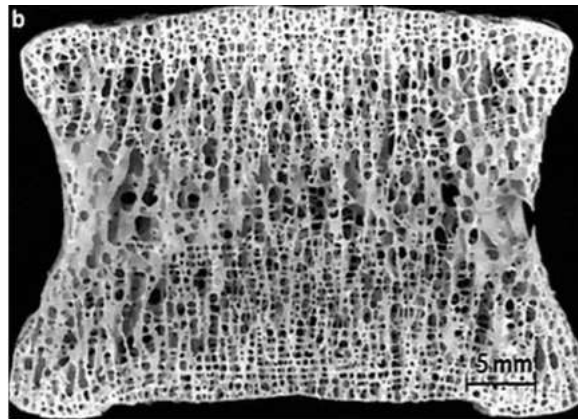
Η δευτερεύουσα φάση ονομάζεται φάση διασποράς ή ενισχυμένη φάση ή έγκλεισμα. Τα εγκλείσματα διαφέρουν σε μέγεθος, γεωμετρία και σύσταση. Η ενισχυμένη φάση που είναι σφηνωμένη στη μήτρα είναι συνήθως ανθεκτικότερη από αυτήν. Η ενισχυμένη φάση προσδίδει την αντοχή και την ακαμψία στο Σύνθετο Υλικό. Ο τύπος και η μορφή της ενίσχυσης επιλέγεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού του Σύνθετου Υλικού. Μερικές από τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση είναι η υψηλή αντοχή, υψηλό μέτρο ελαστικότητας, μικρό βάρος, περιβαλλοντική αντοχή, χαμηλό κόστος, καλή επεξεργασιμότητα και ευκολία κατασκευής.^{5,7}

1.4.1 Φυσικά – Συνθετικά σύνθετα

Από την άλλη τα σύνθετα υλικά μπορούμε να τα ταξινομήσουμε με διάφορους τρόπους και σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο που θα επιλέξουμε κάθε φορά .

Δηλαδή μια κατηγορία είναι τα φυσικά σύνθετα υλικά τα οποία μπορούν να βρεθούν στη φύση. Για παράδειγμα, δυο φυσικά σύνθετα υλικά είναι το ξύλο το οποίο αποτελείται από ανθεκτικές και εύκαμπτες ίνες κυτταρίνης που περιβάλλονται και συγκρατούνται από ένα πιο δύσκαμπτο υλικό τον λιγνίτη και τα οστά που αποτελούνται από ανθεκτικές και μαλακές πρωτεΐνες κολλαγόνου και από το σκληρό και εύθραυστο ορυκτό (Εικόνα 1.4,1.5).

Σε αντίθεση με τα συνθετικά σύνθετα υλικά που είναι σύγχρονα συστήματα υλικών των οποίων τα συστατικά παράγονται με τεχνητό τρόπο ξεχωριστά το καθένα και μετά συνδυάζονται με ελεγχόμενο τρόπο προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή δομή, οι ιδιότητες και η γεωμετρία του τεμαχίου.⁵



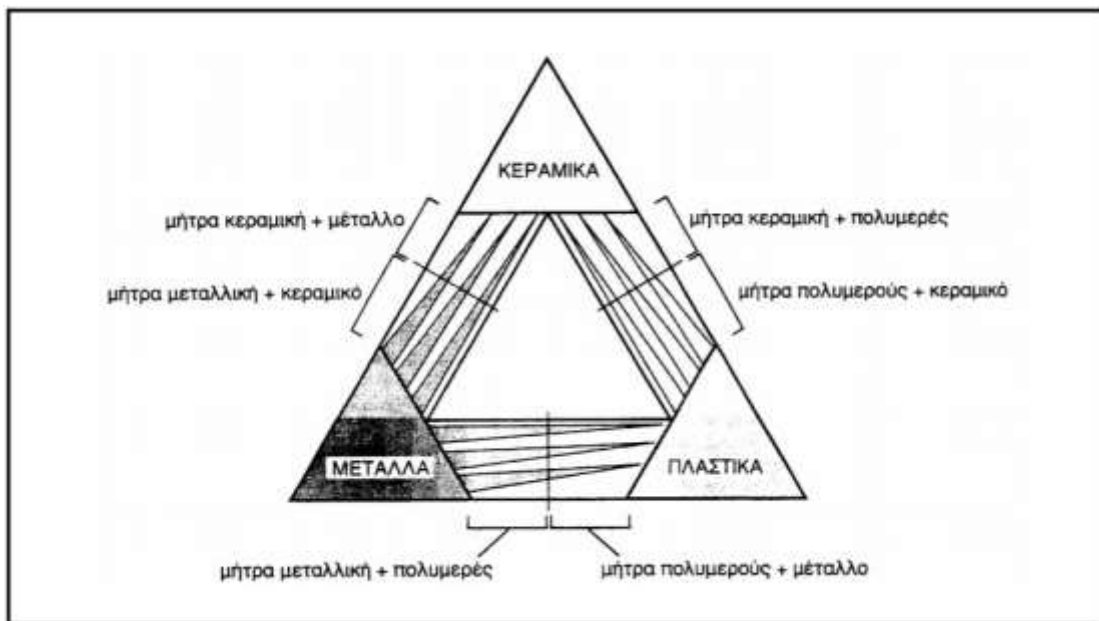
Εικόνα 1.4: Βλέπουμε την διαμήκη τομή οστού.⁵



Εικόνα 1.5: Εδώ βλέπουμε από τι αποτελείται ένα φυσικό σύνθετο, το ξύλο.⁵

1.4.2 Σύνθετα πολυμερούς μήτρας

Στη συνέχεια η επόμενη κατηγορία που μπορούμε να τα ταξινομήσουμε είναι σύμφωνα με το υλικό που έχουμε επιλέξει για να χρησιμοποιηθεί για μήτρα. Τα σύνθετα υλικά κατηγοριοποιούνται συνήθως σε : σύνθετα μεταλλικής μήτρας (MMCs) , σε σύνθετα κεραμικής μήτρας (CMCs) και σε σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (PMCs).(Εικόνα 1.6)



Εικόνα 1.6: Κατηγορίες σύνθετων υλικών³

Όσο αφορά τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας υπάρχουν διαθέσιμα πολλά διαφορετικά πολυμερή υλικά ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή τους. Τα Συνθετικά πολυμερή είναι τα κλασσικά πολυμερή που βασίζονται στο πετρέλαιο και για την παραγωγή των οποίων χρησιμοποιούνται ορυκτοί πόροι. Από την άλλη έχουμε τα Φυσικά πολυμερή που είναι τα κατασκευασμένα από ανανεώσιμες πηγές που μπορούν να βιοδιασπώνται ή των οποίων τα προϊόντα αποδόμησης είναι μη τοξικά.³

Οι πολυμερικές μήτρες είναι εκείνες που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (PMC) αποτελούνται από ένα πολυμερές ως μήτρα και ίνες ή κόκκους ως το μέσο ενίσχυσης. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και

μάλιστα σε μεγάλες ποσότητες λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου, την ευκολία παραγωγής τους και το χαμηλό τους κόστος. Η ταξινόμησή τους μπορεί να γίνει σύμφωνα με τον τύπο ενίσχυσης (άνθρακας, γυαλί, αραμίδιο κ.α.) , ανάλογα με τις εφαρμογές τους, αλλά συνήθως κατατάσσονται με το είδος του πολυμερούς που χρησιμοποιείται ως υλικό μήτρας του σύνθετου και διακρίνονται σε 3 κατηγορίες : α) θερμοσκληρυνόμενες, β) θερμοπλαστικές και γ) ελαστομερείς μήτρες.^{3,5}

α) Θερμοσκληρυνόμενες

Όσον αφορά τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, η ολοκλήρωση του πολυμερισμού κατά τη θέρμανση επιτυγχάνεται με την βοήθεια κατάλληλων σκληρυντών και οδηγεί στον σχηματισμό ενός ισχυρού τρισδιάστατου δικτύου με σταυροδεσμούς (cross-linking) . Η πυκνότητα των σταυροδεσμών καθορίζεται από τη διαδικασία της θερμικής κατεργασίας (curing). Τα θερμοσκληρυνόμενα, εξαιτίας της τρισδιάστατης δομής των σταυροδεσμών, διακρίνονται για την σταθερότητά τους, την θερμική του αντοχή και τη χαμηλή διαλυτότητα. Επειδή η χημική αντίδραση που εξελίσσεται κατά την θέρμανση είναι μη αναστρέψιμη, το αποτέλεσμα είναι η μόνιμη σκλήρυνση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Τα υλικά αυτά όταν επαναθερμανθούν δεν ρευστοποιούνται αλλά αν θερμανθούν σε μεγάλο βαθμό αποσυντίθενται. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι ιδιότητές του δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία. Οι ιδιότητες αυτές (υψηλή δυσκαμψία, μειωμένη αναφλεξιμότητα, υψηλό σημείο τήξης, επιφανειακή σκληρότητα) καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό και το πεδίο εφαρμογής των συγκεκριμένων υλικών. Οι πιο γνωστές θερμοσκληρυνόμενες μήτρες για σύνθετα υλικά είναι οι εποξειδικές ρητίνες(κόλλες, σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού), οι ακόρεστοι πολυεστέρες (UP), οι φαινόλες(ηλεκτρονικός/ηλεκτρολογικός εξοπλισμός), οι βυνιλεστέρες κ.α.^{5,8}

β) Θερμοπλαστικές

Από την άλλη πλευρά, τα θερμοπλαστικά υλικά δεν αποσυντίθενται κατά την θέρμανση. Μπορούν, κατ' επανάληψη, να μαλακώσουν όταν θερμαίνονται και να σκληρύνουν όταν ψύχονται. Στην πραγματικότητα, ο ανακυκλώσιμος χαρακτήρας αυτών των πολυμερών είναι πολύ σημαντικός. Ανάλογα με το ιστορικό της προηγούμενης χρήσης τους και των συνθηκών, τα θερμοπλαστικά υλικά μπορούν να αναδιαμορφωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν στην ίδια ή σε άλλες εφαρμογές όπως πριν από την επίδραση θέρμανσης και πίεσης. Βέβαια, με την επανάληψη των κύκλων θέρμανσης –ψύξης, υπάρχει σταδιακή υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους ανάλογα με το πολυμερές και έτσι υπάρχει περιορισμός στο πλήθος των επαναλαμβανόμενων κύκλων που μπορεί να εφαρμοστούν. Οι πολυμερείς αλυσίδες των θερμοπλαστικών χαρακτηρίζονται από σχετικά ασθενείς δυνάμεις έλξης μεταξύ των αλυσίδων, οι οποίες είναι εύκολο να υπερνικηθούν όταν το υλικό θερμαίνεται, σε αντίθεση με τα θερμοσκληρυνόμενα, όπου οι μοριακοί σταυροδεσμοί είναι ισχυροί χημικοί δεσμοί που, όπως αναφέρθηκε, δεν αποσυντίθενται παρά μόνο σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Τα θερμοπλαστικά, παρότι μειονεκτούν στις υψηλές θερμοκρασίες, από την άλλη μεριά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή στα φαινόμενα ρηγματώσεων. Οι πιο γνωστές ρητίνες αυτής της κατηγορίας είναι το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυβινιλοχλωρίδιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), τα πολυαμίδια (Nylon) , πολυτετραφθοροαιθυλένιο (teflon) .^{5,8}

γ) Ελαστομερείς

Τέλος οι ελαστομερείς μήτρες είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή σε διακλαδισμένες αλυσίδες οι οποίες έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Διαθέτουν μικρή δυσκαμψία με αποτέλεσμα αν υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά την άρση του εξωτερικού φορτίου που τις προκάλεσε. Οι χαρακτηριστικότεροι αντιπρόσωποι των ελαστομερών είναι το καουτσούκ, οι σιλικόνες κ.α.^{5,8}

1.4.3 Σύνθετα μεταλλικής μήτρας

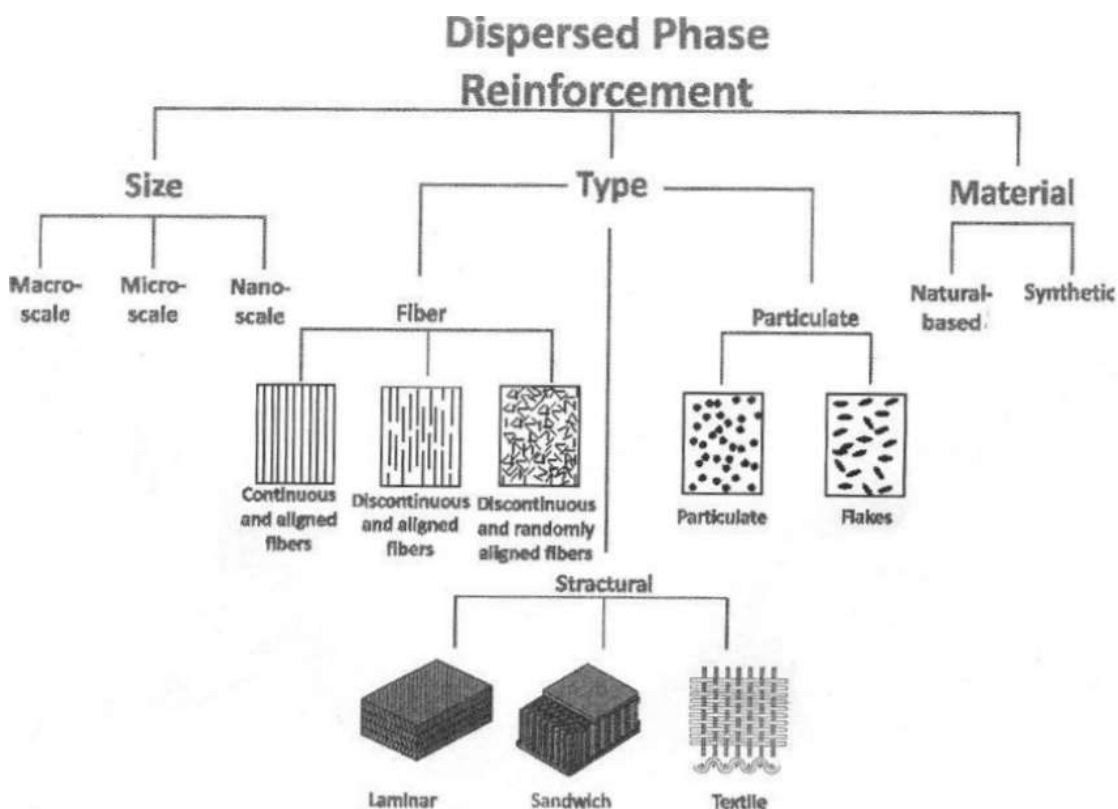
Στη συνέχεια στα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, η μήτρα είναι ένα όλκιμο μέταλλο. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τα αντίστοιχα μέταλλα από τα οποία αποτελούνται, κάνοντάς τα ιδανικά για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Άλλο ένα πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι η μη ευφλεκτότητα σε σχέση με τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Οι πιο γνωστές μεταλλικές μήτρες που χρησιμοποιούνται είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, το νικέλιο, το τιτάνιο και ο χαλκός. Η ενισχυτική φάση μπορεί να είναι σε μορφή κόκκων, συνεχών και ασυνεχών ινών όπως ίνες άνθρακα, βορίου, οξειδίου του αλουμινίου (TiO_2) και καρβίδιο του πυριτίου (SiC).^{3,8,9}

1.4.4 Σύνθετα κεραμικής μήτρας

Ως κεραμικά υλικά ορίζονται 'όλα τα ανόργανα μη μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C). Τα κεραμικά είναι υλικά δύσκαμπτα, εμφανίζουν μεγάλη σκληρότητα, έχουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη και πολύ μικρή σε εφελκυσμό, έχουν χαμηλή πυκνότητα ενώ το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι παρουσιάζουν υψηλότερη πυρίμαχη, αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι η μικροδομή τους επηρεάζει σημαντικά τη μακρομηχανική συμπεριφορά τους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά ίνες ή κόκκοι. Το πλέον διαδεδομένο σύνθετο υλικό κεραμικής μήτρας είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα είναι από μόνο του ένα σύνθετο υλικό το οποίο περιέχει ανόργανα υλικά και συγκεκριμένα άμμο, χαλίκι, γαρμπίλι και σκύρα και προκύπτει όταν συνδυαστούν με τσιμεντοκονία και νερό. Παραδοσιακά κεραμικά υλικά είναι ο πυλός, το τσιμέντο, η άργιλος και το γυαλί, υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως με πληθώρα εφαρμογών από την αρχαιότητα.^{3,8,9}

1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Το ενισχυτικό μέσο στα σύνθετα υλικά επιτελεί πολλές σημαντικές λειτουργίες. Κατά κύριο λόγο οι επιθυμητές ιδιότητες επιτυγχάνονται επιλέγοντας τον κατάλληλο τύπο και υλικό ενίσχυσης. Έχουν επιφορτιστεί με το να φέρουν εις πέρας τις αυξημένες μηχανικές απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν τα σύνθετα υλικά, μιας και είναι εκείνα που παραλαμβάνουν τα φορτία. Γι αυτό και οι ενισχύσεις που χρησιμοποιούνται έχουν μηχανικές ιδιότητες κατά πολύ ανώτερες σε σχέση με το υλικό που αποτελεί τη μήτρα, προσδίδοντας στο σύνθετο υλικό αυξημένη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας. Οι ενισχύσεις που χρησιμοποιούνται είναι πολλές και διαφέρουν ως προς το μέγεθος, τη γεωμετρία και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 1.7) εμφανίζονται οι κύριοι τύποι ενισχύσεων που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά.^{1,10}



Εικόνα 1.7 : Κύριοι τύποι ενισχύσεων ^{1,10}

1.5.1 Ανάλογα με το μέγεθος του ενισχυτικού υλικού

Ανάλογα με το μέγεθος του ενισχυτικού μέσου τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- Σε μακροσύνθετα όπου η τάξη μεγέθους του εγκλείσματος ξεκινά από μερικά χιλιοστά (10^{-3} m) και φτάνει το μέτρο. Σε αυτή την κατηγορία το πιο γνωστό υλικό είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα καθώς και ο γαλβανισμένος χάλυβας.

- Σε μικροσύνθετα όπου η φάση της ενίσχυσης είναι της τάξης μεγέθους του μικρόμετρου (10^{-6} m). Μερικά από τα υλικά που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι τα μεταλλικά κράματα και τα θερμοπλαστικά ενισχυμένα με λάστιχο

- Σε νανοσύνθετα όπου η τάξη μεγέθους της διεσπαρμένης φάσης είναι ένα νανόμετρο (10^{-9} m). Οι πιο συχνοί τύποι ενίσχυσης σε αυτήν την κλίμακα είναι τα carbon black, τα σωματίδια πυριτιούχων ενώσεων, τα σωματίδια από πυλό, οι νανοίνες άνθρακα καθώς και οι νανοσωλήνες άνθρακα.^{1,3,10}

1.5.2 Με βάση την προέλευση του υλικού

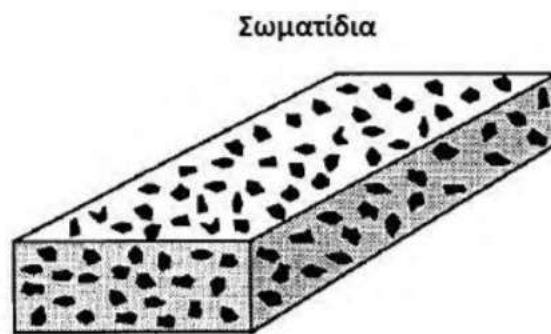
Με βάση την προέλευση του υλικού της ενίσχυσης, έχουμε την κατηγοριοποίηση σε φυσικά και συνθετικά σύνθετα υλικά. Ειδικότερα, τα φυσικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μηχανικές εφαρμογές χωρίζονται σε φυσικά υλικά ορυκτής προέλευσης (πχ μάρμαρο, γρανίτης, αμμόπετρα, μαρμαρυγίας, ζαφείρι, ρουμπίνι), στα αντίστοιχα οργανικής προέλευσης (πχ άμυλο, άλευρο ξύλου, βαμβάκι, λινάρι) και στα υλικά ζωικής προέλευσης όπως το μαλλί και ίνες μεταξιού.^{1,4}

1.5.3 Ανάλογα με το είδος της ενίσχυσης

α) Κοκκώδη

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών προκύπτει με βάση το είδος της ενίσχυσης και διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες.

Κοκκώδη σύνθετα υλικά, που έχουν σαν υλικό πλήρωσης σωματίδια διεσπαρμένα στο εσωτερικό της μήτρας. Το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να κυμαίνεται σε μια μεγάλη περιοχή της τάξης των μερικών nm έως αρκετά mm. Τα σωματίδια χρησιμοποιούνται συχνά σαν υλικά πλήρωσης προκειμένου να μειωθεί το κόστος των σύνθετων υλικών. (Εικόνα 1.8)

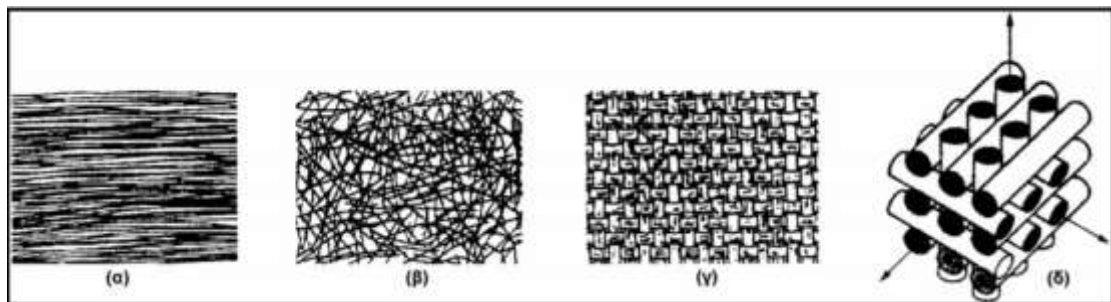


Εικόνα 1.8 : Κοκκώδη σύνθετο⁵

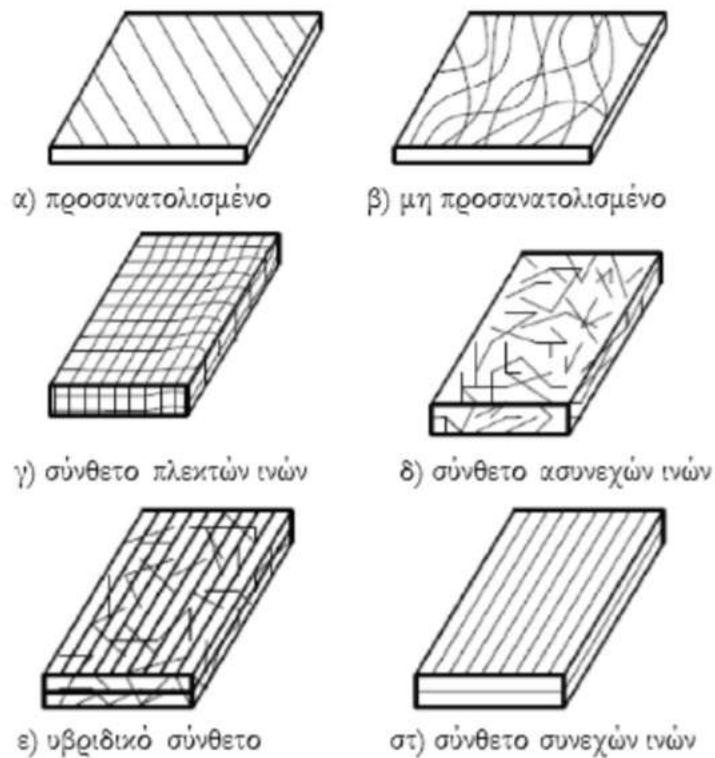
β) Ινώδη

Ινώδη σύνθετα υλικά που περιέχουν ίνες σαν υλικό ενίσχυσης. Οι ίνες έχουν υψηλό λόγο διαστάσεων (l/d) πράγμα που σημαίνει ότι ο κατά μήκος άξονας είναι πολλές φορές μεγαλύτερος από τη διάμετρό τους. Τα ινώδη πολυμερή σύνθετα υλικά εμφανίζουν περιορισμένη ευαισθησία στη διάδοση των ρωγμών και στην ύπαρξη

εγκοπών. Έτσι τα υλικά αυτά εμφανίζουν βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση και διάρκεια ζωής έναντι άλλων συμβατικών υλικών. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από υψηλή ικανότητα ανάληψης των ασκούμενων φορτίων ακόμη και στην περίπτωση που κάποιες ίνες αστοχήσουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ίνες που παραμένουν γερές μπορούν να αναλάβουν το φορτίο και αυτών που σπάνε. Πρόσθετο πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα ενίσχυσης συγκεκριμένων μόνο διευθύνσεων της κατασκευής οι οποίες παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των εξωτερικών φορτίων ή που η ανάλυση τάσεων έχει δείξει ότι είναι οι πιο επικίνδυνες να αστοχήσουν. Αυτή οι δυνατότητα που απαντάται στα ινώδη σύνθετα υλικά, προσφέρει εξαιρετική ευελιξία κατά το σχεδιασμό και την επιλογή των ιδιοτήτων. Η μηχανική συμπεριφορά των ενισχυμένων με συνεχείς, μακριές και παράλληλες ίνες συνθέτων, εξαρτάται από την ικανότητα του δεσμού που αναπτύσσεται μεταξύ τους, να μεταφέρει τα εξωτερικά φορτία. Η καλύτερη, πάντως, εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών γίνεται όταν αυτές είναι τοποθετημένες παράλληλα στη διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Οι ίνες μπορούν να υποταξινομηθούν σε συνεχείς (μακρές) ευθυγραμμισμένες ή ασυνεχείς και τυχαία ευθυγραμμισμένες. Στις εικόνες 1.9 και 1.10 φαίνονται οι διαφορετικοί τύποι και πλέξεις διάταξης των ινών σε σύνθετα υλικά.^{4,5,11}



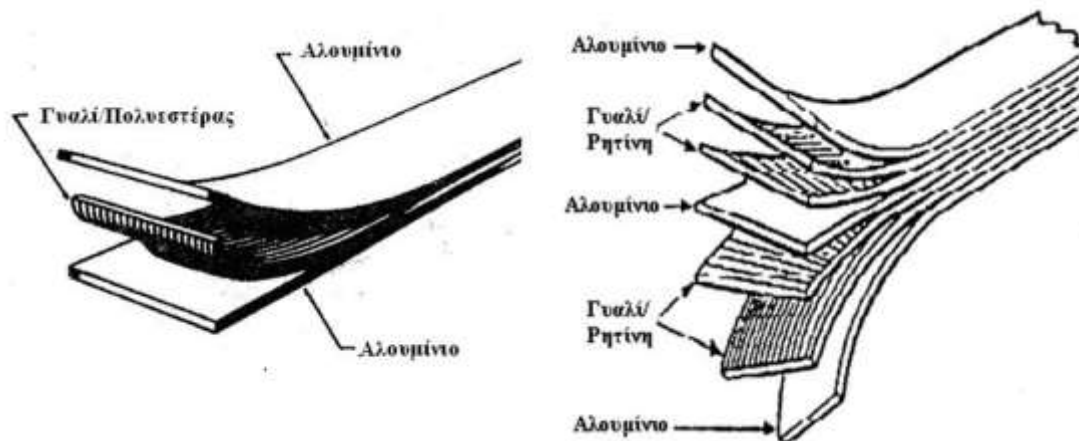
Εικόνα 1.9: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονό διευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.⁵



Εικόνα 1.10 : Διάφοροι τύποι σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες.⁵

γ) Διαστρωματωμένα

Τα Διαστρωματωμένα σύνθετα υλικά μπορούν να υποταξινομηθούν σε πολύστρωτα (laminates), sandwich ή περίπλοκα. Τα πολύστρωτα είναι συγκροτήματα που συνήθως αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στρώματα επίπεδων σύνθετων υλικών, στα οποία κάθε στρώμα (που καλείται επίσης lamina ή φύλλο) μπορεί να είναι από το ίδιο ή διαφορετικό υλικό. Τα sandwich είναι μια ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών τα οποία κατασκευάζονται με την σύνδεση δύο λεπτών πλακών (skins) με ένα ελαφρύ πυρήνα. Τα εξωτερικά φύλλα μπορεί να είναι κατασκευασμένα από κράματα αλουμινίου, πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, κράματα τιτανίου κλπ. Ο πυρήνας μπορεί να είναι κατασκευασμένος από μια κυψελοειδή μορφή από χαρτί, πολυπροπυλένιο, πολυστυρένιο ή από μέταλλο ή από άλλα αφρώδη όπως πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυουραιθάνη, πολυαιθυλένιο κλπ.(Εικόνα 1.11) .^{4,5,11}



Εικόνα 1.11 : Διαστρωματωμένα σύνθετα υλικά⁵

1.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογές στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων σε βαθμό που ο μέσος άνθρωπος δεν έχει αναλογιστεί ποτέ. Η εξέλιξη της τεχνολογίας συμβάλλει στην περαιτέρω αντικατάσταση των κοινών υλικών από τα σύνθετα με ταχύ ρυθμό με αποτέλεσμα να βρίσκουν αμέτρητες εφαρμογές μερικές από τις οποίες περιγράφονται παρακάτω, όπως οικιακοί εξοπλισμοί, αυτοκίνητα, αεροπλάνα, σκάφη αναψυχής, ποδήλατα και αθλητικά είδη είναι μερικά από τα πεδία εφαρμογών των σύνθετων υλικών.¹

Πρωτοπόρος στη χρήση συνθέτων υλικών είναι ο μηχανοκίνητος αθλητισμός. Στη φόρμουλα 1, όπου τα οχήματα κινούνται στο όριο και η ενεργητική και παθητική ασφάλεια είναι εξίσου σημαντικές, τα σύνθετα υλικά έχουν τον πρώτο λόγο. Το αμάξωμα και οι αεροτομές κατασκευάζονται από υφαντά ινών άνθρακα με ρητίνη (CFRP), με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα ελαφρύ ενώ ταυτόχρονα να έχει τη δυνατότητα να αντέχει στις πολύ υψηλές φορτίσεις που δέχεται την ώρα του φρεναρίσματος ή την ώρα που παίρνει μια στροφή με μεγάλη ταχύτητα. Τα συνθετικά ελαστικά που χρησιμοποιεί σε συνδυασμό με τα δισκόφρενα από κεραμικά σύνθετα υλικά δίνουν τη δυνατότητα στο μονοθέσιο να φρενάρει ακόμη και όταν έχει αυξηθεί η θερμοκρασία τους (Εικόνα 1.12) . Οι οδηγοί της φόρμουλα 1 φορούν κράνη και στολές που είναι ενισχυμένα με ίνες Kevlar και τους προστατεύουν από μια πιθανή σύγκρουση καθώς και από την φωτιά,

αντίστοιχα. Φυσικά, η τεχνολογία και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στη φόρμουλα 1 δε σταματά εκεί. Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες επενδύουν πολλά χρήματα στο μηχανοκίνητο αθλητισμό προκειμένου να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία αυτή και να την αξιοποιήσουν στα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής.^{1,4}



Εικόνα 1.12 : Κεραμικό δισκόφρενο με ενίσχυση άνθρακα ¹

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως και στη ναυπηγική. Εδώ και αρκετά χρόνια οι παραδοσιακές ξύλινες ψαρόβαρκες έχουν αντικατασταθεί από σύνθετα υλικά και συγκεκριμένα από πολλές στρώσεις υφαντών, από ίνες γυαλιού, με πολυεστέρα. Πολλά κομμάτια εμπορικών πλοίων και σκαφών αναψυχής κατασκευάζονται από σύνθετα προκειμένου να είναι ελαφρύτερα ούτως ώστε να μπορούν να κινηθούν με υψηλότερες ταχύτητες μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος κατανάλωσης σε καύσιμα. Το ερευνητικό ενδιαφέρον στρέφεται στο κατά πόσο όλο και μεγαλύτερα μέρη πλοίων θα αντικαθίστανται από σύνθετα, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν, όπως η αντίσταση στη διάβρωση, από την επίδραση του θαλασσινού νερού, η συμπεριφορά σε σύνθετες καταπονήσεις και κρουστικά φορτία αλλά και γενικότερα η σταθερότητα των ιδιοτήτων των κατασκευών στο βάθος του χρόνου καθώς παράγοντες όπως υγραθερμική κόπωση συνήθως υποβαθμίζουν τις ιδιότητες των συνθέτων υλικών. (Εικόνα 1.13) ^{1,4}



Εικόνα 1.13 : Βάρκα ελληνικής κατασκευαστικής εταιρίας εξ' ολοκλήρου από ίνες άνθρακα ⁵⁴

Επιπλέον το χαμηλό βάρος των σύνθετων πολυμερικής μήτρας επιτρέπει τη χρήση τους στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία. Πολυμερή με ίνες άνθρακα και Kevlar χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βασικών τμημάτων των διαστημόπλοιων. Εξασφαλίζουν έτσι την εξοικονόμηση βάρους και τη μεγάλη σταθερότητα σχήματος, λόγω του χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής κατά μήκος των ινών, κατά την διάρκεια της πτήσης που λαμβάνουν μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές. Στα εμπορικά αεροσκάφη τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιηθεί από πολύ καιρό για την κατασκευή τμημάτων εσωτερικού χώρου συντελώντας στην εξοικονόμηση βάρους καθώς και στην εξοικονόμηση χώρου.(Εικόνα 1.14) Επίσης αρκετά τμήματα αεροσκαφών είναι κατασκευασμένα κατά ένα μεγάλο ποσοστό από έναν συνδυασμό σύνθετων υλικών που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, ίνες άνθρακα και ίνες Kevlar. ^{4,12}



