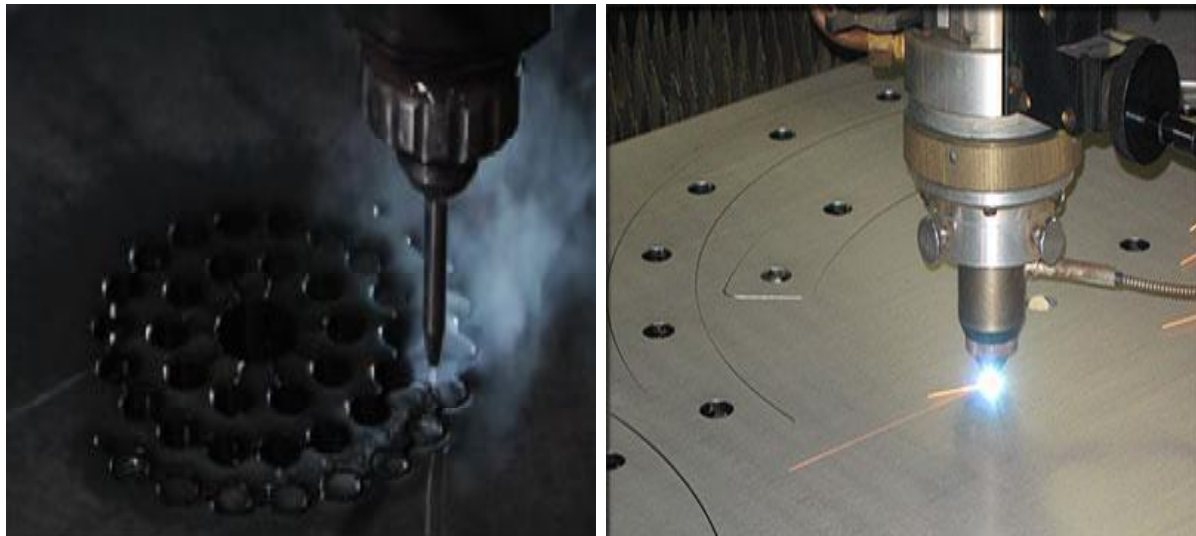


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**



ΣΟΛΛΑΤΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ. ΤΣΙΡΚΑΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ

**ΠΑΤΡΑ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2018**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα Εικόνων	5
Abbreviations.....	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1 Βασικά Στοιχεία - Έννοιες Σύνθετων Υλικών	13
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	13
1.2 Σύνθεση και Ιδιότητες Σύνθετων Υλικών.....	15
1.2.1 Ταξινόμηση των Σύνθετων Υλικών.	16
1.3 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών.....	16
1.4 Ρητίνες (πολυμερικές μήτρες).....	19
1.4.1 Τύποι και αίτια ρηγματώσεων.....	19
1.4.2 Αιτίες ρηγματώσεων.....	19
1.5 Καταλληλότητα Εποξειδικής Ρητίνης.....	20
1.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Ρητινών.....	21
1.7 Ινώδη Πολυμερή.....	22
2 Εισαγωγή στις Κατεργασίες.....	27
2.1 Αριθμητικός Έλεγχος (Numerical Control).....	28
2.2 Προηγμένες Τεχνολογίες – Μέθοδοι.....	29
2.2.1 Κατεργασία & Κοπή με LASER.....	29
2.2.2 Υδροκοπή (waterjet).	29
2.2.3 Κατεργασία με Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machining – EDM).	29
2.2.4 Κοπή με Πλάσμα.....	30
3 Συμβατικές Μέθοδοι Κατεργασίας.....	31
3.1 Διάτρηση (Drilling).....	31
3.1.1 Φθορές – Βλάβες κατά τη Διάτρηση.....	35
3.1.2 Ποιότητα Οπών.....	38
3.1.3 Αποκόλληση.....	39
3.2 Κοπή (Cutting).	40
3.3 Πριόνισμα (Sawing).....	42
3.4 Φρεζάρισμα (Routing).....	43
3.5 Λείανση (Grinding).....	44
4 Μη συμβατικές – Προηγμένες Μέθοδοι.....	45
4.1 Αρχή Λειτουργίας Κοπής με Laser.....	45
4.1.1 Επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού κοπής.....	46
4.1.2 Επίδραση των συνθηκών λειτουργίας.....	48
4.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα και χαρακτηριστικά κοπής λέιζερ.....	50
4.1.4 Μέθοδοι Κοπής λέιζερ.....	51
4.1.5 Παράμετροι κοπής λέιζερ.....	52
4.1.6 Ταχύτητες και Επιταχύνσεις κοπής λέιζερ.....	54
4.2 Μέθοδος Υδροκοπής – Αρχή λειτουργίας.....	55
4.2.1 Καθαρή Υδροκοπή.....	58
4.2.2 Αποξεστική Υδροκοπή (Abrasive waterjet).....	59
4.2.3 Διάτρηση και Διάνοιξη - Εισχώρηση με Υδροκοπή (WJ - Drilling & Piercing).....	64
4.2.4 Φρεζάρισμα με Υδροκοπή (WJ - Milling).....	64
4.2.5 Τόρνευση με Υδροκοπή (WJ - Turning).....	65
4.3 Μέθοδος κατεργασίας με Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machining – EDM).....	65
4.3.1 Αρχή Λειτουργίας EDM.....	65
4.3.2 Τεχνολογίες Ηλεκτροδιάβρωσης.....	67
4.3.3 Ηλεκτροδιάβρωση Σύρματος (wire EDM).....	67
4.3.4 Ηλεκτροδιάβρωση Αποτύπωσης (sinker EDM).....	69

4.3.5	Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής Ηλεκτροδιάβρωσης.....	71
4.3.6	Τροφοδοσία Ρεύματος.....	72
4.3.7	Διηλεκτρικό Υγρό.	74
4.4	Μέθοδος κοπής με plasma.....	74
4.4.1	Συνθήκες δημιουργίας πλάσματος..	75
4.4.2	Αρχή λειτουργίας εργαλειομηχανής κοπής με πλάσμα.	76
4.4.3	Εκκίνηση κοπής με πλάσμα.	78
4.4.4	Απόσταση ακροφυσίου – πυρσού με το προς κατεργασία υλικό.	79
4.4.5	Παράμετροι ποιότητας κοπής.....	80
4.4.6	Χαρακτηριστικά ποιότητας εντομής κοπής (kerf).	81
4.4.7	Αέρια κοπής πλάσματος.	82
4.5	Μέθοδος αφαίρεσης υλικού με κατεργασία υπερήχων (Ultrasonic Machining).....	83
4.5.1	Αρχή λειτουργίας κοπής με χρήση υπερήχων - USM.	83
4.6	Μέθοδος αφαίρεσης υλικού με Ηλεκτροχημική λείανση (Electrochemical Grinding – ECG) 84	
5	Συζήτηση.	87
5.1	Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	87
5.1.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατεργασιών.....	87
5.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κοπής Λείζερ.....	89
5.3	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Υδροκοπής (Waterjet).	89
5.4	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα αφαίρεσης υλικού με Ηλεκτροδιάβρωση.....	90
5.5	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κοπής με πλάσμα.	91
5.6	Ανακεφαλαίωση.	91
6	Αναφορές.....	93

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών στην καθημερινότητα (Παπανικολάου 2007).....	18
Εικόνα 2: Χρήση σύνθετων υλικών (ανθρακονήματα) στην κατασκευή αεροσκάφους AIRBUS A380 (Παπανικολάου 2007).	18
Εικόνα 3: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για ινώδη πολυμερή σύγκριση με χάλυβα [53].	24
Εικόνα 4: Μανδύας από FRP (Kachlakev Ph.D, 2012).....	25
Εικόνα 5: Τυπικό ιστορικό αξονικής δύναμης κατά τη διάτρηση σύνθετου υλικού [1].....	32
Εικόνα 6: Μεταβολή της ροπής κατά τη διάρκεια της διάτρησης [1].....	33
Εικόνα 7: Αύξηση αξονικής δύναμης ως συνάρτηση των διατρυπόμενων οπών [1].	34
Εικόνα 8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείου και επιφάνειας διάτρησης.[1].....	37
Εικόνα 9: Μοντέλο μηχανισμού αποκόλλησης [1,58].	39
Εικόνα 10: Κατεργασία πριονίσματος σύνθετου αραμιδίου (laminat)[1,40].	43
Εικόνα 11: Γεωμετρία εργαλείου και τεμαχίου κατά τη δομολόγηση [1,41].....	44
Εικόνα 12: Τυπική διάταξη λέιζερ κοπής CO ₂ [10].....	47
Εικόνα 13: Τυπικές επιφάνειες κοπής με λέιζερ (α) κάτοψη, (β) [14].	48
Εικόνα 14: Κοπή λέιζερ σε μονοκατευθυντικά σύνθετα:(α)παράλληλα, (β) κάθετα, στη διεύθυνση των ινών [2,43].	49
Εικόνα 15: Στρογγύλεμα των γωνιών κατά την κοπή λέιζερ με μεγαλύτερη ενέργεια της απαιτούμενης [2,43].	50
Εικόνα 16: Κοπή λέιζερ υποβοηθούμενο από δέσμη νερού ψύξης [10-14]	51
Εικόνα 17: Χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής λέιζερ [32].....	53
Εικόνα 18: Θέση εστίασης ως προς το πάχος των υλικών [32].	54
Εικόνα 19: Ο κύκλος του νερού στην υδροκοπή [32].	56
Εικόνα 20: Αντλίες (α) Άμεσης κίνησης, (β) Ενίσχυσης (model 50i –S IIESL)	57
Εικόνα 21: Το κύκλωμα του νερού στην αντλία ενίσχυσης – ροή νερού υψηλής πίεσης [32].	58
Εικόνα 22: Υδροκοπή αποξεστική (α)σε τιτάνιο, (β) σε γραφίτη, (γ) σε αλουμίνιο.....	60
Εικόνα 23: Σωλήνας ανάμιξης και στόμιο εκτόξευσης σε τομή.	60
Εικόνα 24: Τυπική διάταξη εργαλειομηχανής υδροκοπής [32].	61
Εικόνα 25: Μορφή ακροφυσίου υδροκοπής [32].....	63
Εικόνα 26: Κατεργασίες αποβολής υλικού με ηλεκτροδιάβρωση (α)κοπή, (β) διάτρηση, (c) λείανση, (δ) κατάτμηση [49].....	66
Εικόνα 27: Αρχή λειτουργίας Ηλεκτροδιάβρωσης [32].	67
Εικόνα 28: Αρχή μεθόδου EDM σύρματος [53].	68
Εικόνα 29: Κατεργασμένα κομμάτια - μήτρες σε εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.....	69
Εικόνα 30: Τυπική διάταξη κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης με αποτύπωση [32].....	70
Εικόνα 31: Αναλυτικά τμήματα εργαλειομηχανής ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης [32].	72
Εικόνα 32: Παλμοί τάσης και έντασης ρεύματος σε μια στατική παλμογεννήτρια [2].....	74
Εικόνα 33: Τυπικά επιμέρους τμήματα μηχανής πλάσματος.	76
Εικόνα 34: Τομή ακροφυσίου - πυρσού πλάσματος με και χωρίς αέριο περιδίνησης (Swirl gas) – Επίδραση της περιδίνησης στην ποιότητα κοπής.....	76
Εικόνα 35: Εξαρτήματα του ακροφυσίου – ηλεκτρόδια [26].....	77
Εικόνα 36: Μεταφορική κίνηση τσιμπίδας [32].	80
Εικόνα 37: Εντομή κοπής (kerf) σε σχέση με την ταχύτητα κοπής [2].....	82
Εικόνα 38: Μορφή πυρσού σε τομή.....	82
Εικόνα 39: Αρχή λειτουργίας κοπής υπερήχων [32].	84
Εικόνα 40: Αρχή λειτουργίας Ηλεκτροχημικής λείανσης [32].	85

Abbreviations

FRP - Fiber Reinforced Polymers

CNC – Computer Numerical Control

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

CIM - Computer Integrated Manufacturing

FMS - Flexible Manufacturing Systems

DNC - Direct Numerical Control

MMC - Mesh Metallic Composites

HSS - High Speed Steel

HAZ – Heat Affected Zone

UHP - Ultra Hydro Pressure

AWJ - Abrasive Waterjet

EDM – Electrical Discharge Machining

ECG - Electrochemical Grinding

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην καταγραφή προηγμένων μεθόδων κατεργασίας συνθέτων υλικών.

Στα πλαίσια της εργασίας έγινε προσπάθεια διερεύνησης και ανάπτυξης προηγμένων – μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας διαφόρων κατηγοριών συνθέτων υλικών. Έγινε κατηγοριοποίηση ως προς τις συνθήκες κατεργασίας τους, τη χρήση των κοπτικών εργαλείων και εργαλειομηχανών, καθώς και περιγραφή των διαφόρων μεθόδων κοπής. Συμπληρωματικά τέλος εξετάστηκαν οι τύποι αστοχίας και η συμπεριφορά του υλικού.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα, υπεύθυνο καθηγητή της παρούσας πτυχιακής Δρ. Τσίρκα Σωτήριο για τις πολύτιμες συμβουλές του, την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της ερευνητικής εργασίας, καθώς και γενικότερα για την υποστήριξη της όλης προσπάθειας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

.....
Υπογραφή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της κατεργασίας συνθέτων υλικών με προηγμένες μεθόδους. Η μελέτη αυτή σχετίζεται τόσο με το υλικό κατεργασίας όσο και με το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη κατεργασία.

Για την άρτια παρουσίαση του θέματος αρχικά περιγράφονται οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας συνθέτων υλικών έτσι ώστε να διαφανεί η πρόοδος που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα με τη χρήση προηγμένων μεθόδων κατεργασίας των υλικών. Πριν ακόμα όμως και από τις συμβατικές μεθόδους, δίνονται και κάποια βασικά στοιχεία και χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών. Πιο αναλυτικά:

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται χαρακτηριστικά της σύνθεσης των νέων υλικών που ονομάστηκαν σύνθετα, καθώς και οι ιδιότητες αυτών οι οποίες τα προκρίνουν ως εναλλακτικές λύσεις σε κατασκευές. Καταγράφονται επίσης περιληπτικά εφαρμογές των σύνθετων υλικών που αγγίζουν όλες τις πτυχές της καθημερινότητας. Γίνεται μια εκτενέστερη ανάλυση της δομής και ταξινόμηση των σύνθετων υλικών ενώ ειδική αναφορά γίνεται στους τύπους των διαφόρων ρητινών που χρησιμοποιούνται και αποτελούν πάντα αντικείμενο μελέτης και επιστημονικής έρευνας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις κατεργασίες των υλικών γενικότερα και ειδικότερα σε αυτές που αναφέρονται στα σύνθετα υλικά. Δίνεται εν συντομία μια πρώτη καταγραφή των προηγμένων μεθόδων – τεχνικών κατεργασίας σύνθετων υλικών, που σε επόμενο κεφάλαιο αναλύονται πιο διεξοδικά.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των λεγόμενων συμβατικών μεθόδων κατεργασίας. Βασική πηγή για τη συγγραφή του συγκεκριμένου κεφαλαίου αποτέλεσαν βιβλιογραφικές αναφορές όπως των **Abrate & Walton, 1992** (part I, II) οι οποίοι στο πρώτο μέρος της εργασίας τους προβαίνουν σε μια περιληπτική καταγραφή των παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας σύνθετων υλικών, όπως τη διάτρηση, την κοπή, το πριόνισμα τη δρομολόγηση καθώς και τη λείανση. Η συγκεκριμένη πηγή αν και δεν είναι πρόσφατη εντούτοις μπορεί να θεωρηθεί ως μια αρχική αναφορά για το θέμα διαπραγμάτευσης του συγκεκριμένου κεφαλαίου αφού δίνει μια σύντομη και περιεκτική περιγραφή των παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας σύνθετων υλικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι λεγόμενες μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας σύνθετων υλικών ή διαφορετικά οι προηγμένες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια. Οι πιο βασικές και πλέον εφαρμόσιμες τεχνικές είναι η υδροκοπή, η χρήση λείζερ, η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, και η κατεργασία κοπής με Plasma.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών και καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κατεργασιών. Επιπρόσθετα, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των βασικών προηγμένων μεθόδων κατεργασίας σύνθετων υλικών.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών αποτελεί στις μέρες μας βασική προστιθέμενη αξία στην παγκόσμια οικονομία. Η εξέλιξη των σύνθετων υλικών και η πρόοδος που επετεύχθη συνήρρησαν στη χρήση των νέων αυτών υλικών καταρχήν στις επισκευές κτιριακών υποδομών και στη στατική αναβάθμιση – ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων, κυρίως σε μια προσπάθεια ατিকাτάστασης του χάλυβα με τα λεγόμενα FRP σύνθετα υλικά, που οδηγούν σε πιο ελαφριές κατασκευές.

Σε μια γενικότερη προσέγγιση, ο συνδιασμός δυο η περισσότερων στοιχείων συνιστά ένα σύνθετο υλικό. Η ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά αποτελεί στις μέρες μας μια τεχνική, η οποία διαδίδεται αλματωδώς και βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή. Βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών σε δομικά στοιχεία. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ινοπλισμένα πολυμερή-FRP (Fibre Reinforced Polymers) και αποτελούνται από συνεχείς ίνες κυρίως γυαλιού ή άνθρακα και σπανιότερα αραμιδίου, που σε συνδυασμό με την εποξειδική ρητίνη, σχηματίζουν ένα σύνθετο υλικό υψηλής αντοχής. Στην αγορά κυκλοφορούν σε μορφή δύσκαμπτων λωρίδων (με πάχος της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων υφασμάτων (με πάχος της τάξης των 0.1-0.4 mm), από γυαλί, άνθρακα ή αραμίδιο, με τις ίνες κατανεμημένες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Τα υλικά αυτά τοποθετούνται με προσανατολισμό, ώστε οι ίνες να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις. Επίσης, τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται στις επιφάνειες ως ελάσματα, φύλλα ή πλέγματα. Ιδιαίτερα στην περίσφυξη των υποστηλωμάτων, τα υφάσματα μπορεί να είναι μιας ή δυο διευθύνσεων και ολόσωμα ή σε στρώσεις.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 ως μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε αλματώδης σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού, των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες έως και σήμερα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό ως ενίσχυση στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Ειδικότερα οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι που τα καθιστούν όλο και περισσότερο εφαρμόσιμα σε πλήθος εφαρμογών. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει έως και στο 15πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).

Σκοπός της χρήσης των σύνθετων υλικών είναι η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων, δηλαδή η βελτίωση της αντοχής της παραμόρφωσης αστοχίας (συνεπώς και της πλαστιμότητας) και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Με χρήση σύνθετων υλικών είναι δυνατή η αύξηση της συνάφειας σε κρίσιμες περιοχές, ενώσεων οπλισμών καθώς και η μείωση της πιθανότητας τοπικού λυγισμού οπλισμών. Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Τα σύνθετα υλικά, βρίσκουν πλέον ευρεία εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, λόγω των ιδιοτήτων τους και της ικανότητας παρασκευής υλικών με συγκεκριμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Η ραγδαία εξάπλωση της χρήσης τους, οδήγησε σε αναζήτηση τρόπων επεξεργασίας τους ακριβώς λόγω της διαφορετικής σύστασης από τα συμβατικά υλικά. Το γεγονός ότι τα σύνθετα υλικά δεν είναι ομογενή, είναι ανισότροπα ενώ σε πολλές περιπτώσεις συναντώνται ίνες στη σύνθεσή τους, δημιουργεί προβλήματα στην κατεργασία τους. Οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας τους όπως είναι η διάτρηση, η τόννευση, το πριόνισμα και η λείανση χρησιμοποιούνται υπό προϋποθέσεις και για συγκεκριμένες συνθήκες εργασίας, ωστόσο τα εργαλεία που εφαρμόζονται στις παραπάνω διεργασίες αναμένεται να έχουν υψηλό βαθμό φθοράς ή και αστοχίας σε ορισμένες περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό τα τελευταία 30 χρόνια αναπτύχθηκαν οι λεγόμενες και νέες μέθοδοι κατεργασίας όπως η υδροκοπή, η ηλεκτρική εκκένωση, η χρήση laser, η κοπή με plasma, η επεξεργασία με υπερήχους και η ηλεκτροχημική λείανση.

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια παρουσίασης των δυνατοτήτων των διαφορετικών κατεργασιών, τόσο των παραδοσιακών όσο και των προηγμένων δίνοντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών. Επίσης περιγράφονται προβλήματα των εργαλείων που χρησιμοποιούνται καθώς και η επίδραση στα τα ίδια τα υλικά που κατεργάζονται ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

1 Βασικά Στοιχεία - Έννοιες Σύνθετων Υλικών

Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε αύξηση των απαιτήσεων για κατασκευές ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες, με συνέπεια την ανάπτυξη σύνθετων υλικών. Ζητούμενο πάντα είναι η αύξηση της αντοχής ενός υλικού με την ταυτόχρονη μείωση του βάρους του, με απώτερο στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Κατά αυτή την έννοια το χαρακτηριστικό μέγεθος των νέων υλικών είναι οι υψηλές τιμές του λόγου αντοχή / βάρος, σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά.

Τα σύνθετα υλικά (composite materials) βρίσκουν εφαρμογή σε ένα πλήθος κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, τα τεχνικά έργα - κατασκευές, καθώς επίσης και οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων καθημερινής χρήσης. Τα σύνθετα υλικά (composite materials), που ήδη παρουσιάζουν ευρύτατη εφαρμογή σε πολλούς τομείς, αποτελούν συνεχώς αντικείμενο έρευνας ανάπτυξης και μελέτης ως προς τις ιδιότητές τους με αποτέλεσμα την παραγωγή νέων σύνθετων υλικών με όλο και πιο επιθυμητές ιδιότητες.

Η βασική μέθοδος ανάπτυξης ενός σύνθετου υλικού είναι η φυσική ανάμειξη δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την δημιουργία ενός νέου υλικού το οποίο θα έχει τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των αρχικών υλικών. Έτσι, με κατάλληλη επιλογή των αρχικών υλικών, είναι δυνατή η παραγωγή ενός σύνθετου υλικού με τις επιθυμητές ιδιότητες. Κατά αυτή την έννοια είναι δυνατός ένας μεγάλος αριθμός συνδυασμών υλικών που μπορεί να οδηγήσει σε μια πληθώρα σύνθετων υλικών.

Από τα πιο γνωστά και διαδεδομένα υλικά είναι τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Composites) τα οποία κατασκευάζονται όταν η συνεχής φάση που ονομάζεται μήτρα (matrix) ενισχύεται με ίνες (fibers). Οι πιο γνωστές μήτρες είναι οι πολυμερικές και οι τύποι ιών που συνήθως χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά είναι οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι ίνες γυαλιού (glass fibers), οι ίνες aramid (Kevlar), οι κεραμικές ίνες (ceramic fibers) και τέλος οι πολυμερικές ίνες (polymeric fibers).

Η αντικατάσταση παλαιών παραδοσιακών υλικών από σύνθετα ή και η παραγωγή νέων σύνθετων υλικών αναπόσπαστα θα πρέπει να συνοδεύονται από το χαμηλό κόστος. Έτσι συνολικότερα η θερμομηχανική συμπεριφορά, η επάρκεια και το χαμηλό κόστος των πολυμερικών υλικών, έχει στις μέρες μας ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση των μετάλλων σε πολλές κατασκευές και μια σύγχρονη τεχνολογική επανάσταση στον κατασκευαστικό και όχι μόνο τομέα.

Αναφορικά με την πληθώρα υλικών κατασκευών καθένα από αυτά διαθέτει πλεονεκτήματα που μπορούν να καλύψουν συγκεκριμένες κατασκευαστικές απαιτήσεις, όμως έχει και μειονεκτήματα που πρέπει να συνεκτιμηθούν για κάθε επιλογή. Έτσι η λύση της δημιουργίας σύνθετων υλικών συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα δυο ή περισσότερων υλικών δείχνει ιδιαίτερα ελκυστική. Αξιοσημείωτο είναι ότι ακόμα και το σπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί σύνθετο υλικό που αποτελεί ακόμα και σήμερα το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό.

1.1 Ιστορική Αναδρομή.

Υλικά όπως ο πηλός, η άσφαλτος και οι συνθετικές ρητίνες είναι από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήσε ο άνθρωπος. Ενδείξεις χρήσης τέτοιων υλικών σε τεχνικές κατασκευές έχουν καταγραφεί σε κεραμικά του 5000π.Χ.. Επίσης υλικά όπως το χαρτί που είναι και αυτό ένα ινώδες σύνθετο υλικό, ο πάπυρος κ.α. δείχνουν μια διαδεδομένη χρήση σύνθετων υλικών.

Οι Βαβυλώνιοι κατά την περίοδο 4000π.Χ.-2000π.Χ. φαίνεται να έχουν χρησιμοποιήσει τα πρώτα ενισχυμένα πολυμερικά υλικά.

Πιο σύγχρονα από το 2000 και μετά και με την ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνικών κατασκευών, η τεχνολογία στρέφεται σε ελαφρά υλικά κατασκευών που θα καλύπτουν εξίσου την ασφάλεια των κατασκευών όπως και τα παραδοσιακά. Έτσι η τεχνολογική εξέλιξη οδήγησε στην εφαρμογή νέων τεχνικών για τη χρήση των νέων σύνθετων υλικών. Έτσι σήμερα είναι πολύ διαδεδομένα τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή, τα οποία αποτελούνται από «υφάσματα», από ινώδη οπλισμένα πολυμερή, εμποτισμένα με εποξειδικές ρητίνες.

Τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19ου αιώνα και είχαν ως συστατικά φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική παραγωγή τους όμως ξεκινά στο τέλος της δεκαετίας του 1930 όπου αρχικά η χρήση τους περιορίζεται στην αεροναυπηγική, την χημική βιομηχανία και την ναυπηγική εξαιτίας του υπερβολικού τους κόστους. Επιπρόσθετα τα σύγχρονα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή και σε κατασκευές υπόγειων δεξαμενών καυσίμων, ως ύφαλα πλοίων ενώ πολύ σημαντική είναι και η συμβολή τους στην κατασκευή υπερσύγχρονων πολεμικών αεροσκαφών τα οποία δεν αναγνωρίζονται από ραδιοφάρους (ραντάρ).

Προκύπτει έτσι ότι η χρήση των σύνθετων υλικών έχει εξαπλωθεί σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό ειδικό βάρος, υψηλές τάσεις και μη διαβρωτικές δομικές ιδιότητες. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυση τους, πρωτοεμφανίστηκε στην Ελβετία το 1984, ενώ την τελευταία εικοσαετία βρίσκει πολλές εφαρμογές με επιτυχία σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες ή με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, όπως οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία, η Αυστραλία κ.α. Στην Ελλάδα οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιούνται στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώνονται ιδιαίτερα από το 2000 και μετά. Η ενίσχυση των κατασκευών επιτυγχάνεται με χρήση μανδύα και ελασμάτων από σύνθετα υλικά ή περιτύλιξη των μελών με ταινίες από σύνθετα υλικά. Η χρονολογική εξέλιξη των συνθέτων υλικών φαίνεται πιο αναλυτικά στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί (Γκοτσοπούλου & Κρεμαστιώτη, 2008).

Πίνακας 1.1 Ιστορική Εξέλιξη Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών.

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΥΛΙΚΟ
5000 π.Χ.	Μίγμα παπύρου-πίσσας
1500 π.Χ.	Επίστρωση ξύλου (καπλαμιάς)
1909 μ.Χ.	Φαινολικά σύνθετα
1928 μ.Χ.	Σύνθετα ουρίας-φορμαλδεΐδης
1938 μ.Χ.	Σύνθετα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης
1942 μ.Χ.	Πολυεστέρας- ίνες γάλλου
1946 μ.Χ.	Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης
1946 μ.Χ.	Σύνθετα Nylon - ίνες γάλλου
1951 μ.Χ.	Σύνθετα πολυστυρενίου-γάλλου
1956 μ.Χ.	Σύνθετα φαινόλης-αμιάντου
1964 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα άνθρακα-γάλλου
1972 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες Aramid
1975 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα aramid/γραφίτη

1.2 Σύνθεση και Ιδιότητες Σύνθετων Υλικών.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες άνθρακα, ύαλου ή σπανιότερα αραμιδίου, (Kevlar) υψηλής αντοχής, πλεγμένες μέσα σε μία μήτρα εποξειδικής ρητίνης σχηματίζοντας έτσι ένα είδος υφάσματος ή ελάσματος. Οι ίνες προσφέρουν αυξημένη δυσκαμψία και εφελκυστική αντοχή ενώ η ρητίνη δίνει την θλιπτική αντοχή στο υλικό και αποτελεί το μέσο σύνδεσης των ινών. Τα υφάσματα αυτά (ή ελάσματα) με την χρήση επιπλέον εποξειδικής ρητίνης για την εφαρμογή τους στις κατασκευές, σχηματίζουν ένα σύνολο υψηλών αντοχών, το οποίο επικολλάται μέσω της ρητίνης στο δομικό στοιχείο που ενδιαφέρει προσφέροντας ανάλογα με την περίπτωση σημαντική αύξηση αντοχής.

Η ρητίνη δηλαδή χρησιμοποιείται τόσο ως μήτρα του σύνθετου υλικού, όσο και ως συγκολλητικό μέσο που θα προσφέρει τον απαραίτητο δεσμό μεταξύ του σύνθετου υλικού και του υπό ενίσχυση στοιχείου. Τα πλεονεκτήματα αυτού του μίγματος είναι ότι μπορεί να μορφωποιηθεί επιτόπου στο έργο γύρω από οποιοδήποτε σχήμα επιφάνειας (μετά την κατάλληλη προετοιμασία αυτής). Ο προσανατολισμός των ινών γίνεται με τέτοιον τρόπο ώστε να αξιοποιούνται οι ιδιότητές τους και να παραλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις. Σύνθετα υλικά που έχουν εφαρμογή στις νέες κατασκευές είναι τα αφρώδη υλικά και τα επιχρίσματα, που κι αυτά εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου και μελετάται η σύσταση τους, έτσι ώστε να έχουν τις πιο επιθυμητές ιδιότητες και τη μέγιστη αποτελεσματικότητα στις κατασκευές. Τα υλικά αυτά αν και δεν αφορούν τόσο την ενίσχυση και την επισκευή των κτιρίων, όπως οι εποξειδικές ρητίνες και τα υφάσματα, ανήκουν στα σύνθετα υλικά (Γκοτσοπούλου & Κραμαστιώτη, 2008).

Ως προς τις ιδιότητες κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από τις μηχανικές και τις θερμικές ιδιότητες που συχνά αναφέρονται ως θερμομηχανικές ιδιότητες και συνήθως είναι ικανές για το χαρακτηρισμό ενός υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι η αντοχή, η ακαμψία, η ολκιμότητα, η σκληρότητα και η συμπεριφορά του σε κόπωση, ερπυσμό, θλίψη. Οι θερμικές ιδιότητες ενός υλικού είναι η πυκνότητα (ως εξάρτηση της θερμοκρασίας), η θερμοχωρητικότητα, η θερμική αντίσταση ή η θερμική αγωγιμότητα, η αντίσταση σε διάβρωση, η θερμοκρασία τήξης κλπ.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι ότι εμεριέχουν 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 πέρα από τις θερμομηχανικές ιδιότητές τους, η αντοχή στη φθορά, το χαμηλό κόστος, η μείωση του βάρους της κατασκευής, η ακουστική μόνωση.