Εικόνα 1.14 : Τμήμα εσωτερικού χώρου έχει κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου από σύνθετα υλικά^{4,12}

Με τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών σε διάφορους κλάδους αποκτήθηκε εμπειρία και γνώση που χρησιμοποιήσε και η βιομηχανία αθλητικών ειδών. Η χρήση σύνθετων υλικών επεκτάθηκε στην κατασκευή πέντλων σκι, στα μπαστούνια του golf, σε ρακέτες του τένις, σε καλάμια ψαρέματος, σε σκελετούς ποδηλάτων, με κύριο γνώμονα τη μείωση του βάρους, τη βελτίωση της συμπεριφοράς τους, την αύξηση της ταχύτητας, την αντοχή σε ιδιαίτερες συνθήκες. (Εικόνα 1.15, 1.16)



Εικόνα 1.15 : Τμήμα εξοπλισμού σανίδας windsurf από carbon fiber.⁵⁵



Εικόνα 1.16 : Σκελετός ποδηλάτου κατασκευασμένος από σύνθετα υλικά.⁵⁶

Τέλος ίσως ο σημαντικότερος τομέας που βρίσκουν εφαρμογή τα σύνθετα υλικά είναι ο τομέας της ιατρικής. Η κατασκευή υλικών που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον άνθρωπο αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους επιστήμονες, για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε η βιοτεχνολογία ένα μέρος της οποίας αποτελεί και η επιστήμη των βιοϋλικών. Ένας πιθανός ορισμός των βιοϋλικών είναι και ο εξής: Βιοϋλικό χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε υλικό, φυσικό ή τεχνητό, το οποίο αποτελεί ολόκληρη ή μέρος “ζωντανής” δομής ή μία βιοϊατρική συσκευή η οποία εκτελεί, αυξάνει ή αντικαθιστά μια φυσική λειτουργία του ανθρώπου. Τα φυσικά μοσχεύματα είναι συνήθως βιοσυμβατά όμως η εξεύρεση δότη δεν είναι πάντα δυνατή. Η ανάπτυξη της επιστήμης αυτής έδωσε απαντήσεις στην ανάπτυξη νέων βιοϋλικών με

αποτέλεσμα σήμερα να είναι δυνατόν να μιλάμε για την κατασκευή τεχνητής καρδιάς, τεχνητών βαλβιδών, τεχνητού δέρματος, τεχνητών αρθρώσεων και κλειδώσεων. Στην οδοντιατρική νέες κονίες όπως οι υαλοϊονομερείς δεν είναι τίποτε άλλο παρά κοκκώδη σύνθετα υλικά. Όμοια και η εφαρμογή των σύνθετων υλικών στην νέα τεχνολογία των οδοντιατρικών εμφυτευμάτων.^{1,4,12}



Εικόνα 1.17 : Οδοντιατρικά εμφυτεύματα από σύνθετα υλικά⁵⁷

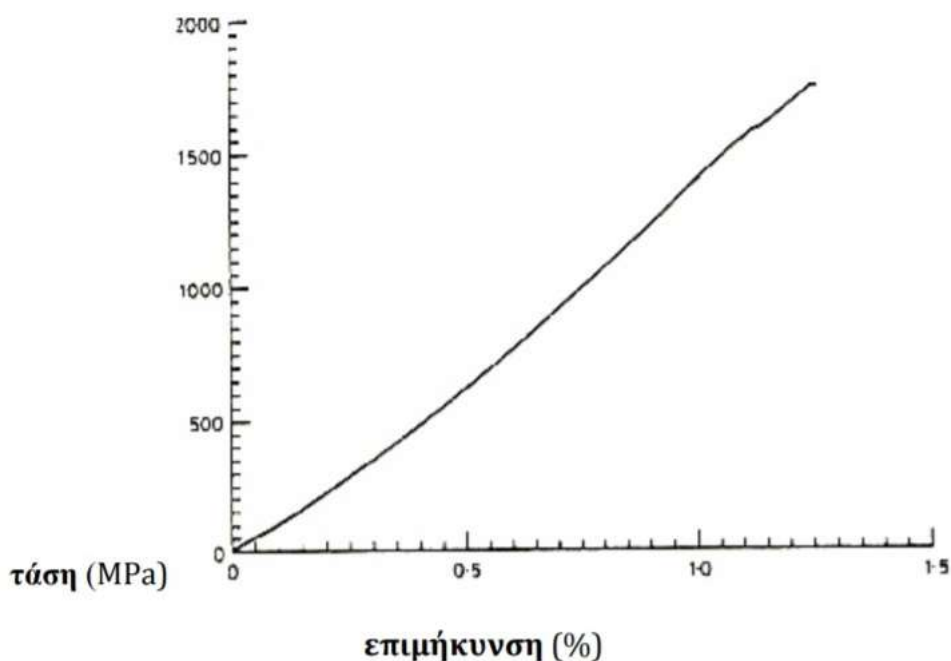
Τα παραπάνω είναι μερικές από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών. Η ποικιλία που υπάρχει σε σύνθετα υλικά σε συνδυασμό με το γεγονός ότι μπορεί να κατασκευασθεί σχεδόν οτιδήποτε από αυτά παρέχει αμέτρητες επιλογές στην χρήση τους. Το σίγουρο είναι πως τα σύνθετα υλικά απασχολούν και θα συνεχίσουν να απασχολούν τη βιομηχανία και την επιστημονική κοινότητα, η σωστή συνεργασία των οποίων μπορεί να επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τον άνθρωπο και για τον πλανήτη.¹

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

"ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ"

2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν κυρίως ανισοτροπική συμπεριφορά, δηλαδή εμφανίζουν ιδιότητες που σε κάθε σημείο τους είναι διαφορετικές προς όλες τις διευθύνσεις. Τις περισσότερες φορές εμφανίζουν μόνο ορθοτροπικότητα, δηλαδή οι ιδιότητές τους σε κάθε σημείο τους είναι διαφορετικές σε τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις και, επιπρόσθετα, έχουν τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας. Γενικά η μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων είναι αρκετά διαφορετική από αυτή των συμβατικών ισοτροπικών υλικών (π.χ. χάλυβα). Επίσης, και ο τρόπος αστοχίας τους είναι διαφορετικός, αφού στα πολύστρωτα ελάσματα αστοχεί κάθε φορά και από μία τους στρώση, προκαλώντας στα ενδιάμεσα στάδια αλλαγές στην αντοχή και στη δυσκαμψία, οδηγώντας τελικά σε καταστροφική αστοχία. Η συμπεριφορά τους είναι γενικά ελαστική (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων) μέχρι τη θραύση (Σχήμα 2.1- Eckold 1994). Η καμπύλη τάσεων (stress) – επιμηκύνσεων (strain), σ - ϵ , που απεικονίζεται μπορεί να θεωρηθεί γραμμική χωρίς σημαντικό σφάλμα. Λεπτομερέστερη ανάλυση απαιτεί τη θεώρηση κάποιας μορφής ελαστικότητας ή/και ιξωδοελαστικότητας.¹³



Σχήμα 2.1 : Τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων ενός μονοαξονικού σύνθετου υλικού.²

Η μηχανική των σύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα περιλαμβάνει τόσο τη μηχανική των στερεών εγκλεισμάτων όσο και τη ρευστομηχανική της πολυμερικής μήτρας. Οι μηχανικές ιδιότητες της πολυμερικής μήτρας προσδιορίζονται με πολλές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στα μέταλλα όπως το μέτρο ελαστικότητας, η εφελκυστική αντοχή, η αντοχή στην κρούση και η κόπωση. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πολυμερών είναι πολύ ευαίσθητα στο ρυθμό παραμόρφωσης, τη μεταβολή της θερμοκρασίας και τη φύση του περιβάλλοντος.²

Είναι γνωστό ότι ένα άμορφο πολυμερές μπορεί να συμπεριφέρεται σαν ύαλος σε χαμηλές θερμοκρασίες, σαν ελαστόμορφο στερεό σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες και σαν παχύρρευστο υγρό όταν η θερμοκρασία αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Για σχετικά μικρές παραμορφώσεις η μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι ελαστική, δηλαδή σε συμφωνία με τον νόμο του Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες επικρατεί η ιξώδης συμπεριφορά, που προσομοιάζει με αυτή του υγρού. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες υπάρχει ένα ελαστόμορφο υγρό που εμφανίζει τα συνδυασμένα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών των δύο ακραίων περιπτώσεων. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται ιξωδοελαστικότητα.^{2,3}

Τα πολυμερή λοιπόν είναι ιξωδοελαστικά υλικά δηλαδή η απόκρισή τους σε μία μηχανική τάση είναι ταυτόχρονα ελαστική αλλά και ιξώδης. Έχουν χαρακτηριστικά τόσο ελαστικών στερεών όσο και ιξώδων υγρών. Στην πρώτη περίπτωση έχουν σαφώς καθορισμένο σχήμα και παραμορφώνονται υπό την επίδραση εξωτερικών μηχανικών δυνάμεων ακαριαία και κατά τον τερματισμό της εξωτερικής τάσης η παραμόρφωση ανακτάται πλήρως, δηλαδή το πολυμερές επιστρέφει στις αρχικές του διαστάσεις. Ενώ στην δεύτερη περίπτωση δεν έχουν καθορισμένο σχήμα και δεν παραμορφώνονται ακαριαία. Σε ανταπόκριση προς μία εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση, η παραμόρφωση καθυστερεί ή εξαρτάται από τον χρόνο. Η παραμόρφωση αυτή δεν είναι αντιστρεπτή, δηλαδή δεν ανακτάται όταν τερματίζεται η τάση. Στην περίπτωση της ενδιάμεσης ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς η εφαρμογή της τάσης έχει σαν αποτέλεσμα μια στιγμιαία ελαστική παραμόρφωση η οποία ακολουθείται από μια ιξώδη χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση. Αποτελεί μια μορφή ανελαστικότητας.

Ο ρυθμός παραμόρφωσης καθορίζει αν η παραμόρφωση θα είναι ελαστική ή ιξώδης. Για μεγάλους ρυθμούς παραμόρφωσης η αντίδραση του ιξωδοελαστικού υλικού είναι ελαστική ενώ για μικρούς ρυθμούς είναι ιξώδης. Ο ρυθμός της εφαρμογής τάσης επηρεάζει επίσης τα ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά. Η αύξηση του

ρυθμού φόρτισης έχει την ίδια επίδραση με τη μείωση της θερμοκρασίας, δηλαδή η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών εξαρτάται και από τον χρόνο.^{3,14}

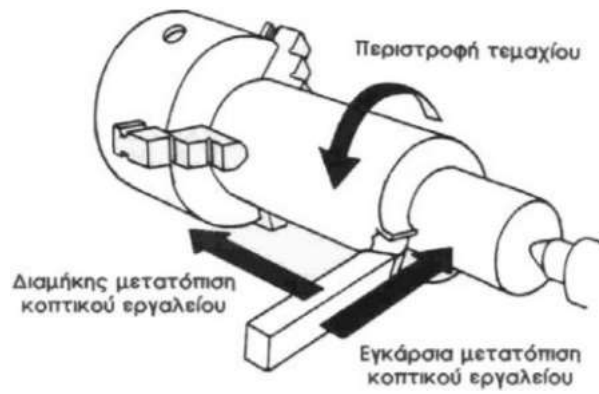
2.2 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι κατεργασίες των σύνθετων υλικών είναι εκείνες οι οποίες χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια για τα μέταλλα, τα κεραμικά, τα πολυμερή οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται και για τα σύνθετα υλικά, δηλαδή η τórνευση, το φρεζάρισμα, η διάτρηση και η λείανση.

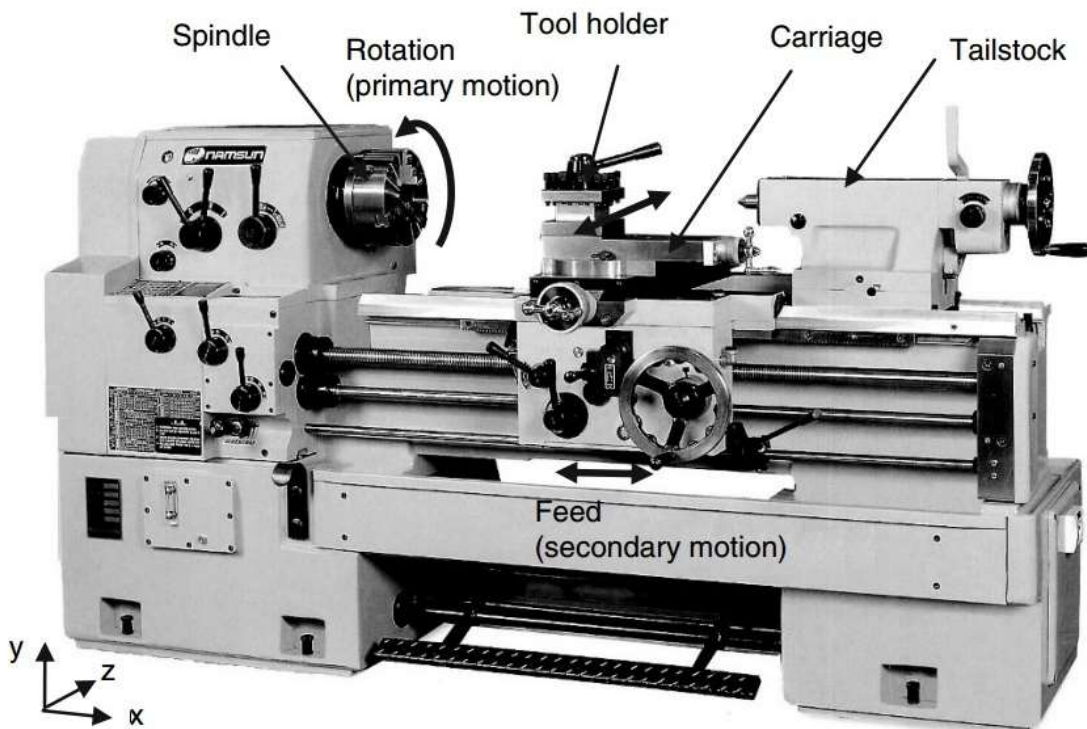
α) Τórνευση

Με τórνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Σαν ορισμό θα λέγαμε ότι είναι μια κατεργασία κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφική κίνηση της ατράκτου, όπου προσδένεται κατάλληλα το τεμάχιο που είναι προς κοπή και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης, δηλαδή την κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Κατά την εκτέλεση το κοπτικό εργαλείο έχει καθορισμένη γεωμετρία και απλή σημειακή επαφή.¹⁵

Πιο αναλυτικά κατά την τórνευση, χρησιμοποιείται ένα μόνο εργαλείο κοπής το οποίο εκτελεί περιστροφική κίνηση. Το κυλινδρικό τεμάχιο εργασίας περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του ενώ ένα εργαλείο κοπής τροφοδοτείται παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής. Καθώς το εργαλείο κοπής εμπλέκεται στο τεμάχιο εργασίας, παράγεται μια νέα επιφάνεια περιστροφής, με την αφαίρεση ενός στρώματος υλικού του οποίου το πάχος ισούται με το βάθος κοπής του(Εικόνα 2.1). Ένα τυπικό μηχάνημα που παράγει τις απαραίτητες κινήσεις για τη διεξαγωγή αυτής της λειτουργίας είναι ένας τυπικός τórνος που φαίνεται στην εικόνα 2.2. Η μηχανή παρέχει μια πρωτεύουσα κίνηση στο τεμάχιο εργασίας σε περιστροφές ανά λεπτό και δευτερεύουσα κίνηση στο εργαλείο κοπής σε χιλιοστά ανά περιστροφή. Η συνδυασμένη κίνηση που παράγει την επιφάνεια είναι η διανυσματική προσθήκη αυτών των δύο κινήσεων. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η κίνηση τροφοδοσίας είναι πολύ μικρότερη από την πρωτεύουσα κίνηση και η ταχύτητα κοπής καθορίζεται μόνο από την κύρια κίνηση.¹⁵



Εικόνα 2.1 : Κίνηση κατά την τórνευση¹⁵



Εικόνα 2.2 : Ένας τυπικός τórνος ¹⁵

Ο τόρνος αποτελεί μια από τις περισσότερο παραγωγικές εργαλειομηχανές καθώς πάρα πολλές εργασίες κοπής των μετάλλων γίνονται σε τόρνο. Οι σύγχρονοι τόρνοι έχουν δυνατότητα παραγωγής καμπύλων εξαρτημάτων, με μεγάλο αριθμό ακρίβειας και μεγάλες ταχύτητες παραγωγής.(Εικόνα 2.3) ¹⁵



Εικόνα 2.3 : Σύγχρονος τόρνος κοπής (CNC)⁵⁸

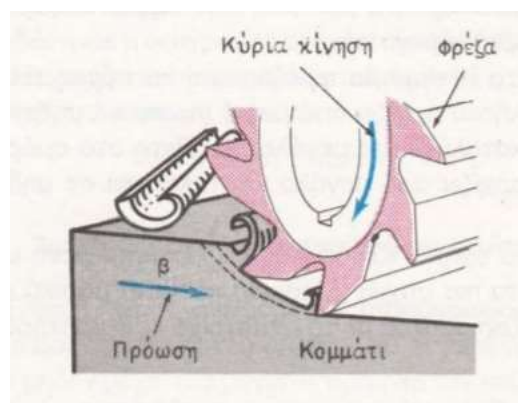
β) Φρεζάρισμα

Αρχικά το φρεζάρισμα είναι μέθοδος κατεργασίας κοπής με ένα περιστρεφόμενο εργαλείο που έχει πολλές κύριες κόψεις για τη μόρφωση διαφόρων επίπεδων και μη επίπεδων επιφανειών. Το κοπτικό εργαλείο εδώ δεν έχει συνεχή επαφή με το υλικό που είναι προς κατεργασία. Σε μια φρεζομηχανή δηλαδή σε αντίθεση με τον τόρνο κάθε δόντι του κοπτικού εργαλείου κάνει μια τουλάχιστον διακοπή σε μία στροφή. Αυτό έχει σαν συνέπεια πρώτον, στον χρόνο που δεν κόβουν τα κοπτικά δόντια του κοπτικού εργαλείου να προλαβαίνουν να χάνουν θερμότητα και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά (όπως στο κοπτικό εργαλείο της

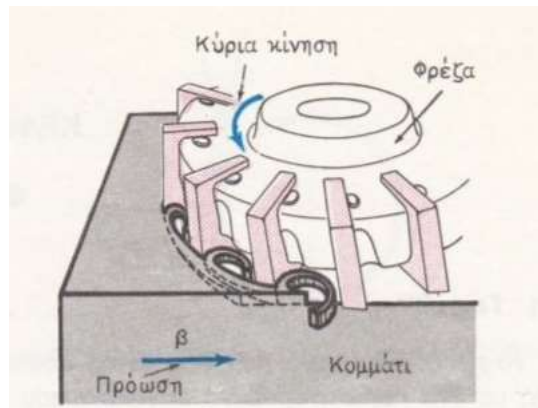
τόρνευσης όπου έχει συνεχή κοπή)και δεύτερον τα απόβλητα να είναι διακεκομμένα. Το πάχος σε κάθε απόβλητο είναι μεταβαλλόμενο, αρχίζει από το μηδέν και φθάνει σε μια μέγιστη τιμή.¹⁵

Η πρόωση είναι μια ισοταχής κίνηση που μεταδίδεται από το κομμάτι κατά τη διάρκεια της κοπής. Ενώ δηλαδή ο κοπτήρας περιστρέφεται, χωρίς να κάνει καμιά άλλη κίνηση, το κομμάτι όντας δεμένο επάνω στο τραπέζι, μετατοπίζεται από την ευθύγραμμη και ισοταχή κίνηση προώσεως του τραπεζιού. Ενώ στην τόρνευση, όπως είναι γνωστό, πρόωση είναι η μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του κομματιού, στο φρεζάρισμα πρόωση ανά στροφή είναι η μετατόπιση του κομματιού κατά τη διάρκεια μιας πλήρους στροφής του κοπτήρα. Συμπερασματικά στο φρεζάρισμα η κύρια κίνηση μεταδίδεται από το κοπτικό εργαλείο ενώ η κίνηση προώσεως μεταδίδεται από το κομμάτι.¹⁵

Επίσης συναντάμε δύο είδη φρεζαρίσματος ανάλογα με την θέση του άξονα του κοπτικού εργαλείου προς την επιφάνεια κατεργασίας. Έτσι από την μία έχουμε το περιφερειακό φρεζάρισμα όπου ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια (Εικόνα 2.4), ενώ από την άλλη έχουμε το μετωπικό φρεζάρισμα όπου εδώ ο άξονας περιστροφής του κοπτήρα είναι κάθετος προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια (Εικόνα 2.5).



Εικόνα2.4:Περιφερειακόφρεζάρισμα.¹⁵



Εικόνα 2.5 :μετωπικό φρεζάρισμα .¹⁵

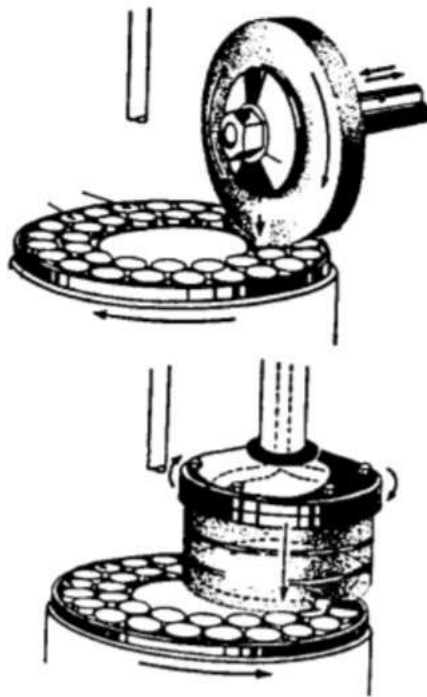
Τέλος οι μηχανές CNC μπορούν να παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες ατράκτου και ταχύτητες τροφοδοσίας, μεγαλύτερη ευελιξία και μεγαλύτερο χώρο εργασίας από μια τυπική μηχανή φρεζαρίσματος. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις παραγωγής υψηλών προδιαγραφών. Χειροκίνητες φρεζομηχανές χρησιμοποιούνται συνήθως για το κόψιμο των λεπτών τεμαχίων. Ο δρομολογητής παρέχει την πρωτεύουσα περιστροφική κίνηση στον κοπτήρα ενώ ο χειριστής τροφοδοτεί το εργαλείο στο τεμάχιο εργασίας χειροκίνητα.

γ) Λείανση

Η λείανση είναι ένα είδος επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υλικού από ένα κομμάτι. Επιτυγχάνεται σε εργαλειομηχανές λείανσης, με τη βοήθεια κοπτικών μηχανών, οι οποίες έχουν ακαθόριστο αριθμό κοπτικών αιχμών και ακαθόριστο γεωμετρικό σχήμα. Η λείανση είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη διεργασία αποπεράτωσης και χρησιμοποιείται ευρέως όταν, το υπό επεξεργασία υλικό παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα και ψαθυρότητα καθώς και όταν η επιθυμητή επιφανειακή ποιότητα και η διαστασιακή ακρίβεια είναι υψηλή. Έτσι έχουμε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια κοπής από ότι σε μία συνηθισμένη εργαλειομηχανή, όπως είναι ο τόρνος, η πλάνη, η φρεζομηχανή κλπ. Όπως, υπάρχουν διάφοροι τύποι τόρνων, δρεπάνων, φρεζομηχανών, έτσι υπάρχουν και διάφοροι τύποι λειαντικών μηχανών, ανάλογα με την ειδική επεξεργασία που πρόκειται να εκτελέσουν. Τα μέσα λείανσης χωρίζονται στις κατηγορίες των τεχνητών και των φυσικών.¹⁶ Τα τεχνητά μέσα είναι

συνήθως συνθετικά, ενώ σαν φυσικά μέσα λείανσης χρησιμοποιούνται η αμμόπετρα, η σμυρίδα και το διαμάντι

Λίγο πιο αναλυτικά η λείανση είναι κατεργασία αποβολής υλικού με κοπτικό εργαλείο τον λειαντικό τροχό που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από πολλές κοπτικές ακμές, τους λειαντικούς κόκκους, οι οποίοι είναι άμορφοι χωρίς καθορισμένη γεωμετρία. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ενεργούν ταυτόχρονα στην αποβολή υλικού μεγάλος αριθμός λειαντικών κόκκων. Άρα, η λείανση είναι κατεργασία κοπής πολλαπλής σημειακής επαφής. Η λείανση διακρίνεται σε δύο είδη την επίπεδη και την κυλινδρική. Όπου η επίπεδη με την σειρά της διακρίνεται σε περιφερική και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια (Εικόνα 2.6), ενώ η κυλινδρική χωρίζεται σε εσωτερική και εξωτερική λείανση.¹⁶



Εικόνα 2.6 : Πάνω διακρίνουμε την περιφερειακή ενώ κάτω την μετωπική λείανση.¹⁶

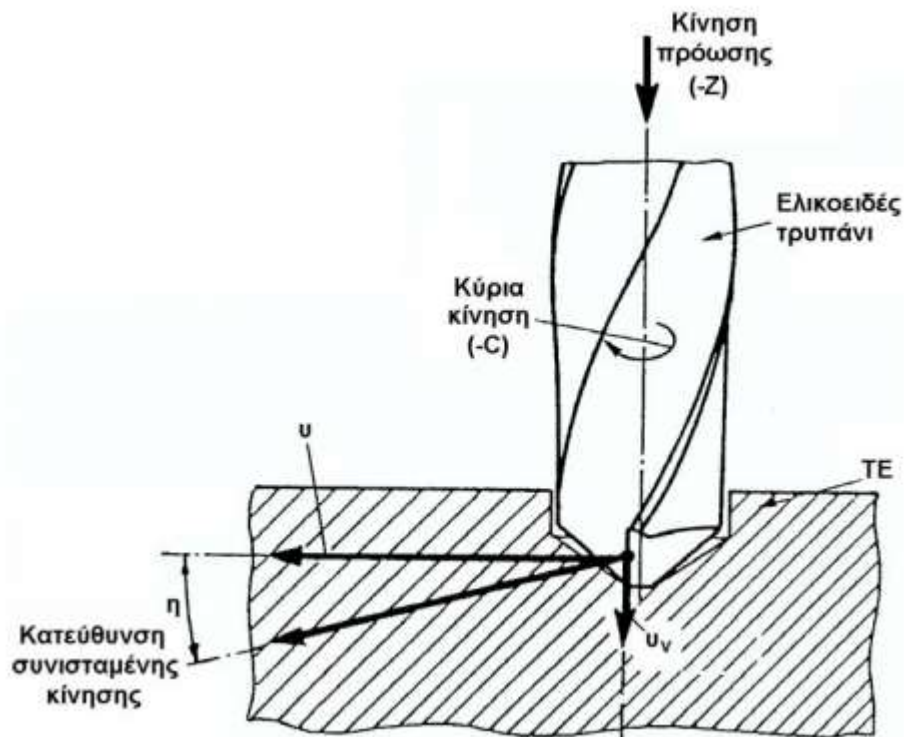
Τέλος η διαδικασία της λείανσης έχει κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τη μία, το πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι μετά την κατεργασία, η εργασία αποκτά μεγάλη ακρίβεια μορφής. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα, είναι ότι με τη λείανση, μπορεί να κατεργαστούν πολύ σκληρά

μεταλλικά υλικά, που έχουν επεξεργαστεί θερμικά (ολική, επιφανειακή σκλήρυνση), καθώς και ότι προσφέρει υψηλή απόδοση κοπής. Από την άλλη, το πιο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι κατά την κατεργασία λείανσης αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η κρυσταλλική δομή του υλικού.¹⁶

δ) Διάτρηση

Η διάτρηση είναι η πιο συνηθισμένη διαδικασία αφαίρεσης υλικών στη μηχανική κατεργασία μετάλλων και σύνθετων υλικών. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή οπών που απαιτούνται για συναρμολόγηση. Η διάτρηση πραγματοποιείται σε συμβατικές όρθιες μηχανές γεώτρησης, μηχανές φρεζαρίσματος και διάφορες εξειδικευμένες μηχανές. Είναι η μηχανουργική κατεργασία διάνοιξης ή διεύρυνσης οπών διαμέτρου συνήθως από 0,1mm έως 60mm. Μικρότερες οπές συνήθως γίνονται με τη βοήθεια laser ή ηλεκτροδιάβρωσης, ενώ οι μεγαλύτερες με εσωτερική τόννευση.

Η διάτρηση ειδικότερα αποτελείται από έναν συνδυασμό δύο επιμέρους κινήσεων, την περιστροφική και την μεταφορική (Εικόνα 2.7). Η κύρια κίνηση κοπής είναι η περιστροφική και αντιστοιχεί στην περιστροφή του εργαλείου γύρω από τον άξονά του. Η συνθήκη που συνδέεται με την κίνηση αυτή άμεσα είναι η ταχύτητα κοπής και εκφράζεται σε (mm/min), όπου στις εργαλειομηχανές είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου και εκφράζεται σε (rpm). Η δευτερεύουσα κίνηση είναι η μεταφορική και αντιστοιχεί στην πρόωση του εργαλείου με κατεύθυνση προς το κατεργαζόμενο κομμάτι. Εδώ η συνθήκη που συνδέεται με την κίνηση αυτή είναι η πρόωση που εκφράζεται σε (mm/rev) και στις εργαλειομηχανές μπορούμε να το βρούμε και ως (m/min).¹⁵



Εικόνα 2.7 : Κίνηση κατά την διάτρηση.¹⁷

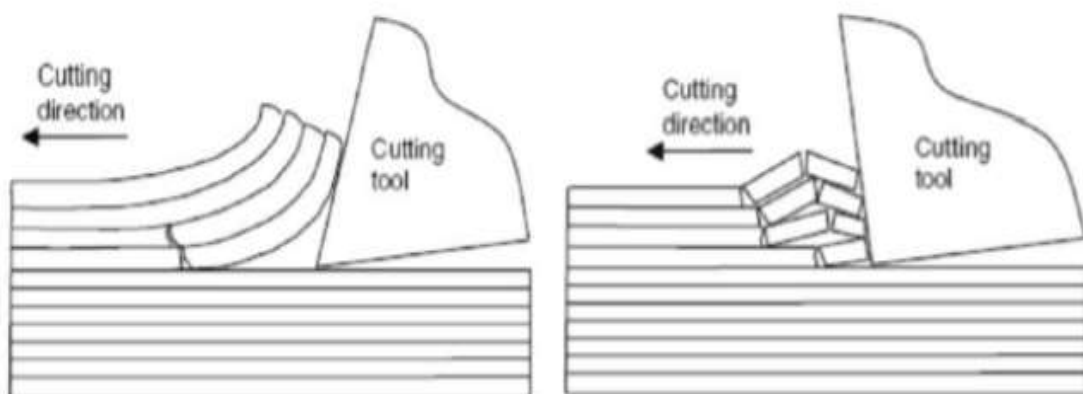
2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ευκολία ή αντίστοιχα η δυσκολία με την οποία μπορούμε να κατασκευάσουμε τα σύνθετα υλικά αναφέρεται στην κατεργασιμότητα των υλικών αυτών. Δηλαδή η κατεργασιμότητα θα λέγαμε ότι είναι μια εκτίμηση της ανταπόκρισης του υλικού σε ένα σύστημα όπου περιλαμβάνει το ίδιο το υλικό ,τα εργαλεία κοπής, τις εργαλειομηχανές και τις συνθήκες κοπής. Η κατεργασιμότητα δεν είναι εύκολο να μετρηθεί ποσοτικά αλλά κρίνεται από ορισμένες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί είναι η φθορά του κοπτικού , η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή του και τέλος το φινίρισμα επιφανείας.¹⁵

Οι κατεργασίες των σύνθετων υλικών είναι διαφορετικές σε πολλές πτυχές από τις κατεργασίες των μετάλλων. Τα σύνθετα υλικά είναι ανομοιογενή υλικά που αποτελούνται από σαφώς διαφορετικές φάσεις. Οι ενισχυτικές ίνες είναι ισχυρές και εύθραυστες και μπορεί να έχουν κακή θερμική αγωγιμότητα, όπως στην περίπτωση των αραμιδίων και των ινών από γυαλί. Από την άλλη πλευρά η μήτρα του

πολυμερούς είναι αδύναμη και κάπως εύπλαστη. Η μηχανική των πιο ομοιογενών και όλκιμων μετάλλων χαρακτηρίζεται από διάτμηση και πλαστική παραμόρφωση και η δράση της διάτμησης σχηματίζει ένα συνεχές ρινίσμα που ρέει στην επιφάνεια του εργαλείου. Υπό σταθερές συνθήκες κοπής όμως η διαδικασία κοπής φθάνει σε σταθερή κατάσταση για την οποία οι δυνάμεις κοπής, οι θερμοκρασίες κοπής και οι συνθήκες επιφανείας μπορούν να προβλεφθούν με πολύ καλή ακρίβεια. Επίσης η ικανότητα επεξεργασίας των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών εξαρτάται κυρίως από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της ίνας και της μήτρας, την περιεκτικότητα σε ίνες και τον προσανατολισμό των ινών. Ενώ π.χ. οι ίνες γυαλιού και άνθρακα συναντάνε θραύση μπροστά από την κοπτική άκρη, οι σκληρότερες ίνες αραμιδίου αποφεύγουν τη διάτμηση και τείνουν να κάμπτονται μπροστά από την κοπτική άκρη. Έτσι συμπεραίνουμε πως, η ποιότητα της επιφάνειας της κατεργασμένης ακμής επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του σπλισμού των ινών και τον προσανατολισμό τους. Οι δυνάμεις κοπής εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τον τύπο των ινών καθώς και από την διάταξή τους.¹⁵

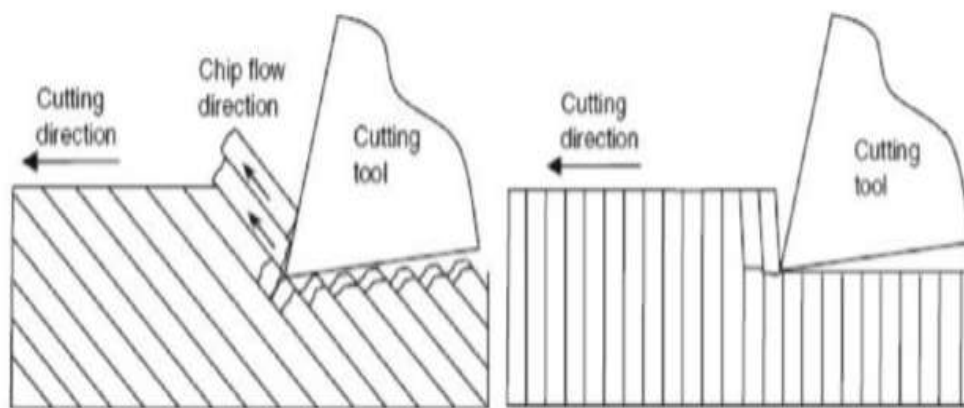
Τα εργαλεία μορφοποίησης των σύνθετων υλικών θα πρέπει να είναι ικανά να αντέχουν την θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω τριβής τόσο με τις ίνες όσο και με τα ρινίσματα που προκύπτουν κατά τη μηχανική κατεργασία. Η γεωμετρία του εργαλείου πρέπει να παρέχει μια αιχμηρή ακμή ικανή να κόψει τις ίνες αλλά και με τέτοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά που να εξασφαλίζουν το καλύτερο δυνατό φινίρισμα. Τώρα ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών και την γωνία κλίσης του κοπτικού υλικού ο σχηματισμός και η απομάκρυνση των ρινισμάτων στην μηχανική κατεργασία προϊόντων χωρίζονται σε πέντε διαφορετικούς τύπους.¹⁵



Εικόνα 2.8 : Ο τύπος 1 αριστερά και ο τύπος 2 δεξιά για τα ρινίσματα που παράγονται κατά την κοπή³⁷

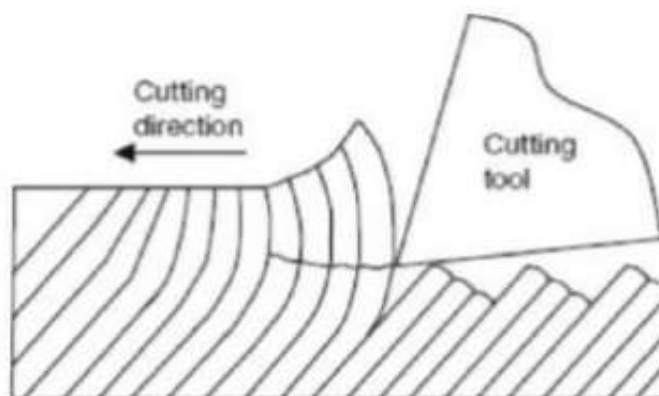
Όπως φαίνεται στην εικόνα από πάνω στον πρώτο τύπο έχουμε θετικές γωνίες κοπής και διεύθυνση κοπής παράλληλη στον διαμήκη άξονα των ινών , σαν συμπέρασμα τα ρινίσματα απομακρύνονται με την μορφή φλοίδας. Στη συνέχεια στον δεύτερο τύπο παρατηρούνται αρνητικές γωνίες κοπής και τα ρινίσματα απομακρύνονται με ακαθόριστο σχήμα λόγω των διαμηθικών τάσεων που αναπτύσσονται.