Ανάλογα με τις ανάγκες κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής, τα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται έτσι ώστε να διαθέτουν κάποιες από όλες τις παραπάνω ιδιότητες. Ειδικότερα τα ινώδη σύνθετα υλικά διαθέτουν τέσσερα από τα παραπάνω πλεονεκτήματα τα οποία είναι η ακαμψία, η μεγάλη αντοχή, το μικρό βάρος και το χαμηλό κόστος. Τα ινώδη σύνθετα υλικά διαθέτουν τέσσερα από τα παραπάνω πλεονεκτήματα τα οποία είναι η ακαμψία, η μεγάλη αντοχή, το μικρό βάρος και το χαμηλό κόστος.

Σε κάθε περίπτωση βασικό κριτήριο αξιολόγησης των σύνθετων υλικών είναι οι ειδικές ιδιότητες (specific properties). Ειδική ιδιότητα ενός υλικού ονομάζεται ο λόγος της τιμής της ιδιότητας προς τη μάζα του υλικού. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει η ειδική ιδιότητα τόσο ελαφρύτερο είναι το υλικό ενώ συγχρόνως διαθέτει υψηλότερη τιμή της συγκεκριμένης ιδιότητας. Για τα σύνθετα υλικά η ειδική δυσκαμψία, η ειδική αντοχή αποτελούν σημαντικά κριτήρια για την αποτελεσματικότητά τους.

Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως κριτήριο αξιολόγησης του σύνθετου υλικού είναι και οι ποσότητες των αποβλήτων κατά την παραγωγή και χρήση του καθώς και ο τρόπος που οι ποσότητες αυτού του υλικού μπορούν να ανακυκλωθούν. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι α απόβλητα των σύνθετων υλικών δεν μπορούν να ανακυκλωθούν

αλλά αυτό δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα αφού οι ποσότητες αυτών των αποβλήτων είναι μικρές ενώ οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται μπορούν να διαμορφώσουν το υλικό στην τελική του μορφή χωρίς να αφήνονται υπολείματα [5 – 9].

1.2.1 Ταξινόμηση των Σύνθετων Υλικών.

Ως σύνθετα υλικά συνήθως αναφέρονται τα πολυμερή η χρήση των οποίων είναι ευρέως διαδεδομένη όπως θα φανεί και παρακάτω στις εφαρμογές. Για την ταξινόμηση των σύνθετων υλικών υπενθυμίζεται ότι αυτά παράγονται σε μορφή sandwich ξεκινώντας από μια μήτρα που είναι το βασικό υλικό κατασκευής, το οποίο εμπλουτίζεται από ένα πολυμερές και η σύνδεση των δύο γίνεται με τη βοήθεια ενός μέσου ενίσχυσης.

Κατά αυτή την έννοια η μήτρα μπορεί να είναι ένα πολυμερές, ένα κεραμικό ή μέταλλο. Τα πολυμερή διακρίνονται σε θερμοπλαστικά (PA, PP, ABS, HIPS, PEEK), σε θερμοσκληρυνόμενα (εποξειδικά και πολυεστέρες). Τέλος τα μέσα ενίσχυσης μπορεί να είναι ίνες, κόκκοι, υφάσματα, νιφάδες. Ειδικότερα οι ίνες διακρίνονται ως συνεχείς και ασυνεχείς.

1.3 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών.

Τα σύνθετα υλικά και ιδιαίτερα τα ινώδη σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα, βρίσκουν συνεχώς όλο και περισσότερες εφαρμογές στην καθημερινότητα. Σε όλο και περισσότερες εκφάνσεις της καθημερινότητας έχει γίνει εισαγωγή των σύνθετων υλικών αφού το πεδίο των εφαρμογών τους είναι ευρύτατο, από τη βιομηχανία και τα μέσα μαζικής μεταφοράς μέχρι και τον οικιακό εξοπλισμό. Αναλυτικότερα μερικοί βασικοί τομείς στους οποίους έχουν εφαρμογή τα σύνθετα υλικά είναι:

A. Ναυπηγική: Τα σύνθετα υλικά έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο. Η χαμηλή πυκνότητα, η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια, είναι οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών κατασκευής σκαφών αναψυχής ενώ η μείωση του κόστους των επισκευών οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στο τομέα της ναυπηγικής. Επίσης τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή ναρκαλιευτικών σκαφών του πολεμικού ναυτικού.

B. Μεταφορές - Αυτοκινητοβιομηχανία: Η μείωση του κόστους κατασκευής και η μείωση του βάρους με την εφαρμογή των σύνθετων υλικών συνεπάγονται εξοικονόμηση ενέργειας. Η χρήση των ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων στην κατασκευή αμαξωμάτων είναι μια τυπική εφαρμογή των σύνθετων υλικών. Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών δεν περιορίζεται μόνο στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και στους σιδηρόδρομους. Οι άριστες μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους και ο λόγος της ευρείας χρήσης του στις κατασκευές. Οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού καθορίζονται από τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών που το αποτελούν συγκεκριμένα στην περίπτωση που μελετάμε των ινών και της εποξειδικής ρητίνης.

Γ. Ηλεκτρικά είδη: Ο τύπος E-glass, είναι ένας τύπος ινών γυαλιού που παράγεται και χρησιμοποιείται σε ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και ειδικότερα στα σημεία όπου απαιτείται ηλεκτρική μόνωση. Ενδεικτικά ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιείται σε εξοπλισμό όπως ηλεκτρικοί διακόπτες, υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων, ηλεκτρικοί διανομείς κ.α

Δ. Παραγωγή αντιδιαβρωτικών: Η εύκολη παραγωγή μεγάλων κομματιών και πολύπλοκων κατασκευαστικών σχημάτων με απλή χύτευση αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών στη κατασκευή δεξαμεμών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμεμών αποθήκευσης νερού. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των υλικών σε αυτού του είδους τις εφαρμογές είναι το χαμηλό ειδικό βάρος και η ευκολία μεταφοράς που ελαχιστοποιούν το κόστος έτσι ώστε η μεταφορά των σωλήνων να είναι πιο εύκολη σε μεγάλες αποστάσεις και δύσβατες περιοχές. Σημαντική επίσης είναι και η χρήση των σύνθετων υλικών υψηλής απόδοσης των οποίων το κόστος της παραγωγής είναι ιδιαίτερο υψηλό αλλά αντισταθμίζεται από την υψηλή τους απόδοση. Τα υλικά αυτά είναι ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και Kevlar. Τα σύνθετα υλικά υψηλής απόδοσης εφαρμόζονται στους παρακάτω τομείς:

Α. Αεροδιαστημική: Η χρήση των ελαφρών σύνθετων υλικών στην κατασκευή ενός διαστημικών οχημάτων επιφέρει σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής. Έτσι, πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και Kevlar συχνά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κύριων τμημάτων διαστημοπλοίων, τα αυτόκλειστα για τα αέρια καύσης καθώς και την κατασκευή κώνων. Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή σύνθετων υλικών είναι ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά μήκος των ινών αυτών, ο οποίος εξασφαλίζει μεγάλη σταθερότητα σχήματος σε μέρη του διαστημοπλοίου ή του δορυφόρου που κατά την διάρκεια της πτήσης τους είναι εκτεθειμένα σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα γίνεται προσπάθεια έτσι ώστε η χρήση των σύνθετων υλικών να γίνεται σε αεροσκάφη και ανεμόπτερα. Η κατασκευή κάποιων τμημάτων ενός ελικοπτερου από σύνθετα υλικά αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο ζωής και την ταχύτητα του ελικοπτερου αφού η αντοχή του σε κόπωση μεγαλώνει.

Β. Βιομηχανία αθλητικών ειδών: Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών από τις βιομηχανίες αθλητικών ειδών συνίσταται στην παραγωγή προϊόντων μειωμένου βάρους και εύχρηστης συμπεριφοράς. Έτσι σήμερα κάποια από τα αθλητικά είδη όπως τα μαστούνια του γκόλφ, τα πέδιλα του σκί, τα βατραχοπέδιλα, τα καλάμια ψαρέματος και πολλά άλλα είναι φτιαγμένα εν μέρει από σύνθετα υλικά.

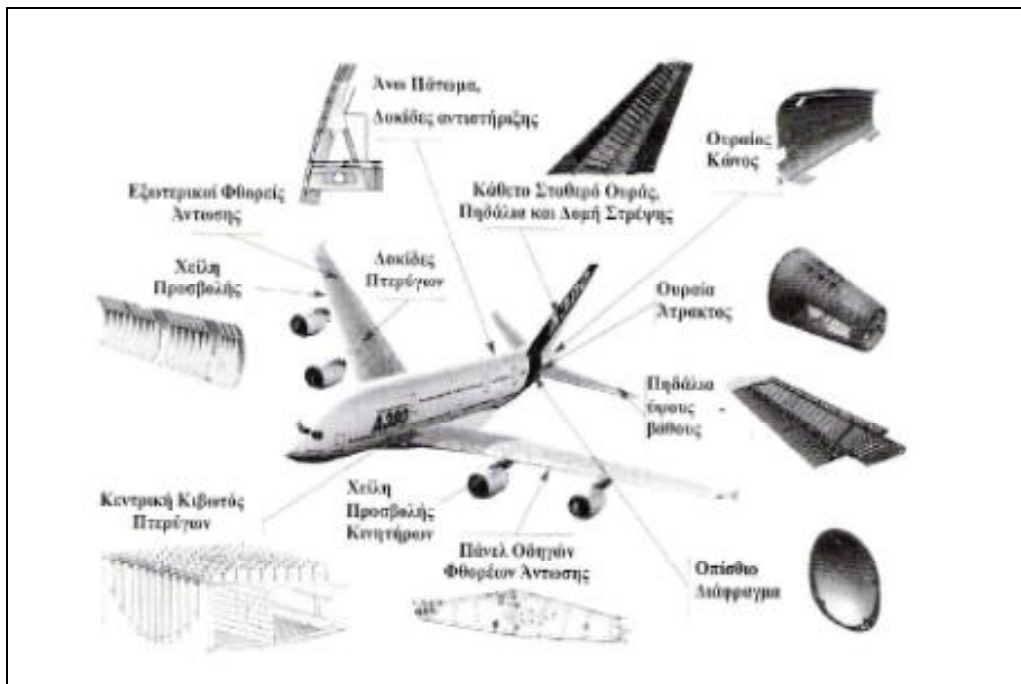
Γ. Ιατρική: Στην επιστήμη των βιοϋλικών γίνεται προσπάθεια δημιουργίας τεχνητών μοσχευμάτων. Σκοπός της έρευνας που διενεργείται ακόμα και σήμερα είναι η ανάπτυξη νέων μη τοξικών υλικών κατάλληλων για την αντικατάσταση ιστών και φυσικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος. Πολλά υλικά όπως τα νέα πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά συγκαταλέγονται σε αυτά που επιτρέπουν στους μηχανικούς να ασχολούνται με θέματα ιατρικής και να σχεδιάζουν τεχνητά βιοσυμβατά μοσχεύματα. Στην επιστήμη της οδοντιατρικής, νέα υλικά όπως οι κόνιες από τελούνται από κοκκώδη σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα δοντιών (σφραγίσματα).

Δ. Ηλεκτρονικές εφαρμογές: Στην επιστήμη των Ηλεκτρονικών γίνεται προσπάθεια αντικατάστασης του πυριτίου από το φουλερένιο στην κατασκευή των ημιαγωγών. Όπως επίσης με την βοήθεια του χαλκού και του χρωμίου αντί των πολύτιμων μετάλλων λευκόχρυσου, παλλαδίου και ραδίου κατασκευάστηκαν καταλυτικοί μετατροπείς. Με τον τρόπο αυτό γίνεται στις μέρες μας προσπάθεια ανάπτυξης ηλεκτρονικών εφαρμογών με τη χρήση φουλερενίου αντί πυριτίου.

Στις εικόνες που ακολουθούν δίνονται παραδείγματα χρήσης των συνθέτων υλικών σε εφαρμογές της καθημερινής ζωής.



Εικόνα 1: Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών στην καθημερινότητα (Παπανικολάου 2007)



Εικόνα 2: Χρήση σύνθετων υλικών (ανθρακονήματα) στην κατασκευή αεροσκάφους AIRBUS A380 (Παπανικολάου 2007).

1.4 Ρητίνες (πολυμερικές μήτρες).

Οι εποξειδικές ρητίνες είναι υλικά δύο συστατικών, (A – ρητίνη, B - σκληρυντής). Έχουν ευρεία χρήση σε κατασκευαστικά έργα και προβλήματα μηχανικού και ειδικότερα στις οικοδομικές κατασκευές. Τα υλικά αυτά αναμειγνύονται πριν από την τελική τους χρήση και μετά την εφαρμογή τους δημιουργούν μια ισχυρή σύνδεση σε σημεία που εμφανίζονται ρωγμές κυρίως στις κατασκευές. Ειδικότερα χρησιμοποιούνται ευρέως κατά την ενσωμάτωση οπλισμών σε παλαιό σκυρόδεμα π.χ. βλήτρα σε μανδύες ή αναμονές, ή ακόμα χρησιμοποιούνται και κατά τη σύνδεση παλαιού με νέο νωπό σκυρόδεμα, ώστε η επιφάνεια τους να συγκολληθεί. Η τεχνική της ρητινένεσης απαντάται κυρίως στον φέροντα οργανισμό κατασκευών από σκυρόδεμα και στις τοιχοποιίες. Στοχεύει στην επανάκτηση της αρχικής φέρουσας ικανότητας ρηγματωμένων φορέων καθώς και της αστοχίας τους.

Οι εποξειδικές ρητίνες με την τεχνική της λεγόμενης ρητινένεσης χρησιμοποιούνται στην επισκευή υποστυλωμάτων, χωρίς να έχει υποστεί βλάβη το σκυρόδεμα ή ο οπλισμός για ελαφρές ρωγμές σε εύρος (0.1 – 5) mm. Οι ρητινένεσεις εφαρμόζονται κατά την ένωση δύο κομματιών από σκυρόδεμα που έχουν διαχωριστεί, όταν αυτό δεν είναι αποδιοργανωμένο και ο οπλισμός δεν έχει λυγίσει ή σπάσει. Κατά παρόμοιο τρόπο χρησιμοποιούνται κατά την επισκευή κόμβων με ελαφριές – μέτριες ρωγμές χωρίς αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα ή οπλισμό που έχει υποστεί λυγισμό. Επίσης στην τοιχοποιία είναι δυνατή η κάλυψη ρηγματώσεων της τάξης λίγων mm με ενέσεις ρητινών υπό υψηλή πίεση [18-23].

1.4.1 Τύποι και αίτια ρηγματώσεων.

Οι τυπικοί βαθμοί βλάβης στην οικοδομική είναι:

1. Απλή Ρηγμάτωση (πάχος ρωγμής: για δοκούς 2-5 mm, για υποστυλώματα 0.5-3 mm). Η βλάβη αποκαθίσταται με χρήση εποξειδικών ρητινών και επικόλληση ελασμάτων ή σύνθετων υλικών στο σκυρόδεμα. Η χρήση των εποξειδικών ρητινών γίνεται μόνο στην πρώτη περίπτωση, την περίπτωση της απλής ρηγμάτωσης, σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος για την αποκατάστασή του [10].
2. Μερική Αποδιοργάνωση. Η βλάβη αποκαθίσταται με μερική καθαίρεση του βλαμμένου σκυροδέματος και αντικατάσταση αυτού με νέο σκυρόδεμα, ενίσχυση με νέους οπλισμούς ή επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων ή σύνθετων υλικών ή προσθήκη εξωτερικού μανδύα σκυροδέματος.
3. Διακοπή Συνέχειας, Πλήρης Αποδιοργάνωση Σκυροδέματος, Βλάβη Οπλισμών (ολίσθηση, λυγισμός οπλισμού). Η βλάβη αποκαθίσταται με πλήρη επισκευή ή αντικατάσταση ολόκληρου του στοιχείου.