Τώρα για κατεργασίες με προσανατολισμό ινών από μηδέν μέχρι ενενήντα μοίρες ($0^\circ < \theta \leq 90^\circ$) έχουμε τους δυο ακόλουθους τύπους κοπής 3 και 4 όπως φαίνεται στην εικόνα από κάτω. Λόγω των διαμηθικών τάσεων οι ίνες κόβονται και απομακρύνονται είτε με συνεχή είτε με ασυνεχή τρόπο.³⁷



Εικόνα 2.9 : Απομάκρυνση ινών με συνεχή τρόπο στα αριστερά ,τύπος 3 και δεξιά ο τύπος 4 με ασυνεχή τρόπο.³⁷

Τέλος ο τελευταίος τύπος κοπής αναφέρεται σε διαφορετικό μήκος ινών με ακανόνιστο σχήμα, σαν αποτέλεσμα να παράγει μια ακανόνιστη επιφάνεια μιας και έχουμε ρινίσματα διαφορετικών μορφολογιών και κομμένων σε διαφορετικά σημεία όπως βλέπουμε στην εικόνα από κάτω.



Εικόνα 2.10 : Διαφορετικό μήκος ινών Τύπος 5 ³⁷

Οι ίνες άνθρακα παράγουν αιχμηρά ρινίσματα με πολύ μικρή παραμόρφωση δίνοντας οδοντωτές επιφάνειες. Η αυτό-λιπαντική δράση των ινών άνθρακα βοηθά στην εύκολη ολίσθηση του κοπτικού πάνω στην μήτρα, καθιστώντας τις ίνες άνθρακα πιο επιρρεπείς σε αποκολλήσεις κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Γενικά, κατά την κατεργασία υπάρχει μια μείωση στην δύναμη κοπής με την αύξηση της γωνίας κλίσης του κοπτικού, δεδομένου ότι τα ρινίσματα που δημιουργούνται στην επιφάνεια απομακρύνονται πιο εύκολα καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται.

Η μελέτη των πολυκατευθυντικών ελασμάτων έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή στις περισσότερες εφαρμογές, τα αντικείμενα έχουν σχηματιστεί χρησιμοποιώντας πολλές στρώσεις ινών στις επιθυμητές μορφολογίες. Η παραγωγή ρινισμάτων κατά την κοπή πολυδιευθυντικών στρώσεων μοιάζει αρκετά με την κοπή μονοδιευθυντικών στρώσεων. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε στρώση συμπεριφέρεται ανεξάρτητα από τις στρώσεις που το περιβάλλουν. Τα φύλλα ινών άνθρακα 0° τείνουν να λυγίζουν και η αποφλοιώση που ακολουθεί μοιάζει με τις αποφλοιώσεις τύπου 1 και 2. Αντίθετα, στα φύλλα άνθρακα με γωνίες 45° και 90° τείνουν να αποφλοιώνονται σύμφωνα με τον τύπου 3. Η γεωμετρία του κοπτικού έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Κατά τη μελέτη κοπής των πολυκατευθυντικών ινών βρέθηκε ότι σημαντικό ρόλο παίζουν και άλλες παράμετροι όπως το βάθος κοπής και η ταχύτητα. Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάτρηση είναι η απαγωγή της θερμότητας, η φθορά του εργαλείου και αποκόλληση ινών. Κακή

θερμική αγωγιμότητα της ίνας θα προκαλέσει συσσώρευση γύρω από την περιοχή κοπής και τελικά θέρμανση του κοπτικού. Εκτός αυτού, οι ίνες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή φθορά στο κοπτικό καθώς αυξάνει η δύναμη που απαιτείται για την κοπή τους.^{37,38}

Τέλος σαν συμπέρασμα καλή κατεργασιμότητα σημαίνει λιγότερη φθορά του εργαλείου, χαμηλές δυνάμεις κοπής, άρα και κατανάλωση ενέργειας, και τέλος καλό φινίρισμα επιφάνειας.

Η κατεργασιμότητα μπορεί επίσης να αξιολογηθεί από τον τύπο των ρινισμάτων που απομακρύνονται αλλά και τις θερμοκρασίες κοπής, δεδομένου ότι υπάρχει ένας συσχετισμός μεταξύ του μεγέθους των ρινισμάτων και το φινίρισμα της επιφάνειας. Η κατεργασιμότητα των υλικών που αποτελούνται από διαφορετικές φάσεις, όπως οι ίνες άνθρακα σε εποξική μήτρα, καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ινών και της μήτρας, από την περιεκτικότητα σε ίνες αλλά και τον προσανατολισμό τους.¹⁵

Ο προσανατολισμός των ινών, όπως και το είδος τους επηρεάζουν το μέγεθος των ρινισμάτων και την εμφάνιση της επιφάνειας. Από την άλλη μεριά, η μήτρα ως συνδετικό είναι πολύ ασθενέστερη μηχανικά από τις ίνες και η επιρροή της στην κατεργασιμότητα είναι ασήμαντη. Ωστόσο, η μήτρα επηρεάζει το είδος των ρινισμάτων που παράγονται.

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες είναι εύθραυστες, οι θερμοπλαστικές έχουν την ικανότητα να αντέχουν μεγάλες ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις. Οι θερμοκρασίες κοπής εξαρτώνται από τις θερμικές ιδιότητες και τον προσανατολισμό των ινών, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την κατεργασιμότητα.

Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του ψυκτικού μέσου, η απορρόφηση υγρασίας από τη μήτρα ή των ινών μπορούν να επηρεάσουν τη μορφή και τις μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής της μήτρας και των ινών οδηγούν σε θερμικές καταπονήσεις που μπορεί να απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και να οδηγήσει σε παραμόρφωση. Καταλαβαίνουμε δηλαδή πως δεν φτάνει μόνο το μορφοποιούμενο αντικείμενο να είναι δομημένο σωστά αλλά πρέπει να είμαστε προσεκτικοί κατά την επεξεργασία του λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σωστές παραμέτρους στο εργαλείο μορφοποίησης με σκοπό να αποφύγουμε τυχόν προβλήματα στο τελικό αποτέλεσμα.¹⁵

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

"ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ"

3.1. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως αναφέραμε και στο παραπάνω κεφάλαιο η τórνευση είναι ένας γενικός όρος μιας κατηγορίας κατεργασιών, κατά την οποία το τεμάχιο προς επεξεργασία εκτελεί περιστροφική κίνηση, ενώ το κοπτικό εργαλείο εκτελεί τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης, με καθορισμένη γεωμετρία και απλή σημειακή επαφή. Ανάλογα τώρα με την διάταξη του άξονα τórνευσης συναντάμε δύο διαφορετικά είδη τórνευσης, την οριζόντια τórνευση όταν έχουμε οριζόντιο άξονα και την κατακόρυφη τórνευση αντίστοιχα όταν έχουμε κατακόρυφο άξονα. Πιο αναλυτικά πάμε να δούμε τα είδη και τις βασικές λειτουργίες στην τórνευση.³⁸

3.1.1. Είδη τórνευσης

Ανάλογα με την θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας η τórνευση διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική.

Οι βασικές λειτουργίες εξωτερικής τórνευσης ταξινομούνται ανάλογα με την κατεύθυνση της πρόωσης και σύμφωνα με τον άξονα περιστροφής, δηλαδή όταν η κατεύθυνση της πρόωσης διατηρείται παράλληλη με τον άξονα περιστροφής τότε πραγματοποιείται ευθεία τórνευση. Αντίστοιχα εγκάρσια τórνευση πραγματοποιείται όταν η κατεύθυνση της πρόωσης είναι κάθετη στον άξονα περιστροφής. Τέλος Τórνευση περιγράμματος πραγματοποιείται όταν η κατεύθυνση της πρόωσης αλλάζει σύμφωνα με το περίγραμμα του κατεργασμένου τεμαχίου λόγω συντονισμένων κινήσεων πρόωσης με βάση τους άξονες συντεταγμένων.

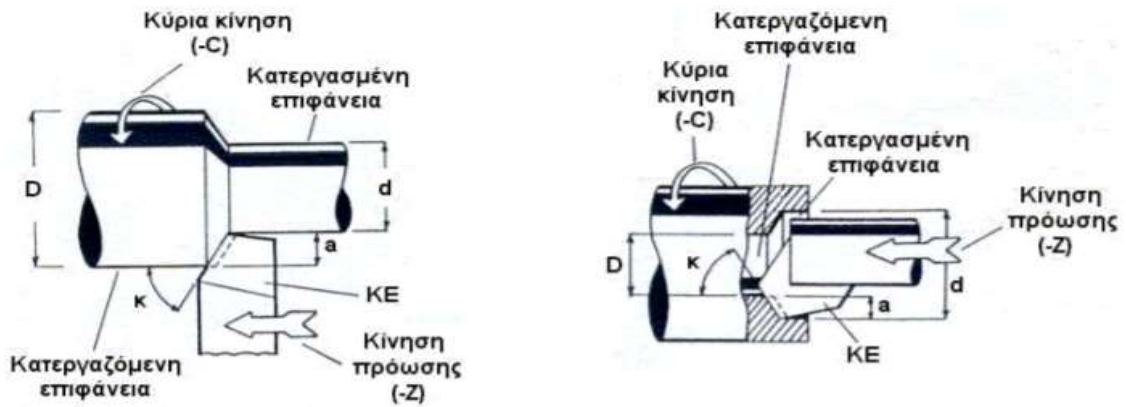
Από την άλλη μεριά έχουμε την εσωτερική τórνευση, γνωστή και ως διάνοιξη κυκλικής εσοχής και χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη διάμετρο μιας οπής. Οι

βασικές κινήσεις εσωτερικής τόννευσης είναι ίδιες με αυτές της εξωτερικής δηλαδή, η κύρια κίνηση είναι η περιστροφική κίνηση του τεμαχίου γύρω από το άξονα περιστροφής ενώ η δευτερεύουσα κίνηση είναι η μεταφορική κίνηση του εργαλείου, που είναι γνωστή και ως πρόωση. Τώρα η διάνοιξη κυκλικής εσοχής επιτυγχάνει 3 βασικούς στόχους. Πρώτα την μεγέθυνση, η εσωτερική τόννευση αυξάνει την διάμετρο οπής στο κατάλληλο μέγεθος και με φινιρισμένη επιφάνεια. Δεύτερον την ευθύτητα, η εσωτερική τόννευση ισιώνει την αρχική οπή και τέλος την ομοκεντρικότητα αφού η εσωτερική τόννευση δημιουργεί ομόκεντρη οπή με τον άξονα περιστροφής.³⁸

Οι περισσότερες από τις κατεργασίες εσωτερικής τόννευσης μπορούν να πραγματοποιηθούν και με εξωτερική τόννευση. Με την εξωτερική τόννευση το μήκος του τεμαχίου δεν θα πρέπει να επηρεάζει την προεξοχή του κοπτικού εργαλείου, ωστόσο με την διάνοιξη κυκλικής εσοχής, η επιλογή κοπτικού εργαλείου είναι πολύ περιορισμένη εξαιτίας του μεγέθους της διαμέτρου και του μήκους του τεμαχίου. Ένας γενικός κανόνας που ισχύει για όλες τις κατεργασίες, είναι η ελαχιστοποίηση της προεξοχής του κοπτικού εργαλείου προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σταθερότητα και συνεπώς ακρίβεια στην κατεργασία. Με εσωτερική τόννευση το βάθος της οπής καθορίζει την προεξοχή. Η σταθερότητα αυξάνεται, όταν χρησιμοποιείται ένα μεγαλύτερης διαμέτρου κοπτικό εργαλείο, αλλά περιορίζονται οι δυνατότητες κατεργασίας αφού ο χώρος που δημιουργείται από τη διάμετρο της οπής στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, πρέπει να επιδέχεται τις όποιες πιθανές κινήσεις του κοπτικού εργαλείου, όπως για παράδειγμα ακτινικές κινήσεις.³⁸

Ανάλογα με την αμοιβαία σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης έχουμε :

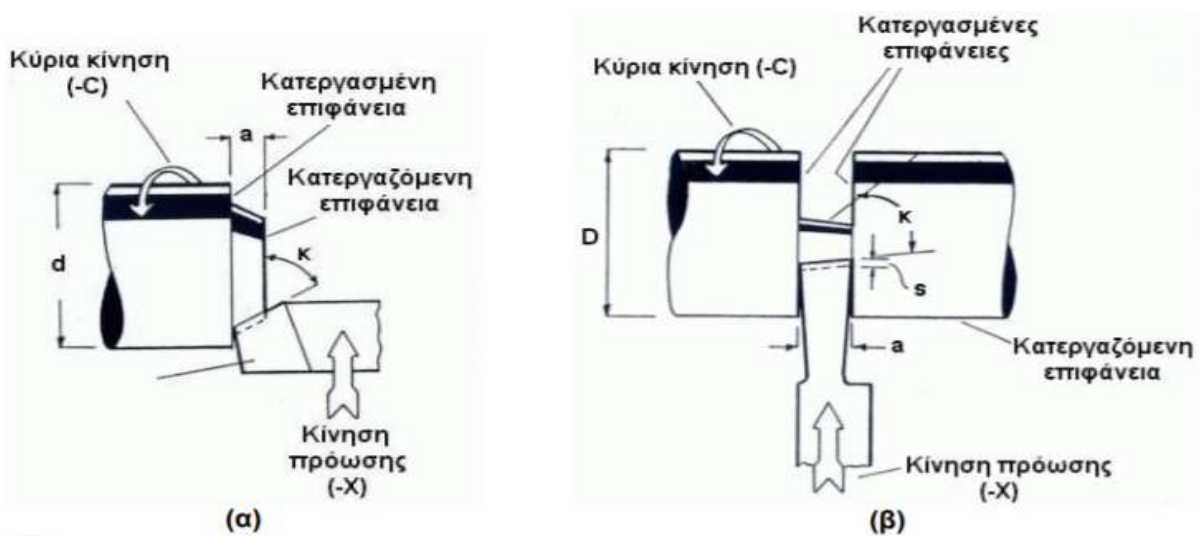
-Διαμήκης τόννευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τόννευσης , εξωτερική και εσωτερική αντίστοιχα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1 από κάτω .

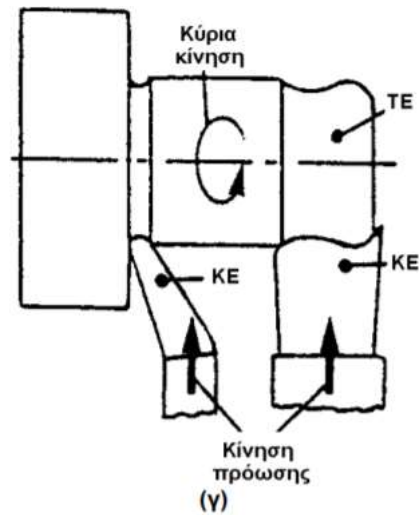


Εικόνα 3.1 : Αριστερά συναντάμε εξωτερική διαμήκης τόννευση και αντίστοιχα εσωτερική στα δεξιά.³⁸

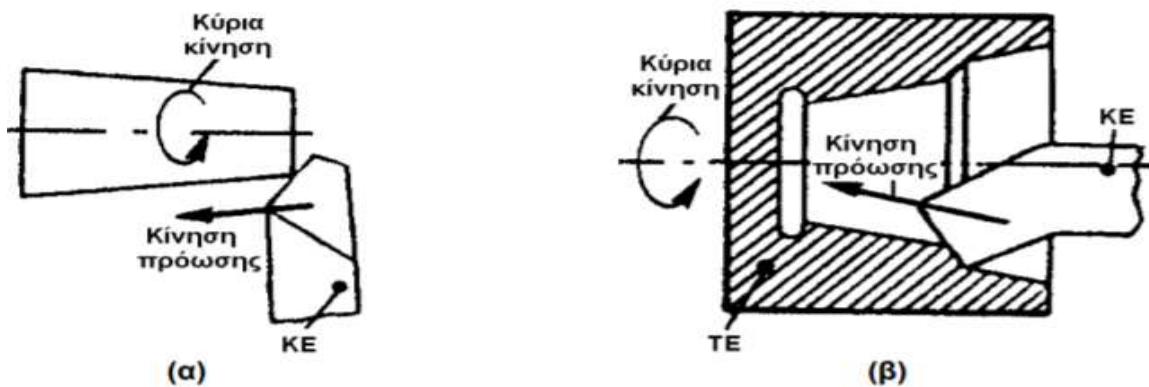
-Εγκάρσια τόννευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τόννευσης.

Η οποία διακρίνεται με τη σειρά της σε: Μετωπική (Εικόνα 3.2α), Ακτινική (τόννευση αποκοπής και τόννευση μορφής, Εικόνες 3.2β, 3.2γ) και τέλος κωνική τόννευση, με την διεύθυνση της κίνησης πρόωσης να τέμνει τον άξονα τόννευσης (Σχήμα 3.3).



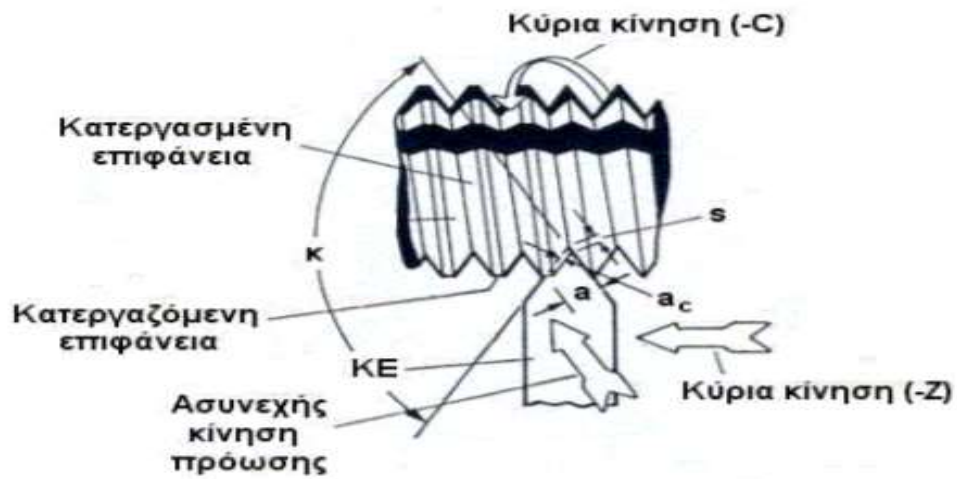


Εικόνα 3.2 : Εγκάρσια τórνευση α)Μετωπική β)Αποκοπής γ)Μορφής³⁸

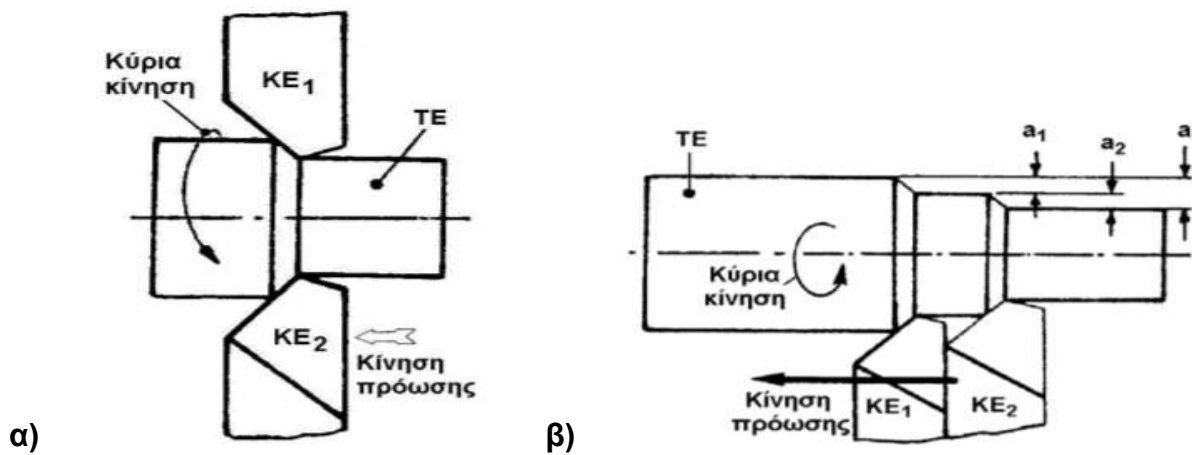


Εικόνα 3.3 : Κωνική τórνευση α)Εξωτερική και β)Εσωτερική³⁸

Τέλος συναντάμε τις ειδικές τρνενύσεις που είναι η σπειροτόμηση, εξωτερική ή εσωτερική αντίστοιχα (Εικόνα 3.4) και η τórνευση με πολλά κοπτικά εργαλεία. Αυτή μπορεί να είναι είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.4 : Σπειροτόμηση³⁸



Εικόνα 3.5 : Με διπλό κοπτικό εργαλείο α) Διαιρούμενη πρόωση και β) Διαιρούμενο βάθος κοπής.³⁸

3.1.2. Συνθήκες Κατεργασίας

Στην τόννευση οι συνθήκες κοπής είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κομματιού και την διάμετρο κοπής, είναι η πρόωση που είναι η ταχύτητα στη διεύθυνση του άξονα περιστροφής κατά την οποία το κοπτικό εργαλείο εισέρχεται εντός του τεμαχίου ανά μία περιστροφή και είναι και το βάθος κοπής που ονομάζεται το εγκάρσιο βάθος εισχώρησης του κοπτικού εργαλείου στο

τεμάχιο που είναι υπό κατεργασία. Οι τρεις αυτοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατεργασία και η σωστή κάθε φορά επιλογή τους, αποτελεί απαραίτητη γνώση του χειριστή ενός τόνου.

Η ταχύτητα κοπής δηλαδή εκφράζει τον ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση, που είναι η περιστροφή του τεμαχίου. Κατά την τόννευση τεμαχίου διαμέτρου D [mm], το οποίο περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής v , προκύπτει από την σχέση:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad , \quad \text{όπου } \pi \approx 3,14 \quad (\text{σχέση 3.1})$$

Η σχέση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η ταχύτητα κοπής ισούται με το πηλίκο του διαστήματος που διανύεται δια τον χρόνο. Το διάστημα που διανύεται σε ένα λεπτό [min], είναι το αντίστοιχο n περιστροφών και επειδή σε μία περιστροφή, το διάστημα που διανύεται ισούται με την περιφέρεια του τεμαχίου (πD), το συνολικό διάστημα σε ένα λεπτό είναι $\pi \cdot D \cdot n$. Ο παρονομαστής 1000, εισάγεται έτσι ώστε τα χιλιοστά [mm] της διαμέτρου D , να εκφράζονται σε μέτρα [m] στην τιμή της ταχύτητας v . Επίσης η ταχύτητα κοπής δεν επιλέγεται τυχαία. Χαμηλή ταχύτητα κοπής οδηγεί σε μεγάλο χρόνο κοπής, ενώ υψηλή ταχύτητα κοπής οδηγεί σε υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο, με αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά και καταστροφή του κοπτικού μας εργαλείου.³⁹

Δηλαδή καταλαβαίνουμε πως από τον συνδυασμό των μεγεθών που αναφέραμε, ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής και πρόωση εξαρτώνται κατά κύριο λόγο η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ο χρόνος της κατεργασίας, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται καθώς και η καταναλισκόμενη ισχύς κοπής και η διάρκεια ζωής του κοπτικού μας εργαλείου.

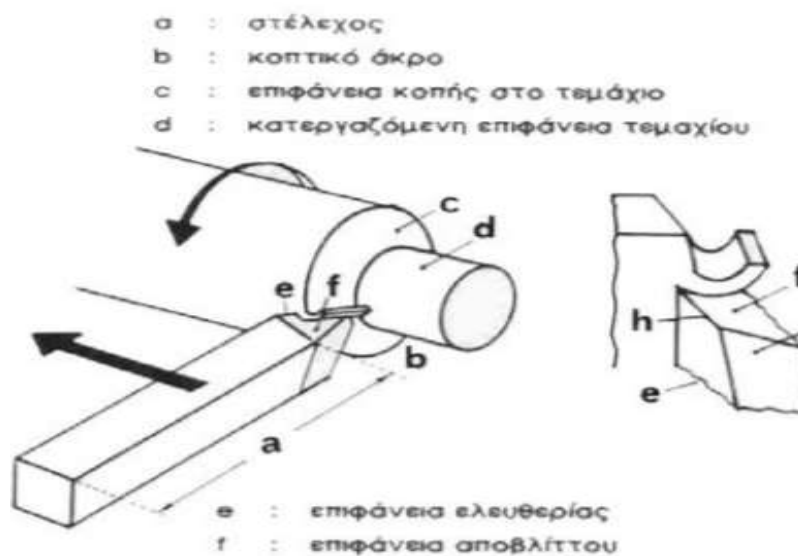
3.1.3. Κοπτικά Εργαλεία

Για την κοπή στην τόννευση χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία συνήθως από χάλυβα εργαλείων, ταχυχάλυβα, σκληρομέταλλα και κεραμικά. Η διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου εξαρτάται κατά πολύ από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο και από την γεωμετρία της κόψης του. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα

κοπτικό εργαλείο συνοψίζονται στα παρακάτω :

- μεγάλη σκληρότητα, ώστε να μπορεί το εργαλείο να εισχωρεί στο μαλακότερο κατεργαζόμενο τεμάχιο
- αντίσταση στην θερμότητα, ώστε να διατηρεί την σκληρότητά του στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή
- αντίσταση σε φθορά, ώστε η κοπτική ακμή του να διατηρεί τις κοπτικές ιδιότητές της.

Στο κοπτικό εργαλείο διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά τμήματα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6, το στέλεχος και το κοπτικό άκρο. Το μεν στέλεχος χρησιμοποιείται για την συγκράτηση του εργαλείου στον εργαλειοδέτη, ενώ το κοπτικό άκρο περιλαμβάνει τις κοπτικές ακμές που συμμετέχουν στην κοπή. Το στέλεχος είναι από μαλακό υλικό ώστε να δέχεται τα κρουστικά φορτία και τις δυναμικές καταπονήσεις κατά την διάρκεια της κοπής χωρίς να θραύεται.³⁹



Εικόνα 3.6 : Διακρίνουμε το στέλεχος στο *a* και το κοπτικό άκρο στο *b*.³⁹

Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου καθορίζεται από τις κοπτικές γωνίες του. Οι γωνίες κοπής επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της κοπής (ποιότητα επιφάνειας, τραχύτητα κλπ) και εξαρτώνται από το υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί. Γενικώς σκληρό υλικό απαιτεί μεγάλη γωνία κοπτικού εργαλείου ενώ μαλακό υλικό απαιτεί μεγάλη γωνία αποβλήτου.³⁹

3.2. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

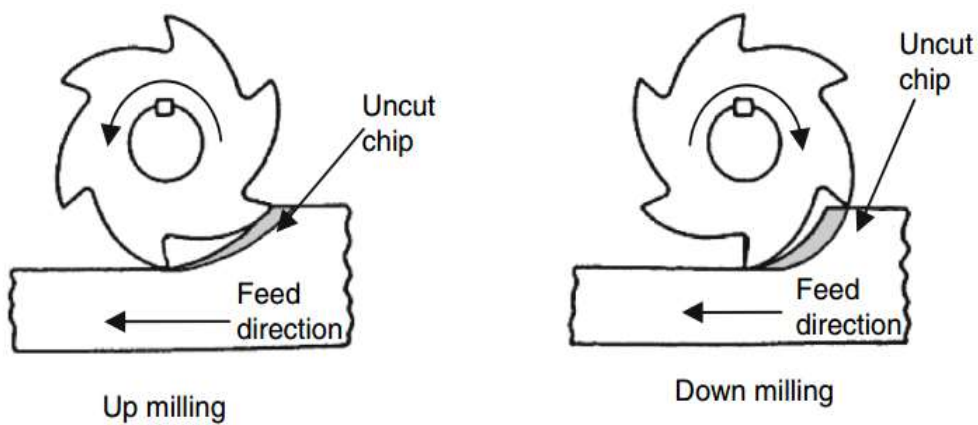
Κατά το φρεζάρισμα, το υλικό απομακρύνεται από το τεμάχιο εργασίας με μια περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή που μπορεί να έχει περισσότερο από ένα ενεργό κοπτικό άκρο. Οι τύποι εργασιών φρεζαρίσματος που είναι πιο συνηθισμένοι κατά τη μηχανική κατεργασία των σύνθετων υλικών είναι το περιφερειακό φρεζάρισμα (όταν ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος προς την τράπεζα) και το μετωπικό φρεζάρισμα (όταν ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι κάθετος προς την τράπεζα). Το περιφερειακό φρεζάρισμα χρησιμοποιεί τις άκρες κοπής στην περιφέρεια του εργαλείου. Ονομάζεται καταλληλότερα το κόψιμο των άκρων, επειδή η διάμετρος του εργαλείου είναι συνήθως μικρή και η αξονική εμπλοκή καλύπτει ολόκληρο το πάχος του τεμαχίου εργασίας.