1.4.2 Αιτίες ρηγματώσεων

Οι αιτίες ρηγματώσεων αποτελούν κύρια πρόβλημα του Πολιτικού Μηχανικού και εδώ αναφέρονται συνοπτικά και μόνο. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η σεισμική κατάπνηση, η λανθασμένη επιλογή υλικών του σκυροδέματος, η εσφαλμένη στατική μελέτη (όχι σωστή εκτίμηση φορτίων, μοντέλων) ή κακή εφαρμογή της στο στάδιο της κατασκευής, η παρεμπόδιση της συστολής ξήρανσης, οι παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού, ένα περιβάλλον με έντονες θερμοκρασιακές ή υγροσκοπικές εναλλαγές, η διάβρωση οπλισμού λόγω οξειδωσης ή μικρής επικάλυψης, οι ογκομετρικές μεταβολές σκυροδέματος (σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες η πήξη του νερού των πόρων οδηγεί σε αύξηση του όγκου του και σε ανάπτυξη πιέσεων στον τσιμεντοπολλτό), τα κατασκευαστικά σφάλματα όπως λανθασμένη σκυροδέτηση (πρόσθεση νερού, ελλιπής συμπύκνωση, ανεπαρκής στήριξη των ξυλοτύπων, πρόωρη

αφαίρεση των ξυλοτύπων), η κακή πρόσφυση σκυροδέματος – χάλυβα, η καθίζηση θεμελίων λόγω υπερεκτίμησης της αντοχής του εδάφους. Τα αποδεκτά όρια ρωγμών αναφέρονται εκτενώς από τον Δρίτσο 2001.

1.5 Καταλληλότητα Εποξειδικής Ρητίνης.

Η καταλληλότητα των ρητινών ελέγχεται ως προς τα μηχανικά και τα φυσικά χαρακτηριστικά της όπως είναι το χρώμα, το ιξώδες, ο χρόνος εργασιμότητας, ο χρόνος σκλήρυνσης, η ημερομηνία λήξης, η υδατοπερατότητα, Η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, είναι απαραίτητες και πρέπει να είναι επαρκείς, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση με τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων υλικών της κατασκευής. Μια ρητίνη θα πρέπει επίσης να έχει σχετικά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (όχι $E < 20.000 \text{ kg/cm}^2$), έτσι ώστε να αποφεύγεται η τοπική μείωση της ακαμψίας των στοιχείων και να είναι συμβατό με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και το ιξώδες να είναι ανάλογο προς την συγκεκριμένη χρήση (συνήθως χαμηλή τιμή του ιξώδους). Είναι απαραίτητο να έχει τέτοιο χρόνο πήξης ώστε να μπορεί να γίνει η εφαρμογή μίας δόσης πριν αυτή πήξει και ρευστότητα πρέπει να είναι κατάλληλη για το όποιο βάθος της ρωγμής. Η εποξειδική ρητίνη πρέπει να παρουσιάζει συνάφεια και συγκολλητικότητα με το σκυρόδεμα και το χάλυβα και ελάχιστη συστολή ξύρασης. Επίσης πρέπει να αντέχει στις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του έργου. Επιπλέον, θα πρέπει πάνω στην συσκευασία να αναφέρεται ότι δεν περιέχονται διαλύτες. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να λαμβάνεται στην αποθήκευση του υλικού, όπου τα συσκευασμένα συστατικά Α και Β πρέπει να βρίσκονται σε θέση με θερμοκρασία μεταξύ 10° και 20°C και κατά τις οδηγίες του εργοστασίου παραγωγής. Η εφαρμογή της ρητινένεσης επίσης γίνεται με συγκεκριμένο εξοπλισμό (πιστόλι) και τεχνική η ανάπτυξη της οποίας περιγράφεται στην εργασία των Κρεμαστιώτη & Γκοτσοπούλου, 2008.

Σε σχέση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά διακρίνονται τρία είδη ρητινών: η εποξική, η πολυεστερική καθώς και η βινυλεστερική. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την καταλληλότητα κάθε είδους ρητίνης ανάλογα με την εφαρμογή που αυτές θα χρησιμοποιηθούν δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 1.5.1. Τόσο οι μηχανικές ιδιότητες όσο και χρονικά όρια διατήρησης αυτών καλύπτονται πολλές φορές από διεθνή πρότυπα. Μερικά από τα χαρακτηριστικά χρήσης της εποξειδικής ρητίνης δίνονται στον Πίνακα 1.5.2.

Πίνακας 1.5.1: Μηχανικές Ιδιότητες Ρητινών (Παπανικολάου 2007).

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή(MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης(%)	Πυκνότητα (gr/cm ³)
Εποξική	55-130	2-4,5	4-14	1,2-1,3
Πολυεστερική	35-104	2,1-4,1	<5	1,1-1,46
Βινυλεστερική	73-81	3-3,6	3,5-5,5	1,12-1,32

Πίνακας 1.5.2: Μηχανικές Ιδιότητες Εποξειδικής Ρητίνης (Παπανικολάου 2007).

Ιδιότητες-Χαρακτηριστικά	Μέθοδος Δοκιμής	Όρια
Θλιπτική αντοχή (Mpa)	ASTM D695	55-110
Ιξώδες (PS)	ASTM D1824-mod	1,5-40
Επιμήκυνση θραύσης (%)		1,5-2,5
Μέτρο ελαστικότητας (Mpa)	ASTM D695	2100-5500
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	ASTM D638	40-65
Χρόνος απόκτησης αντοχής (ημέρες)		2-20(συνήθως 7)
Χρόνος εργασιμότητας (min)		20-80 min (για 200 gr υλικού στους 25°C)

1.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Ρητινών.

Το πρόβλημα που δημιουργήθηκε από την χρήση αυτών των μεθόδων με εξαίρεση την εφαρμογή των ρητινεδέσεων είχε να κάνει με την γήρανση των υλικών επισκευής. Έτσι αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται πλέον μόνο για την προσωρινή αποκατάσταση των ρωγμών, σε αντίθεση με την τεχνική των ενέσεων με ρητίνες η οποία όπως φαίνεται μπορεί να δημιουργήσει μόνιμη αποκατάσταση, που δεν χάνει την αντοχή της με το χρόνο [51 – 54].

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης των ρητινών είναι:

- ∅ Οι ρητίνες γεμίζουν το κενό της ρωγμής επιτυγχάνοντας την πλήρη συνέχεια του υλικού. Αποκαθίσταται με αυτό τον τρόπο πλήρως η συνάφεια του οπλισμού και του περιβάλλοντος του σκυροδέματος. Ακόμα οι οπλισμοί στην περιοχή της ρωγμής καλύπτονται πλήρως και έτσι προστατεύονται από κάθε διαδικασία οξείδωσης ή άλλης περιβαλλοντικής προσβολής.
- ∅ Οι ρητίνες παρουσιάζουν υψηλές αντοχές εφελκυσμού και συνάφειας με το σκυρόδεμα και με αυτόν τον τρόπο εμποδίζεται η αύξηση του εύρους και του μήκους των ρωγμών.
- ∅ Το υλικό της ρητίνης δεν είναι ευάλωτα από παράγοντες που συχνά επιδρούν δυσμενώς στην κατασκευή όπως οι περιβαλλοντικές δράσεις, η αλκαλικότητα και τα ιόντα. Εξάλλου το υλικό που βρίσκεται στο βάθος της ρωγμής, δέχεται πολύ μικρότερες επιδράσεις από το υλικό που βρίσκεται στην επιφάνεια.
- ∅ Ένα βασικό ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης της ρητίνης σε σχέση με τη διαδικασία γήρανσης της, είναι ότι βρίσκεται στο εσωτερικό της ρωγμής και το άνοιγμα των παρειών, λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, είναι πολύ μικρότερο από ότι στην επιφάνεια του στοιχείου. Το εύρος της ρωγμής μεταβάλλεται σε σχέση με την θερμοκρασία και οι κινήσεις των παρειών είναι ουσιαστικά μικρές αλλά όχι αμελητέες αφού το υλικό που βρίσκεται στην επιφάνεια του στοιχείου

γηράσκει, λόγω της επαναλαμβανόμενης έντασης κάτι που δεν συμβαίνει με το υλικό που βρίσκεται στο βάθος της ρωγμής.

- Ø Επίσης αρκετά σημαντικό είναι το γεγονός ότι η χρήση της εποξειδικής ρητίνης επιφέρει ένα καλαίσθητο αποτέλεσμα κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με την χρήση άλλων μεθόδων αφού είναι ίσως η μόνη επέμβαση που έχει τόσο υψηλό βαθμό διακριτικότητας.

Ανάμεσα στα βασικά μειονεκτήματα της χρήσης των ρητινών είναι η μη ορθή εφαρμογή της. Επίσης πολύ σημαντική είναι η επιλογή των υλικών με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας λόγω της επίδρασης στις στροφές της επισκευασμένης διατομής. Μια κατώτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη που μπορεί να χρησιμοποιείται προσωρινά λόγω της έλλειψης κανονισμών είναι τα 2000Μρα. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας είναι η χρήση ρητινοκονιαμάτων, κονιάματα δηλ. με την προσθήκη αδρανών αν και τέτοια υλικά έχουν πολύ μεγάλο ιξώδες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μεγάλο εύρος ρωγμών, όπως επίσης η χρήση τους μειώνει σημαντικά την αντοχή όπως φαίνεται στο διάγραμμα [34, 60].

1.7 *Ινώδη Πολυμερή*

Η χρήση φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers - FRB), αποτελεί σήμερα την πιο σύγχρονη τεχνική στον τομέα της ενίσχυσης των κατασκευών. Είναι η εξέλιξη της τεχνικής των χαλύβδινων ελασμάτων αντιμετωπίζοντας με επιτυχία τα μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής. Έχουν πολύ μικρό βάρος και πολύ μεγάλη αντοχή, διατίθενται σε μεγάλα μήκη και είναι ευαίσθητα στην διάβρωση. Η εφαρμογή της τεχνικής είναι απλή και δεν απαιτεί χρόνο για την εκτέλεση της εργασίας. Επίσης πολύ σημαντικό είναι το ότι εφαρμόζονται και σε περιπτώσεις όπου η εφαρμογή των επικολλούμενων ελασμάτων είναι περιορισμένη. Είναι υλικά ευρέως αποδεκτά παρά το υψηλό κόστος και την επιφύλαξη που υπάρχει για το νέο αυτό υλικό.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber-reinforced composites), αποτελούνται από μια έγλειστη περιοχή υπό μορφή ινών μέσα σε μία συνεχή μήτρα. Η μήτρα αυτή μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε υλικό από μία μεγάλη ποικιλία φυσικών ή τεχνητών υλικών. Χαρακτηριστικό ζητούμενο μίας ίνας είναι ο μεγάλος λόγος μήκος/διάμετρος. Έχει παρατηρηθεί ότι τα διάφορα υλικά που βρίσκονται σε συνήθη μορφή είναι λιγότερο άκαμπτα και ανθεκτικά από τις αντίστοιχες ίνες τους που οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών είναι πολύ μεγαλύτερες. Έτσι συμπεραίνεται ότι η γεωμετρία μίας ίνας είναι σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της αντοχής της [53].

Μερικά από τα πιο συνηθισμένα είδη ινωδών πολυμερών αναφέρονται περιληπτικά:

- Ø **Ίνες Άνθρακα:** Κατασκευάζονται από δύο υλικά, που αποτελούν τις πρώτες ύλες. Ως τέτοιες μπορεί να είναι ρητίνη φανικού οξέος, διάφορα πολυμερή, συνθετικό μετάξι και υδρογονάνθρακες. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται μόνο το P.A.N (πολυ-ακρυλονιτρίλιο) και η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο. Σε εξέλιξη βρίσκεται η παραγωγή κοντών ινών από αέριους υδρογονάνθρακες. Οι ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, έχουν διάμετρο 7-8 mm και αποτελούνται από κρυσταλλίτες γραφίτη του τύπου 'turbo static' που είναι μία αλλοτροπική μορφή του άνθρακα (Παπανικολάου 2007). Για να παρουσιάζουν οι ίνες άνθρακα υψηλό μέτρο και αντοχή, πρέπει οι επίπεδες στρώσεις του γραφίτη να είναι διατεταγμένες κατά την διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στην πράξη όμως, οι κρυσταλλικές μονάδες είναι πολύ μικρές, άτακτα διατεταγμένες και παρουσιάζουν ασυνέχειες δομής. Διακρίνονται σύμφωνα

με τις χαρακτηρίστηκες τους ιδιότητες σε ίνες υψηλής αντοχής (high strength HS), μέσου μέτρου ελαστικότητας (intermediate modulus IM), υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus HM) και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας (ultra high modulus UHM). Οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη ειδική δυσκαμψία (δυσκαμψία / πυκνότητα) σε σχέση με τις άλλες ίνες και πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη καθώς επίσης είναι ανθεκτικές σε διάβρωση, ερπυσμό και κόπωση.

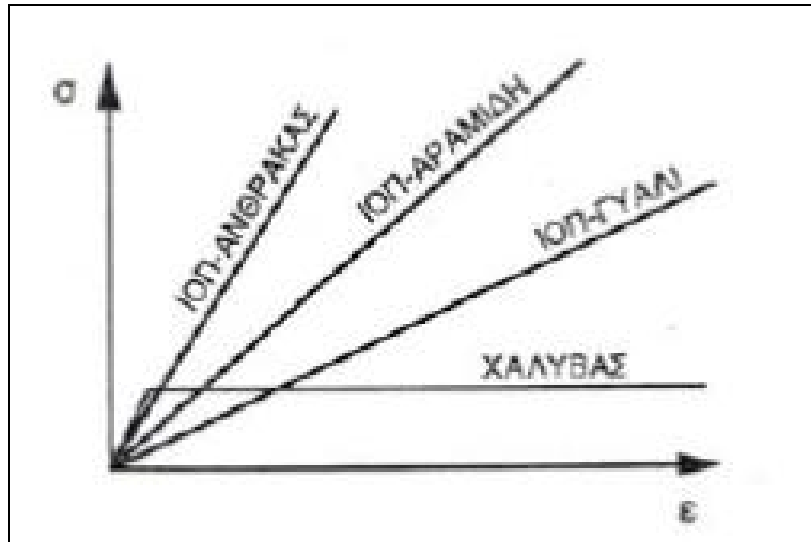
Ø **Ίνες υαλού:** Πάνω από το 90% των ινών που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση είναι ίνες γυαλιού, αφού είναι υλικό φθινό, εύκολο στην παραγωγή και έχει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή πυκνότητα του, η ανθεκτικότητά του σε χημικά και η άριστη μονωτική του ικανότητα είναι μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Ø **Ίνες αραμιδίου:** Οι ίνες αραμιδίου παρασκευάζονται από αρωματικά πολυαμίδια (μακριές πολυμερικές αλυσίδες με αρωματικούς δακτυλίους). Προσφέρουν καλές μηχανικές ιδιότητες σε μια χαμηλή πυκνότητα. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εφελκυστική αντοχή, υψηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλό βάρος. Η πυκνότητα των ινών αραμιδίου είναι μικρότερη από αυτή των ινών γυαλιού και άνθρακα. Έχουν υψηλή ανθεκτικότητα τόσο σε πυρκαγιά όσο και υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης είναι απρόσβλητες από οργανικούς διαλύτες η συμπίεστική δύναμη [7],[8]. Η πιο επιτυχής οργανική ίνα που παρασκευάστηκε βιομηχανικά είναι εκείνη που αναπτύχθηκε από την εταιρία Du Pont με την επωνυμία Kevlar. Υπάρχουν δύο τύποι ινών Kevlar : Kevlar 29 και Kevlar 49. Το Kevlar 29 έχει υψηλή αντοχή και μέτριο μέτρο ελαστικότητας. Το Kevlar 49 έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, αλλά την ίδια αντοχή με το Kevlar 29 και είναι το πλέον κατάλληλο υλικό για ενίσχυση.

Όπως αναφέρουν και οι Δραμηλαράκης & Αντωνογιαννάκης, 2013, η αντικατάσταση των χαλύβδινων ελασμάτων με ινοπλισμένα πολυμερή συζητήθηκε στα Ελβετικά Ομοσπονδιακά εργαστήρια για δοκιμές υλικών όπου διεξήχθη και σχετική έρευνα. Το 1982 ελήφθησαν σημαντικές αποφάσεις ως προς την οριοθέτηση του καταλληλότερου τύπου ινών FRP. Στον Πίνακα 1.7 παρατίθενται τα κριτήρια και η συμπεριφορά ως προς αυτά, των πιο διαδεδομένων σύνθετων υλικών για την ενίσχυση των κατασκευών. Στην Εικ. δίνεται επίσης η συσχέτιση τάσης – παραμόρφωσης για τους τρεις τύπους ινών.