Το μετωπικό φρεζάρισμα είναι παρόμοιο με το περιφερειακό εκτός του ότι η αξονική εμπλοκή μπορεί να είναι μικρότερη από το πάχος του τμήματος και λαμβάνεται μια σχισμή. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι ένα κάθετο μηχάνημα φρεζαρίσματος και παρέχει την πρωτεύουσα κίνηση στον άξονα.^{15,40}

Οι εργασίες φρεζαρίσματος και τελειώματος ταξινομούνται περαιτέρω ανάλογα με την σχέση των διανυσμάτων της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας κοπής στο σημείο πρώτης επαφής κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, δηλαδή ανάλογα με το πώς το κοπτικό άκρο προσεγγίζει το τεμάχιο εργασίας, σε ομόρροπο και αντίρροπο φρεζάρισμα. Κατά το αντίρροπο φρεζάρισμα τα δύο διανύσματα είναι αντίρροπα δηλαδή η κατεύθυνση της ταχύτητας κοπής της ακμής σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας είναι αντίθετη προς την κατεύθυνση τροφοδοσίας. Από την άλλη στο ομόρροπο φρεζάρισμα η κατεύθυνση της ταχύτητας κοπής είναι η ίδια με αυτή της τροφοδοσίας και η εκκίνηση κοπής γίνεται από μέγιστο πάχος αποβλήτου σε αντίθεση με την άλλη περίπτωση όπου η εκκίνηση κοπής ξεκινά από μηδενικό πάχος αποβλήτου. Η προκύπτουσα περιοχή αποβλήτου και στις δύο περιπτώσεις έχει ένα σχήμα “κόμμα” και το μήκος του αποβλήτου περιγράφεται από ένα τροχοειδές που προκύπτει από την υπέρθεση της περιφερικής κίνησης και κίνησης τροφοδοσίας.^{15,40}

Όπως αναφέραμε κατά το αντίρροπο φρεζάρισμα η ακμή κοπής αρχίζει να εμπλέκει το απόβλητο στο λεπτό τμήμα του σχήματος κόμμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλές δυνάμεις εμπλοκής και ανύψωση του τεμαχίου εργασίας. Κατά το ομόρροπο, το κοπτικό άκρο εμπλέκει το απόβλητο στο παχύ τμήμα του σχήματος

κόμμα. Οι δυνάμεις εμπλοκής είναι υψηλές και έχουν σαν αποτέλεσμα να σπρώχνουν το τεμάχιο εργασίας πάνω στην επιφάνεια εργασίας. Οι δυνάμεις κοπής κατά το φρεζάρισμα επίσης δεν είναι συνεχείς. Κατά το αντίρροπο, οι δυνάμεις αυξάνονται σταδιακά από το μηδέν κατά την έναρξη της εμπλοκής του εργαλείου σε ένα μέγιστο όταν η κοπτική άκρη πρόκειται να εγκαταλείψει το τεμάχιο εργασίας. Οι δυνάμεις πέφτουν πάλι στο μηδέν όταν η άκρη κοπής αφήνει το τεμάχιο εργασίας. (Εικόνα 3.7)⁴⁰



Εικόνα 3.7 : Αντίρροπο και ομόρροπο φρεζάρισμα¹⁵

Η διαδρομή του εργαλείου είναι θολοειδής και παράγεται από το συνδυασμό των κινήσεων περιστροφής (ατράκτου) και μετάθεσης (τροφοδοσίας). Η ακριβής γεωμετρία και κινηματική του φρεζαρίσματος προς τα πάνω και προς τα κάτω έχουν διερευνηθεί διεξοδικά από τους Martellotti , Foenigsberger και Sabberwal μεταξύ άλλων. Οι βασικές εκφράσεις που περιγράφουν αυτή την κίνηση δίνονται ως εξής.¹⁵ Η ταχύτητα κοπής δίνεται ως συνάρτηση της ταχύτητας του άξονα, N , και της διαμέτρου του εργαλείου, D , από τη σχέση :

$$v = \pi \cdot D \cdot N \quad (\text{σχέση 3.2})$$

Η ταχύτητα τροφοδοσίας, v_f , και η τροφοδοσία ανά περιστροφή, f , σχετίζονται με :

$$f = \frac{V_f}{N} \quad (\text{σχέση 3.3})$$

Η τροφοδοσία ανά δόντι, a_f , η οποία ορίζει τη μετάθεση του τεμαχίου προς κατεργασία μεταξύ της εμπλοκής διαδοχικών κοπτικών άκρων, εκφράζεται ως συνάρτηση της ταχύτητας τροφοδοσίας v_f , της ταχύτητας ατράκτου N και του αριθμού των κοπτικών άκρων επί της κοπτικής κεφαλής, T και δίνεται από την σχέση:

$$a_f = \frac{V_f}{T \cdot N} \quad (\text{σχέση 3.4})$$

Το μήκος της εμπλοκής της κοπτικής ακμής στο τεμάχιο εργασίας δίνεται από το έκφραση :

$$L_c = \frac{D}{2} \cos^{-1} \left(1 - \frac{2a_e}{D} \right) \pm \frac{a_f T}{\pi D} (Da_e - a_e^2)^{1/2} \quad (\text{σχέση 3.5}) ,$$

Όπου το θετικό σύμβολο χρησιμοποιείται για το αντίρροπο και το αρνητικό σύμβολο χρησιμοποιείται για το ομόρροπο φρεζάρισμα και όπου a_e το βάθος κοψίματος.¹⁵ Το μέσο πάχος του αδιάρτητου αποβλήτου δίνεται από το τύπο :

$$a_{avg} = \frac{a_f a_e}{L_c} \quad (\text{σχέση 3.6})$$

Από αυτές τις εξισώσεις παρατηρείται ότι η διαδρομή του εργαλείου είναι μεγαλύτερη κατά το αντίρροπο σε σχέση με το ομόρροπο φρεζάρισμα.¹⁵ Οι μη χαραγμένες περιοχές των αποβλήτων είναι οι ίδιες και για των δύο ειδών τα φρεζαρίσματα, αλλά το μέσο πάχος αποβλήτου στο ομόρροπο φρεζάρισμα είναι μεγαλύτερο. Για ένα δεδομένο βάθος κοψίματος, a_e , το μέγιστο άκαμπτο πάχος αποβλήτου αντίρροπου φρεζαρίσματος είναι μικρότερο από αυτό στο ομόρροπο. Αυτό εξηγεί την υψηλότερη απαίτηση της κοπής ισχύος και των υψηλότερων δυνάμεων κοπής που σχετίζονται με το ομόρροπο φρεζάρισμα.¹⁵

Για τις μικρές ταχύτητες τροφοδοσίας σε σύγκριση με την ταχύτητα του άξονα,

η θολοειδής διαδρομή μπορεί να προσεγγιστεί με ένα κυκλικό τόξο και η γεωμετρία των άκοπων αποβλήτων για τα δύο είδη φρεζαρίσματος είναι περίπου η ίδια. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση των περισσότερων εφαρμογών επεξεργασίας των σύνθετων υλικών. Η συνολική γωνία εμπλοκής, φ_{χ} , δίνεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του εργαλείου και του ακτινικού βάθους της κοπής, a_e .¹⁵

$$\cos \varphi_{\chi} = 1 - \frac{2 a_e}{D} \quad (\text{σχέση 3.7})$$

Ο ρυθμός απομάκρυνσης του υλικού, Z_w , στο τελικό άλεσμα δίνεται από τα προϊόντα του ακτινικού βάθους κοπής, a_e , του αξονικού βάθους κοπής, a_p , και ταχύτητας τροφοδοσίας. Κατά το κόψιμο των άκρων και τη μορφοποίηση, το a_p αντιπροσωπεύει το πάχος του τεμαχίου εργασίας, έτσι έχουμε :

$$Z_w = a_e a_p v_f \quad (\text{σχέση 3.8})$$

Τέλος ο χρόνος που απαιτείται για το φρεζάρισμα ενός μήκους, L_w , είναι ο χρόνος που χρειάζεται το εργαλείο για να διασχίσει το μήκος του τεμαχίου εργασίας και οποιαδήποτε επιπλέον απόσταση που απαιτείται για να καθαριστεί πλήρως το εργαλείο από το τεμάχιο εργασίας.¹⁵ Ο χρόνος κατεργασίας δίνεται από :











$$t_m = \frac{L_w + L_e}{v_f} \quad (\text{σχέση 3.9})$$

όπου L_e είναι η απόσταση που απαιτείται για να καθαρίσετε το τεμάχιο εργασίας από το εργαλείο και δίνεται από :

$$L_e = \sqrt{a_e (D - a_e)} \quad (\text{σχέση 3.10})$$

Τέλος ένας συνοπτικός πίνακας των κοπτικών εργαλείων φρεζαρίσματος με τις αντίστοιχες ονομασίες τους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 από κάτω.

Πίνακας 3.1 : Συγκεντρωτικός πίνακας των βασικών κοπτικών εργαλείων φρεζαρίσματος.⁴

| Είδος φραιζαρίσματος | Είδος κοπήρα (φραιζας) | Μορφή κοπήρα | Είδος φραιζαρίσματος | Είδος κοπήρα (φραιζας) | Μορφή κοπήρα |
|----------------------|------------------------------------|--|----------------------|-------------------------------------|---|
| Περιφερικό | Περιφερικός ή κυλινδρικός |  | Μετωπικό | Μετωπικός |  |
| | Κονδυλοειδής |  | | Πρισματικός (οξείας γωνίας) |  |
| | Αυλάκων (τριπλής τομής ή τρίκοπος) |  | | Μετωπικός (ένθετων οδόντων) |  |
| | Δισκοειδής |  | Περιφερικό-Μετωπικό | Περιφερικός (κυλινδρικός)-μετωπικός |  |
| | Σχίσματος (πριονόδισκος) |  | | | |
| | Μορφής (μορφοκοπήρας) |  | | | |

3.3. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΛΕΙΑΝΣΕΩΝ

Η λειαντική κατεργασία και το τρόχισμα αφαιρούν το υλικό με τη δράση της κίνησης μικρών σκληρών σωματιδίων που είναι προσαρτημένα σε ένα σχετικά άκαμπτο σώμα. Η σκληρή φάση είναι τυπικά αλουμινοξείδιο, καρβίδιο του πυριτίου, νιτρίδιο κυβικού βορίου ή σωματίδια διαμαντιού. Το τρόχισμα είναι μια σημαντική διαδικασία κατασκευής και έχει λάβει μεγάλη προσοχή από την επιστημονική κοινότητα. Η λειαντική μηχανική κατεργασία, αντίθετα, είναι μια σχετικά νέα πρακτική και έχει λάβει ελάχιστη προσοχή. Ωστόσο, οι ομοιότητες μεταξύ του τροχίσματος και της λειαντικής κατεργασίας μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να είναι επαρκείς για να γεφυρώσουν το κενό στη γνώση και να διευκολύνουν τη μεταφορά της εμπειρίας από το τρόχισμα στην λείανση. Η λείανση έχει ιδιαίτερες πτυχές που την κάνουν κάπως διαφορετικό από το τρόχισμα. Οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων εμπίπτουν κυρίως σε τρεις παραμέτρους διεργασίας: το βάθος κοπής, τη διάμετρο του τροχού ή

του κοπτήρα (και την ταχύτητα που προκύπτει) και τις ταχύτητες τροφοδοσίας του τεμαχίου. Ο Πίνακας 3.2 παραθέτει κάποιες από τις κοινές κλίμακες παραμέτρων το τρόχισμα και την λείανση.

Πίνακας 3.2 : Σύγκριση τυπικών διακυμάνσεων των παραμέτρων διεργασίας σε λειαντικές κατεργασίες και τρόχισμα¹⁵

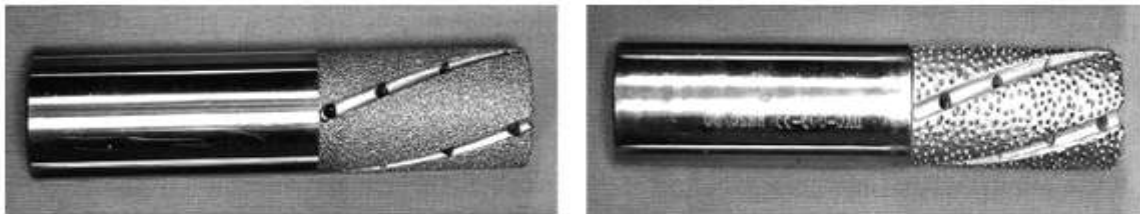
| Parameter range | Abrasive machining | Grinding |
|---|---------------------------|---|
| Typical cutter/wheel diameter (mm) | 6–25 | Up to 1,000 |
| Cutting speed, v (m/min) | 100–500 | 1,500–5,000 |
| Workpiece feed rate, v_f (m/min) | 0.25–1.00 | 5.0–50.0 |
| Radial depth of cut, a_e (mm) | 1.00 – Full tool diameter | 0.01–0.05 |
| Equivalent chip thickness, h_q (μm) | 2.00–50 | 0.01–0.1 |
| Material removal rate, Z_w (cm^3/min) | 10–100 | 1.00×10^{-5} – 2.50×10^{-4} |

Οι λειαντικοί κοπτήρες έχουν μικρές διαμέτρους σε σύγκριση με τους τροχούς λείανσης και χρησιμοποιούνται για πιο μαζική αφαίρεση υλικού. Η ταχύτητα κοπής και η τροφοδοσία του τεμαχίου είναι σχετικά χαμηλότερες, αλλά το βάθος κοπής είναι υψηλότερο. Ως αποτέλεσμα, το ισοδύναμο πάχος γρεζιών αποκοπής είναι σημαντικά μεγαλύτερο, ο ρυθμός απομάκρυνσης του υλικού είναι υψηλότερος και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι υψηλότερη από εκείνη της λείανσης.¹⁵

3.3.1. Λειαντική κατεργασία

Αρχικά στην κατεργασία αυτή τα πρωταρχικά κίνητρα είναι μια σχεδόν πλήρης εξάλειψη της αποκόλλησης και βελτιωμένη επιφάνεια.^{42,43} Η Εικόνα 3.8 δείχνει τυπικούς λειαντικούς κόπτες διαμαντιών που χρησιμοποιούνται για την κοπή των άκρων και την κατεργασία των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών. Τα λειαντικά σωματίδια είναι διαμαντένια χαλίκια διαφόρων μεγεθών προσαρτημένα με μεταλλικό δεσμό στο στέλεχος του εργαλείου. Ο κοπτήρας 30 είναι ένας κόπτης γενικής χρήσης, αφού έχει μεγάλους κόκκους διαμαντιού και μεγάλη απόσταση μεταξύ των

αυλακώσεων, επιτρέποντας την καλύτερη απόρριψη των αποβλήτων. Ο κοπτήρας 80 έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση μικρών σωματιδίων διαμαντιού και είναι καταλληλότερος για εφαρμογές φινιρίσματος, όπου οι αυλακώσεις και οι οπές ψυκτικού μέσου ενσωματώνονται στον κόπτη για την ευκολία απομάκρυνσης και ψύξης των θραυσμάτων. Υπάρχουν δύο τεχνικές για τη συγκόλληση του διαμαντένιου χαλικιού στο στέλεχος του εργαλείου, συγκεκριμένα η ηλεκτρολυτική επίστρωση και η συγκόλληση.⁴⁴ Και στις δύο μεθόδους, ένα μονό στρώμα σωματιδίων διαμαντιού συνδέεται με το στέλεχος του εργαλείου με έναν μεταλλικό δεσμό.



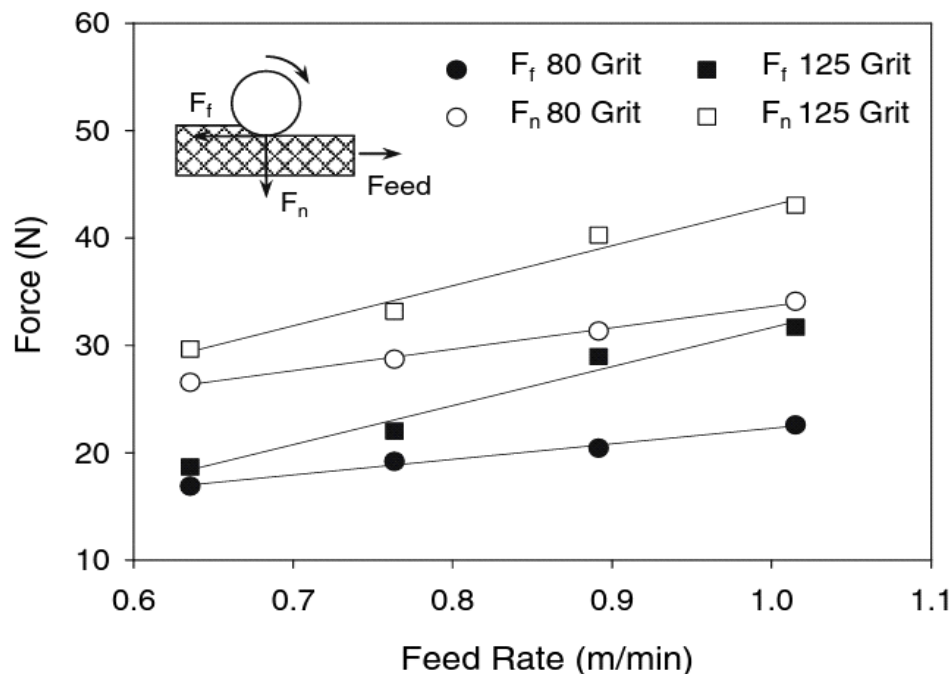
Εικόνα 3.8 : Τυπικοί λειαντικοί κόπτες με λεπτόκοκκο 80 (αριστερό) και χοντρό 30 (δεξιά).⁴⁴

Η ηλεκτρολυτική επικάλυψη περιλαμβάνει τη βύθιση ενός κορμού από χαλύβδινο εργαλείο σε διάλυμα επίστρωσης νικελίου με αιωρούμενα σωματίδια διαμαντιού. Τα ιόντα του νικελίου συσσωρεύονται στο χαλύβδινο κορμό μεταξύ των σωματιδίων του διαμαντιού, προσκολλώντας ένα μόνο στρώμα σωματιδίων στην επιφάνεια του εργαλείου. Το εργαλείο στη συνέχεια καλύπτεται με νικέλιο μέχρις ότου περίπου το 50-70% του σωματιδίου διαμαντιού καλύπτεται από τη μήτρα δεσμού. Η ηλεκτρολυτική επικάλυψη έχει ως αποτέλεσμα υψηλή πυκνότητα σωματιδίων διαμαντιού με χαμηλή έκθεση σε κόκκους. Αυτό μειώνει την απόσταση που απαιτείται για την απόθεση αποβλήτου και προκαλεί θερμότητα και ταχεία φθορά εργαλείων. Στην τεχνική ετερογενούς συγκόλλησης, εφαρμόζονται στην επιφάνεια του χαλύβδινου στελέχους, το χαλίκι με διαμάντια και το κράμα ψευδαργύρου νικελίου-χρώματος. Ο συνδυασμός εργαλείου / διαμαντιού στη συνέχεια θερμαίνεται για να λιώσει το κράμα. Το κράμα ψευδαργύρου συνδέεται με το υπόστρωμα του χάλυβα και με τα σωματίδια διαμαντιού, ρυθμίζοντας ξεχωριστά κάθε σωματίδιο διαμαντιού και συνδέοντάς το με το χαλύβδινο κορμό. Η συγκόλληση επιτρέπει τον μεγαλύτερο έλεγχο της πυκνότητας και της κατανομής των σωματιδίων των διαμαντιών. Αυτό έχει

ως αποτέλεσμα υψηλή έκθεση σε κόκκους και επιτρέπει τη μέγιστη εκκαθάριση από τα γρέζια.

3.3.2. Δυνάμεις κοπής και ειδική ενέργεια κοπής

Οι δυνάμεις κοπής στην λειαντική μηχανική κατεργασία μετριούνται κατά την κατεύθυνση τροφοδοσίας όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Οι δυνάμεις κοπής επίσης εξαρτώνται από την ταχύτητα τροφοδοσίας και το μέγεθος του πλέγματος.⁴²



Σχήμα 3.1 : Εξάρτηση των δυνάμεων κοπής στην ταχύτητα τροφοδοσίας και το μέγεθος του κόκκου κατά την κατεργασία πολυστρωματικού υλικού CFRP.⁴²

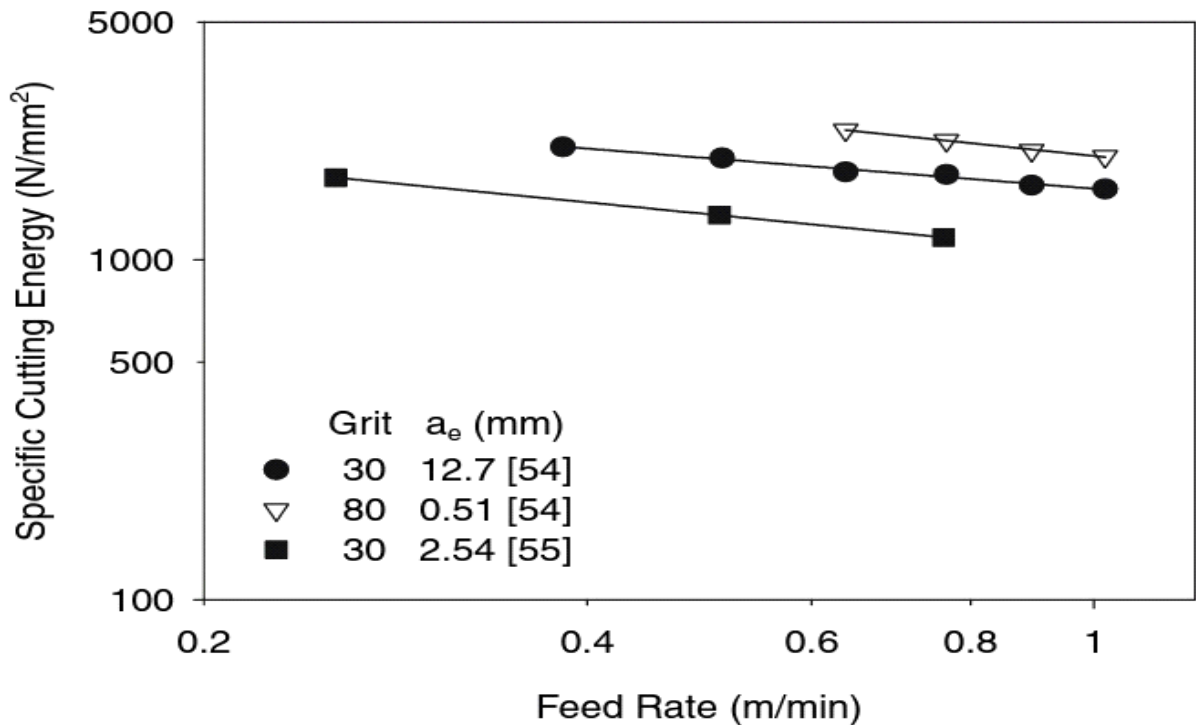
Οι δυνάμεις κοπής γενικά αυξάνονται με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας και τη μείωση του μεγέθους των κόκκων (αύξηση του αριθμού των κόκκων). Η αύξηση της ταχύτητας τροφοδότησης διατηρώντας ταυτόχρονα την ταχύτητα κοπής και το ακτινικό βάθος της κοπής συνεπάγεται μια αναλογική αύξηση στο ισοδύναμο πάχος αποβλήτου και μια αναλογική αύξηση των δυνάμεων που απαιτούνται για την αφαίρεση του αποβλήτου. Τα εργαλεία κοπής με λεπτότερο γρανίτη έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα σωματιδίων και μικρότερη κάθαρση σωματιδίων για

απόρριψη γρεζιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων να εμπλέκονται στην κοπή και ένα μεγαλύτερο βάθος εμπλοκής για κάθε μεμονωμένο σωματίδιο. Αυτό εξηγεί την υψηλότερη εξάρτηση των δυνάμεων κοπής από την ταχύτητα τροφοδοσίας για λεπτότερο εργαλείο κοπής. Γενικώς για διαφορετικά εργαλεία κοπής, η δύναμη κοπής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη δύναμη τροφοδοσίας. Αυτό είναι χαρακτηριστικό της κατεργασίας των σύνθετων υλικών σε μικρά βάθη κοπής επειδή οι δυνάμεις τριβής κυριαρχούν στον τρόπο κοπής. Καθώς αυξάνεται το βάθος κοπής, η δύναμη τροφοδοσίας γίνεται υψηλότερη από την κανονική δύναμη.^{42,43} Η συγκεκριμένη ενέργεια κοπής στην λειαντική μηχανική κατεργασία καθορίζεται από τη σχέση

$$U = \frac{P}{Z} = \frac{F_f \cdot v}{a_e \cdot a_w \cdot v_f} \quad (\text{σχέση 3.11})^{41}$$

όπου P είναι η δύναμη κοπής, F_f είναι η δύναμη τροφοδοσίας, v είναι η ταχύτητα κοπής, Z είναι η ταχύτητα απομάκρυνσης του ογκομετρικού υλικού που δίνεται από το προϊόν του ακτινικού βάθους κοπής, a_e , το πλάτος της κοπής, a_w , και ο ρυθμός τροφοδοσίας, v_f . Αυτή η έκφραση αντιπροσωπεύει μια συνολική ποσότητα ενέργειας κοπής. Τυπικές ειδικές τιμές ενέργειας κοπής για λειαντικές μηχανικές κατεργασίες του CFRP φαίνονται στο Σχήμα 3.2.

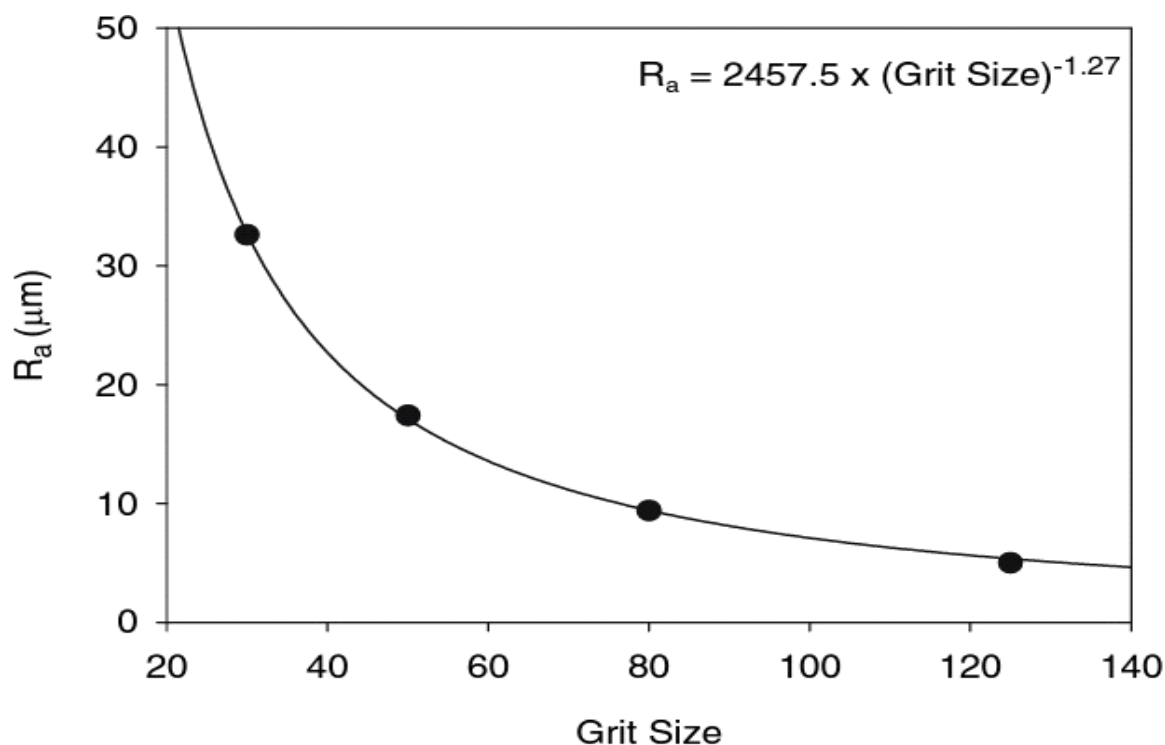
Παρόμοια με τη συμπεριφορά κατά το φρεζάρισμα και τη διάτρηση, η συγκεκριμένη ενέργεια κοπής μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας σύμφωνα με μια σχέση ισχύος. Ωστόσο, είναι φανερό ότι η ειδική ενέργεια κοπής που απαιτείται για λειαντική κοπή είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται για τη διάτρηση και το φρεζάρισμα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρότερο αντίστοιχο μέγεθος αποβλήτου και εξηγεί τις υψηλότερες συγκεκριμένες δυνάμεις κοπής και τις θερμοκρασίες που σχετίζονται με την λειαντική μηχανική κατεργασία.⁴²



Σχήμα 3.2 : Εξάρτηση των δυνάμεων κοπής στην ταχύτητα τροφοδοσίας και το μέγεθος των κόκκων κατά την κατεργασία πολυστρωματικού CFRP.⁴²

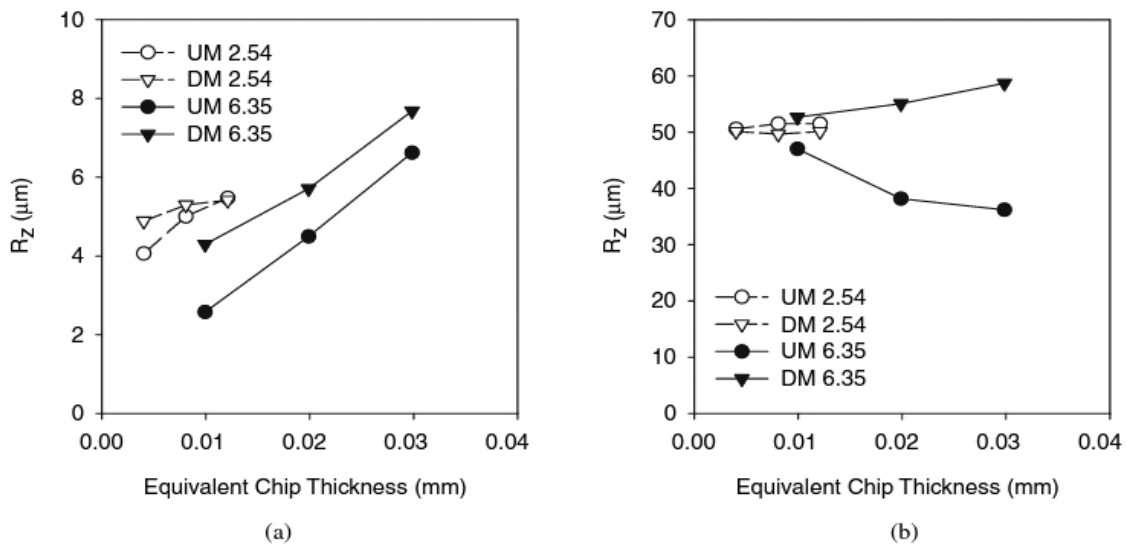
3.3.3. Ποιότητα Κατεργασίας

Η επιφανειακή τοπογραφία στην λειαντική μηχανική κατεργασία παράγεται από τα ίχνη των μεμονωμένων λειαντικών σωματιδίων στην κατεργασμένη επιφάνεια. Επομένως, η τραχύτητα της επιφάνειας στην λειαντική μηχανική κατεργασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του χαλκού και δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ρυθμό τροφοδοσίας.⁴² Η κατεργασμένη επιφάνεια έχει ένα σχέδιο από παράλληλες αυλακώσεις που τρέχουν κατά μήκος της επεξεργασμένης επιφάνειας προς την κατεύθυνση της ταχύτητας τροφοδοσίας. Το μέγεθος των αυλακώσεων και συνεπώς η προκύπτουσα επιφανειακή τοπογραφία συσχετίζεται γενικά με το μέγεθος των λειαντικών κόκκων όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 3.3.



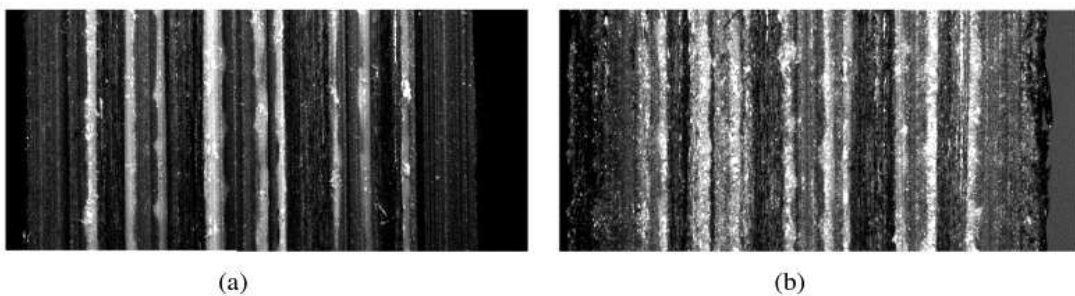
Σχήμα 3.3 : Σχέση μεταξύ φινιρίσματος επιφάνειας και μεγέθους λειαντικού κόπτη⁴²

Ο ρυθμός τροφοδοσίας δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας για το μικρό βάθος κοπής και για τους λεπτούς κόπτες.⁴³ Επίσης, για το μέγεθος των λεπτών κόκκων, η διαμόρφωση κοπής δεν επηρεάζει την τραχύτητα της επιφάνειας. Για μεγαλύτερο βάθος κοπής και για μεγάλα μεγέθη χοντρών κόκκων η κοπή παράγει σταθερά καλύτερη επιφάνεια. Η επίδραση αυτών των παραμέτρων κοπής στην τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να ερμηνευθεί λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ του μέγιστου ισοδύναμου πάχους αποβλήτου, του μεγέθους του αποβλήτου ανά λειαντικό κόκκο και του καθαρισμού των κόκκων για την απόρριψη των αποβλήτων. Το Σχήμα 3.4 δείχνει την επίδραση του ισοδύναμου πάχους των αποβλήτων και της διαμόρφωσης κοπής στην τραχύτητα της επιφάνειας στην λειαντική μηχανική κατεργασία πολυστρωματικού CFRP με κοπήρα 30. Η τραχύτητα της επιφάνειας μετράται κατά μήκος της κατεύθυνσης κοπής και κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Για μια δεδομένη ταχύτητα ατράκτου, το αποτελεσματικό πάχος αποβλήτου είναι ανάλογο με το προϊόν του ακτινικού βάθους της κοπής και του ρυθμού τροφοδοσίας.⁴²



Σχήμα 3.4 : Αποτέλεσμα ισοδύναμου πάχους αποβλήτων και διαμόρφωσης κοπής στην τελική επιφάνεια στην λειαντική κατεργασία του CFRP, (α) διαμήκης κατεύθυνση, (β) εγκάρσια κατεύθυνση.⁴³

Δείχνεται ότι η τραχύτητα της επιφάνειας στη διαμήκη κατεύθυνση είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στην εγκάρσια κατεύθυνση και επηρεάζεται έντονα από το αποτελεσματικό πάχος του αποβλήτου. Η τραχύτητα της επιφάνειας στην εγκάρσια κατεύθυνση ελέγχεται πιθανότατα από τις αυλακώσεις που αφήνονται πίσω από τους λειαντικούς κόκκους και εξαρτάται λιγότερο από το αποτελεσματικό πάχος του γρεζιού.