Πίνακας 1.7 Συγκριτική Συμπεριφορά Ινών ενίσχυσης

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΙΟΠ-ΑΝΘΡΑΚΑ	ΙΟΠ-ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ	ΙΟΠ-ΓΥΑΛΙΟΥ
Εφελκυστική αντοχή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Θλιπτική αντοχή	Πολύ καλή	Μη ικανοποιητική	Καλή
Μέτρο ελαστικότητας	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
Συμπεριφορά κόπωσης	Εξαιρετική	Καλή	Ικανοποιητική
Ανθεκτικότητα σε αλκάλια	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
Τιμή	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική	Πολύ καλή



Εικόνα 3: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για ινώδη πολυμερή σύγκριση με χάλυβα [53].

Για την κατασκευή του σύνθετου υλικού επιπλέον απαιτείται η πλέξη των ινών που μπορεί να γίνεται κατά διάφορους τρόπους όπως σε μορφή θύσανων με στρέψη (στουπιά). Μπορούν επίσης να πλέκονται σε ταινίες μιας διεύθυνσης με εμποτισμό ρητινών ώστε να διατηρούν το σχήμα τους.

Υπάρχουν επίσης αρκετοί τύποι ύφανσης όπως

- ∅ η απλή πλέξη κατά την οποία διαμήκεις και εγκάρσιοι θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ η μία ομάδα πάνω από την άλλη,
- ∅ η διαγώνια πλέξη (twill) με μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας σε σύγκριση με την απλή πλέξη,
- ∅ πλέξη Satin στην οποία η μπροστινή επιφάνεια αυτού του τύπου πλέξης κυριαρχείται από διαμήκεις θυσάνους ινών. Η συγκεκριμένη πλέξη χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών,
- ∅ η καλαθωτή πλέξη (basket weave) που είναι μια παραλλαγή της απλής πλέξης στην οποία δύο ή περισσότερες διαμήκεις θύσανοι διασταυρώνονται με δύο ή περισσότερους εγκάρσιους θυσάνους ινών. Η πλέξη αυτή είναι πιο δυνατή από την απλή πλέξη αλλά λιγότερο σταθερή γιατί παρουσιάζει μία σχετική χαλαρότητα,
- ∅ η πλέξη Leno που χαρακτηρίζεται από περιορισμένη στο ελάχιστο μετατόπιση των θυσάνων.

Αναλυτικότερες πληροφορίες δίνονται στην εργασία των Γκοτσοπούλου & Κρεμαστιώτη, 2008 σε σχέση με τις τεχνικές πλέξης αλλά και την επίδραση της γεωμετρίας δομής και διάταξης των ινών στις ιδιότητες των συνθέτων υλικών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα σύνθετα υλικά υψηλής τεχνολογίας αποτελούνται από πολλές στρώσεις που η διεύθυνση των ινών σε κάθε μία από αυτές είναι αυστηρά προσδιορισμένη. Επισημαίνεται επίσης ότι για την πρόβλεψη των ελαστικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, κάθε στρώση θεωρείται ομογενής με την προϋπόθεση ότι η διάταξη και η κ.ο. περιεκτικότητα των ινών είναι ομοιόμορφη. Οι ίνες στις στρώσεις μπορεί να είναι συνεχείς ή μικρού μήκους και μπορεί να είναι προσανατολισμένες προς μία ή περισσότερες διευθύνσεις ή να έχουν τυχαίο προσανατολισμό σε δύο ή τρεις διατάξεις. Το σύνολο των στρώσεων (laminie) ονομάζεται πολύστρωτο σύνθετο υλικό (laminiate). Γενικά, η διάταξη των στρώσεων είναι περίπλοκη διότι θα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις.



Εικόνα 4: Μανδύας από FRP (Kachlakev Ph.D, 2012)

Στην Εικ.5 φαίνεται ο τρόπος εφαρμογής - ενίσχυση δομικού στοιχείου με ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή (www.truedellcorp.com) Η χρήση των σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών μπορεί θεωρείται η φυσική εξέλιξη των ενισχύσεων με μεταλλικά ελάσματα. Ενώ παλαιότερα χρησιμοποιούνταν ίνες χάλυβα, σήμερα χρησιμοποιούνται ίνες πολυμερών.

2 Εισαγωγή στις Κατεργασίες

Με τον όρο κατεργασία θεωρείται κάθε μεταβολή και διαμόρφωση της πρώτης ύλης για την παραγωγή ενός προϊόντος. Η κατεργασία ενός προϊόντος στη βιομηχανία επηρεάζει άμεσα κατά 15 με 20% το κόστος παραγωγής του, ενώ εκτιμάται ότι με έμμεσο τρόπο φτάνει να καθορίζει πάνω από το 80% την αξία του (Ιτσόπουλος 2014). Οι κυριότερες παράμετροι που συγκροτούν μία κατεργασία και κατά βάση έχουν σχέση αλληλοεξάρτησης είναι :

- Ø Το κατεργαζόμενο τεμάχιο, υπό διάφορες μορφές (ράβδος, έλασμα κλπ),
- Ø Το κοπτικό εργαλείο που θα διαμορφώσει το τεμάχιο,
- Ø Οι συνθήκες διεπιφάνειας τεμαχίου/κοπτικού εργαλείου, δηλαδή η λίπανση και τα λοιπά τριβολογικά χαρακτηριστικά καθώς και οι θερμοκρασιακές μεταβολές αυτών,
- Ø Η ζώνη παραμόρφωσης ή πλαστική ζώνη, όπου επιτελείται η πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου.

Βασική παράμετρος καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη ενός προϊόντος σε όρους αγοράς είναι η ταχύτητα κατεργασίας - παραγωγής. Ειδικά για τις κατεργασίες αποβολής υλικού, καθοριστικό ρόλο στη μείωση του χρόνου παραγωγής διαδραματίζει η επιλογή των κατάλληλων παραγόντων κοπής που θα επιτρέψουν στην ταχύτητα παραγωγής να μεγιστοποιηθεί. Οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν σε μέγιστο βαθμό τη μορφή του αποβλήτου, τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες τις δυνάμεις κοπής και τελικά τον χρόνο παραγωγής. Κατά αυτή την έννοια η βελτιστοποίηση των κατεργασιών απαιτεί τη μελέτη των μηχανισμών της και την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών. Έτσι μέχρι σήμερα έχουν γίνει αξιοσημείωτες προσπάθειες για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων και προσομοιώσεων των κατεργασιών π.χ κοπής, που σε συνδυασμό με τις εργαλειομηχανές CNC (Computer Numerical Control) και τα νέα αποδοτικά και σχετικά χαμηλού κόστους υλικά για τα εργαλεία κοπής, έχουν δώσει τεράστια ώθηση στην ανάπτυξη των κατεργασιών κοπής υψηλής ταχύτητας. Όμως η χρήση υψηλών ταχυτήτων κατά την κοπή παρουσιάζει πολλές δυσχέρειες, αρκετούς ιδιόμορφους μηχανισμούς και παράξενα φαινόμενα που με μια πρώτη ανάλυση φαίνονται παράλογα.

Οι μη συμβατικές - προηγμένες κατεργασίες αφαίρεσης μετάλλου έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό με τις παραδοσιακές κατεργασίες κοπής ότι για τη μορφοποίηση ενός τεμαχίου, απαιτείται η αφαίρεση πλεονάζοντος υλικού. Όμως, το αποβαλλόμενο υλικό δεν έχει τη μορφή αποβλήτου ούτε και σχηματίζεται με τον ίδιο μηχανισμό (υψηλού βαθμού πλαστική παραμόρφωση), αλλά παρουσιάζεται υπό μορφή ποικίλων τελικά σχημάτων, όπως σφαιριδίων, ακανόνιστων τεμαχιδίων κ.ά.

Η προσδιδόμενη ενέργεια, για να λάβει χώρα μία μη συμβατική κατεργασία αφαίρεσης υλικού, δεν είναι εν γένει μηχανική, όπως συμβαίνει στις συμβατικές κατεργασίες κοπής, αλλά θερμική, χημική, ηλεκτροχημική ή κάποιας άλλης μορφής. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα συνδυασμού μη συμβατικών κατεργασιών μετάλλου με κατεργασίες κοπής. Ένας μικρός αριθμός τεχνικών έχουν αναπτυχθεί σε υψηλό βαθμό και εφαρμόζονται σε ευρεία κλίμακα στον κλάδο της μηχανουργικής τεχνολογίας. Για παράδειγμα, οι κατεργασίες με προηγμένες τεχνικές είναι:

- Ø Η αφαίρεση υλικού με ηλεκτρικό σπινθήρα (EDM),
- Ø Η κατεργασία με νερό, υδροκοπή, (waterjet),
- Ø Η κατεργασία με LASER,
- Ø Η κοπή με τη χρήση Plasma,
- Ø Η ηλεκτροχημική λείανση (ECG),
- Ø Η αφαίρεση υλικού με υπέρηχους (USM – Ultrasonic)

(Ιτσόπουλος 2014).

2.1 Αριθμητικός Έλεγχος (Numerical Control).

Ο αριθμητικός έλεγχος στην πραγματικότητα συνιστά την αυτοματοποιημένη λειτουργία μιας εργαλειομηχανής με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (HY). Ο HY παρεμβάλλεται ουσιαστικά ανάμεσα στο χειριστή και τη μονάδα ελέγχου της εργαλειομηχανής (NC – Numerical Control) ώστε η διαδικασία της κατεργασίας να γίνεται ευκολότερα. Σε αυτή την περίπτωση η μηχανή λέγεται ψηφιακά καθοδηγούμενη (CNC – Computer Numerical Control) και ο χειρισμός – έλεγχος της κατεργασίας γίνεται από απόσταση (remote control). Αυτού του είδους η καθοδήγηση (CNC) έχει ως γνωστόν το πλεονέκτημα της συνεργασίας της με ποικίλα συστήματα σχεδίασης (CAD - Computer Aided Design) και γενικότερα συστήματα κατεργασιών (CAM - Computer Aided Manufacturing) με τη χρήση πάντοτε του HY, ενώ χρησιμοποιείται εντατικά σε ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής με υπολογιστές (CIM - Computer Integrated Manufacturing) και ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS - Flexible Manufacturing Systems). Με τους παραπάνω τρόπους το μεγαλύτερο ποσοστό χρόνου για υπολογισμούς αν όχι όλος ο χρόνος καθώς και ο έλεγχος καθοδήγησης έχουν παραχωρηθεί στον HY ο οποίος εργάζεται ταχύτερα και με μικρότερο πλέον κόστος.

Θα πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι όλες οι διαδικασίες καθοδήγησης και ελέγχου των εργαλειομηχανών είναι μονόδρομες, δηλ. οριοθετούνται από τον χειριστή. Ο τεχνικός καθορίζει την ακολουθία των κινήσεων της εργαλειομηχανής, τις τιμές των συνθηκών κατεργασίας (πρόωση, βάθη κοπής, ταχύτητα κοπής, κ.λπ.), ελέγχει τη χρήση ή όχι του υγρού κοπής, διαχειρίζεται τα κοπτικά εργαλεία, κ.λπ.. Για όλα αυτά, συντάσσει ένα πρόγραμμα καθοδήγησης σε τυποποιημένη γλώσσα προγραμματισμού (κώδικας), μεταφέρει τον κώδικα στη μονάδα ελέγχου και ενεργοποιεί την εκτέλεση του προγράμματος. Επιπρόσθετα θα πρέπει να επισημανθεί ότι η πρόοδος της τεχνολογίας και ιδιαίτερα, η ανάπτυξη αισθητήρων (sensors) και συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΕ), επιτρέπει στους κατασκευαστές εργαλειομηχανών να προχωρήσουν την τεχνολογία ένα βήμα ακόμα, στο σχεδιασμό δηλαδή “σκεπτόμενων” διατάξεων, που, ανάλογα με την εξέλιξη της μηχανουργικής κατεργασίας, λαμβάνουν κρίσιμες αποφάσεις και επεμβαίνουν στο πρόγραμμα καθοδήγησης. Οι μηχανές αυτές χαρακτηρίζονται άμεσα καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές με ηλεκτρονικό υπολογιστή (DNC - Direct Numerical Control).

Για παράδειγμα αν σε μία τυπική περίπτωση τόνρευσης με CNC τόρνο, προγραμματιστεί εσφαλμένα από το χειριστή απαράδεκτη ταχύτητα πρόωσης κοπής, ο χειριστής πρέπει να διαβάσει την αντίστοιχη ένδειξη στον πίνακα ελέγχου της εργαλειομηχανής, να σταματήσει την εκτέλεση του προγράμματος και, αφού το διορθώσει, να το ενεργοποιήσει ξανά. Αντίθετα στην περίπτωση χρήσης εργαλειομηχανών DNC αυτές είναι σε επικοινωνία με έναν κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του οποίου λαμβάνουν εντολές για εκτέλεση εργασιών, αλλά και αντλούν πληροφορίες από σχετικές βάσεις πληροφοριών. Στις DNC εργαλειομηχανές μπορεί να ελέγχεται αυτόματα η ταχύτητα κοπής, η χρήση ψυκτικού υγρού, η φθορά των κοπτικών εργαλείων, κ.λπ.. Ιδιαίτερα για τη φθορά των κοπτικών εργαλείων, πολλές ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές διαθέτουν ειδικές μετρητικές διατάξεις (αισθητήρες) στις οποίες μετρώνται τα κοπτικά εργαλεία, σε τακτά χρονικά διαστήματα, κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας. Στην περίπτωση που, για το εξεταζόμενο κοπτικό εργαλείο, διαπιστωθεί μεγάλη απόκλιση από τις προβλεπόμενες διαστάσεις, η κατεργασία συνεχίζεται αυτόματα με νέο (όμοιο) κοπτικό εργαλείο ή γίνεται αυτόματη διάρθρωση των διαστάσεων κοπής με βάση τις κατασκευαστικές ανοχές που έχουν δηλωθεί (Ulrich Fischer, 1996). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας CNC και DNC βοήθησε σε

πολύ μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη αλλά και τον χειρισμό των μη συμβατικών εργαλειομηχανών.

2.2 Προηγμένες Τεχνολογίες – Μέθοδοι.

Οι τεχνολογίες μη συμβατικής κοπής που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια είναι οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες σήμερα στην παραγωγική διαδικασία και είναι οι εξής:

- Ø Κατεργασία και κοπή με LASER,
- Ø Υδροκοπή και κατεργασία με νερό,
- Ø Κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση (EDM),
- Ø Κατεργασία κοπής με πλάσμα (plasma)
- Ø Κατεργασία με υπερήχους (ultrasonic)
- Ø Κατεργασία κοπής με ηλεκτροχημική λείανση (ECG)

Στα επόμενα αναφέρονται εν συντομία τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου και αναλυτικά στοιχεία θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο σε σχέση με προηγμένες μεθόδους κατεργασίας συνθέτων υλικών [1-2].

2.2.1 Κατεργασία & Κοπή με LASER.

Το LASER ως γνωστόν είναι μονοχρωματική ενισχυμένη ακτίνα φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Παράγεται από μία πηγή (γεννήτρια) που εκπέμπει ακτινοβολία (φως, στο υπέρυθρο φάσμα) που είναι πολωμένη, μονοχρωματική (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος - χρώμα) η οποία διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Γενικά είναι ακτινοβολία συγκεκριμένων, πολύ γειτονικών, συχνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και LASER που εκπέμπουν πλατύ φάσμα συχνοτήτων ή πολλές διαφορετικές μεμονωμένες συχνότητες συγχρόνως. Αυτή η εξαιρετικά ισχυρή ακτίνα, εστιασμένη από σύστημα κατόπτρων και φακών, και υποβοηθούμενη από την μεγάλη ταχύτητα ροής κάποιων αερίων, προσβάλλει και λιώνει ελεγχόμενα το υλικό που πρόκειται να κοπεί ή γενικότερα να διαμορφωθεί.