Εικόνα 3.9 : Τοπογραφία της κατεργασμένης επιφάνειας για πολυστρωματικό πολυστρωματικό CFRP⁴³

Η τοπογραφία της επεξεργασμένης επιφάνειας σε δύο διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας παρουσιάζεται παραπάνω στην Εικόνα 3.9. Η επιφανειακή τοπογραφία

χαρακτηρίζεται από αυλακώσεις που εκτείνονται κατά μήκος της κατεύθυνσης κοπής. Για τον μικρότερο ρυθμό τροφοδοσίας η επιφάνεια φαίνεται να είναι ομαλότερη και τα διαφορετικά στρώματα που κάνουν το έλασμα μπορούν εύκολα να επιλυθούν. Για την υψηλότερη ταχύτητα τροφοδοσίας η επιφάνεια παρουσιάζει σημαντική ασαφή και κηλίδα της μήτρας. Τα φύλλα που αποτελούν το έλασμα δεν διαλύονται εύκολα και η απόδειξη της βλάβης είναι καθαρή. Οι χαμηλές τιμές της τραχύτητας της επιφάνειας και της καλής ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας καθιστούν την λειαντική κατεργασία ανώτερη από την κοπή των άκρων για το φινίρισμα και την τραχεία κατεργασία των FRP. Συνιστάται στις περισσότερες εφαρμογές λειαντικών μηχανουργικών κατεργασιών να λαμβάνονται ελαφρές περικοπές και να χρησιμοποιείται αρκετό ψυκτικό υγρό για την εκκαθάριση των αποβλήτων και την ψύξη της κατεργασμένης επιφάνειας.

Τέλος η ικανότητα επεξεργασίας των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών σε λειαντικές κατεργασίες και τρόχισμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αντίστοιχο πάχος των γρεζιών. Οι δυνάμεις, η τραχύτητα της επιφάνειας και η θερμοκρασία επιφάνειας αυξάνουν όλα με αύξηση του ισοδύναμου πάχους των γρεζιών. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι υπάρχει ένα κρίσιμο πάχος γρεζιών πέρα από το οποίο η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας γίνεται πιο σημαντική από την μη κοπή της ενεργειακής δαπάνης. Αυτό το κρίσιμο πάχος βρέθηκε να είναι καλά εντός του εύρους των παραμέτρων λείανσης μηχανικής κατεργασίας. Είναι επομένως πιθανό ότι η καλύτερη κατεργασιμότητα των FRP θα επιτυγχάνεται με λειαντική μηχανική κατεργασία με πολύ χαμηλό πάχος ισοδύναμο με το τρόχισμα. Επειδή η λειαντική μηχανική κατεργασία και το τρόχισμα παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας από το φρεζάρισμα, συνιστάται όλες αυτές οι εργασίες να χρησιμοποιούν ένα εγκεκριμένο ψυκτικό μέσο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

"ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ"

4.1. ΚΟΠΗ ΜΕ LAZER

Η μηχανική κατεργασία με λέιζερ των σύνθετων υλικών FRP προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας. Δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου εργασίας και επομένως δεν υπάρχουν δυνάμεις κοπής, δεν υπάρχει φθορά εργαλείων και καμία παραμόρφωση του κομματιού λόγω μηχανικής φόρτωσης. Η κοπή με λέιζερ είναι μια θερμική διαδικασία και δεν επηρεάζεται από τη δύναμη και τη σκληρότητα του υλικού εργασίας. Κατά συνέπεια, είναι καταλληλότερο για την κοπή ετερογενών υλικών που αποτελούνται από διαφορετικές φάσεις με αντίθετες μηχανικές ιδιότητες. Παρέχει υψηλές ταχύτητες μηχανικής κατεργασίας, λεπτό πλάτος κοπής και ευελιξία για την κοπή πολύπλοκων μορφών. Τα μειονεκτήματα της κοπής με λέιζερ περιλαμβάνουν τις αλλαγές υλικών και τη μείωση της αντοχής λόγω του σχηματισμού ενός HAZ (Heat Affected Zone) ή αλλιώς θερμική ζώνη που επηρεάζεται. Ένα άλλο πρόβλημα στη μηχανική κατεργασία με λέιζερ σύνθετων υλικών είναι η παραγωγή επικίνδυνων χημικών προϊόντων αποσύνθεσης. Έχει αποδειχθεί ότι η κοπή με λέιζερ γραφίτη / εποξική, αραμιδική / εποξική και ύαλο / εποξική / αραμιδίου / εποξειδίου παράγει μεγάλες ποσότητες κυανιούχου υδρογόνου, οι οποίες ενδέχεται να ενέχουν σημαντικό κίνδυνο για την υγεία.⁴⁵



Εικόνα 4.1: Κοπή με laser⁶⁰

Επισκόπηση τεχνολογίας

Η μηχανική κατεργασία με λέιζερ χρησιμοποιεί την ενέργεια από μια έντονη, εξαιρετικά κατευθυνόμενη συνεκτική δέσμη υπέρυθρου φωτός για την απομάκρυνση υλικού από το τεμάχιο εργασίας με εντοπισμένη διάτμηση και εξαέρωση τήγματος. Το LASER αντιπροσωπεύει την Ενίσχυση του Φωτός με τη Διέγερση Εκπομπής Ακτινοβολίας, η οποία είναι η βασική αρχή για την παραγωγή όλων των τύπων λέιζερ. Αυτή η αρχή δηλώνει ότι εάν ένα άτομο ή ένα μόριο αυξηθεί σε υψηλό επίπεδο ενέργειας από μια εξωτερική πηγή ενέργειας (π.χ. θερμότητα, φως, χημική αντίδραση κλπ.) και αφήνεται να αποσυντεθεί στο επίπεδο της κατάστασης εδάφους, (ένα φωτόνιο μονάδα φωτός) απελευθερώνεται. Εάν το φωτόνιο έρθει σε επαφή με άλλο άτομο ή μόριο που έχει επίσης αυξηθεί σε υψηλό ενεργειακό επίπεδο, το δεύτερο άτομο ή μόριο θα ενεργοποιηθεί για να επιστρέψει στην κατάσταση εδάφους, απελευθερώνοντας ένα δεύτερο φωτόνιο μαζί με το φωτόνιο ενεργοποίησης. Το ζεύγος φωτονίων που απελευθερώνεται έχει το ίδιο μήκος κύματος, φάση, κατεύθυνση και ενέργεια (συνεκτική). Σε μια συσκευή παραγωγής λέιζερ, τα

εκπεμπόμενα φωτόνια υποβάλλονται σε πολλαπλές ανακλάσεις από δύο παράλληλους και μερικώς μεταδίδοντες καθρέφτες. Αυτό επιτρέπει την ενίσχυση του φωτός με την τόνωση των μέσων εκτύπωσης. Το φως στη συνέχεια αναδύεται από τον μερικώς μεταδιδόμενο καθρέφτη ως μια κορυφαία και συνεκτική δέσμη.

Τα λέιζερ ταξινομούνται σε λέιζερ στερεάς κατάστασης και αέρια, ανάλογα με το μέσο εκτύπωσης, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 : Τύποι λέιζερ ⁴⁶

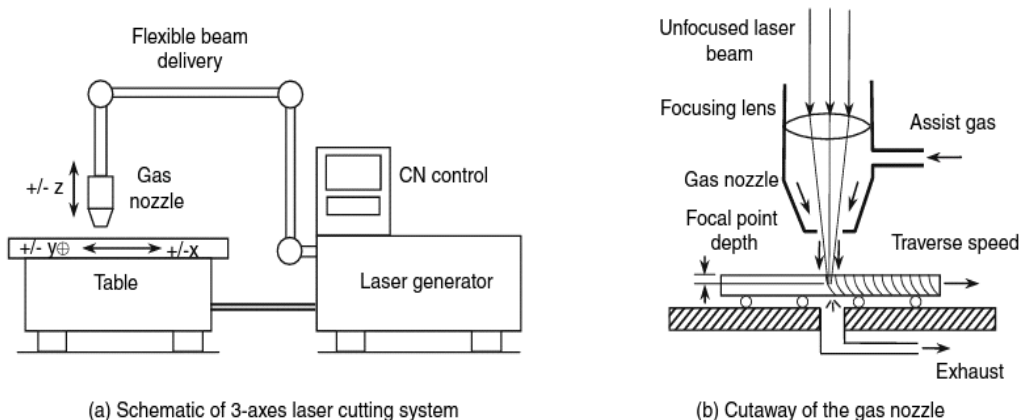
| Laser type | Active media | Mode of operation | Wavelength (μm) |
|-------------|-------------------------------------|-------------------|------------------------|
| Solid-state | Cr:Ruby | Pulsed | 0.6943 |
| Solid-state | Nd:glass | Pulsed | 1.06 |
| Solid-state | Nd:YAG | CW or pulsed | 1.06 |
| Gas | Helium–neon | CW or pulsed | 0.6328, 1.15, 3.39 |
| Gas | Argon | CW or pulsed | 0.4765, 0.4880, 0.5145 |
| Gas | CO ₂ –N ₂ –He | CW or pulsed | 10.6 |

Επιπλέον, όλοι οι τύποι λέιζερ λειτουργούν σε έναν από τους δύο χρονικούς τρόπους: συνεχούς (CW) και παλμικής λειτουργίας. Σε συνεχή λειτουργία, η δέσμη λέιζερ εκπέμπεται χωρίς διακοπή. Σε παλμική λειτουργία, η δέσμη λέιζερ εκπέμπεται περιοδικά. Τα λέιζερ CO₂ είναι ικανά να παρέχουν υψηλή ισχύ έως 3 kW και η ακτινοβολία τους απορροφάται καλά από μη μεταλλικά στοιχεία. Τα λέιζερ YAG στερεάς κατάστασης (κρύσταλλο γρανίτη αλουμινίου πυριτίου περασμένα με Nd³⁺) λειτουργούν σε κατάσταση παλμών και μπορούν να επιτύχουν μέγιστες δυνάμεις 7-10kW, με μέση ισχύ της τάξης των 400W. Οι ακτινοβολίες τους δεν απορροφώνται αποτελεσματικά από οργανικά υλικά ή γυαλί. Συνεπώς, τα λέιζερ CO₂ είναι τα καλύτερα κατάλληλα για μηχανική κατεργασία σύνθετων υλικών και τα λέιζερ YAG δεν είναι κατάλληλα για την κοπή γυάλινων FRP.

Συστήματα κοπής λέιζερ

Τα συστήματα κοπής λέιζερ γενικά αποτελούνται από τέσσερις κύριες ομάδες στοιχείων: παραγωγή δέσμης λέιζερ (CO₂ ή Nd: YAG), παράδοση δέσμης και εστίαση την τοποθέτηση του τεμαχίου προς τη δέσμη λέιζερ και βοηθητικές συσκευές

όπως ακροφύσιο αερίου και εξοπλισμός ασφαλείας. Η εικόνα 3.4.1α είναι ένα σχηματικό σύστημα κοπής με λέιζερ. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της εισαγωγής δέσμης λέιζερ στο τεμάχιο εργασίας. Η δοκός θα μπορούσε να σταθεροποιηθεί ενώ το τεμάχιο εργασίας κινείται από ένα πίνακα με δύο άξονες ελεγχόμενο από το CNC. Σε άλλες διαμορφώσεις, όπως ρομποτικό βραχίονα, το τεμάχιο εργασίας στερεώνεται ενώ η δέσμη μετακινείται σε τρισδιάστατο χώρο. Σε όλα τα συστήματα λέιζερ, ένα σύστημα παράδοσης δέσμης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά και εστίαση της δέσμης λέιζερ για κοπή ή διάτρηση. Το σύστημα παράδοσης δέσμης στεγάζει αντανακλαστικούς καθρέπτες, φακό εστίασης και ομοαξονικό ακροφύσιο αερίου. Η δέσμη επικεντρώνεται σε μία διάμετρο κηλίδων της τάξης των 0,1 mm και ένταση της τάξης των 10MW / cm². Ο πίδακας αερίου που έρχεται μέσω του ακροφυσίου βοηθά τη δέσμη λέιζερ να κόβεται δημιουργώντας μια δευτερεύουσα πηγή θερμότητας (όπως στην περίπτωση της εξώθερμης αντίδρασης οξυγόνου με σιδηρούχα υλικά). Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, το ρεύμα αερίου που ρέει διαμέσου της δέσμης επιτρέπει την μεταφορά θερμότητας προς το πίσω μέρος του τεμαχίου εργασίας. Σε υψηλές πιέσεις τζετ, το αέριο παρέχει αποτελεσματική ψύξη στην πλευρά εισόδου της δέσμης και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πλάτους του άξονα εισόδου δέσμης. (Εικόνα 4.2)



Εικόνα 4.2: Σχέδια ενός τυπικού συστήματος τριών αξόνων κοπής λέιζερ⁴⁶

Παράμετροι διεργασίας κοπής λέιζερ

Οι παράμετροι της διαδικασίας κοπής λέιζερ ομαδοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Παράμετροι δέσμης λέιζερ: πυκνότητα ισχύος, μήκος κύματος εκπομπής, χρονική κατάσταση (CW ή παλμική), χωρική λειτουργία (λειτουργία TEM) και μέγεθος εστιακού σημείου
- Παράμετροι αερίου: Μείγματα αερίων, πίεση αερίου και διαμόρφωση ακροφυσίων
- Παράμετροι εργαλείου μηχανής: ταχύτητα κοπής (γνωστή και ως ταχύτητα τροφοδοσίας ή μετακίνησης)
- Παράμετροι τεμαχίου εργασίας: πάχος, συντελεστής απορρόφησης στο δεδομένο μήκος κύματος δέσμης λέιζερ, θερμοκρασίες τήξης και εξάτμισης, θερμική αγωγιμότητα και θερμική ισχύς.

Οι παράμετροι του λέιζερ και οι παράμετροι του τεμαχίου προσδιορίζουν την αποτελεσματικότητα της μηχανικής κατεργασίας με λέιζερ. Η λειτουργία TEM (εγκάρσια ηλεκτρομαγνητική λειτουργία) περιγράφει το χαρακτηριστικό χωρικό μοτίβο της δέσμης λέιζερ και καθορίζει τη διάδοση και την εστίαση της. Οι δείκτες "mm" αναφέρονται στον αριθμό των μηδενικών (μηδενική ένταση) στο χωρικό πρότυπο που εμφανίζονται σε κάθε μια από τις δύο ορθογώνιες διευθύνσεις εγκάρσια προς την κατεύθυνση της διάδοσης της δέσμης. Η λειτουργία TEM00 χρησιμοποιείται συχνά για μηχανική κατεργασία. Σε αυτή τη λειτουργία, η ένταση της δέσμης λέιζερ ακολουθεί μια Gaussian κατανομή (κανονική) ως συνάρτηση της ακτίνας σημείου. Το μικρότερο δυνατό μέγεθος σημείου για τα λέιζερ αερίου έχει διάμετρο περίπου 0,1 mm.

Μέρος της προσπίπτουσας δέσμης ανακλάται από την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας. Η ποσότητα με την οποία ανακλάται η δέσμη εξαρτάται από το μήκος κύματος της δέσμης και την κατάσταση επιφάνειας του τεμαχίου εργασίας. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος της δέσμης λέιζερ, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Η ενέργεια του λέιζερ που δεν ανακλάται απορροφάται από την επιφάνεια του τεμαχίου. Η βαθιά διείσδυση γίνεται σε σύνθετα υλικά με συγκεκριμένες δυνάμεις της τάξης των 102-103W / cm². Το μέγεθος της

οπής και η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας επηρεάζονται από τη διάμετρο της δέσμης λέιζερ, την πίεση αερίου υποβοήθησης, τον συντελεστή απορρόφησης και τη θερμοκρασία εξάτμισης του υλικού.

Δυνατότητες διεργασιών

Η κοπή με λέιζερ είναι μια διαδικασία υψηλής ευελιξίας και υψηλής παραγωγικότητας με ένα ευρύ φάσμα εξοπλισμού που διατίθεται στο εμπόριο. Πολλά διαφορετικά είδη υλικών μπορούν να κοπούν, ανεξάρτητα από τη σκληρότητα. Η ευελιξία του συστήματος λέιζερ και ο αριθμητικός έλεγχος του υπολογιστή του μηχανήματος παρέχουν διαστάσεις ανοχής που τυπικά κυμαίνονται μεταξύ 0,05 και 0,1 mm.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της κοπής με λέιζερ είναι ο σχηματισμός ενός HAZ και οι ραβδώσεις στην κατεργασμένη επιφάνεια. Και τα δύο φαινόμενα ελέγχονται από τις παραμέτρους της διαδικασίας (ταχύτητα κοπής και ισχύς δέσμης) και μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν σημαντικά. Γενικά, η κοπή με λέιζερ παρέχει υψηλές ταχύτητες κοπής. Ο πίνακας 4.2 παραθέτει τα αντιπροσωπευτικά δεδομένα κοπής των κοινών σύνθετων FRP.

Πίνακας 4.2 : Αντιπροσωπευτικά δεδομένα για την κοπή με λέιζερ σύνθετων υλικών FRP ⁴⁷

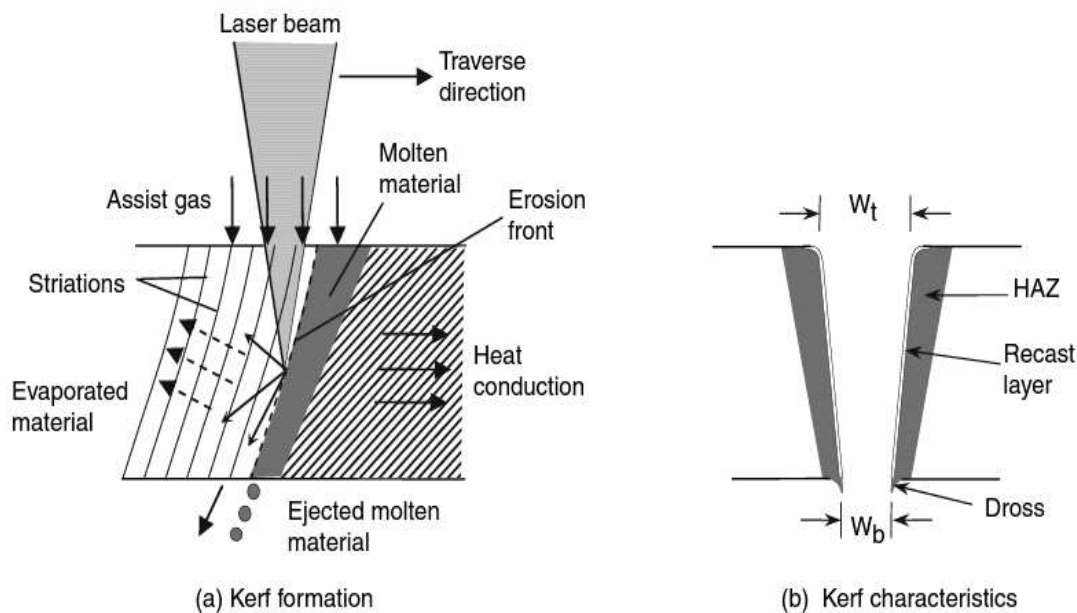
| Material | Laser power (W) | Cutting speed (m/min) | Thickness/kerf depth (mm) | Kerf width (mm) |
|--------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|
| Kevlar/epoxy | 150–950 | 2.0 | 3.2–9 | 0.1 |
| Aramid/polyester | 800 | 0.5 | 2.0 | 0.6 |
| Glass/epoxy | 1000 | 2.0 | 5.0 | 0.5 |
| Glass/polyester | 800 | 0.5 | 2.0 | – |
| Graphite/epoxy | 300 | 0.3 | 1.0 | 0.1 |
| Graphite/epoxy | 1,000–2,000 | 0.9–7.2 | 1.0–4.0 | – |
| Graphite/polyester | 800 | 0.5 | 2.0 | 0.5 |

Μηχανισμοί απομάκρυνσης υλικού

Η αφαίρεση υλικού στην κοπή λέιζερ λαμβάνει χώρα δημιουργώντας και μετακινώντας ένα μέτωπο διάβρωσης προς την κατεύθυνση κοπής όπως φαίνεται

στην εικόνα 4.3α. Καθώς η εστιασμένη δέσμη λέιζερ προσκρούει στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας, απορροφάται μια ορισμένη ποσότητα θερμότητας από το υλικό στην επιφάνεια και στη συνέχεια διοχετεύεται στο τεμάχιο εργασίας. Η αλληλεπίδραση της απορροφούμενης θερμότητας με το βοηθητικό αέριο και το υλικό τεμαχίου προς κατεργασία προκαλεί την αφαίρεση του υλικού και σχηματίζεται ένα κέλυφος ή μία σχισμή σε ένα ορισμένο βάθος διείσδυσης. Η βαθιά διείσδυση στα περισσότερα μέταλλα συμβαίνει σε πυκνότητα ισχύος λέιζερ $106\text{W} / \text{cm}^2$, και για σύνθετα υλικά εμφανίζεται σε πολύ χαμηλότερες πυκνότητες ισχύος ($102\text{-}103\text{W} / \text{cm}^2$).⁴⁸ Η απομάκρυνση του υλικού από το κέλυφος λαμβάνει χώρα με έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους μηχανισμούς: διατμήσεις αδρανούς αερίου, διάτμηση τήγματος αντιδραστικού αερίου, εξάτμιση, χημική αποικοδόμηση και γραφή.⁴⁹ Για τα υλικά που τήκονται όταν θερμαίνονται με δέσμη λέιζερ, όπως μέταλλα και θερμοπλαστικά, η εστιασμένη θερμότητα σχηματίζει μια κοιλότητα διείσδυσης τετηγμένου μετάλλου η οποία στην συνέχεια απομακρύνεται με τη δράση διατμήσεως ενός βοηθητικού αερίου υψηλής πίεσης. Ο αέρας χρησιμοποιείται συνήθως όταν η οξειδωση δεν αποτελεί ανησυχία. Αδρανή αέρια όπως άζωτο και αργό χρησιμοποιούνται όταν η οξειδωση δεν είναι ανεκτή. Η δραστική διάτμηση τήγματος αερίου χρησιμοποιείται για την κοπή σιδηρούχων μετάλλων αντικαθιστώντας το αδρανές αέριο με οξυγόνο ή αέρα. Μια πρόσθετη πηγή θερμότητας δημιουργείται από την εξώθερμη αντίδραση του ενεργού αερίου με το μέταλλο.

Αυτό επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες κοπής από ό, τι με τη διάτμηση τήγματος αδρανούς αερίου. Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα όταν το υλικό θερμαίνεται γρήγορα στη θερμοκρασία εξάτμισης και στη συνέχεια εκτοξεύεται με τηγμένο υλικό με τη δράση του βοηθητικού αερίου. Αυτός ο μηχανισμός είναι πιο κοινός για μερικά πολυμερή, σύνθετα πολυμερή και ξύλο. Λόγω της απουσίας τήξης, η τραχύτητα της επιφάνειας που παράγεται είναι καλύτερη από εκείνη της διάτμησης του τήγματος. Ωστόσο, οι ταχύτητες κοπής είναι συγκριτικά χαμηλότερες. Η χημική αποικοδόμηση βασίζεται στην αποσύνθεση του υλικού με θραύση των χημικών δεσμών λόγω της δράσης της δέσμης λέιζερ. Ο μηχανισμός αυτός είναι συνηθέστερος για τα σύνθετα αραμιδίων, θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, ελαστομερή και ξύλο. Η γραφή είναι ο πιο συνηθισμένος μηχανισμός στη μηχανική κατεργασία κεραμικών και περιλαμβάνει τη δημιουργία αυλακώσεων στην επιφάνεια του τεμαχίου, τα οποία αργότερα γίνονται θέσεις υψηλής συγκεντρώσεως και θραύσης τάσεων.⁴⁹



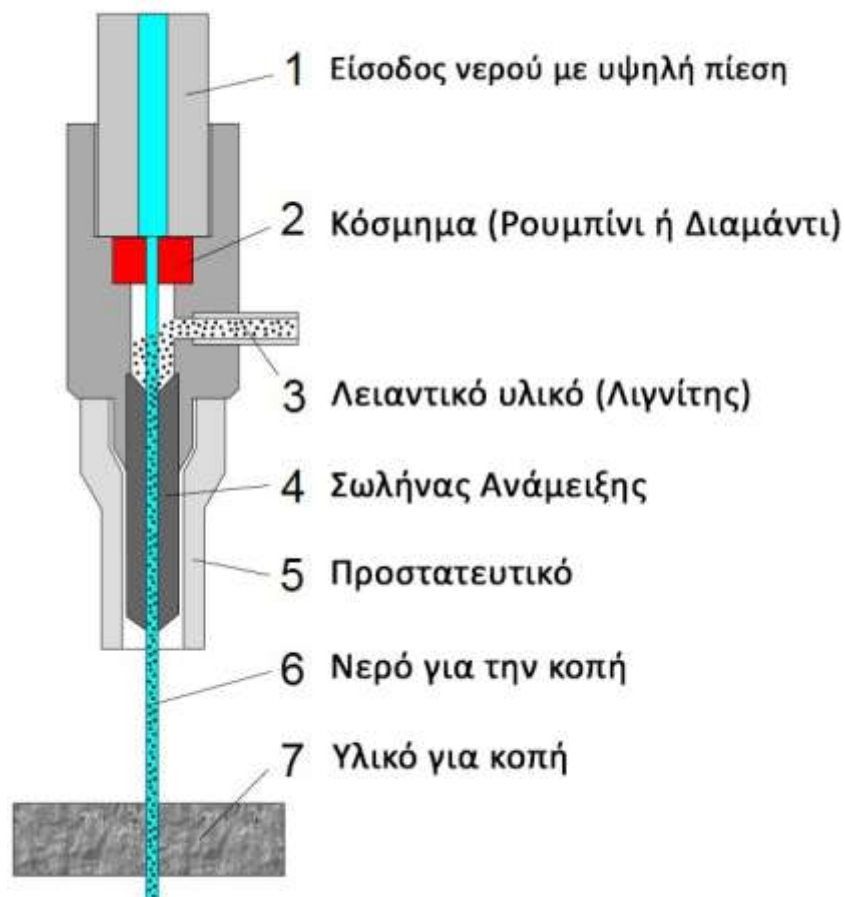
Εικόνα 4.3 : Μπροστινό μέρος διάβρωσης στην κοπή λέιζερ⁴⁷

4.2. ΥΔΡΟΚΟΠΗ

Με την υδροκοπή μπορούμε να τεμαχίσουμε μέταλλα ή άλλα υλικά χρησιμοποιώντας ένα πίδακα νερού με υψηλή ταχύτητα και πίεση ή μείγμα νερού και λειαντικής ουσίας. Η διαδικασία είναι ουσιαστικά η ίδια με τη διάβρωση του νερού που βρίσκεται στη φύση, αλλά επιταχύνεται και συγκεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό. Συχνά χρησιμοποιείται κατά την κατασκευή εξαρτημάτων για μηχανήματα και άλλες συσκευές. Είναι η προτιμώμενη μέθοδος όταν τα υλικά που κόβονται είναι ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες που παράγονται από άλλες μεθόδους. Έχει βρεθεί σε διάφορους κλάδους εφαρμογών από εξόρυξη έως αεροδιαστημική, όπου χρησιμοποιείται για εργασίες όπως κοπή, διαμόρφωση, σκάλισμα και ξήρανση.

Μια μικρή ιστορική αναδρομή μας λέει πως στην δεκαετία του 1950, ο δασικός μηχανικός Norman Franz πειραματίστηκε με μια πρόωρη μορφή κοπής με ψεκασμό νερού για να κόψει ξυλεία. Ωστόσο, η τεχνολογία δεν προχώρησε ιδιαίτερα μέχρι τη δεκαετία του 1970, όταν ο Mohamed Hashish δημιούργησε μια τεχνική για να προσθέσει λειαντικά στον κόπτη νερού. Σήμερα το τζετ νερού είναι ασύγκριτο σε πολλές πτυχές της κοπής και έχει αλλάξει τον τρόπο κατασκευής πολλών προϊόντων. Πολλοί τύποι πίδακες νερού υπάρχουν σήμερα, συμπεριλαμβανομένων των απλών(plain water jets), των εκτοξευόμενων(percussive water jets) και των υβριδικών(hybrid water jets) πιδάκων νερού.

Ας δούμε λίγο για την λειτουργία τους. Ο κοπτήρας συνδέεται συνήθως με μια αντλία νερού υψηλής πίεσης όπου το νερό εξάγεται στη συνέχεια από το ακροφύσιο, κόβοντας το υλικό, ψεκάζοντάς το με τον πίδακα νερού υψηλής ταχύτητας. Τα πρόσθετα με τη μορφή αιωρούμενων κόκκων ή άλλων λειαντικών, όπως το γρανάτη και το οξειδίο του αργιλίου, μπορούν να βοηθήσουν σε αυτή τη διαδικασία. (Εικόνα 4.4)⁵¹



Εικόνα 4.4 : Λειτουργία τζετ νερού⁶¹

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του κοπτήρα με ψεκασμό νερού είναι η δυνατότητα κοπής υλικού χωρίς παρεμβολή στην εγγενή δομή του υλικού καθώς δεν υπάρχει "ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα" ή HAZ. Η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της θερμότητας επιτρέπει την κοπή των μετάλλων χωρίς να βλάπτονται ή να μεταβάλλονται οι εγγενείς ιδιότητες.⁵⁰ Οι κοπτήρες εκτόξευσης νερού μπορούν επίσης να παράγουν περίπλοκες περικοπές στο υλικό. Με το εξειδικευμένο λογισμικό

και τις κεφαλές επεξεργασίας 3-D μπορούν να παραχθούν σύνθετα σχήματα 3-D.⁵¹ Το κούμπωμα ή το πλάτος της τομής μπορεί να αλλάξει αλλάζοντας τμήματα στο ακροφύσιο, καθώς και τον τύπο και το μέγεθος του λειαντικού.

Οι τυπικές λειαντικές κοπές κατασκευάζονται με ένα κούμπωμα στην περιοχή από 0,04 έως 0,05 "(1,016 έως 1,27 mm), αλλά μπορούν να είναι τόσο στενές όσο 0,02" (0,508 mm). Οι μη λειαντικές κοπές κανονικά είναι 0,007 "έως 0,013" (0,178 έως 0,33 mm), αλλά μπορεί να είναι τόσο μικρό όσο 0,003 "(0,076 mm), το οποίο είναι περίπου το μέγεθος μιας ανθρώπινης τρίχας. Αυτές οι μικρές κοπές μπορούν να κάνουν πολύ μικρές λεπτομέρειες σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι πίδακες νερού είναι ικανοί να επιτυγχάνουν ακρίβεια 0,005 "(0,13 mm) και επαναληψιμότητα 0.001" (0,03 mm).⁵¹

Επίσης η υδροκοπή θεωρείται μια "πράσινη" τεχνολογία. Οι πίδακες νερού δεν παράγουν επικίνδυνα απόβλητα, μειώνοντας το κόστος διάθεσης των αποβλήτων. Μπορούν να αποκόψουν μεγάλα κομμάτια επαναχρησιμοποιούμενων απορριμμάτων που θα μπορούσαν να χαθούν χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους κοπής. Οι πίδακες νερού χρησιμοποιούν ελάχιστη ποσότητα νερού (μισό γαλόني σε περίπου ένα γαλόني ανά λεπτό ανάλογα με το μέγεθος του στομίου κοπής) και το νερό που χρησιμοποιείται μπορεί να ανακυκλωθεί χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κλειστού βρόχου.⁵¹ Οι εκτοξευτήρες νερού εξαλείφουν επίσης τα σωματίδια σκόνης, τον καπνό, τα καυσαέρια πράγμα που βελτιώνει σημαντικά το περιβάλλον εργασίας και μειώνει τα προβλήματα που προκύπτουν από την έκθεση του χειριστή.⁵²

Τα υλικά που συνήθως κόβονται με πίδακα νερού περιλαμβάνουν καουτσούκ, αφρό, πλαστικά, σύνθετα, πέτρα, κεραμίδια, μέταλλα, τρόφιμα, χαρτί και πολλά άλλα. Τα υλικά που δεν μπορούν να κοπούν με πίδακα νερού είναι γυαλί, διαμάντια και ορισμένα κεραμικά⁵².

Τέλος υπάρχουν έξι κύρια χαρακτηριστικά επεξεργασίας για την κοπή με ψεκασμό νερού :

1. Χρησιμοποιεί ένα ρεύμα υψηλής ταχύτητας λειαντικών σωματιδίων αιωρούμενων σε ένα ρεύμα υψηλής πίεσης νερού (30.000 - 90.000 psi) που παράγεται από μια αντλία εντατικοποίησης με πίδακα νερού.⁵³
2. Χρησιμοποιείται για την κατεργασία μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, συμπεριλαμβανομένων των ευαίσθητων στη θερμότητα, λεπτών ή πολύ σκληρών υλικών.
3. Δεν προκαλεί ζημιά στη θερμότητα της επιφάνειας ή των άκρων του τεμαχίου.
4. Τα ακροφύσια είναι συνήθως κατασκευασμένα από συντηγμένο βορίδιο.
5. Παράγει μια κωνικότητα μικρότερη από 1 μοίρα στις περισσότερες περικοπές, οι οποίες μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν εξ ολοκλήρου επιβραδύνοντας τη διαδικασία κοπής.
6. Η απόσταση του ακροφυσίου από το τεμάχιο εργασίας επηρεάζει το μέγεθος του κελύφους και την ταχύτητα απομάκρυνσης του υλικού. Η τυπική απόσταση είναι 125".⁵³

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις βιομηχανίες χρησιμοποιούνε drilling για να παράγουν τρύπες γρήγορα και οικονομικά. Κατά την κατεργασία της διάτρησης (drilling) η κεφαλή σπρώχνει το υλικό καθώς διεισδύει μέσα στην τρύπα. Τα διάφορα χαρακτηριστικά που έχουν τα σύνθετα υλικά επηρεάζονται κατά την διαδικασία αυτής της κατεργασίας. Επίσης με την χρήση διαφορετικών τύπων τρυπανιών(π.χ saw drill, candle stick drill, core drill, step drill) επηρεάζεται διαφορετικά το φαινόμενο της αποφύλλωσης (αποστρωμάτωσης) καθώς και η τραχύτητα στην επιφάνεια της οπής μας. Η αποφύλλωση προκαλείται από την ώθηση του εργαλείου και έχει αναγνωριστεί ως το σημαντικότερο πρόβλημα κατά την διάτρηση (drilling). Επηρεάζεται εκτός από τον τύπο των τρυπανιών και από την ταχύτητα πρόωσης του αντίστοιχου τρυπανιού. Αυξάνοντας απότομα τον ρυθμό τροφοδοσίας κατά το τέλος του drilling το τρυπάνι θα προκαλέσει αστοχία (ρωγμή) γύρω από την περιοχή της τρύπας κατά την έξοδό του (μπορούμε να το συναντήσουμε και στην είσοδό του), συνεπώς έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα πως απότομες υψηλές ταχύτητες οδηγούν κατά μεγάλο ποσοστό σε σοβαρή αστοχία του υλικού μας. Επίσης για την αποφυγή τέτοιου είδους ζημιών λόγω της γεωμετρίας των τρυπανιών έχει μελετηθεί η δημιουργία νέων κοπτικών υλικών.(τα τρυπάνια με σπειρώματα (spiral) έχουν καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με τα συνηθισμένα.)

Λόγω αυτών των δυσκολιών για να αποφύγουμε τον υποβιβασμό της ποιότητας του υλικού είναι αναγκαίο να επιλέξουμε κατάλληλες παραμέτρους διάτρησης.

Πρώτη παράμετρος είναι οι παράμετροι κοπής, δηλαδή κατάλληλη ταχύτητα κοπής καθώς και κατάλληλος ρυθμός τροφοδοσίας. Ανάλογα με το υλικό του τρυπανιού μας και ανάλογα με το υλικό που θα επιλέξουμε για το drilling θα έχουμε κάθε φορά διαφορετική ταχύτητα κοπής και ρυθμό

τροφοδοσίας. Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας υψηλής ταχύτητας ασάλι (HSS) ή τρυπάνια από tungsten carbide (WC) η ταχύτητα κοπής είναι από 20-60 m/min και ο ρυθμός τροφοδοσίας μέχρι 0,3mm/rev. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν θέλουμε να τρυπήσουμε σύνθετα πολυμερή υλικά με σκληρά μέταλλα επιλέγουμε ταχύτητες κοπής μικρότερες από 60 m/min ώστε να αποφύγουμε την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών που μπορούν να μας οδηγήσουν στην αλλοίωση της μήτρας και χρησιμοποιούμε ρυθμό τροφοδοσίας κάτω από 0,3 mm/rev για να αποφύγουμε αντίστοιχα την αποφύλλωση.

Δεύτερη παράμετρος είναι το υλικό και η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Γενικά η γεωμετρία του κάθε τρυπανιού και συγκεκριμένα η κεφαλή του επηρεάζει την ποιότητα της τρύπας. Η μικρότερη απόσταση μήκους μεταξύ της γεωμετρίας του τρυπανιού και της τρύπας, μας ελαχιστοποιεί το σφάλμα για την αποφύλλωση των στρωμάτων.

Τρίτη παράμετρος είναι η ποιότητα της τρύπας και η προετοιμασία για την κατεργασία. Η καλή ποιότητα της τρύπας μας οδηγεί στην μείωση ζημιών και στην ικανοποιητική επιφάνεια του υλικού μας.

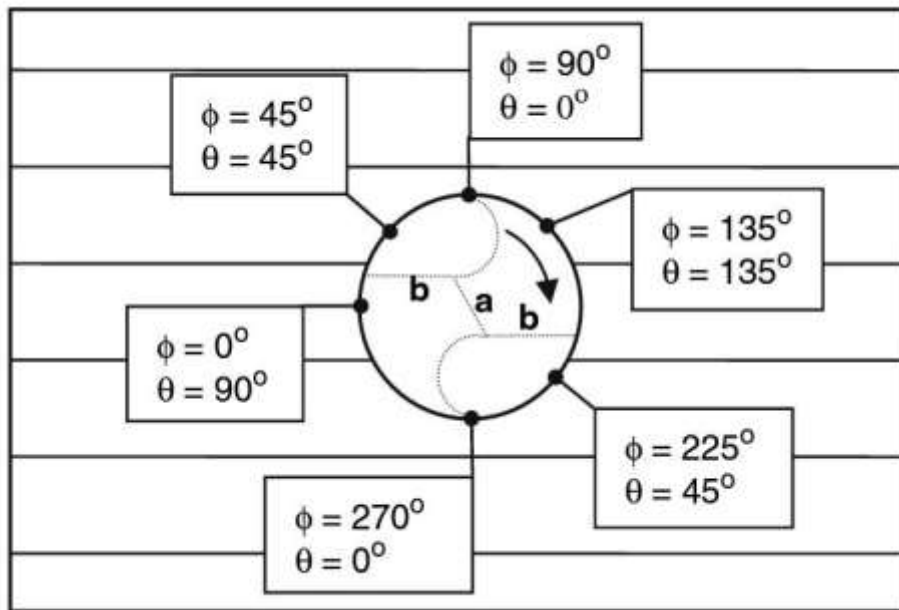
5.2. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Η σχέση μεταξύ της κατεύθυνσης των ινών και της διεύθυνσης του διανύσματος ταχύτητας κοπής είναι παρόμοια με αυτή του φινιρίσματος. Τόσο η διάτρηση όσο και το φινίρισμα επειφανείας περιλαμβάνουν την αφαίρεση υλικού από μια περιστρεφόμενη κοπτική άκρη. Η εικόνα 5.1 μας δείχνει μια σχηματική παράσταση της σύμβασης προσανατολισμού των ινών για ένα τρυπάνι δύο αυλών. Η γεωμετρία ενός τρυπανιού και η κινηματική της διάτρησης φαίνονται στην εικόνα 5.2. Η αφαίρεση του υλικού πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο από τις μεγάλες κοπτικές άκρες. Η άκρη του κοπτικού συμβάλλει επίσης στη διαδικασία απομάκρυνσης υλικού.^{19,20}

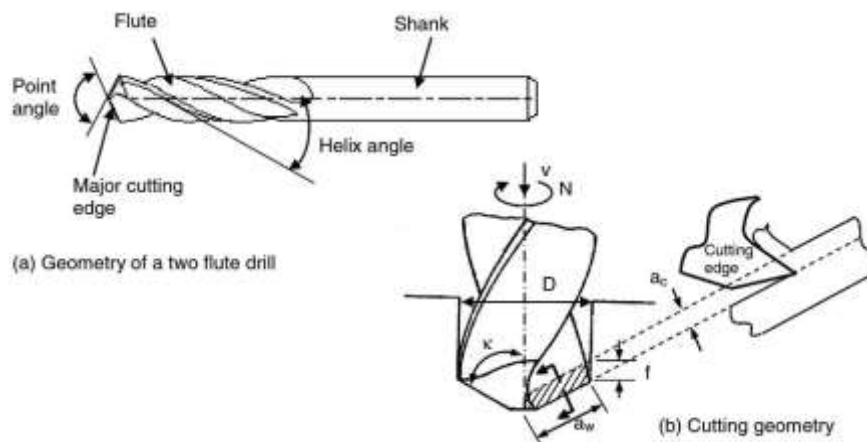
Σε αντίθεση με την άλεση, το πάχος του αποβλήτου στο τρύπημα είναι ανεξάρτητο από τη γωνιακή θέση και το κέντρο περιστροφής του εργαλείου κοπής, είναι πάντα σταθερό σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας. Μόνο η περιστροφή της

κοπτικής ακμής γύρω από το κέντρο προκαλεί διαφορές στον προσανατολισμό των ινών.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1, η γωνιακή θέση κοπής άκρου είναι μηδέν όταν η κοπτική άκρη παρατάσσεται με τις ίνες. Αυτή τη στιγμή ο φορέας ταχύτητας κοπής είναι κάθετος προς τις ίνες και η γωνία προσανατολισμού της ίνας είναι 90° . Καθώς αυξάνεται η γωνιακή θέση, ο προσανατολισμός των ινών μειώνεται και φτάνει στο μηδέν όταν η γωνιακή θέση είναι ίση με 90° .



Εικόνα 5.1 :Ορισμός του προσανατολισμού των ινών στην διάνοιξη μονοκατευθυντικών σύνθετων υλικών¹⁹



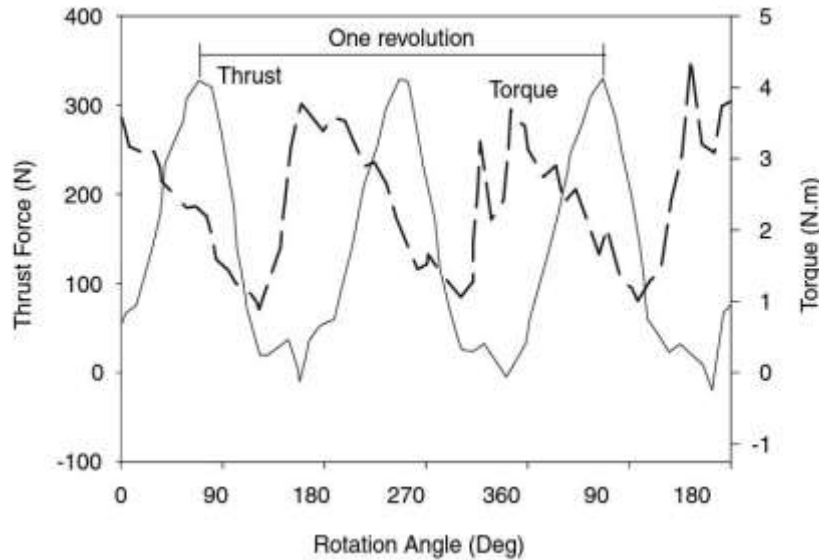
Εικόνα 5.2: Γεωμετρία κοπής στη διάτρηση¹⁵

5.3. ΔΥΝΑΜΗ ΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ ΣΤΡΕΨΗΣ

Η διάτρηση είναι ένας σύνθετος μηχανισμός επειδή η διαδικασία σχηματισμού αποβλήτου προκαλείται από πολλαπλές κοπτικές άκρες ποικίλων γωνιών κλίσης και ταχυτήτων κοπής. Οι δυνάμεις του εργαλείου που παράγονται κατά τη διάτρηση είναι η δύναμη ωθήσεως (κατά μήκος της κατεύθυνσης της τροφοδοσίας) και η ροπή στρέψεως. Κατά τη διάτρηση μετάλλων, αυτές οι δυνάμεις είναι αρκετά ομοιόμορφες με το χρόνο, επειδή το απόβλητο είναι σταθερό. Οι δύο κύριες κοπτικές άκρες (χείλη) αφαιρούν το μεγαλύτερο μέρος και έτσι επηρεάζουν τη ροπή τρυπήματος, τη δύναμη ωθήσεως και την ακτινική δύναμη. Η άκρη του κοπτικού εργαλείου λειτουργεί ως σφήνα με μεγάλη αρνητική γωνία κλίσης. Σε μια μικρή περιοχή στο κέντρο του άκρου, το υλικό αφαιρείται με μια δράση εξώθησης ή λείανσης. Μακριά από αυτή την κεντρική περιοχή, το άκρο του κοπτικού αφαιρεί ένα πολύ λεπτό απόβλητο με ορθογώνια κοπή με εξαιρετικά αρνητική γωνία κλίσης.¹⁷

Η άκρη του κοπτικού εργαλείου είναι επομένως σημαντική συνεισφορά στη δύναμη ωθήσεως. Κατά τη διάτρηση των μονοκατευθυντικών σύνθετων υλικών, οι δυνάμεις διάτρησης είναι κυκλικές λόγω των στιγμιαίων αλλαγών στη γωνία προσανατολισμού των ινών. Το σχήμα 5.1 δείχνει την εξέλιξη της δύναμης ωθήσεως και της ροπής, με τη θέση της κοπτικής ακμής κατά τη διάρκεια της γεώτρησης του CFRP με τρυπάνι περιστροφής δύο ακμών.¹⁹

Το σχήμα δείχνει την κυκλική και επαναλαμβανόμενη φύση της δύναμης τροφοδοσίας και της ροπής που προκαλείται από τον προσανατολισμό των ινών. Το μέγιστο μέγεθος της δύναμης ωθήσεως είναι προς το συμφέρον μας επειδή η αποκόλληση διαδίδεται από την δύναμη ωθήσεως. Η δύναμη ωθήσεως δημιουργείται από την δράση κοπής των δύο πρωτογενών κοπτικών άκρων (χείλη) και της ακμής της σμίλης, και η τελευταία αυτή διαπιστώνεται ότι συνεισφέρει σημαντικά στη δύναμη ωθήσεως.^{21,22}



Σχήμα 5.1 : Οι δυνάμεις διάτρησης έναντι του χρόνου για ολόκληρο τον κύκλο διάτρησης.

Ταχύτητα διάτρησης = 400 rpm, d τρυπανιού = τρυπάνι καρβιδίου 6,4 mm,
UD άνθρακα / εποξική (80στρώσεις), τροφοδοσία = 102 m / min¹⁹

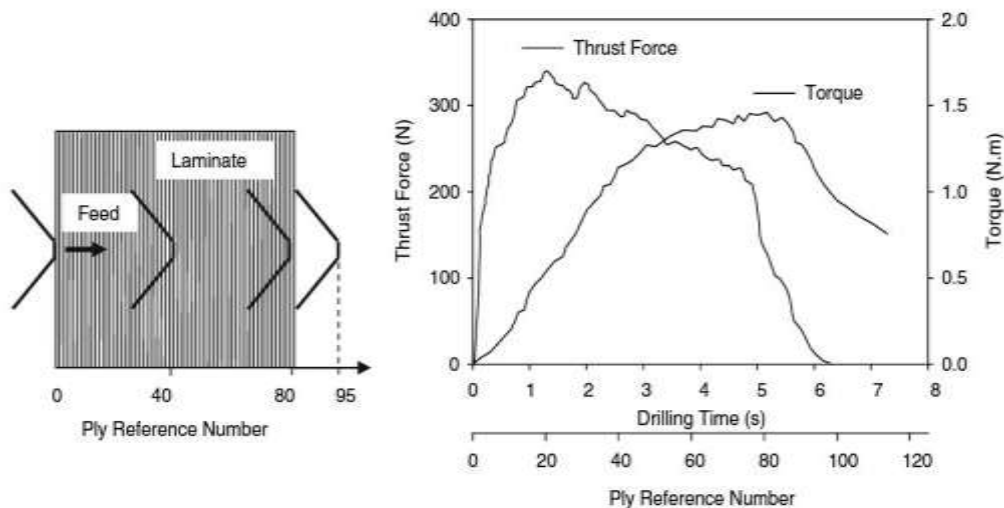
Ο κύκλος της δύναμης ωθήσεως και της ροπής είναι στενά συνδεδεμένος με τον προσανατολισμό της ίνας. Η δύναμη ωθήσεως φθάνει σε μια μέγιστη γειτονική θέση 90° όπου η κατεύθυνση κοπής είναι παράλληλη προς τις ίνες ($\theta = 0$). Πέρα από αυτό το σημείο οι δυνάμεις πέφτουν απότομα φτάνοντας στο ελάχιστο στα 135° ($\theta = 135^\circ$). Καθώς η γωνία περιστροφής συνεχίζει να αυξάνεται, η δύναμη ωθήσεως αυξάνεται βαθμιαία στο μέγιστο κοντά στα 270°, που αντιστοιχεί στην εμπλοκή του δεύτερου μεγάλου κοπτικού άκρου. Η ροπή τρυπήματος προκαλείται από το ζεύγος δύναμης κοπής που επενεργεί στις μεγάλες κοπτικές άκρες και το μέγεθός του καθορίζεται από το μέγεθος της δύναμης κοπής και της διάμετρος του εργαλείου κοπής. Όπου F_c είναι η δύναμη κοπής στην κύρια κοπτική άκρη, r είναι η ακτίνα του τρυπανιού και d είναι η διάμετρος του τρυπανιού.

$$M = 2f_c \frac{r}{2} = f_c \frac{d}{2} \quad (\text{σχέση 5.1})$$

Υποθέτουμε εδώ ότι το F_c είναι μια ισοδύναμη δύναμη κοπής που δρα στο κέντρο της περιοχής των άκαμπτων αποβλήτων και ότι το πλάτος άκρων της σμίλης είναι αμελητέο. Η ροπή στρέψης φθάνει σε μια μέγιστη γωνιακή θέση 0°, που αντιστοιχεί στον προσανατολισμό των ινών 90°. Η περαιτέρω αύξηση του προσανατολισμού των ινών προκαλεί τη μείωση της ροπής στο ελάχιστο σε περίπου

135°. Οι ανόμοιες κλίσεις της καμπύλης ροπής και στις δύο πλευρές του μέγιστου προκαλούνται από ανόμοια συμπεριφορά της δύναμης κοπής για προσανατολισμούς ινών μικρότερες και μεγαλύτερες των 90°, η οποία προκαλείται από διαφορετικούς τρόπους σχηματισμού αποβλήτου.

Η τυπική συμπεριφορά της μέσης ώσης και ροπής κατά τη διάτρηση ενός μονοκατευθυνόμενου ελασματοποιημένου CFRP φαίνεται στο σχήμα 5.2. Στην αρχή της διάτρησης η άκρη του σμίλου διεισδύει στο έλασμα, γεγονός που προκαλεί γρήγορη άνοδο της δύναμης ωθήσεως. Η ροπή αυξάνεται αργά λόγω των μικρότερων δυνάμεων κοπής στην άκρη του σμίλου και της εγγύτητας των δυνάμεων αυτών στο κέντρο του τρυπανιού. Η ροπή αρχίζει να αυξάνεται ταχέως καθώς οι άκρες κοπής (χείλη) εμπλέκονται στην κοπή του φύλλου. Υπάρχει βαθμιαία πτώση της δύναμης ωθήσεως κατά την πλήρη εμπλοκή του τρυπανιού στο έλασμα.¹⁹



Σχήμα 5.2: Οι δυνάμεις διάτρησης έναντι του χρόνου για ολόκληρο τον κύκλο διάτρησης.

Ταχύτητα διάτρησης = 400 rpm, d τρυπανιού = τρυπάνι καρβιδίου 6,4 mm,

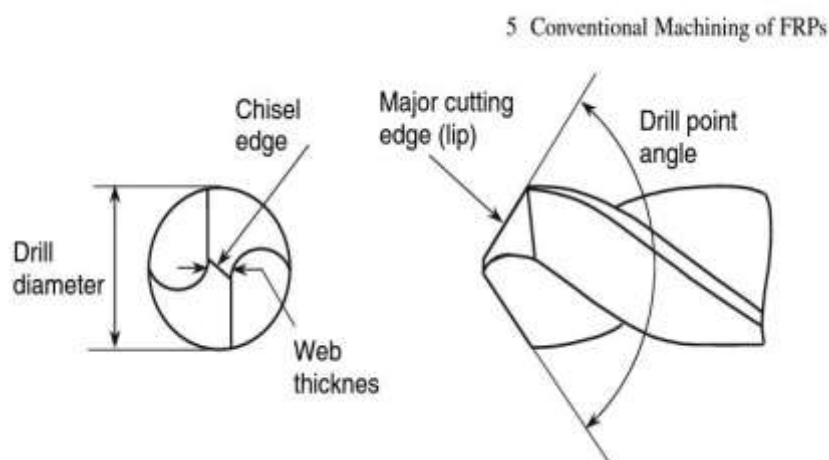
UD άνθρακα / εποξική (80 στρώσεις), τροφοδοσία = 102 m / min [31]¹⁹

Αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα του μαλακώματος της μήτρας λόγω της θέρμανσης που δημιουργείται από τη διάτρηση και / ή την αυξημένη μείωση στην ακαμψία του ελασματοποιημένου υλικού που υποστηρίζει το σημείο γεώτρησης καθώς αυξάνεται το βάθος της οπής. Η δύναμη ωθήσεως και η ροπή μειώνονται γρήγορα καθώς το τρυπάνι εξέρχεται από το έλασμα. Η δύναμη ωθήσεως φτάνει στο μηδέν όταν ο κώνος τρυπανιού εξέρχεται πλήρως από το έλασμα, αλλά η ροπή στρέψης φτάνει σε μη μηδενική τιμή επειδή τα αυλάκια του τρυπανιού εξακολουθούν να εμπλέκονται στο τεμάχιο εργασίας.

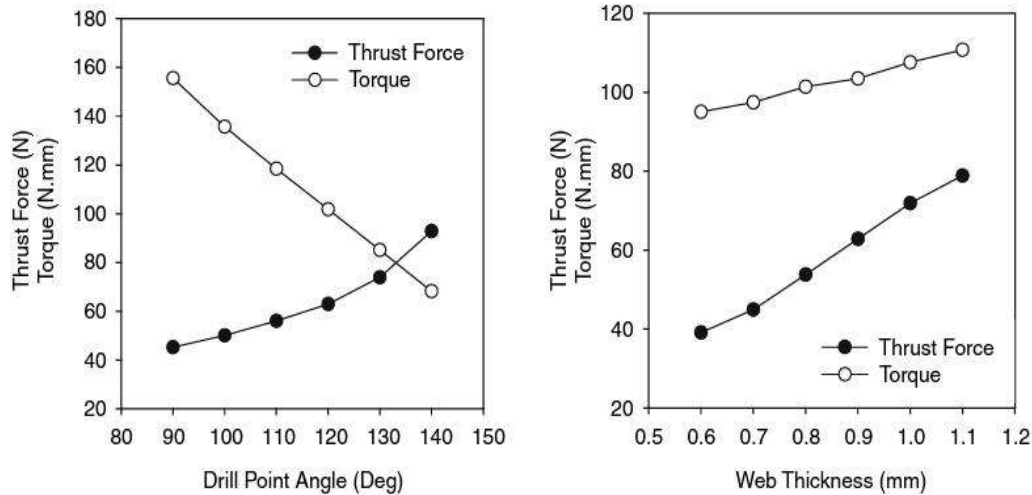
5.4. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η δύναμη ωθήσεως και η ροπή τρυπήματος επηρεάζονται από την ταχύτητα κοπής, την ταχύτητα τροφοδοσίας και τη γεωμετρία του τρυπανιού. Τόσο η δύναμη ώθησης όσο και η ροπή αυξάνονται σημαντικά με την αυξανόμενη ταχύτητα τροφοδοσίας λόγω της άμεσης επίδρασής της στο μέγεθος του κομματιού που δεν έχει κοπεί. Η επίδραση της ταχύτητας κοπής επί της δύναμης ωθήσεως και της ροπής δεν είναι σημαντική.²³

Οι τυπικές παράμετροι γεωμετρίας τρυπανιού που επηρεάζουν τη δύναμη ώθησης και τη ροπή περιλαμβάνουν τη γωνία σημείου τρυπήματος, το πλάτος της ακμής του σμίλου, το πάχος του πλέγματος και τη διάμετρο του τρυπανιού. Αυτές οι παράμετροι παρουσιάζονται για ένα συμβατικό τρυπάνι στην εικόνα 5.3 και τα αποτελέσματα μερικών από αυτά φαίνονται στο σχήμα 5.3. Η αύξηση της γωνίας σημείου τρυπήματος οδηγεί σε αύξηση της δύναμης ωθήσεως και σε μείωση της ροπής. Η μείωση της ροπής συνδέεται με την αύξηση της ορθογωνικής γωνίας κλίσης σε κάθε σημείο της κύριας κοπτικής ακμής με την αύξηση της γωνίας σημείων. Η τυπική γωνία σημείου 118° βρέθηκε να είναι βέλτιστη στη διάτρηση AS4 / PEEK CFRP ενώ η επίδραση της γωνίας σημείων βρέθηκε να είναι περιθωριακή στο τρύπημα T300 / 5208 CFRP. Η δύναμη ωθήσεως ήταν μέγιστη για την τυπική γωνία σημείων. Η αύξηση του πάχους του πλέγματος οδηγεί σε αύξηση τόσο της δύναμης ώθησης όσο και της ροπής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του πλέγματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος ακμής της σμίλης.²¹



Εικόνα 5.3 :Οι συμβατικές παράμετροι γεωμετρίας τρυπανιού επηρεάζουν περισσότερο τη δύναμη ωθήσεως και τη ροπή τρυπήματος²¹



Σχήμα 5.3 : Επίδραση της γωνίας του σημείου εκτίναξης (αριστερά) και του πάχους του ιστού (δεξιά) στη δύναμη διάτρησης και τη ροπή στρέψης. Το τεμάχιο εργασίας είναι CFRP μονής κατεύθυνσης, συνθήκες κοπής: τρυπάνι 5,0 mm HSS, 1,370 rpm, 0,1 mm / rpm ¹⁹

Η συνδυασμένη επίδραση της ταχύτητας τροφοδοσίας και της διάμετρος τρυπανιού επί της δύναμης ώθησης και της ροπής βρέθηκε να είναι πιο σημαντική από την ξεχωριστή επίδραση μιας από τις παραμέτρους. Για τα μέταλλα, με τη χρήση συμβατικού τρυπανιού, η δύναμη ωθήσεως συσχετίζεται με την ταχύτητα τροφοδοσίας και τη διάμετρο του τρυπανιού με εμπειρική σχέση της μορφής¹⁵

$$F_A = d^2 \cdot H_B \left[K_1 \frac{f^{0,8}}{d^{1,2}} + K_2 \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right] \quad (\text{σχέση 5.2})$$

όπου HB είναι το σκληρό τεμάχιο Brinell σε kg / mm², f είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας σε mm/rev, c είναι το μήκος της ακμής του σμίλου και τα K1 και K2 είναι εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό του τεμαχίου, το πάχος και τη γεωμετρία του σημείου διάτρησης.¹⁸

Παρόμοιες εξισώσεις αναφέρθηκαν επίσης για τη διάνοιξη μονοκατευθυντικών και πολυδιάστατων σύνθετων υλικών όπως παρατίθενται στον πίνακα 5.1. Μία τέτοια σχέση είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην πρόβλεψη της μηχανικής κατεργασίας των FRP επειδή επιτρέπουν την πρόβλεψη των συνθηκών κοπής για ελεύθερη αποκόλληση όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Πίνακας 5.1 : Εμπειρική σχέση ροπής και δύναμης ώσης¹⁵

| Drilling parameters | Thrust force F_z (N), Torque M (N m) |
|---|--|
| Workpiece: unidirectional CFRP T300/5208, ply thickness = 0.228 mm, laminate thickness = 20 plies, $H_B = 98 \text{ kg/mm}^2$. Standard HSS twist drill, diameters = 6.35, 12.7 mm, drill point = 118° , chisel length = $0.2d$, feed rate up to 0.12 mm/rev [33, 34] | $F_A = d^2 H_B \left[\frac{1.91 f^{0.4}}{d^{1.2}} + \frac{0.101}{d} \right]$ $F_A = 0.136 H_B d^{0.78} f^{0.4} \text{ (simplified)}$ |
| Workpiece: CFRP T300/5208 laminates of different configuration. Cross ply laminate thickness = 20 plies, quasi-isotropic laminate thickness = 24 plies, ply thickness = 0.125 mm. Standard HSS twist drill, diameter = 6.35, drill point = 118° , chisel length = $0.2d$, feed rate up to 0.2 mm/rev [34] | $F_A = 56.3 f^{0.4} \text{ (unidirectional)}$ $F_A = 41.8 f^{0.32} \text{ (crossply)}$ $F_A = 43.1 f^{0.22} \text{ (quasi-isotropic)}$ |
| E-glass UD GFRP, ply thickness = 0.228, total laminate thickness = 4mm, $V_f = 0.4$. Trepanning tool and twist drill diameters = 8, 10, 14, and 16 mm, feed rates = 0.01–0.2 mm/rev, cutting speed = 50 m/min [37] | $F_A = 48.98 d^{0.783} f^{0.410} \text{ (twist drill)}$ $F_A = 48.98 d^{0.242} f^{0.37} \text{ (trepanning/saw drill)}$ $M = 0.039 d^{1.529} f^{0.52} \text{ (twist drill)}$ $M = 0.039 d^{1.571} f^{0.59} \text{ (trepanning/saw drill)}$ |
| E-glass chopped fiber mat, laminate thickness = 10 mm, $V_f = 0.63$, carbide coated drill bit, drill diameters = 6, 10 mm, spindle speed 400 rpm, feed rates = 0.1–0.7 mm/rev [38] | $F_A = 35.004 (fd)^{1.3844} - 0.23 d^2$ $M = 0.0064 f^{1.3844} d^{2.3844} + 0.0091 d^2$ |
| Quasi-isotropic layup [0/45] _{39s} of woven CFRP (Toray 300/Fiberite 934), ply thickness = 0.125 mm, laminate thickness = 9.9 mm, $V_f = 0.63$. Drills: carbide tipped HSS, diameters = 6.35, 7.9 mm, spindle speed = 1,000 rpm, feed rates 0.1–1.0 mm/rev [40] | $F_A = 40.77 (fd)^{0.66} - 0.36 d^2 \text{ (w/o pilot holes)}$ $F_A = 3.5 (fd)^{0.66} + 0.11 d^2 \text{ (with pilot holes)}$ $F_c = 14.12 (fd)^{0.66}, M = F_c \frac{d}{2}$ |
| Quasi-isotropic layup [0/45] _{43s} of woven AFRP (Kevlar 49/Fiberite 7714) 8.1-mm total thickness. $V_f = 0.6$. Drills: carbide tipped HSS, diameters = 6.35, 7.9 mm, spindle speed = 300 rpm, feed rates 0.1–1.0 mm/rev [41] | $F_A = 35.84 (fd)^{0.50} - 0.09 d^2$ $F_c = 30.81 (fd)^{0.50}, M = F_c \frac{d}{2}$ |

5.5. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ

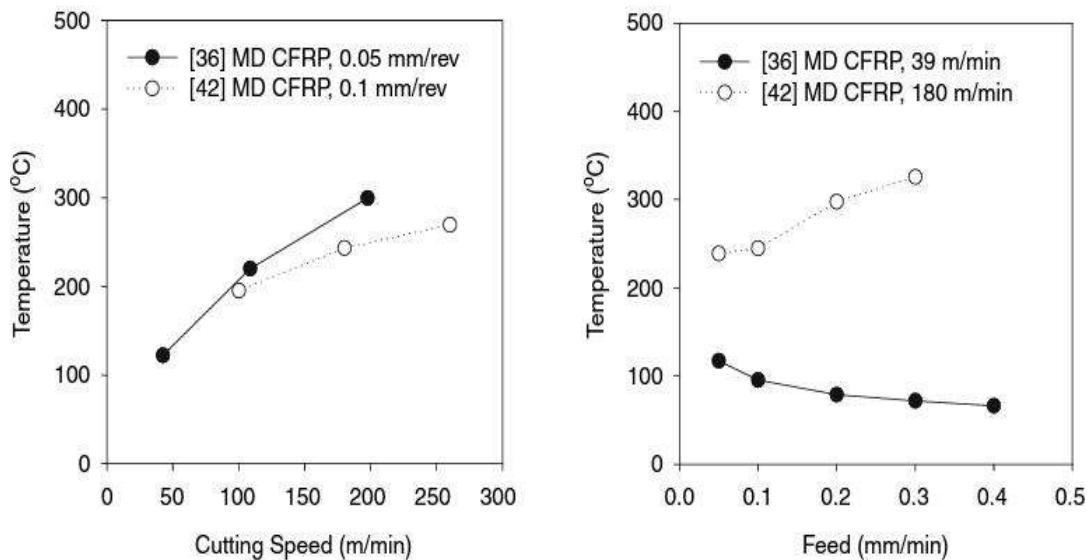
Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάτρηση των σύνθετων υλικών διανέμεται διαφορετικά από ό,τι κατά τη διάτρηση μεταλλικών υλικών. Στην κοπή μετάλλου μια μεγάλη ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας μεταφέρεται από το απόβλητο. Κατά τη διάνοιξη FRP μεγάλου ποσού της παραγόμενης θερμότητας διαχέεται από το τεμάχιο εργασίας και το εργαλείο. Οι κλίσεις της θερμοκρασίας χώρου και κώνου επηρεάζονται έντονα από τη θερμική αγωγιμότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου και των υλικών εργαλείων. Μικρότερες βαθμίδες θερμοκρασίας παρατηρούνται σε άνθρακα-εποξικά από ό,τι σε υαλο-εποξικά ή αραμιδίο-εποξικά σύνθετα υπό τις ίδιες συνθήκες. Η θερμοκρασία κοπής στη διάτρηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα κοπής και την ταχύτητα τροφοδοσίας. Το ανώτατο όριο της ταχύτητας κοπής περιορίζεται από τον κίνδυνο εισαγωγής θερμικής βλάβης στο υλικό του τεμαχίου.¹⁵

Η θερμοκρασία της επιφάνειας μιας πλευράς CFRP σε ένα πείραμα διάτρησης μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ενσωματωμένα θερμοστοιχεία στην όψη της πρόσοψης πίσω από την άκρη κοπής των τρυπανιών διπλής αυλάκωσης.^{23,26}

Σε αυτή τη διάταξη, το τρυπάνι κρατιέται ακίνητο ενώ το τεμάχιο περιστρέφεται από τον άξονα. Αυτό επιτρέπει την εισαγωγή θερμοστοιχείων σε μικροσκοπικές οπές επεξεργασμένες στην επιφάνεια του πλευρικού άξονα του τρυπανιού. Το σχήμα 5.4 δείχνει την επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στις μέσες θερμοκρασίες της όψης της πλευράς. Είναι προφανές ότι η θερμοκρασία που παράγεται κατά τη διάτρηση μπορεί να φτάσει στη θερμοκρασία τήξης ή αποσύνθεσης της πολυμερούς μήτρας. Η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Παρόλο που η ταχύτητα κοπής δεν έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις διάτρησης, η αύξηση της ταχύτητας κοπής σε συνεχή τροφοδοσία προκαλεί περισσότερη παραγωγή θερμότητας με διαδικασίες τριβής και επιτρέπει λιγότερο χρόνο διάχυσης θερμότητας μέσω του εργαλείου. Η επίδραση της ταχύτητας τροφοδοσίας στη θερμοκρασία επιφάνειας της πλευράς διαμορφώνεται ανάλογα με την ταχύτητα κοπής και το βάθος της τρυπημένης οπής. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος κοπής και επομένως η μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της πλευράς.