2.2.2 Υδροκοπή (waterjet).

Η κατεργασία με υδροκοπή είναι μία διαδικασία με πολλές μοναδικές ικανότητες και πλεονεκτήματα. Στην τεχνολογία αυτή δημιουργείται μια στενή δέσμη νερού πολύ υψηλής πίεσης που προσβάλλει το προς κοπή – διαμόρφωση υλικό. Από πλευράς ασφάλειας και υγείας του χειριστή δεν προκύπτουν επιβλαβή αέρια ή υγρά, έτσι δεν δημιουργούνται επικίνδυνοι ατμοί και υλικά, ενώ η θερμότητα και οι μηχανικές πιέσεις δεν επηρεάζουν την επιφάνεια κοπής. Η τεχνική υδροκοπής είναι ουσιαστικά μια ευπροσάρμοστη, παραγωγική και χαμηλής θερμοκρασίας διαδικασία κοπής που σε σχέση με άλλες, μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν, όπως λεπτομερή κοπή σε πέτρα, σε γυαλί.

2.2.3 Κατεργασία με Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machining – EDM).

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM), είναι μια μη-συμβατική προηγμένη μέθοδος κατεργασίας αφαίρεσης υλικού, θερμικού/θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα. Αν και η θεωρητική της βάση και οι τεχνολογικές της παράμετροι απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση, εφαρμόζεται ευρύτατα, λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει, σε

αγώγιμα υλικά μικρής κατεργασιμότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως για την δημιουργία πολύπλοκων και ασυνήθιστων γεωμετρικών μορφών σε υλικά υψηλής σκληρότητας, οι οποίες θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρες και δαπανηρές να δημιουργηθούν με χρήση συμβατικών κατεργασιών.

2.2.4 Κοπή με Πλάσμα.

Πλάσμα ονομάζουμε την κατάσταση της ύλης στην οποία δεν λαμβάνει συγκεκριμένο όγκο και σχήμα που να οφείλεται στην ίδια (όπως συμβαίνει στα αέρια), και επιπλέον βρίσκονται ελεύθερα και όχι σε μοριακούς δεσμούς τα ηλεκτρικά φορτισμένα ατομικά της σωματίδια (ιόντα και ηλεκτρόνια). Το πλάσμα διαφέρει από ένα μη-ιονισμένο αέριο. Σχηματίζεται όταν ένα αέριο γίνει πολύ θερμό με αποτέλεσμα ηλεκτρόνια να δραπετεύσουν από το άτομό τους (ελεύθερα ηλεκτρόνια). Το πλάσμα συνίσταται επομένως από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα (άτομα ή μόρια που έχουν χάσει ή αποκτήσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια). Το πλάσμα μπορεί να προκύψει από ένα αέριο στο οποίο έχει δοθεί αρκετή ενέργεια για να αποχωριστούν τα ηλεκτρόνια από τα άτομά τους (ιονισμός) ώστε να παραχθεί ένα νέφος από ιονισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η κοπή με πλάσμα πραγματοποιείται από την ροή του πλάσματος μέσω καταλλήλων διατάξεων και την προσβολή του προς κοπή υλικού με υψηλής θερμοκρασίας μίγμα πλάσματος και ενός πρόσθετου αερίου.

3 Συμβατικές Μέθοδοι Κατεργασίας.

Τα σύνθετα υλικά είναι πιο δύσκολα κατεργάσιμα ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες σε σχέση με τα μέταλλα, λόγω της δομής τους κυρίως. Βασική αιτία αποτελεί ότι είναι ανισότροπα, μη ομοιογενή και οι ενισχυτικές ίνες τους είναι πολύ λειασμένες. Συνήθως απαιτούνται εκτραχυσμένες επιφάνειες ώστε η επικόλληση των πολλών στρώσεων να δίνει ένα σταθερό τελικό προϊόν. Επίσης κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας, εισάγονται ελαττώματα στο τεμάχιο εργασίας ενώ και τα κοπτικά εργαλεία φθείρονται γρήγορα.

Οι συμβατικές τεχνικές μηχανικής επεξεργασίας, όπως η διάτρηση το πριόνισμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σωστό σχεδιασμό εργαλείων και συνθήκες λειτουργίας. Μια επισκόπηση των παραδοσιακών μεθόδων μηχανικής κατεργασίας που εφαρμόζονται σε οργανικά και μεταλλικά σύνθετα μήτρα δίνεται παρακάτω (Abrate & Walton, 1992).

Υπενθυμίζεται ότι τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται εκτενώς λόγω των υψηλότερων αναλογιών αντοχής σε βάρος και σε σύγκριση με τα μέταλλα προσφέρουν νέες ευκαιρίες σχεδιασμού. Είναι όμως δύσκολο να κατεργαστούν μηχανικά. Μπορεί να εισαχθούν σημαντικές ζημιές στο τεμάχιο εργασίας και να παρατηρηθούν υψηλοί ρυθμοί φθοράς των εργαλείων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι μηχανουργικής επεξεργασίας, όπως διάτρηση, στροφή, πριόνισμα, δρομολόγηση και λείανση, μπορούν να εφαρμοστούν σε σύνθετα υλικά με τη χρήση κατάλληλου σχεδιασμού εργαλείων και συνθηκών λειτουργίας. Στα επόμενα θα περιγραφούν παραδοσιακές μέθοδοι για την κατεργασία πολυμερών μήτρας και μεταλλικών πλεγμάτων.

Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάτρηση, την κοπή, τη δρομολόγηση και τη λείανση σύνθετων υλικών. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας και να αποφευχθεί η θερμική βλάβη στο τμήμα του υλικού κατεργασίας, πρέπει να υιοθετηθεί η σωστή γεωμετρία του εργαλείου και οι συνθήκες λειτουργίας. Λόγω της λειαντικής φύσης των ενισχυτικών ινών, τα εργαλεία εμποτισμένα με καρβίδιο ή διαμάντι είναι ικανοποιητικά. Πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις για την αποφυγή αποκολλήσεων στο τεμάχιο εργασίας περιορίζοντας τη φθορά του εργαλείου, ώστε να παραμείνουν χαμηλές οι μηχανικές καταπονήσεις. Για το λόγο αυτό πρέπει να υπάρχει εφεδρικό εργαλείο κατά την κατεργασία του τεμαχίου προς διαμόρφωση.

Ιδιαίτερα προβλήματα συναντώνται κατά την κατεργασία σύνθετων υλικών που περιέχουν οπλισμό αραμιδίου λόγω των ιδιοτήτων αυτών των ινών. Ειδικά σχέδια εργαλείων είναι απαραίτητα για να αποφεύγεται το χνούδι (fuzz) κατά την κατεργασία των υλικών. Αναφορικά με τις επιδράσεις στην υγεία, τα σωματίδια σκόνης στον αέρα που παράγονται κατά την κατεργασία ενισχυμένων πολυεστέρων μελετήθηκαν διεξοδικά, υποδεικνύοντας ότι εάν δεν ληφθούν ειδικές προφυλάξεις, τα επίπεδα εισπνεόμενης σκόνης μπορούν να υπερβούν τα ανεκτά επίπεδα. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση υγρού ψυκτικού μέσου το οποίο θα μεταφέρει αυτά τα σωματίδια. Αυτό το ψυκτικό υγρό χρησιμεύει επίσης για τη μείωση των θερμοκρασιών κοπής και είναι μερικές φορές απαραίτητο. Ωστόσο, για ορισμένα υλικά η υγρασία απορροφάται εύκολα και επηρεάζει την απόδοση του εξαρτήματος και πρέπει να αποφεύγεται [1,15,16].

3.1 Διάτρηση (Drilling).

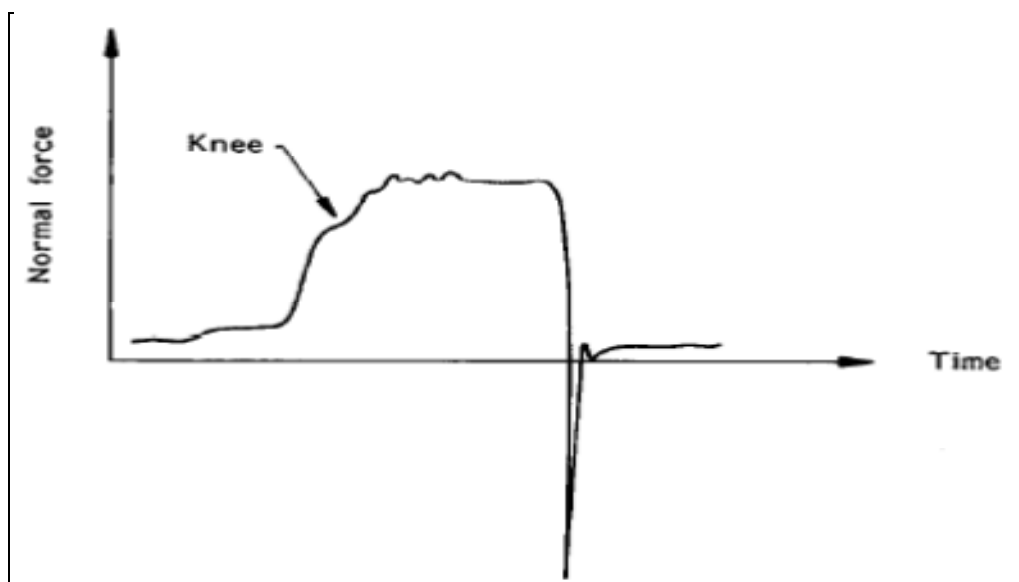
Η **διάτρηση (Drilling)** είναι η πιο συνηθισμένη διαδικασία σύνθετης κατεργασίας, καθώς πολλές φορές πρέπει να διανοιχθούν για την τοποθέτηση μηχανικών συνδέσεων. Η κακή ποιότητα των οπών αντιπροσωπεύει περίπου το 60% όλων των απορρίψεων των τμημάτων (Wong et al. 1982) ενώ δεδομένου ότι οι τρύπες ανοίγονται σε τελικά προϊόντα, η

απόρριψη μέρους λόγω κακής ποιότητας οπών έχει αποδειχθεί πολύ δαπανηρή. Η μηχανική διάτρησης σύνθετων υλικών εξετάζεται ταυτόχρονα με την ποιότητα της οπής και την επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού εργαλείων. Τα δισκοπρίονα και τα κυκλικά πρίονια με ειδικά σχέδια λεπίδων χρησιμοποιούνται για την κοπή σύνθετων υλικών ενώ έχουν σχεδιαστεί και ειδικά κοπτικά εξαρτήματα - εργαλεία για τη διαμόρφωση καμπύλων επιφανειών. Απαιτείται έτσι μια περισσότερο θεμελιώδης κατανόηση της διαδικασίας της μηχανουργικής κατεργασίας [24,28].

Χρησιμοποιούνται δύο τύποι μηχανικής υπερήχων (ultrasonic machining). Κατά τον πρώτο τρόπο το εργαλείο λειτουργεί όπως στις συνήθεις εργασίες γεώτρησης ή περιστροφής αλλά επιπλέον υπόκειται σε υψηλές συχνότητες, δονήσεις μικρού πλάτους. Σε αυτή την περίπτωση, οι υπερηχητικές δονήσεις του εργαλείου χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν την παραδοσιακή διαδικασία μηχανουργικής κατεργασίας. Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, που θα αναθεωρηθεί στο επόμενο κεφάλαιο ένα άλλο ακίνητο εργαλείο δονείται υπερηχητικά και ένας υγρός πολτός που περιέχει πλέγμα τοποθετημένο μεταξύ του εργαλείου και του εξαρτήματος πραγματοποιεί την κοπή [35-38].

Η ώση και η ροπή που εφαρμόζονται σε ένα κομμάτι κατά τη διάρκεια των εργασιών διάτρησης εξαρτώνται από την ταχύτητα, το ρυθμό τροφοδοσίας, τη γεωμετρία εργαλείων και τη φθορά εργαλείων. Πειράματα (Wong et al. 1982) έδειξαν ότι η ώθηση αυξάνεται σταθερά μέχρις ότου φθάσει μια σταθερή τιμή που αντιστοιχεί σε σταθερή διάτρηση διαμέσου του πάχους του ελάσματος και ακολουθείται από μια απότομη πτώση καθώς το εργαλείο εξέρχεται από την αντίθετη πλευρά (Εικ.5).

Μια απότομη μείωση της κάθετα εφαρμοζόμενης δύναμης καθώς το κομμάτι εισέρχεται στο τεμάχιο εργασίας συνδέεται πάντοτε με την εισαγωγή της αποκόλλησης με μηχανική δράση του εργαλείου αποκολλώντας το άνω στρώμα του ελάσματος. Η αποκόλληση (delamination) της κορυφαίας στρώσης μπορεί επίσης να παραχθεί με υψηλές θερμικές καταπονήσεις που δημιουργούνται από τη διάτρηση, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν παρατηρούνται ασυνέχειες στο φυσιολογικό ιστορικό δύναμης. Οι αποκολλήσεις (delamination) κοντά στην πλευρά εξόδου εισάγονται όταν το εργαλείο δρα ως διατρητήρας που διαχωρίζει το λεπτό άκοπο στρώμα από το υπόλοιπο του φύλλου.



Εικόνα 5: Τυπικό ιστορικό αξονικής δύναμης κατά τη διάτρηση σύνθετου υλικού [1]

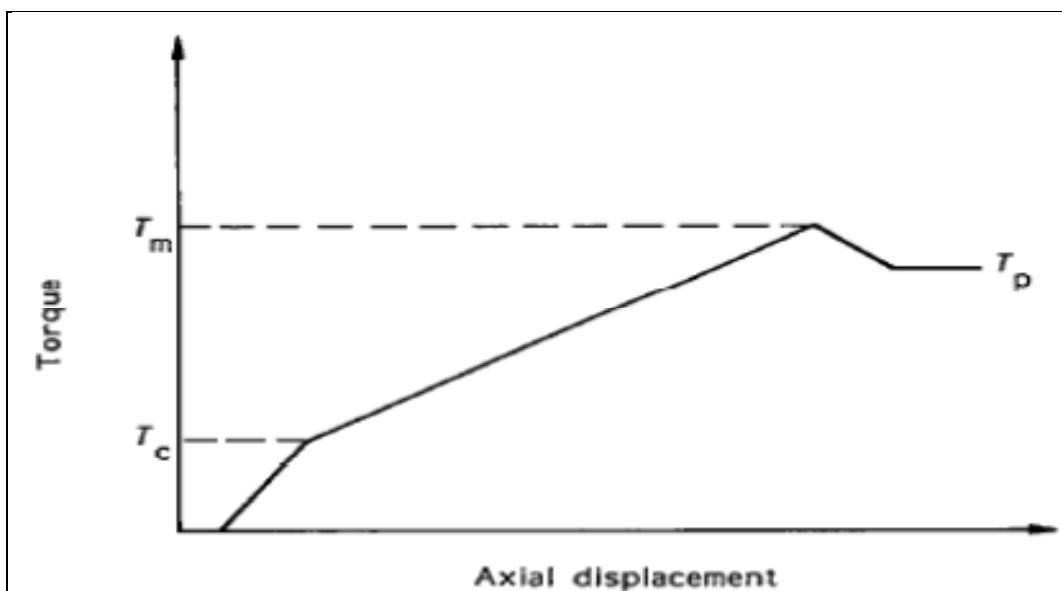
Η ενέργεια αυτή συσχετίζεται με μια σχεδόν στιγμιαία πτώση της κανονικής δύναμης από την τιμή σταθερής κατάστασης έως το μηδέν. Οι αποκολλήσεις μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν σε μεγάλο βαθμό μειώνοντας τις ταχύτητες τροφοδοσίας κοντά στην έξοδο

και χρησιμοποιώντας εφεδρικές πλάκες για να παρέχουν στήριξη και να αποτρέπουν τις παραμορφώσεις που οδηγούν σε αποεπένδυση στην πλευρά εξόδου. Η ανάλυση της διαδικασίας αποκόλλησης (delamination) συζητείται στην επόμενη ενότητα.

Κατά τη διάρκεια του σταθερού τμήματος της διαδικασίας γεώτρησης παρατηρούνται σημαντικές ταλαντώσεις των καθέτων δυνάμεων (Radkaktishnan 1981, Di Plio, 1991). Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του δυναμικού σήματος αντιστοιχεί στη συχνότητα στρωματοποίησης, που ορίζεται ως η αναλογία του αριθμού των στηλών – τριχών (piles) ανά ίντσα με το χρόνο που απαιτείται από το τρυπάνι για να διεισδύσει μία ίντσα του υλικού. Αυτή η συχνότητα είναι γενικά αρκετά μικρή σε σύγκριση με την αντίστοιχη περιστροφής του εργαλείου και το μέγεθος του δυναμικού σήματος δείχνει καλή συσχέτιση με την κυματοειδή επιφάνεια της οπής. Συνεπώς, το σήμα της κάθετης δύναμης περιέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με πιθανή ζημιά που εισάγεται στο τεμάχιο εργασίας, τη φθορά του εργαλείου, η οποία μπορεί να παρακολουθείται για τον προσδιορισμό του χρόνου αντικατάστασης του εργαλείου και την ποιότητα της επιφάνειας.

Κατά τη διάρκεια της διάτρησης η ροπή αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς μέχρις ότου οι άκρες κοπής του εργαλείου να εμπλακούν τελείως και στη συνέχεια να αυξηθούν γραμμικά μέχρι να επιτευχθεί μέγιστη τιμή, ακολουθούμενη από ελαφρά πτώση μετά την ολοκλήρωση της οπής (Εικόνα 6). Στη συγκεκριμένη εικόνα ορίζεται ως T_c η ροπή κοπής, ως T_m η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή ενώ ως T_p ορίζεται η ροπή μετά την εισχώρηση [44,46,48].

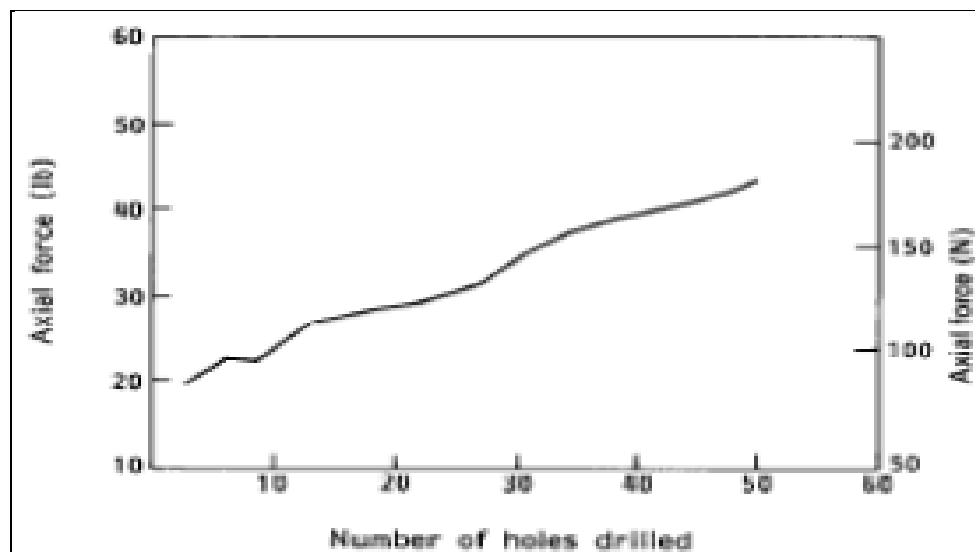
Η ροπή κοπής αντιστοιχεί στο άκρο της φάσης εμπλοκής του εργαλείου με την επιφάνεια διάτρησης (Εικ.6). Η μεγάλη διαφορά μεταξύ της ροπής κοπής και της μέγιστης ροπής οφείλεται σε υψηλές δυνάμεις τριβής μεταξύ των επιφανειών του τρυπανιού και του τοιχώματος της οπής. Καθώς η διάτρηση εξελίσσεται, το εργαλείο έρχεται σε επαφή με την πλευρά της οπής πάνω από μια αυξανόμενη περιοχή, έτσι ώστε οι δυνάμεις τριβής στη διεπαφή να δημιουργούν όλο και μεγαλύτερη ανθεκτική ροπή στρέψης. Μετά την πλήρη διείσδυση έχει παρατηρηθεί μόνο μια μικρή μείωση της ροπής που παρατηρείται ότι δείχνει ότι η τριβή είναι η κύρια συμβολή στη συνολική ροπή. Οι υψηλές θερμοκρασίες και οι ελαφρώς αρνητικοί συντελεστές θερμικής διαστολής συνθέτουν το πρόβλημα συμπιέζοντας το τρυπάνι (Di Plio et al. 1991).



Εικόνα 6: Μεταβολή της ροπής κατά τη διάρκεια της διάτρησης [1].

Η αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας και της γωνίας σημείου του τρυπανιού, αντίστοιχα, παράγει αντίστοιχη αύξηση και μείωση των επιπέδων ροπής αντιστοίχως (Gindy, 1998, Konig et al. 1985).

Σε μονοκατευθυνόμενα σύνθετα, μια μεταβολή ροπής σε συχνότητα που αντιστοιχεί στο διπλάσιο της ταχύτητας περιστροφής του τρυπανιού αντικατοπτρίζει τη μεταβολή της ακαμψίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου με κατεύθυνση 7,8. Τα επίπεδα ώσης αυξάνουν καθώς ο ρυθμός τροφοδοσίας, η ταχύτητα κοπής ή η γωνία σημείου του τρυπανιού αυξάνονται (Gindy, 1998, König et al. 1985). Η μέγιστη κάθετη δύναμη και η μέγιστη ροπή αυξάνουν σημαντικά με τον αριθμό των οπών που έχουν ανοιχθεί λόγω του «τσιμπήματος» και της φθοράς των επιφανειών κοπής (König 1984, Nagao 1988). Χρησιμοποιώντας τρυπάνια καρβιδίου διαχωρισμένου σημείου 8 mm για τη διάτρηση σύνθετων πλακών γραφίτη με εποξική ρητίνη πάχους 4.5 mm σε 2800 rpm min και ταχύτητα τροφοδοσίας 0.0152 mm min, οι Radhakrishnan και Wu 1991 καθόρισαν τη μεταβολή του χρόνου αιχμής ως συνάρτηση του αριθμού των οπών (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Αύξηση αξονικής δύναμης ως συνάρτηση των διατρυπόμενων οπών [1].

Οι αυξήσεις της ώσης λόγω της φθοράς των εργαλείων αναφέρθηκαν σε πολλές έρευνες και αποδείχθηκαν πιο σημαντικές κατά τη διάτρηση εποξειδικού γραφίτη από ό, τι με την εποξική ύλη λόγω της πιο λειαντικής φύσης των ινών γραφίτη. Οι υψηλότερες κάθετες δυνάμεις συνήθως εισάγουν περισσότερη φθορά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, ειδικότερα τις αποελασματοποιήσεις. Ωστόσο, η μέγιστη ροπή ή η μέγιστη κάθετη δύναμη δεν συσχετίζονται καλά με την τελική επιφάνεια (Radhakrishnan και Wu 1991).

Μια ανάλυση των κατανομών θερμοκρασίας στο τεμάχιο εργασίας και το εργαλείο κατά τη διάτρηση πλάκας εποξικού γυαλιού τυπωμένου κυκλώματος έδειξε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάτρηση διανέμεται διαφορετικά από ότι στα μέταλλα, όπου τυπικά το 75% της παραγόμενης θερμότητας απορροφάται από το υλικό του τσιπ, το 7% απορροφάται από το τεμάχιο εργασίας και το 18% από το εργαλείο. Για το εποξιδικό άνθρακα, περίπου το 50% της ενέργειας απορροφάται από το εργαλείο, το υπόλοιπο απορροφάται σχεδόν εξίσου από το τεμάχιο εργασίας και τα τσιπ. Ως εκ τούτου, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απορροφάται από το τεμάχιο εργασίας και από το εργαλείο. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται θερμοκρασίες υψηλής της τάξης των 200°C κοντά στη θέση της οπής (Sadat 1990). Οι χωρικές και χρονικές θερμοκρασιακές βαθμίδες (μεταβολές της θερμοκρασίας) επηρεάζονται έντονα από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Μικρότερες βαθμίδες θερμοκρασίας παρατηρούνται σε εποξιδικό άνθρακα σε σχέση με τα υαλο-εποξικά ή αραμιδικά-εποξικά υλικά υπό τις ίδιες συνθήκες. Το ανώτερο όριο στην ταχύτητα κοπής περιορίζεται από τον κίνδυνο εισαγωγής θερμικής βλάβης στο τεμάχιο εργασίας, ενώ το κατώτερο όριο καθορίζεται από την ποιότητα της επιφάνειας που

καθίσταται φτωχή καθώς οι ίνες παραμένουν μπροστά από την κοπτική άκρη (Konig 1985, Sakuma et al. 1984). Οι ρυθμοί τροφοδοσίας περιορίζονται για να αποφευχθούν οι υπερβολικές δυνάμεις που προκαλούν αποκόλληση. Οι τυπικές τιμές των ταχυτήτων κοπής και των ποσοστών τροφοδοσίας που χρησιμοποιούνται για τη διάτρηση σύνθετων υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τυπικές Μηχανικές Παράμετροι για τη διάτρηση σύνθετων υλικών (Abrate & Walton, 1992).

Workpiece material	Tool material	Hole diameter (mm)	Material thickness (mm)	Cutting speed (m min ⁻¹)	Feed rate (mm rev ⁻¹)	Source
Unidirectional graphite-epoxy	Carbide	4.85-7.92	0-12.7	42.7	0.0254-0.0508	13, 19
		4.85-7.92	12.7-19.1	33.5	0.0254	
	PCD	4.85-7.92	0-12.7	61.0	0.0508-0.0889	
		4.85-7.92	12.7-19.1	51.8	0.0508-0.0889	
Multidirectional graphite-epoxy	Carbide	4.85-7.92	0-12.7	61.0	0.0254-0.0508	
		4.85-7.92	12.7-19.1	42.7	0.0254	
	PCD	4.85-7.92	0-12.7	68.6	0.0508-0.0889	
		4.85-7.92	12.7-19.1	61.0	0.0508-0.0889	
Graphite-epoxy	Carbide	4.85	6.35	60.9	0.0254	20
Glass-epoxy	HSS	—	12.5	15.0	0.028	5
Glass-epoxy	HSS	3	10	33.0	0.05	11
Carbon-epoxy	Carbide	3	10	33.0	0.05	
Glass-epoxy	HSS	8	1.2	0-40.2	20-460 mm min ⁻¹	14
Boron-epoxy	PCD	6.35	2.0	91-182	25.4 mm min ⁻¹	24
		6.35	25.4	91-182	25.4 mm min ⁻¹	
MMC	PCD	6	19.2	15-75	0.05	22
	Carbide					
Boron-epoxy	PCD	6.35	10.4	79	41.91 mm min ⁻¹	8
Kevlar-epoxy	Carbide	5.6	—	158	0.05	10

3.1.1 Φθορές – Βλάβες κατά τη Διάτρηση.

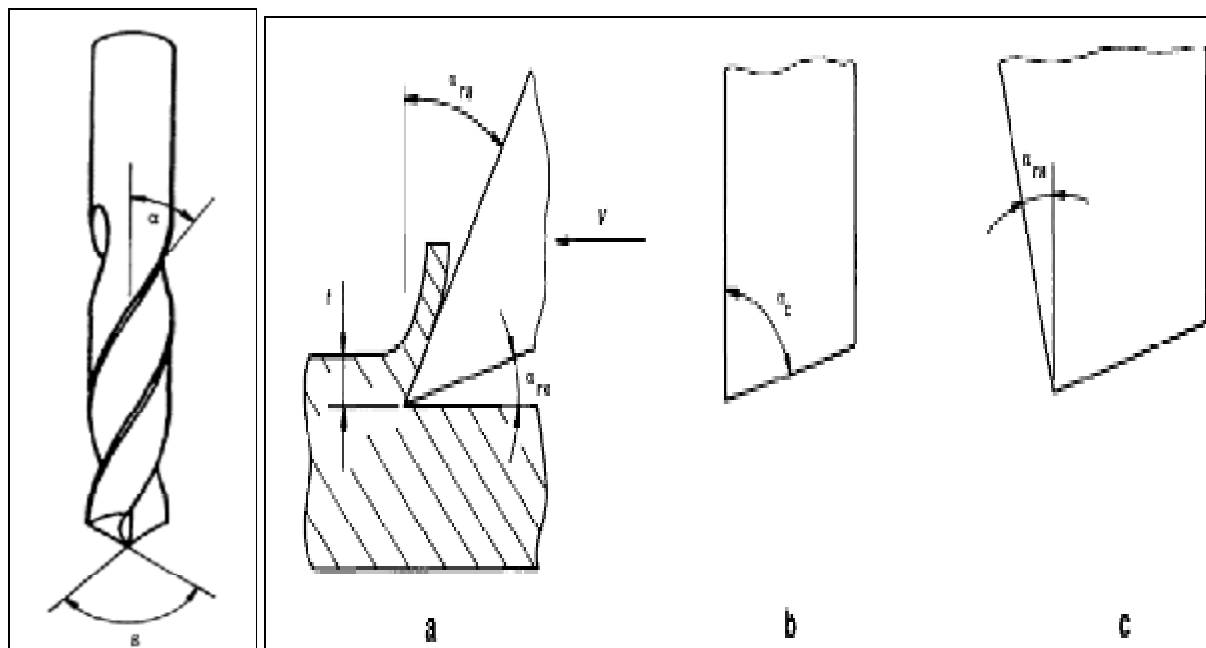
Διάφοροι τύποι ζημιών εισάγονται κατά τη διάρκεια εργασιών διάτρησης: κραματοποίηση μήτρας και θερμικές μεταβολές, αποκόλληση ινών και διαστρωμάτωση ινών, διαστρωματικές ρωγμές και αποκόλληση, εκτός από τα γεωμετρικά ελαττώματα που συνήθως απαντώνται στις μεταλλικές διατρήσεις. Η φθορά και η αποκόλληση κατά τη διάτρηση επηρεάζονται από τον τύπο του εργαλείου (τρυπανιού) που χρησιμοποιείται. Ένας συντελεστής αποκόλλησης δ μπορεί να οριστεί ως ο λόγος μεταξύ της μέγιστης διαμέτρου της ζώνης που υπέστη ζημία και της διαμέτρου της οπής (Wong et al. 1982). Ο συντελεστής δ φθάνει σε ένα ανώτερο όριο καθώς αυξάνεται ο αριθμός των οπών που έχουν ανοιχθεί. Για ένα τρυπάνι σπειροειδούς σημείου, ο συντελεστής απόσπασης τείνει προς το 1.2 μετά από μόλις τρεις οπές, όπως αναφέρουν οι παραπάνω ερευνητές. Για τρυπάνια διάστικτων σημείων στερεού καρβιδίου, ο συντελεστής αποκόλλησης λαμβάνει τιμή περίπου 1.8 μετά από πέντε οπές, ενώ χρησιμοποιώντας τρυπάνι διαχωρισμού σημείου υψηλής ταχύτητας (HSS) ο συντελεστής λαμβάνει τιμή 2.5 μετά από 4-5 οπές. Το μέγεθος της ζώνης που έχει υποστεί βλάβη σχετίζεται με τις παραμέτρους διάτρησης σε πρόσφατη μελέτη (Griswold et al. 1989). Το πλάτος της κατεστραμμένης ζώνης σε υαλο-εποξειδικά ελασματοποιημένα υλικά προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της διηθήσεως ενός υγρού διεισδύσεως διαμέσου της κοπιασμένης επιφανείας και μετρήσεως του D , του πλάτους της καταστραμμένης ζώνης, με ένα οπτικό μικροσκόπιο. Η διάμετρος D φαίνεται ότι εξαρτάται από την αναλογία μεταξύ της ταχύτητας κοπής V_f και της ταχύτητας τροφοδοσίας V_t . Μία απότομη μείωση στο πλάτος βλάβης παρατηρείται αρχικά καθώς ο όρος V_f/V_t αυξάνεται. Πέρα από μια κρίσιμη τιμή το

μέγεθος της βλάβης παραμένει σταθερό. Η κρίσιμη τιμή, στην περιοχή των 100-150, είναι ανεξάρτητη από τον τύπο ρητίνης, την μορφή ινών, το σύνθετο πάχος και τη διαδικασία κατασκευής. Η έκταση της βλάβης, ωστόσο, μπορεί να εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών και τη διάταξη [50,52,59].