Για βαθύτερες οπές και για υψηλή ταχύτητα κοπής, η αύξηση του ρυθμού

τροφοδοσίας οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας των πλευρών. Εδώ, το μεγαλύτερο τρύπημα και η υψηλότερη ταχύτητα κοπής παρείχαν περισσότερο χρόνο για επαφή μεταξύ του εργαλείου κοπής και της πηγής θερμότητας, παρακάμπτοντας την επίδραση της ταχύτητας τροφοδοσίας.¹⁵



Σχήμα 5.4 : Επίδραση των παραμέτρων διεργασίας στη θερμοκρασία της όψης της πλευράς σε διατρήσεις FRP. Συνθήκες κοπής που χρησιμοποιούνται: Πλαίσιο πολλαπλών κατεύθυνσης CFRP πάχους 2mm, τρυπάνι καρβιδίου, διάμετρος τρυπανιού = 9 mm. Συνθήκες κοπής που χρησιμοποιούνται στο [43]: CFRP πολλαπλών κατεύθυνσης (υφαίνει), $V_f = 0,7$, τρυπάνι καρβιδίου, διάμετρος τρυπανιού = 8 mm, μήκος διάτρησης 20 mm¹⁵

5.6. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

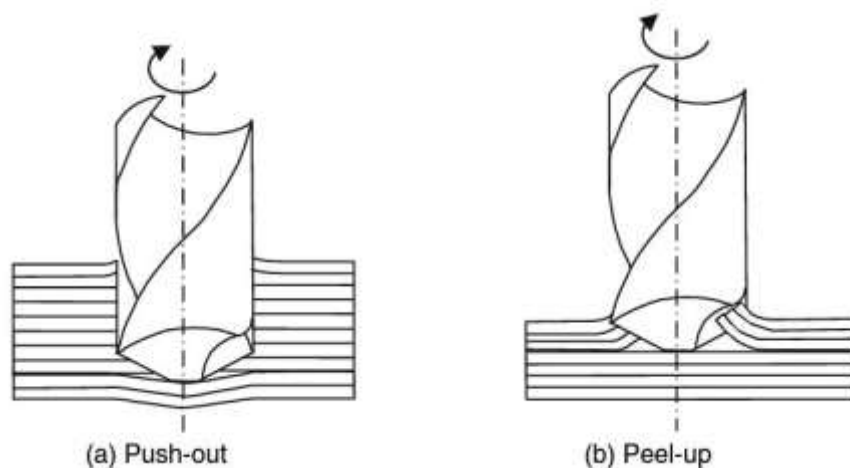
Η ποιότητα της κατεργασίας στις διατρήσεις χαρακτηρίζεται από την έκταση της βλάβης αποκόλλησης, την τραχύτητα της επιφάνειας, την ποιότητα της άκρης των οπών και την στρογγυλότητα. Η αποκόλληση είναι ένα εγγενές πρόβλημα στη διάτρηση των στρωματοποιημένων υλικών επειδή η κίνηση τροφοδοσίας τρυπανιού και η προκύπτουσα δύναμη ωθήσεως που δρουν κανονικά στο επίπεδο τείνουν να διαχωρίζουν τα φύλλα κατά μήκος της ασθενούς εποξειδικής στιβάδας μεταξύ τους. Επιπλέον, οι διαφορετικές γεωμετρίες σημείων τρυπανιών συμπεριφέρονται

διαφορετικά όσον αφορά την απόκριση αποκόλλησης.¹⁵ Η αποελασματοποίηση αφήνει ρωγμές μεταξύ των πτυχών στο τρυπημένο εξάρτημα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της μηχανικής απόδοσής του. Η τραχύτητα της επιφάνειας των οπών μετράται στα τοιχώματα της οπής κατά την κατεύθυνση της τροφοδοσίας. Επηρεάζεται από τον προσανατολισμό των ινών γύρω από την περιφέρεια της οπής. Έχει αποδειχθεί προηγουμένως ότι ο μηχανισμός σχηματισμού αποβλήτου και η προκύπτουσα τραχύτητα της επιφάνειας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό των ινών. Η ποιότητα της άκρης, η στρογγυλότητα και η ακρίβεια των διαστάσεων επηρεάζονται από την αποκόλληση, τη φθορά εργαλείων και τις θερμοκρασίες κοπής. Παραμορφώσεις στην οπή μπορεί να συμβούν λόγω των διαφόρων συντελεστών θερμικής διαστολής κατά μήκος και εγκάρσια στις κατευθύνσεις των ινών και μεταξύ της πολυμερούς μήτρας και των ενισχυτικών ινών.

Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπολειμματικές τάσεις και διακυμάνσεις διαστάσεων στη διάμετρο της οπής. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η σωστή επιλογή των παραμέτρων και πρακτικών διάτρησης είναι μια καλή στρατηγική για τη μείωση ή την εξάλειψη μερικών από των προβλημάτων. Τα παρακάτω τμήματα είναι αφιερωμένα στις λεπτομέρειες της ποιότητας γεωτρήσεων και των παραγόντων επηρεασμού.²⁷

5.7. ΑΠΟΦΥΛΛΩΣΗ

Μεταξύ των πολλών ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών που παράγονται με τη διάτρηση, θεωρείται ότι η διελασματική αποκόλληση είναι η πιο σημαντική. Η αποελασμάτωση αποτελεί βασική μέριμνα για τη διάτρηση των FRP επειδή μπορεί να επηρεάσει σοβαρά τη δομική ακεραιότητα και την μακροπρόθεσμη αξιοπιστία του κατεργασμένου εξαρτήματος.²⁷



Εικόνα 5.4 : Σχηματική απεικόνιση εξώθησης κατά την έξοδο(a) και αποφλοίωσης κατά την είσοδο(b)¹⁵

Η αποελασματοποίηση που προκαλείται από τη διάτρηση λαμβάνει χώρα στα επίπεδα εισόδου και εξόδου του τεμαχίου εργασίας όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.4. Αυτά ονομάζονται εξώθηση(a) και αποφλοίωση(b). Δύο διαφορετικοί μηχανισμοί ευθύνονται για την αποκόλληση σε κάθε πλευρά του φύλλου.¹⁹

Η άκρη του τρυπανιού ασκεί δύναμη συμπίεσης κάτω από τα άκοπα στρώματα που προκαλούν την ελαστική κάμψη. Καθώς το τρυπάνι πλησιάζει την έξοδο, μειώνεται ο αριθμός των άκοπων φύλλων που το υποστηρίζουν και η αντίσταση στην κάμψη μειώνεται. Σε ένα κρίσιμο πάχος η τάση κάμψης καθίσταται μεγαλύτερη από την ενδοελασματική αντοχή μεταξύ των στρώσεων και ξεκινάει μια εσωτερική ρωγμή γύρω από την οπή.

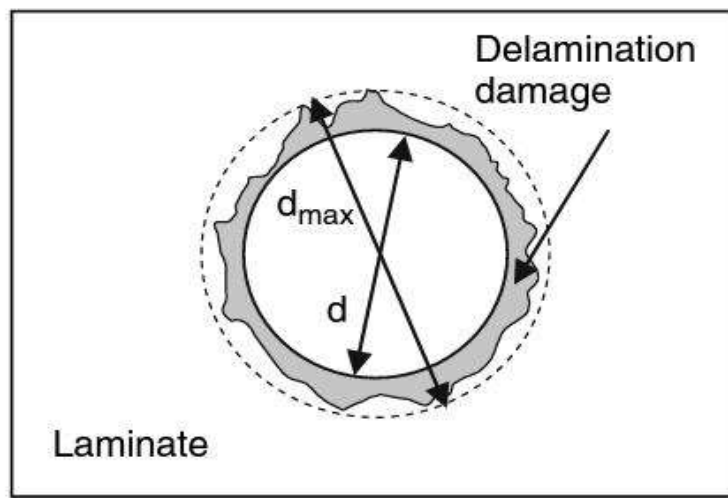
Περαιτέρω ώθηση προς τα κάτω από το σημείο διάνοιξης προκαλεί τη διάδοση της ρωγμής και η ακαμψία κάμψεως των στρώσεων υποστήριξης καθίσταται ασθενέστερη. Αυτό οδηγεί σε ρήξη του υλικού κάτω από το σημείο τρυπήματος καθώς η άκρη του σμίλου εξέρχεται από το έλασμα. Η αποελασματοποίηση πραγματοποιείται με την ολίσθηση των τρυπημένων πτυχών επάνω στις αυλακώσεις του τρυπανιού παρόμοιες με τη δράση μιας βίδας.

Η απεικόνιση και η αξιολόγηση της ζημίας αποκόλλησης είναι δύσκολο έργο, διότι η ζημιά είναι εσωτερική και εξωτερική. Καταλαβαίνοντας το μέγεθος, το σχήμα, και τη θέση της αποκόλλησης που είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των ζημιών της μηχανικής κατεργασίας. Η οπτική μικροσκοπία και η ανάλυση εικόνας

χρησιμοποιούνται συχνά για τη μέτρηση της έκτασης της ζημίας αποκόλλησης στις επιφάνειες εισόδου και εξόδου.^{25,28,29}

Ο συντελεστής απόσπασης ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης διαμέτρου της ζώνης ζημίας προς τη διάμετρο της οπής

$$F_d = \frac{d_{max}}{d} \quad (\text{σχέση 5.3})$$



Εικόνα 5.5 : Σχηματική αναπαράσταση του παράγοντα αποελασματοποίησης¹⁵

Χρησιμοποιείται συχνά για να χαρακτηρίσει τη ζημία διάτρησης και να ποσοτικοποιήσει την επίδραση των παραμέτρων διεργασίας στην έκταση της αποκόλλησης. Η Εικόνα 5.5 δείχνει ένα σχήμα που εξηγεί τον παράγοντα αποκόλλησης.

Η έναρξη της αποκόλλησης και η έκταση της βλάβης αποκόλλησης επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους της διαδικασίας, όπως ταχύτητα τροφοδοσίας, ταχύτητα ατράκτου, διάμετρος τρυπανιού, σχεδιασμός σημείων τρυπήματος και διαμόρφωση υλικού.

Αρκετές μελέτες έχουν επισημάνει ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι η πλέον επηρεαστική παράμετρος για τον έλεγχο της αποκόλλησης λόγω της άμεσης επίδρασής της στη δύναμη ωθήσεως. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις για αρκετές γεωμετρίες γεωτρήσεων για τη συσχέτιση του συντελεστή αποκόλλησης F_d και των παραμέτρων διεργασίας. Μια περίληψη αυτών των

σχέσεων δίνεται στον πίνακα 5.2. Αυτές οι σχέσεις καταδεικνύουν τις επιδράσεις του ρυθμού τροφοδοσίας, της ταχύτητας διάτρησης και της διαμέτρου της διάτρησης σε ζημιές αποκόλλησης. Η αποκόλληση στις εξωτερικές επιφάνειες των φύλλων γενικά πραγματοποιείται με αύξηση τόσο της ταχύτητας τροφοδοσίας όσο και της ταχύτητας κοπής. Από πειράματα η στατιστική ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι η ταχύτητα κοπής έχει την υψηλότερη στατιστική και φυσική σημασία για τον συντελεστή αποκόλλησης Fd.^{25,30}

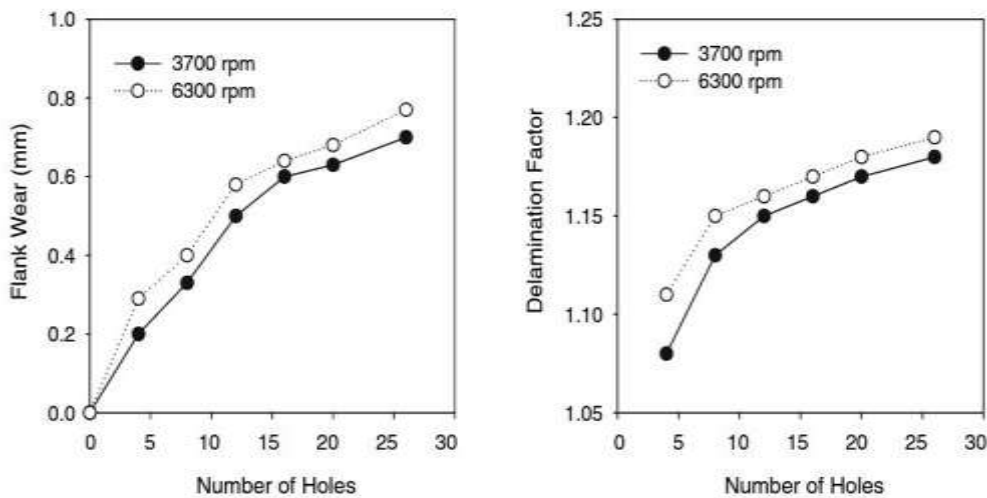
Από την άλλη πλευρά, παρόμοιες μελέτες σε πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού έχουν δείξει ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας που ακολουθείται από την ταχύτητα κοπής έχει τη μεγαλύτερη στατιστική και φυσική σημασία για το Fd.^{31,32}

Το τρυπάνι καρβιδίου Brad και Spur έχει τη χαμηλότερη βλάβη αποκόλλησης, ακολουθούμενη από το ελικοειδές τρυπάνι με ραβδώσεις καρβιδίου, το τρυπάνι από καρβίδιο με ευθύγραμμη γράμμωση και το σπειροειδές τρυπάνι HSS. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αποκόλληση εξαρτάται έντονα από τη δύναμη ωθήσεως, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη γεωμετρία του τρυπανιού. Το συμβατικό τρυπάνι περιστροφής έχει μια μεγάλη άκρη σμίλης σε σύγκριση με το τρυπάνι Brad και Spur (ή τρυπάνι τύπου candle stick) και το ευθύ τρυπάνι. Έτσι, προκαλεί μεγαλύτερη δύναμη ωθήσεως και υψηλότερη τάση για αποκόλληση. Επιπλέον, το τρυπάνι περιστροφής HSS φθείρει πολύ πιο γρήγορα από το καρβίδιο και η δύναμη ωθήσεως που προκαλείται από τη φθορά είναι υψηλότερη. Μετά από στατιστική ανάλυση πειραμάτων της εσωτερικής βλάβης, όπως μετρήθηκε με το υπερηχητικό C-Scan, έδειξε ότι η ταχύτητα τροφοδοσίας και η διάμετρος του τρυπανιού έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή στις ζημιές αποκόλλησης. Το τρυπάνι τύπου saw και το τρυπάνι τύπου candle stick προκαλούν μικρότερο συντελεστή αποκόλλησης από το τρυπάνι τύπου twist.²⁹

Η δύναμη ώθησης αυξάνεται με τη φθορά σε μεγάλο βαθμό και η ζημιά αποκόλλησης γίνεται πιο εμφανής με την αύξηση της φθοράς του εργαλείου. Το σχήμα 5.5 παρακάτω καταδεικνύει την εξέλιξη του συντελεστή φθοράς και αποκόλλησης με την αύξηση του αριθμού των τρυπών. Η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ ζημιών αποκόλλησης και φθοράς είναι εμφανής.

Πίνακας 5.2 : Εμπειρικές σχέσεις για παράγοντα αποκόλλησης, F_d σε διατρήσεις FRPs²⁵

| Drilling parameters | Delamination factor |
|---|---|
| Plain weave CFRP with 0/90° layup, $V_f = 0.55$, 16 layers with thickness of 4 mm, drill geometry: carbide two-flute helical drill, Brad and Spur drill, 5 mm diameter, feed rates 0.05, 0.1, 0.2 mm/rev, cutting speeds 30, 40, and 50 m/min [42] | Helical flute carbide drill $F_d = 0.923 + 3.463 \times 10^{-3}v + 1.559f$ (entrance) $F_d = 0.966 + 1.085 \times 10^{-3}v + 0.134f$ (exit) Brad and Spur carbide drill $F_d = 0.991 + 4.65 \times 10^{-4}v + 0.097f$ (entrance) $F_d = 1.006 + 1.980 \times 10^{-4}v + 0.021f$ (exit) |
| Woven carbon fiber fabric (WFC200)/epoxy matrix, [0/90] _{12s} laminate 5 mm thick, $V_f = 0.55$, all HSS drills, diameters = 6, 8, 10 mm, feed rates 0.01, 0.02, 0.03 mm/rev, spindle speeds 800, 1,000 and 1,200 rpm [46]. | HSS twist drill $F_d = 1.961 - 1.81 \times 10^{-4}N - 10.955f - 1.77 \times 10^{-2}d$ HSS candle stick drill (Brad and Spur) $F_d = 1.539 - 7.81 \times 10^{-6}N - 2.274f - 1.7 \times 10^{-2}d$ HSS saw drill $F_d = 1.508 + 8.681 \times 10^{-6}N - 3.385f - 1.49 \times 10^{-2}d$ |
| Material is the same as [42], drill geometry: HSS twist drill, carbide two-flute helical drill, straight four flute carbide drill, 5 mm diameter, point angle 118°, feed rates 0.04, 0.08, 0.15 mm/rev, cutting speeds 16, 24, and 32 m/min [47] | HSS twist drill $F_d = 1.021 + 1.31 \times 10^{-3}v + 0.117f$ Helical flute carbide drill $F_d = 1.010 - 1.16 \times 10^{-4}v + 0.097f$ Straight flute carbide drill $F_d = 1.037 + 1.0 \times 10^{-3}v + 0.158f$ |



Σχήμα 5.5 : Σχέση μεταξύ συντελεστή αποκόλλησης και φθοράς¹⁵

Η αποκόλληση γίνεται σοβαρή καθώς ο ρυθμός φθοράς του τρυπανιού αυξάνεται με τον αριθμό τρυπών. Τα σχήματα δείχνουν επίσης ότι η αποκόλληση γίνεται σοβαρότερη καθώς αυξάνεται η ταχύτητα κοπής.

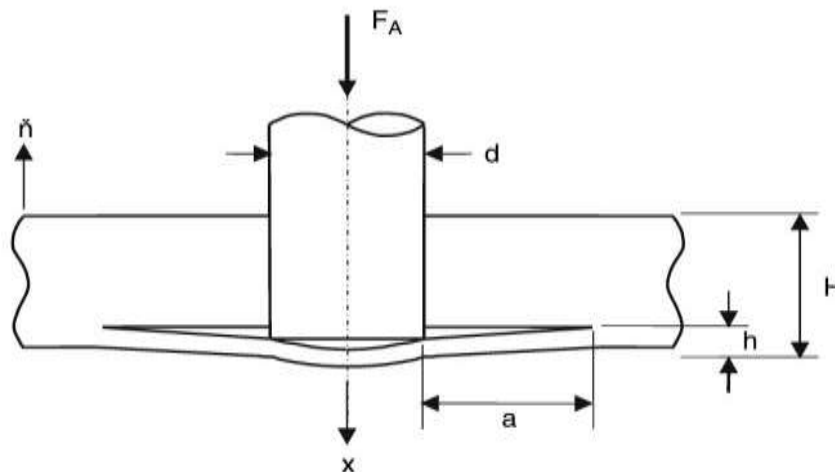
5.8. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η αποκόλληση γίνεται κατά τη διάρκεια της διάτρησης με δύο διακριτούς μηχανισμούς: ξεφλούδισμα του άνω στρώματος του ελασματοποιημένου υλικού και διάτρηση του άκοπου στρώματος κοντά στην έξοδο όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Μια απότομη μείωση της δύναμης ωθήσεως καθώς το κομμάτι εισέρχεται στο τεμάχιο εργασίας συνδέεται πάντοτε με την εμφάνιση αποελασματοποίησης με μηχανική δράση του εργαλείου αποκολλώντας το άνω στρώμα του ελάσματος. Αποκόλληση κοντά στην πλευρά εξόδου εισάγεται καθώς το εργαλείο δρα σαν ένας διατρητήρας, διαχωρίζοντας το λεπτό μη κομμένο στρώμα από το υπόλοιπο του φύλλου. Αυτή η ενέργεια συσχετίζεται με μια σχεδόν στιγμιαία πτώση της δύναμης ώσης από τη σταθερή της κατάσταση στο μηδέν. Αρκετοί συγγραφείς πρότειναν αναλυτικά μοντέλα για μηχανισμούς αποελασματοποίησης με βάση τη θεωρία της γραμμικής ελαστικής μηχανικής κάμψης (LEFM). Σε αυτά τα μοντέλα, μια κρίσιμη δύναμη ωθήσεως στην έναρξη της αποελασματοποίησης προβλέπεται ως συνάρτηση των ελαστικών ιδιοτήτων του σύνθετου φύλλου και της γεωμετρίας του σημείου διάνοιξης.

Ο συνδυασμός γνώσης της κρίσιμης δύναμης για αποελασματοποίηση και οι υπάρχουσες σχέσεις μεταξύ του ρυθμού τροφοδοσίας και της δύναμης ώσης επιτρέπει τον έλεγχο της αποκόλλησης με έλεγχο του ρυθμού τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας γεώτρησης. Στα επόμενα τμήματα, προγνωστικά μοντέλα της έναρξης της αποελασματοποίησης εξετάζονται και οι προβλέψεις τους συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα.^{20,21,24,33,34}

5.8.1. Εξώθηση ενός ισότροπου φύλλου

Ένα μοντέλο LEFM για την πρόβλεψη της έναρξης της αποκόλλησης εξόδου λόγω της εφαρμοζόμενης δύναμης ωθήσεως εισήχθη αρχικά από τους Hocheng και Dharan³³. Για την εκτέλεση της ανάλυσης γίνονται διάφορες απλουστεύσεις. Σε αυτό το μοντέλο (Εικόνα 5.6), η πολυστρωματική δομή πάχους H αποτελείται από έναν αριθμό ισότροπικών στρώσεων. Το μέτρο ελαστικότητας της ισότροπικής στοιβάδας θεωρείται ότι είναι το υψηλότερο μέτρο ενός μονοκατευθυνόμενου φύλλου. Αυτό επιτρέπει την ανάλυση στην συντηρητική πλευρά. Το τρυπάνι προσεγγίζεται ως κυλινδρική διάτρηση με διάμετρο d και το εφαρμοζόμενο φορτίο θεωρείται ότι είναι συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο της διάτρησης. Μια κυκλική ρωγμή ακτίνας $(0.5d + a)$ προϋπάρχει στη δομή μπροστά από το σημείο διάνοιξης. Θεωρείται ότι η ανάπτυξη ρωγμών είναι συνεπίπεδη και περιορίζεται στο επίπεδο της ρωγμής. Αυτές είναι οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται προκειμένου να εφαρμοστεί η θεωρία LEFM. Κατά τη διάτρηση ενός ελάσματος, μια ρωγμή αρχίζει και εξαπλώνεται στη διεπιφάνεια συνδετικού υλικού μεταξύ των πτυχών, που είναι ένα επίπεδο συμμετρίας για το υλικό.³⁴



Εικόνα 5.6: Μοντέλο κυκλικής πλάκας για ανάλυση αποελασματοποίησης³³

Έτσι, πληρούνται οι προϋποθέσεις για το LEFM. Το άκοπο πάχος h που βρίσκεται μπροστά από την διάτρηση διαμορφώνεται ως ισότροπη κυκλική πλάκα στερεωμένη στο περίγραμμα του στο κομμένο τμήμα του φύλλου, το οποίο

υποτίθεται ότι είναι άκαμπτο. Καθώς το τρυπάνι κόβει προς τα κάτω, η πλάκα αυτή παραμορφώνεται ελαστικά από τη δράση του φορτίου F_A που εφαρμόζεται στο κέντρο του.³³ Η διάδοση της ρωγμής εμφανίζεται όταν η ελαστική τάση στην κορυφή της υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή

Η εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου από το LEFM, υποθέτοντας ότι η διάδοση της ρωγμής κατά τη λειτουργία I δίνεται από

$$G\pi(d + 2a)da = F_A dx - dU \quad (\text{σχέση 5.4})$$

όπου G είναι απελευθέρωση ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Ο όρος στην αριστερή πλευρά περιγράφει την ενέργεια που απαιτείται για την επέκταση της ρωγμής σε απόσταση da . Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά είναι το έργο που γίνεται από την δύναμη ωθήσεως F_A όταν κινείται σε απόσταση dx και ο δεύτερος όρος είναι η ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται στην κυκλική πλάκα και δίνεται από

$$U = \frac{8\pi M x^2}{(a + \frac{d}{2})^2} \quad (\text{σχέση 5.5})$$

όπου M είναι η καμπτική ακαμψία της πλάκας και δίνεται από

$$M = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{σχέση 5.6})$$

Η μετατόπιση x εκφράζεται ως

$$x = \frac{F_A(a + \frac{d}{2})^2}{16\pi M} \quad (\text{σχέση 5.7})$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις εξισώσεις στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου και την επίλυση για F_A , λαμβάνεται το κρίσιμο φορτίο στην αρχή της αποελασματοποίησης³³

$$F_A^* = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)}} = \pi\sqrt{32G_{IC}M} \quad (\text{σχέση 5.8})$$

όπου το G_{IC} είναι ο κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας του στελέχους σε καταστάσεις επίπεδου στελέχους και θραύσμα λειτουργίας I. Χρησιμοποιείται G_{IC} αντί G (επίπεδη τάση) επειδή μπορεί εύκολα να μετρηθεί. Επειδή το G_{IC} είναι χαμηλότερο από το G , αυτό επίσης παρέχει συντηρητικές εκτιμήσεις του κρίσιμου φορτίου για αποκόλληση. Είναι προφανές ότι η δύναμη ωθήσεως κατά την έναρξη της αποελασματοποίησης είναι ανεξάρτητη της διαμέτρου του τρυπανιού όταν λαμβάνεται ένα συμπυκνωμένο φορτίο. Η συμπυκνωμένη κατάσταση φορτίου εφαρμόζεται καλύτερα σε τρυπάνια με στενή σμίλη.³³

5.8.2 Επίδραση της γεωμετρίας τρυπανιών στην αποκόλληση

Το μοντέλο των Hocheng και Dharan επεκτάθηκε από τους Hocheng και Tsao για να συμπεριλάβει διάφορες γεωμετρίες σημείων διάτρησης. Ακολουθεί μια σύνοψη των σχέσεων για κρίσιμη ώθηση κατά την έναρξη της αποκόλλησης. Ο αναγνώστης αναφέρεται για την παραγωγή αυτών των σχέσεων.^{33,34}

Τρυπάνι τύπου Saw



Ένα τρυπάνι τύπου saw έχει κοπτικά δόντια γύρω από την περιφέρειά του και έτσι η δύναμη ωθήσεως κατανέμεται με αυτόν τον τρόπο. Αυτό επιτρέπει καλύτερη

ποιότητα κατεργασίας στις διατρήσεις.³⁴ Η κρίσιμη δύναμη ώθησης στην αρχή της αποκόλλησης δίνεται ως

$$F_s = F_A^* \frac{1}{\sqrt{(1-2s^2+s^4)}} \quad (\text{σχέση 5.9})$$

όπου το s είναι ο λόγος διάμετρος διάτρησης προς διάμετρο κυκλικής ρωγμής, $s = d / (2a + d)$ και F_A^* είναι η κρίσιμη δύναμη ωθήσεως. Ο λόγος s είναι μικρότερος από 1 και η κρίσιμη δύναμη ωθήσεως που προβλέπεται για ένα τρυπάνι (εφαρμόζοντας κυκλική δύναμη στο έλασμα) είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη που προβλέπεται για το τρυπάνι με στρέβλωση (twist drill) (εφαρμόζοντας συμπυκνωμένο φορτίο).³⁴

Τρυπάνι τύπου Candle Stick



Το τρυπάνι τύπου Candle Stick, γνωστό και ως τρυπάνι Brad και Spur, είναι μια τροποποιημένη έκδοση του τρυπανιού όπου το άκρο της σμίλης είναι αλεσμένο σε ένα σημείο. Η δύναμη ωθήσεως εφαρμόζεται στο έλασμα ως συμπυκνωμένο κεντρικό φορτίο συν ένα περιφερικό κυκλικό φορτίο.¹⁵

Η δύναμη ωθήσεως στην αρχή της αποκόλλησης για αυτό το τρυπάνι δίνεται ως

$$F_c = F_A^* \frac{1+p}{\sqrt{1+p^2(1-2s^2+s^4)}} \quad (\text{σχέση 5.10})$$

όπου $\rho = p_1/p_2$ είναι η αναλογία της περιφερειακής κυκλικής δύναμης προς την κεντρική συμπυκνωμένη δύναμη. Δεδομένου ότι η συνολική δύναμη ωθήσεως κατανέμεται στην περιφέρεια με αναλογία ρ , αναμένεται ότι το τρυπάνι αυτό θα επιτρέψει μεγαλύτερη δύναμη κατά την έναρξη της αποκόλλησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η κατανομή της δύναμης ώσης στην περιφέρεια (μεγαλύτερη ρ), τόσο μεγαλύτερη είναι η κρίσιμη δύναμη ώθησης.

Τρυπάνι τύπου Core



Ένα τρυπάνι τύπου Core κατασκευάζεται από μεταλλικό σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου d και πάχους t , το οποίο διεισδύει με υλικό διαμαντιού στο άκρο του. Η δύναμη ωθήσεως που εφαρμόζεται από ένα τρυπάνι τέτοιο είναι ένας δακτύλιος κυκλικής δύναμης διαμέτρου d και πάχους t . Η κρίσιμη δύναμη στην αρχή της αποκόλλησης δίνεται από το

$$F_R = F_A^* \frac{1}{\sqrt{1 - As^2 + Bs^4}} \quad (\text{σχέση 5.11})$$

$$A = \left(2 - 2\beta + \left(\frac{3\beta^2}{2} \right) \right) + \left(\frac{4(1 - \beta)^2}{\beta(2 - \beta)} \right) \ln(1 - \beta)$$

$$B = \left(\frac{2 - 4\beta + 5\beta^2 - 3\beta^3 + \beta^4}{2} \right) + \left(\frac{2(1 - \beta)^2(2 - 2\beta + \beta^2)}{\beta(2 - \beta)} \right) \ln(1 - \beta)$$

Όπου, $\beta = 2t / d$ είναι η σχέση μεταξύ του πάχους t και της ακτίνας του τρυπανιού $d / 2$. Καθώς η δύναμη ωθήσεως κατανέμεται πάνω από μια δακτυλιοειδή περιοχή αντί να συμπυκνώνεται στο κέντρο, το τρυπάνι αυτό παρέχει μια υψηλότερη κρίσιμη δύναμη για αποκόλληση από το τρυπάνι περιστροφής (candle drill).

Τρυπάνι τύπου Step



Το τρυπάνι τύπου Step αποτελείται από δύο στάδια τρυπανιού, ένα κύριο στάδιο διαμέτρου c και ένα δευτερεύον στάδιο διαμέτρου d , όπου το c είναι μικρότερο από d . Η δύναμη ωθήσεως αυτού του τρυπανιού, μετά την διείσδυση του πρωτεύοντος σταδίου είναι ένα κυκλικό φορτίο το οποίο εφαρμόζεται από τα χείλη του δευτερεύοντος σταδίου.

Η κρίσιμη δύναμη ώθησης στην έναρξη της αποκόλλησης δίνεται από το

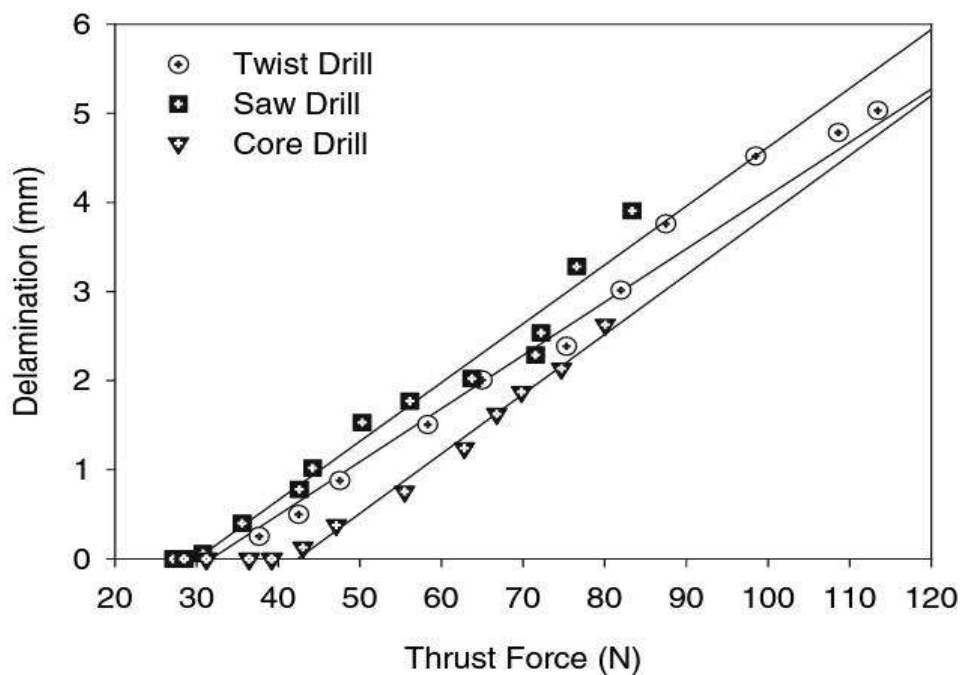
$$F_T = F_A^* \frac{\sqrt{2}}{1-\nu} \left[\frac{\{(1-\nu)+2(1+\nu)\xi^2\}^2}{(1+\nu)\{2(1-\nu)(1+2\nu^2)-(12-4\nu+3\nu^2+3\nu^3)\xi^2-8(1+3\nu)\xi^2 \ln \xi\}} \right]^{1/2}$$

(σχέση 5.12)

όπου $\xi = c / d$ είναι ο λόγος της διάμετρος του πρωτογενούς προς το δευτερεύον στάδιο. Η κρίσιμη ώθηση αυξάνεται με αύξηση της αναλογίας διαμέτρου.³⁵

Η εγκυρότητα των παραπάνω μοντέλων ελέγχθηκε με σύγκριση των προβλέψεών τους με πειραματικά δεδομένα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 και στον

πίνακα 5.3. Τα δεδομένα ελήφθησαν για υφάσματα (WFC200) ίνες άνθρακα / εποξειδικά προπλάσματα με αλληλουχία στοίβαξης [0/90] 12s. Το έλασμα αποτελούταν από 24 φύλλα και είχε πάχος 6 mm. Το κλάσμα όγκου ινών ήταν 0,55, το συντελεστή Young ήταν 18,4GPa, η αναλογία Poisson ήταν 0,3 και ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας στέλεχος ήταν 140J / m². Το σχήμα δείχνει ότι η έκταση της βλάβης αποκόλλησης για μια δεδομένη γεωμετρία σημείων διάτρησης συσχετίζεται καλά με τη δύναμη ωθήσεως. Υπάρχει μια κρίσιμη δύναμη ωθήσεως κάτω από την οποία δεν λαμβάνει χώρα αποκόλληση.^{34,35}



Σχήμα 5.6 : Εξάρτηση της αποκόλλησης σε δύναμη ωθήσεως για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες γεωτρήσεων. Το σπειροειδές τρυπάνι και τρυπάνι τύπου saw είχαν και τα 10mm διάμετρο. Το τρυπάνι τύπου core επιστρώθηκε με διαμάντι μεγέθους 60 grit στο εμπρόσθιο άκρο.³⁵

Η κρίσιμη δύναμη ωθήσεως στην αρχή της αποελασματοποίησης μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με γραμμική παρέκταση όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 και οι τιμές της δεικνύονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Η κρίσιμη δύναμη ωθήσεως και ο ρυθμός τροφοδοσίας για αποελασματοποίηση³⁵

| Drill bit | Theoretical critical thrust force (N) | Experimental critical thrust force (N) | Critical feed rate ($\times 10^{-3}$ mm/rev) |
|--------------------|---------------------------------------|--|---|
| Twist drill | 34.1 | 31.8 | 4.7 |
| Saw drill | 38.8 | 30.5 | 5.1 |
| Candle stick drill | 36.2 | 26.4 | 6.9 |
| Core drill | 48.4 | 42.7 | 7.5 |
| Step drill | 31.4 | 29.1 | 4.9 |

Μπορεί να δει κανείς ότι οι προβλέψεις μοντέλων είναι καλές για τα τρυπάνια που μελετήσαμε. Το step drill παρέχει μια σχετικά χαμηλή κρίσιμη δύναμη για την αποκόλληση, ακολουθούμενη από το candle stick drill ενώ το core drill παρέχει το υψηλότερο. Οι αντίστοιχοι κρίσιμοι ρυθμοί τροφοδοσίας πάνω από τους οποίους θα εμφανιστεί η αποκόλληση έχουν επίσης προσδιοριστεί πειραματικά και παρουσιάζονται στον πίνακα.

Μπορεί να φανεί ότι το core drill παρέχει τον υψηλότερο ρυθμό τροφοδοσίας για ασφαλή διάτρηση χωρίς αποκόλληση.^{34,35}

5.8.3. Εξώθηση ενός ανισότροπου φύλλου

Η προηγούμενη ανάλυση υπολόγισε ισοτροπικές ιδιότητες κάθε στοιβάδας στο σύνθετο φύλλο. Στην πραγματικότητα, η μονόδρομη πτυχή είναι εξαιρετικά ανισότροπη και η γεωμετρία ρωγμών στην πραγματικότητα μπορεί να μην είναι κυκλική. Ο Jian και ο Yang εισήγαγαν ένα μοντέλο LEFM για αποκόλληση σε μονοστρωματικές ελασματοποιήσεις με ελλειπτική γεωμετρία ρωγμών²¹. Οι κύριες κατευθύνσεις του ελάσματος είναι ευθυγραμμισμένες με τους κύριους και δευτερεύοντες άξονες της ελλειπτικής ρωγμής. Η κρίσιμη δύναμη ωθήσεως στην αρχή της αποελασματοποίησης ευρέθη ότι είναι συνάρτηση της ελλειπτικότητας της ρωγμής και δίδεται από

$$F_A^* = 3\pi\left(\frac{b}{a}\right)\sqrt{2G_{IC}D^*} \quad (\text{σχέση 5.13})$$

όπου a και b είναι ήμισυ κύριοι και δευτερεύοντες άξονες της ελλειπτικής ρωγμής που ευθυγραμμίζονται κατά μήκος της διαμήκους και εγκάρσιας διεύθυνσεως, αντίστοιχα. Το D^* είναι μια έκφραση της ακαμψίας του ελασματοειδούς και δίνεται από

$$D^* = D_{11} + \frac{2(D_{12}+2D_{66})}{3} \left(\frac{a}{b}\right)^2 + D_{22} \left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (\text{σχέση 5.14})$$

και με τη σειρά τους D_s είναι οι όροι της μήτρας ακαμψίας ($D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{66}$) για την καθαρή κάμψη εξαιτίας ενός φορτίου έξω από το επίπεδο.

Η κρίσιμη δύναμη ώθησης είναι συνάρτηση του λόγου ελλειπτικότητας a / b , και η ελαχιστοποίηση του F_A^* σε σχέση με το a / b οδηγεί σε τιμή $a / b = (D_{11} / D_{22})^{1/4}$. Οι υψηλότερες τιμές της δύναμης ωθήσεως οδηγούν σε υψηλότερες τιμές του a / b .

Δεδομένου ότι ο στόχος είναι να εξαλειφθεί εντελώς η αποκόλληση, η ελάχιστη τιμή του a / b υποκαθίσταται και η έκφραση για την κρίσιμη δύναμη ώθησης για την αποκόλληση γίνεται

$$F_A^* = 3\pi^4 \sqrt{\frac{D_{22}}{D_{11}}} \sqrt{2G_{IC} D_C^*} \quad (\text{σχέση 5.15})$$

Όπου

$$D_C^* = 2D_{11} + \frac{2(D_{12}+2D_{66})}{3} \sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}}} \quad (\text{σχέση 5.16})$$

5.8.4. Συνιστώμενες πρακτικές

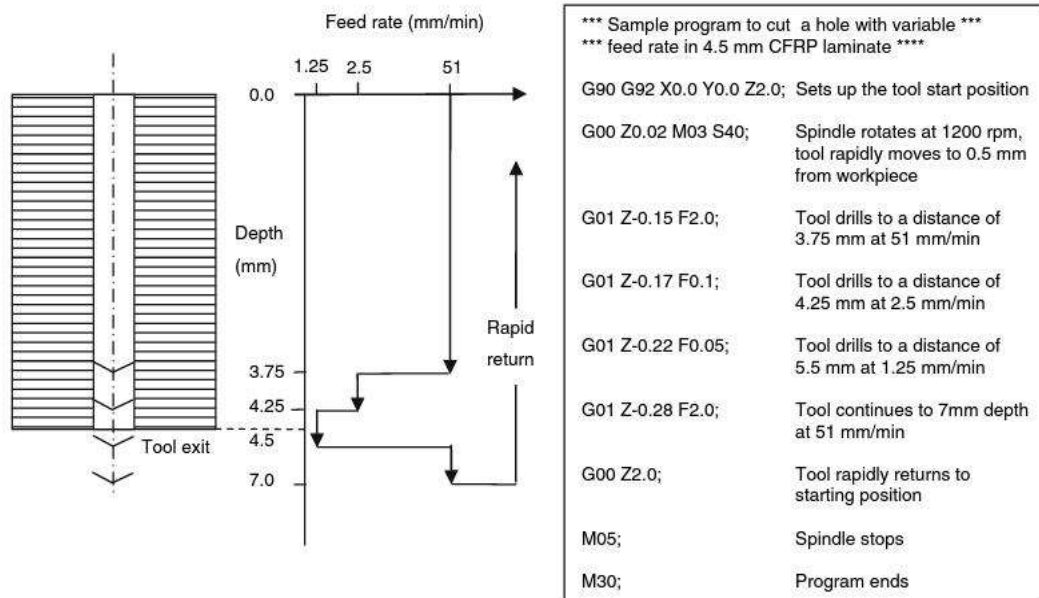
Τα αναλυτικά μοντέλα που συζητήθηκαν παραπάνω υποδηλώνουν ότι η αποκόλληση είναι πιθανό να συμβεί στις διεπαφές κοντά στην πλευρά εξόδου μιας διάτρητης οπής όταν η εφαρμοζόμενη δύναμη ωθήσεως υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή. Μια στρατηγική συχνά χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η εισαγωγή της αποκόλλησης είναι να μειωθεί η δύναμη ώθησης (μειώνοντας τον ρυθμό

τροφοδοσίας) καθώς το εργαλείο φθάνει στην πλευρά εξόδου έτσι ώστε η δύναμη ωθήσεως να παραμένει κάτω από την κρίσιμη τιμή. Η χρήση μεταβλητού ρυθμού τροφοδοσίας για την επιβράδυνση της τροφοδοσίας στην είσοδο και την έξοδο, ενώ η διάτρηση μεταξύ των υψηλότερων δυνατών ρυθμών τροφοδοσίας επιτρέπει την ελεύθερη διάτρηση και την υψηλή παραγωγικότητα.

Διαπιστώθηκε ότι ο χειρισμός του ρυθμού τροφοδοσίας παρέχει καλά αποτελέσματα για διάμετρο διάτρησης τρυπανιού κάτω από 6 mm²¹. Το σχήμα 5.7 δείχνει ένα παράδειγμα προγραμματισμού CNC που χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη μιας οπής χρησιμοποιώντας στρατηγική μεταβλητού ρυθμού τροφοδοσίας. Ο ρυθμός τροφοδοσίας για κάθε στάδιο υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα αναλυτικά μοντέλα που δείχνονται παραπάνω έτσι ώστε η δύναμη ωθήσεως να είναι πάντοτε κάτω από την κρίσιμη δύναμη ωθήσεως για αποκόλληση στο συγκεκριμένο πάχος της βαθμίδας. Για μεγαλύτερες διαμέτρους διάτρησης, καθίσταται απαραίτητη η τροποποίηση της γεωμετρίας του σημείου διάτρησης μειώνοντας το πλάτος της ακμής του σμίλου, ώστε να καταστεί δυνατή η ρύθμιση της αποκόλλησης.^{24,33}

Μία άλλη προσέγγιση για τον έλεγχο αποελασματοποίησης είναι η αύξηση της ακαμψίας της κάτω στιβάδας του ελάσματος. Το αυξανόμενο πάχος της κάτω στρώσης και η χρήση μιας πλάκας υποστήριξης έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικό για τη μείωση της αποκόλλησης. Όσο πιο παχύ είναι το τελευταίο πάχος του στρώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η κρίσιμη δύναμη ώθησης. Έτσι, όποτε είναι δυνατόν, πρέπει να χρησιμοποιούνται παχύτερες στρώσεις στο κάτω μέρος του φύλλου.

Η αποκόλληση σε παχύ σύνθετα εξαρτήματα μπορεί επίσης να αποφευχθεί με διάτρηση και από τις δύο πλευρές του ελασματοποιημένου υλικού με ένα τρυπάνι τύπου core drill. Το έλασμα τρυπιέται κατά το ήμισυ του πάχους από τη μία πλευρά και στη συνέχεια κόβεται από την αντίθετη πλευρά. Όλες οι δυνάμεις κοπής έδρασαν στο κέντρο του φύλλου και δεν υπάρχει καμία προκύπτουσα δύναμη που να σπρώχνει έξω τον πυθμένα της οπής. Αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί ως λειτουργία N / C και με τη χρήση ψυκτικού μέσου.²¹



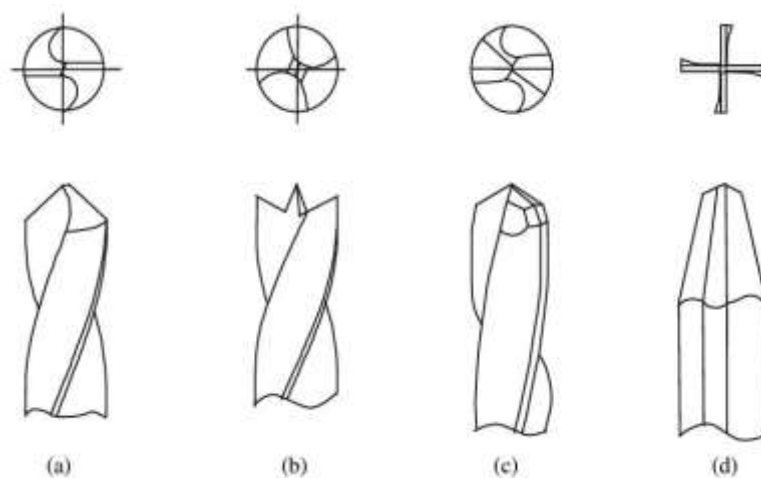
Σχήμα 5.7: Στρατηγική μεταβλητού ρυθμού τροφοδοσίας και σχετικό πρόγραμμα CNC για ελεύθερη διάτρηση μονοδιευθυντικών φύλλων¹⁵

Αν και αυτή η πρακτική δεν είναι πρακτική για τρύπες μικρής διαμέτρου, είναι μια λογική λύση για μεγαλύτερες τρύπες. Εν τούτοις, αυτή η λειτουργία αναπόφευκτα αφήνει ένα μικρό υλικό στο κέντρο της οπής που πρόκειται να απομακρυνθεί με μια λειτουργία τελειώματος εάν απαιτείται.

Η δύναμη ωθήσεως συσχετίζεται στενά με τη φθορά του τρυπανιού και πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τον καλύτερο έλεγχο της φθοράς του τρυπανιού. Αυτό γίνεται επιλέγοντας κατάλληλα υλικά εργαλείων και γεωμετρία σημείων διάτρησης που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού φθοράς των εργαλείων. Τα τρυπάνια από HSS αποτυγχάνουν μετά από μερικές οπές κατά τη διάτρηση GFRP και CFRP λόγω της υψηλής λειαντικότητας αυτών των υλικών. Τα τρυπάνια από καρβιδίου του βολφραμίου, ιδιαίτερα τα υπομικρομετρικά, διαθέτουν επαρκή διάρκεια ζωής λόγω της υψηλότερης αντίστασης στη θραύση και της σκληρότητάς τους. Η αντοχή στην φθορά αυξάνεται επίσης με την επίστρωση με διαμάντια και την απόθεση με PCD. Ωστόσο, αυτά τα τρυπάνια μπορούν εύκολα να πεταχτούν, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται με φορητά τρυπάνια. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται κατά τη διάτρηση με τρυπάνι με αυλάκωση στερεού καρβιδίου ή σπειροειδές τρυπάνι με επίστρωση με διαμάντι.

Η φθορά του τρυπανιού είναι επίσης στενά συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία του εργαλείου και επομένως ο έλεγχος της θερμοκρασίας κοπής είναι εξαιρετικά

σημαντικός για τον έλεγχο της φθοράς του εργαλείου και τη μείωση της θερμικής βλάβης στο κατεργασμένο τμήμα. Τα εξαρτήματα έχουν διαλυθεί λόγω βλάβης που οφείλεται σε υπερβολική θερμότητα που δημιουργείται βαθιά στο έλασμα. Συνιστάται η χρήση εγκεκριμένων ψυκτικών μέσων όποτε είναι δυνατόν. Επιπρόσθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κύκλος κοπής για να τρυπηθούν παχύ σύνθετα ελάσματα σε μηχανές ελεγχόμενες από υπολογιστή. Μπορεί επίσης να εξεταστεί το ενδεχόμενο επιλογής υλικού εργαλείων για καλύτερη διοχέτευση της θερμότητας έξω από τη διάτρητη οπή. Αυτά περιλαμβάνουν τρυπάνια με επικάλυψη PCD και διαμάντι που παρέχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα.¹⁵



Εικόνα 5.7: Διαφορετικά σχέδια κεφαλής τρυπανιού (α) τρυπάνι συνηθισμένης περιστροφής, (β) τρυπάνι τύπου *Candle Stick*, (γ) τρυπάνι πολλαπλών επιφανειών, (δ) τρυπάνι ευθείας σμίλης¹⁵

Η σωστή επιλογή της γεωμετρίας των γεωτρήσεων είναι επίσης εξαιρετικά σημαντική για τον έλεγχο της δύναμης ωθήσεως. Τα αναλυτικά μοντέλα που συζητήθηκαν παραπάνω και υποστηρίζονται από πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η υψηλότερη κρίσιμη δύναμη ωθήσεως κατά την έναρξη της αποελασματοποίησης επιτυγχάνεται με τη διανομή των δυνάμεων μακριά από το κέντρο του τρυπανιού (δηλ. Αποφεύγοντας τη συμπυκνωμένη δύναμη). Μεταξύ των σχεδίων σημείων διάτρησης που φαίνονται στην εικόνα 5.7, το τρυπάνι (b) και το ίδιο τρυπάνι (d) δημιουργούν τη χαμηλότερη βλάβη αποκόλλησης, όπου το τρυπάνι τύπου (b) λειτουργεί καλύτερα σε λεπτά ελάσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και τα δύο τρυπάνια έχουν μικρότερο πλάτος άκρων καλαμιού που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της δύναμης ώσης.²¹

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα-Επίλογος

6.1.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας ασχοληθήκαμε και ήρθαμε σε επαφή με τον κόσμο των σύνθετων υλικών. Όπως είδαμε αναζητώντας την ιστορία των σύνθετων υλικών είναι σαν να ρίχνουμε μια ματιά στην ταυτόχρονη ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Το κυρίαρχο πλεονέκτημα που μας δίνει η φύση των σύνθετων υλικών είναι ότι τις περισσότερες φορές διαθέτουν τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν και ταυτόχρονα επιπλέον ιδιότητες που κανένα από τα πρώτα υλικά δεν είχε.

Μελετήσαμε τις κατεργασίες των σύνθετων υλικών και όπως είδαμε οι κατεργασίες αυτές είναι διαφορετικές σε πολλές πτυχές από τις κατεργασίες άλλων υλικών (π.χ. μετάλλων).

Κυριότερα αναλύσαμε την κατεργασία της διάτρησης και τους σημαντικότερους παράγοντες όσον αφορά την κοπή αυτή.

Συμπερασματικά ο προσανατολισμός των ινών δηλαδή η σχέση μεταξύ της κατεύθυνσης των ινών και της διεύθυνσης του διανύσματος της ταχύτητας κοπής είναι ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την κοπή μας. Οι ενισχυτικές ίνες παρόλο που είναι ισχυρές ορισμένες φορές παρουσιάζονται εύθραυστες και μπορεί να έχουν κακή θερμική αγωγιμότητα, στην περίπτωση δηλαδή που χρησιμοποιήσουμε ίνες αραμιδίου ή ίνες γυαλιού. Γι' αυτό πρέπει να έχουμε σταθερές συνθήκες κοπής ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα με καλή ακρίβεια.

Πιο αναλυτικά οι ίνες γυαλιού και άνθρακα συναντάνε θραύση μπροστά από την κοπτική άκρη του κοπτικού μας εργαλείου ενώ οι σκληρότερες ίνες αραμιδίου αποφεύγουν την διάτμηση και τείνουν να κάμπτονται μπροστά από την άκρη του κοπτικού εργαλείου. Τα κοπτικά εργαλεία θα πρέπει να είναι ικανά να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάτρηση, λόγω τριβής μεταξύ

των ινών καθώς και από τα ρινίσματα που προκύπτουν κατά την διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας.

Στην περίπτωση όπου οι ίνες δεν έχουν καμία κλίση (0°) δηλαδή είναι προσανατολισμένες παράλληλα στον άξονα κοπής, για θετικές γωνίες κοπής τα ρινίσματα απομακρύνονται ομοιόμορφα με την μορφή φλοίδας. Ενώ αντίστοιχα για αρνητικές γωνίες κοπής τα ρινίσματα απομακρύνονται με ακαθόριστο σχήμα. Στην συνέχεια όταν ο προσανατολισμός των ινών δεν είναι παράλληλος προς τον άξονα κοπής αλλά κυμαίνεται από 0° έως 90° τότε λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται οι ίνες κόβονται και απομακρύνονται είτε με συνεχή είτε με ασυνεχή τρόπο.

Οι δυνάμεις του κοπτικού εργαλείου που παράγονται κατά την διάτρηση είναι η Δύναμη ώθησης και η Ροπή στρέψης, όπου είναι άμεσα συνδεδεμένες με των προσανατολισμό των ινών του σύνθετου. Σημαντική συνεισφορά στην δύναμη ώθησης δίνει η άκρη του κοπτικού μας εργαλείου. Μελετήσαμε διαφορετικές κεφαλές κοπτικών εργαλείων (twist drill, saw drill, candle stick drill, core drill, step drill) ώστε να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα στο τελικό προϊόν, μειώνοντας το φαινόμενο της αποκόλλησης. Μέσα από πίνακες καταλήξαμε για εφαρμογή σχετικά χαμηλής δύναμης ώθησης κατάλληλο είναι το step drill σε αντίθεση με το core drill που παρέχει το υψηλότερο ποσό δύναμης ώθησης. Όσον αφορά τον ρυθμό τροφοδοσίας πάλι το core drill παρέχει τον μεγαλύτερο ρυθμό για ασφαλή διάτρηση χωρίς αποκόλληση ενώ το candle stick drill μας δίνει την χαμηλότερη τιμή ρυθμού τροφοδοσίας.

Επίσης πρέπει να έχουμε ελεγχόμενη ταχύτητα κοπής κάθε φορά λόγω της ανάπτυξης θερμοκρασιών κατά την κοπή. Η θερμοκρασία που παράγεται κατά την διάτρηση μπορεί να φτάσει έως την αποσύνθεση της πολυμερούς μήτρας μας.

Ένα άλλο κυρίαρχο πρόβλημα όσον αφορά την ποιότητα επεξεργασίας όπως αναφέραμε είναι η αποκόλληση, κατά την οποία εμφανίζονται κενά-ρωγμές μεταξύ των πτυχών στο εξάρτημά μας πράγμα που οδηγεί συνήθως σε υποβάθμιση της μηχανικής του απόδοσης. Η πιο επηρεαστική παράμετρος για τον έλεγχο της αποκόλλησης είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας. Το πιο πιθανόν είναι να συμβεί στις διεπαφές κοντά στην πλευρά εξόδου μιας διάτρησης οπής όταν η εφαρμοζόμενη δύναμη ωθήσεως υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Μια λύση για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση είναι η χρήση μεταβλητού ρυθμού τροφοδοσίας.

6.2. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία κάθε φοιτητή, έχει ιδιαίτερη σημασία, τόσο γιατί επιστεγάζει τις προσπάθειές του, όσο και γιατί σηματοδοτεί το ξεκίνημα της επαγγελματικής του πλέον ενασχόλησης με την επιστήμη του μηχανολόγου μηχανικού.

Στα πλαίσιά της είχαμε την ευκαιρία να πλουτίσουμε τις γνώσεις μας και τις εμπειρίες μας. Επίσης στην μελλοντική έρευνα και εξέλιξη της παρούσας εργασίας ο επόμενος φοιτητής προτείνεται να περάσει σε πειραματική διαδικασία δημιουργίας και διάτρησης πλακών από διαφορετικά σύνθετα υλικά. Συγκρίνοντας τα θεωρητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα στοχεύοντας κάθε φορά να ελαχιστοποιούμε τις αποκλίσεις.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας προς τον κ. Γραμματικόπουλο και τον κ.Τσίρκα, επόπτες μας στην εργασία καθώς και τις οικογένειές μας για την υποστήριξή και την βοήθειά τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπανικολάου Γ. ,Μουζάκης Δ., (2007) Σύνθετα υλικά, Αθήνα:Κλειδάριθμος
2. Παπανικολάου Γ. , Σύνθετα Πολυμερικά Υλικά, Πανεπιστημιακές εκδόσεις
3. Callister W.D. Jr., Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 5η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004
4. Hull, D. & Clyne, T.W., An Introduction to Composite Materials Cambridge University Press, 2003
5. Μπέλτσιος Κ., Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, 2003.
6. <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Mixanikes%20idiotites%20kai%20Odokimes.pdf>
7. Dwight, D.W., Glass Fiber Reinforcements. In Comprehensive Composite Materials, Oxford, 2000
8. Παντελής Δ., Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά : Δομή-Ιδιότητες-Τεχνολογία-Εφαρμογές, Εκδόσεις Παπασωτηρίου , 1996
9. Morell R., Matrix Materials in Comprehensive Composite Materials, 401, Elsevier Science Ltd, 2000
10. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΔΙΑ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΦΑΣΕΩΣ, Μπέη-Κορωναίου Αθανασίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
11. Chung, D.D.L., Composite Material Structure and Processing Composite Materials, Springer London, 2010
12. ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Σταματόπουλος Χαράλαμπος, Σταματόπουλος Νίκος, Πανεπιστήμιο Πατρών
13. ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΗΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, Δρ. Κ. Μέντρεα, Π. Πανταζοπούλου, Τ.Ε.Ι. Πειραιά
14. Παναγιώτου Κ, Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών, Εκδόσεις Πήγασος, 2000
15. Jamal Y. Sheikh-Ahmad, Machining of polymer composites
16. <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26076/mathimata/2006Liansi.pdf>
17. <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26076/mathimata/Diatrisi.pdf>

18. Stephenson, D.A., Agapiou, J.S., Metal Cutting Theory and Practice, Marcel Dekker, NewYork, NY, 1997.
19. Stephenson, D.A., Agapiou, J.S., Metal Cutting Theory and Practice, Marcel Dekker, NewYork, NY, 1997.
20. DiPaolo, G., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials. Journal of Engineering for Industry. ASME Transaction 118, 104–110, 1996.
21. Petrof, R.C., On the dynamics of drilling glass reinforced plastic with different drill point geometries. SME Technical Paper EM86-363, 1986.
22. Jian, S., Yang, D.C.H., Effects of federate and chisel edge on delamination in composites drilling. Journal of Engineering for Industry. ASME Transaction 115, 398–405, 1993.
23. Jian, S., Yang, D.C.H., Delamination-free drilling of composites laminates. Journal of Engineering for Industry. ASME Transaction 116, 475–481, 1994.
24. Malhorta, S.K., Some studies on drilling of fibrous composites. Journal of Materials Processing Technology 24, 291–300, 1990.
25. Won, M.S., Dharan, C.K.H., Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates. Journal of Manufacturing Science and Technology 124, 242–247, 2002.
26. Davim, J.P., Reis, P., Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave –experimental and statistical study. Materials and Design 24, 315–324, 2003.
27. Weinert, K., Kempmann, C., Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites. Advanced Engineering Materials 6,684–689, 2004.
28. Person, E., Eriksson, I., Hammersberg, P., Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates. Journal of Composite Materials 31, 383–409, 1997.
29. Khashaba, U.A., Delamination in drilling GFR-thermoset composites. Composite Structures 63, 313–327, 2004.
30. Tsao, C.C., Hocheng, H., Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. International Journal of Machine Tool andManufacture 44,1085–1090, 2004.
31. Davim, J.P., Reis, P., Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. Composite Structures 59, 481–487, 2003.

32. Davim, J.P., Reis, P., Antonio, C.C., Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viopal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology* 155–156, 1828–1833, 2004.
33. Davim, J.P., Reis, P., Antonio, C.C., Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology* 64,289–297, 2004.
34. Hocheng, H., Dharan, C.K.H., Delamination during drilling in composite laminates. *Journal of Engineering for Industry* 112, 236–239, 1990.
35. Hocheng, H., Tsao, C.C., Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology* 140,335–339, 2003.
36. Hocheng, H., Tsao, C.C., Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46, 1403–1416, 2006.
37. T. Kaneeda, "CFRP cutting mechanism," *Transaction of North American Manufacturing Research Institute of SME*, vol. 19, 1991.
38. D. H. Wang, M. Ramulu and D. Arola, "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: Multi-directional laminate," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, 1995.
39. <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26076/mathimata/TORNEFSI.pdf>
40. <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/3-2-CUT.pdf>
41. <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26076/mathimata/2006Fresarisma.pdf>
42. Malkin, S., *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1989
43. Colligan, K., Ramulu, M., Edge trimming of graphite/epoxy with diamond abrasive cutters. *Machining of Advanced Composites*, MD-Vol. 45/PED-Vol. 66, ASME, New York, NY, 1993, pp. 97–115.
44. Sheikh-Ahmad, J., Unpublished data, Wichita State University, 2005
45. Peterman, L.M., *Diamond Tooling: Productivity Key to RP Fabrication*. Technical Sessions of the 41st Annual Conference – Reinforced Plastics/Composites Institute, Atlanta, GA, 27–31 January 1986. The Society of the Plastics Industry. <http://www.abrasivetech.com/pdf/trpfab.pdf>, cited December 2007.
46. Flaum, M., Karlsson, T., Cutting of fiber-reinforced polymers with CWCO₂ laser. *SPIE-High Power Lasers and Their Industrial Applications*, 801, 142-149, 1987.

47. McGeough, J.A., Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, New York, NY, 1988.
48. Schucher, D., Veas, G., Laser material processing of composite materials. Machining of Composite Materials II. Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress, Pittsburg, Pennsylvania, 17-21 October 1993, pp. 153-158.
49. Tagliaferri, V., Di Ilio, A., Visconti, I.C., Laser cutting of fibre-reinforced polyesters. Composites 16, 317–325, 1985.
50. Ion, J.C., Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedures and Industrial Applications. Elsevier Butterworth-Heinmann, UK, 2005.
51. Lorincz, Jim. "Water jets : Evolving from Marco to Micro", Manufacturing Engineering, Society of Manufacturing Engineers, November, 2009
52. Lorincz, "Water jets : Evolving from Marco to Micro"
53. AB "Company". Jet Edge. <http://www.jetedge.com/content.cfm>
54. "Company Global Rebar Services". [grswaterjet.co.uk](http://www.grswaterjet.co.uk).
<http://www.grswaterjet.co.uk/pumps.html>.
55. <https://www.boatfishing.gr/article-post/trygons-eco-runner-590-carbon-project/>
56. <https://www.taiwanexcellence.org/en/award/product/30838>
57. <https://www.bicycling.com/bikes-gear/g20029412/the-10-things-you-didnt-know-about-carbon-fiber/>
58. <https://liapatas-dental.gr/yphresies/emfiteumata/>
59. <https://tornos-rodos-mixanourgeio.blogspot.com/2019/05/>
60. <http://www.maksteel.gr/%CF%85%CF%80%CE%B7%CF%81%CE%B5%CF%83%CE%AF%CE%B5%CF%82-%CE%B5%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%CF%82-%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CF%89%CE%BD/%CE%BA%CE%BF%CF%80%CE%AE-%CE%BB%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CF%81%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CF%82-laser/>
61. <http://blog.novaglass.gr/2014/08/blog-post.html>