Για να κατασκευαστούν σύνθετα ενισχυμένα με ίνες, πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το εργαλείο. Επειδή τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα είναι πολύ λειασμένα τρυπάνια κατασκευασμένα από υψηλής ταχύτητας χάλυβα αποτυγχάνουν μετά από μερικές οπές (Lamkert 1987, Miller, 1987). Τα εργαλεία καρβιδίου βολφραμίου διαθέτουν επαρκή ζωή (Kinknid 1988, Hickey, 1992), ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται καρβίδιο διαστάσεων μικρών (μm), καθώς η αντοχή στη ρήξη είναι 50% υψηλότερη. Ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός οπών μπορεί να τρυπηθεί με εργαλεία καρβιδίου βολφραμίου επικαλυμμένα με πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD). Τα εργαλεία που είναι επικαλυμμένα με PCD μπορούν να κοπούν εύκολα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται με φορητά τρυπάνια και δεν μπορούν να ακονιστούν. Μία άλλη προσέγγιση αφορά τη λείανση της γωνίας σημείου σε ένα ακατέργαστο τεμάχιο καρβιδίου [52-54].

Ο τύπος του τρυπανιού που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια επιλέγεται ανάλογα με τον τύπο του σύνθετου υλικού που πρόκειται να τρυπηθεί και αν είναι ήδη συνδεδεμένο με ένα μεταλλικό τμήμα. Σε πολλές περιπτώσεις τα σύνθετα υλικά συνδέονται με τμήματα αλουμινίου ή τιτανίου και η οπή που πρέπει να ανοιχθεί πρέπει να περάσει τόσο από το σύνθετο όσο και από το μέταλλο. Η διάτρηση αλουμινίου με ένα εργαλείο που έχει σχεδιαστεί για τη διάνοιξη εποξειδικών υαλονημάτων απαιτεί ένα πολύ διαφορετικό σχήμα εργαλείου για να αφαιρεθεί το μακρόστενο αλουμινόχαρτο. Η διάτρηση του τιτανίου με το ίδιο εργαλείο με τα σύνθετα υλικά είναι δύσκολη, καθώς η φθορά του εργαλείου καθιστά δύσκολη τη διάτρηση του τιτανίου. Είναι προτιμότερο να ανοιχθεί πρώτα το σύνθετο υλικό, να αφαιρεθεί το εργαλείο και να συνεχίσει η διάτρηση στο τμήμα του τιτανίου με ένα διαφορετικό εργαλείο. Στη συνέχεια, επειδή τα τσιπ τιτανίου φθείρουν την επιφάνεια της οπής στο σύνθετο τμήμα κατά την αφαίρεσή τους, η οπή πρέπει να λειανθεί ξανά. Αυτή η διαδικασία, που περιλαμβάνει τρία εργαλεία και τρεις λειτουργίες, είναι δαπανηρή. Επιδιώκονται τρόποι για τη χρήση εργαλείων συνδυασμού με διαφορετικά άκρα τρυπανιού ή για το σχεδιασμό τρυπανιών που αλλάζουν αυτόματα τις συνθήκες λειτουργίας καθώς εισέρχεται το τρυπάνι σε διαφορετικά υλικά (Cronjager 1991).

Πολλοί τύποι άκρων τρυπανιών (drill bits) έχουν δοκιμαστεί σε υαλονήματα εποξειδικών υλικών (Kinknid 1988). Η γενική γεωμετρία, η γωνία έλικας και οι γωνίες σημείων για τα τρυπάνια συστροφής φαίνονται στην Εικ.8. Οι γωνίες κλίσης, οι γωνίες ανακούφισης και οι γωνίες κοπής της κοπτικής άκρης καθορίζονται ανάλογα με το υλικό προς κατεργασία. Για τον εποξεικό γραφίτη ή υαλο-εποξικό, τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνεται με ένα στερεό κινητό δαχτυλίδι καρβιδίου βολφραμίου ή με τρυπάνια περιστρεφόμενης επικάλυψης με PCD (Miller 1987). Θετικές γωνίες κλίσης απαιτούνται για τη δημιουργία της μικρότερης ποσότητας θερμότητας κατά τη διάρκεια της κοπής. Ωστόσο, όσο πιο θετική είναι η γωνία κλίσης, τόσο πιο εύθραυστη γίνεται η κοπτική άκρη. Μια μικρή γωνία σμίλης είναι το δεύτερο στοιχείο της καλής γεωμετρίας εργαλείων και χρησιμεύει για να βελτιώσει την ταχύτητα διείδυσης (Lamkert 1987). Οι γωνίες ελίκων για τρυπάνια που χρησιμοποιούνται για τη μηχανή σύνθετων υλικών με μεταλλική επένδυση επιλέγονται προκειμένου να αφαιρεθούν τα θραύσματα που παράγονται ως αποτέλεσμα της διεργασίας.



Εικόνα 8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείου και επιφάνειας διάτρησης.[1]

Στην Εικ.8 δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείου κατά τη διάτρηση: α – γωνία ελίκωσης, β – γωνία σημείου διάτρησης. Επίσης δίνεται η γεωμετρία της άκρης κοπής του εργαλείου με (a) θετική, (b) ουδέτερη και (c) αρνητική γωνία κοπής (rake angle). Δίνονται επίσης οι γωνίες α_{re} , (relief angle), α_c (chisel angle), V – ταχύτητα κοπής, t – βάθος κοπής.

Συνήθως επιλέγονται γωνίες ελίκων 12° με το άκρο του εργαλείου από τιτάνιο (Εικ.8). Οι διαφορετικές γωνίες είναι απαραίτητες λόγω της διαφοράς στο σχήμα του ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν την τάση να υποχωρούν εντός της μήτρας αντί να υποχωρούν από την επιφάνεια της οπής.

Οι γωνίες κολόνας (rake angles) και οι γωνίες ανακούφισης (relief angles) στην περιοχή των 29-35" και 12-30", αντίστοιχα, βρέθηκαν επαρκείς. Ειδικά τρυπάνια έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε κατά τη διάτρηση οι προεξοχές να προσανατολίζονται εναλλακτικά προς τα πάνω και προς τα κάτω γύρω από την περιφέρεια, εισάγοντας μια δράση κοπής και προς τις δύο κατευθύνσεις για να κόψουν τις μη οπλισμένες ίνες αραμιδίου. Χρησιμοποιώντας τέτοιου είδους τρυπάνια οι οπές που δημιουργούνται παγιδεύουν τις άκοσμες ίνες και να τις τείνουν. Η διάτρηση σύνθετων υλικών με οπλισμό με ίνες βορίου απαιτεί τη χρήση εργαλείων διάτρησης με διαμάντια επίσης (Ho-Cheng et al.1994). Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ελασματοποιημένα βόριο-εποξικά υλικά (laminates) προέρχεται από την παραγόμενη θερμότητα. Κομμάτι υλικού λεπτότερο από το 1/8in μπορεί να ανοιχθεί χωρίς ψύξη του υγρού. Πάνω από αυτό το πάχος, το ψυκτικό μέσο πρέπει να τροφοδοτείται μέσω του εργαλείου σε πιέσεις μέχρι 75psi για να αποφευχθεί η βλάβη στο τεμάχιο εργασίας. Όταν ένα στρώμα βορίου-αργιλίου συνδέεται με ένα κομμάτι τιτανίου, προτιμάται μια προσέγγιση δύο εργαλείων. Ένα πολυστρωματικό υλικό για την ορθή κοπή ή διάνοιξη τρυπών σε αυτό απαιτεί πολλές αλλαγές εργαλείων και θα πρέπει να τρυπηθεί με ένα εργαλείο με μειωμένο ρυθμό τροφοδοσίας κατά την κοπή μέσω στρώματος τιτανίου.

Η φθορά των εργαλείων φαίνεται να εξαρτάται από την προηγούμενη θερμική επεξεργασία κατά τη διάτρηση των σύνθετων υλικών βορίου-αλουμινίου 24. Ενώ η δόνηση με υπερηχητικό εργαλείο δεν ήταν αποτελεσματική κατά τη διάτρηση εποξικού βαρίου, μείωσε την τριβή, τη φθορά εργαλείων και την τάση του αλουμινίου να συσσωρεύεται στο εργαλείο κατά τη διάτρηση βορίου-αλουμινίου. Η διάτρηση με εργαλείο με υπερήχους δόνησης ήταν επίσης επιτυχής στην παραγωγή οπών σε ελάσματα βορίου-αργιλίου / τιτανίου (Ho-Cheng et al.1994).

Έχουν επίσης πραγματοποιηθεί πειράματα (Bak 1989) με διατρήσεις σύνθετων μεταλλικών πλεγμάτων (MMC - Mesh Metallic Composites) με συνεχή και βραχεία ενίσχυση ινών από μήτρες αλουμινίου, καρβιδίου του πυριτίου και καρβιδίου του βορίου. Η σύγκριση της σκληρότητας των υλικών των εργαλείων και των υλικών κατεργασίας ενισχυμένου οπλισμού έδειξε ότι η χρήση τρυπανιού με άκρο HSS (High Speed Steel) δεν είναι κατάλληλη για τη διάτρηση σύνθετων μεταλλικών πλεγμάτων. Η σκληρότητα των ινών αυτών των σύνθετων μεταλλικών πλεγμάτων όπως $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiC, και B_4C είναι υψηλότερη από αυτή των υλικών εργαλείων από στερεό καρβίδιο, αλλά σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των PCD.

Στα πειράματα του Bak 1989, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία στερεού καρβιδίου και PCD και μερικά τρυπάνια περιστροφής που είχαν εσωτερικά κανάλια για ψυκτικό. Η διάτρηση αλουμινίου ενισχυμένου με ίνες αργιλίου $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, η διάρκεια ζωής των εργαλείων υψηλής ταχύτητας χάλυβα ήταν 100 φορές χαμηλότερη από εκείνη των εργαλείων στερεού καρβιδίου. Η διάρκεια ζωής των εργαλείων PCD ήταν 20 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των εργαλείων στερεού καρβιδίου κατά τη διάτρηση αλουμινίου ενισχυμένου με ίνες συνεχούς ίνας και 100 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της ενίσχυσης βραχέων ινών. Λόγω της φθοράς των εργαλείων, οι δυνάμεις μηχανικής κατεργασίας αυξάνονται δέκα φορές σε σχέση με τις αρχικές τους τιμές, αλλά ακόμη και τότε παραμένουν σε επίπεδο που αντιστοιχεί στο ένα τρίτο ή το ένα τέταρτο των δυνάμεων που εμπλέκονται στη διάτρηση του χάλυβα. Η χρήση ψυκτικού μέσου δεν μείωσε τη φθορά του εργαλείου στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη. Με λειαντικά εργαλεία, η κοπτική άκρη δεν είναι καλά καθορισμένη, δεδομένου ότι τα μεμονωμένα σωματίδια κοπής είναι τυχαία προσανατολισμένα, πολλά από τα οποία έχουν αρνητικές γωνίες κλίσης. Μόνο μικροί χώροι διατίθενται για τσιπς μεταξύ των κόκκων. Ως εκ τούτου, δημιουργείται έντονη θερμότητα καθιστώντας τα εργαλεία αυτά ακατάλληλα για διάτρηση πλαστικών ενισχυμένων με αραμίδια [51-54].

3.1.2 Ποιότητα Οπών.

Η ποιότητα της οπής που παράγεται μπορεί να περιγραφεί με πολλούς τρόπους (Konig 1989). Η μικροδομή της επιφάνειας μπορεί να εκτιμηθεί μέσω τυποποιημένων παραμέτρων τραχύτητας. Το σφάλμα διαστάσεων ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της διαμέτρου της οπής και εκείνης του εργαλείου. Η ποιότητα της οπής (roundness) χαρακτηρίζεται από μία παράμετρο ίση με το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης διαμέτρου της οπής.

Ένα άλλο κριτήριο ποιότητας είναι η βλάβη του υλικού, η οποία μπορεί να περιγραφεί από το πλάτος της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα και από το μέγεθος της αποφλοιωμένης περιοχής. Σε μονοκατευθυντικά ελασματοποιημένα υλικά (unidirectional laminates), η ποιότητα της επιφάνειας της οπής ποικίλει σημαντικά γύρω από την περιφέρεια.

- Ø Όταν η κατεύθυνση κοπής είναι παράλληλη προς τον προσανατολισμό της ίνας (0°), οι ξεχωριστές ίνες τραβιούνται προς τα έξω. Όταν αυτή η γωνία αυξάνεται, η συμπίεση και η κάμψη εμφανίζονται στην περιοχή $(20-45)^\circ$, οι ίνες τραβιούνται έξω από την επιφάνεια κοπής και εκτρέπονται στην κατεύθυνση κοπής. Η χειρότερη ποιότητα επιφάνειας εμφανίζεται σε αυτό το εύρος.
- Ø Όταν η κατεύθυνση κοπής είναι κάθετη προς τον προσανατολισμό των ινών, οι ίνες υποβάλλονται σε διάτμηση και κάμψη και βελτιώνεται η ποιότητα της επιφάνειας. Η ποιότητα των οπών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές ιδιότητες των ενισχυτικών ινών $7 * 10$, οι ίνες αραμιδίου έχουν πολύ χαμηλή αντοχή στη θλίψη.

τείνουν να υποχωρούν στη μήτρα κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας και στη συνέχεια εμφανίζονται φθαρμένες στην επιφάνεια της οπής.

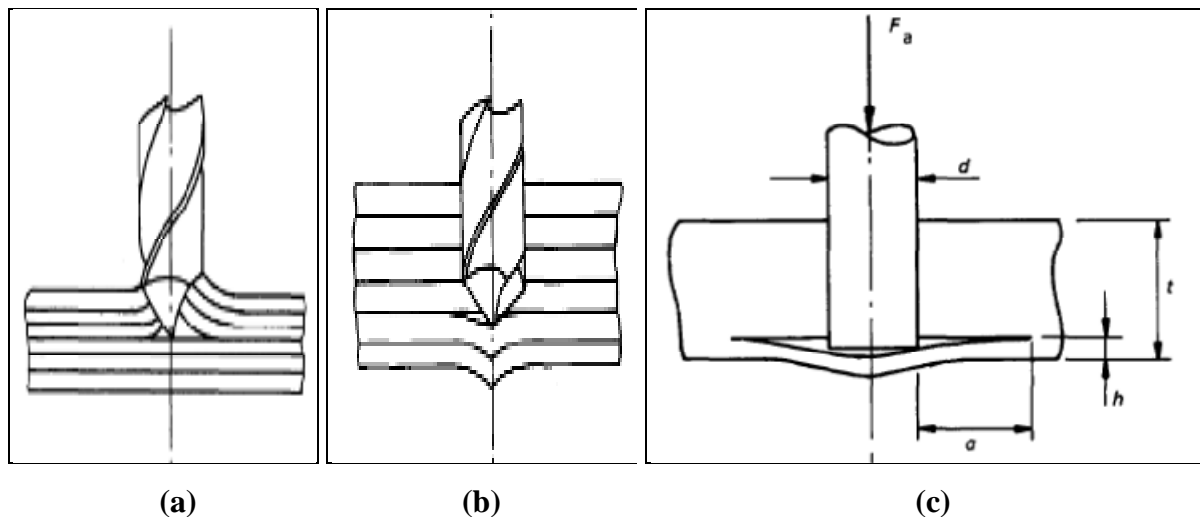
Επειδή, για τα μονοκατευθυνόμενα σύνθετα, η αντοχή των ινών είναι συνήθως μεγαλύτερη σε τάση, οι δυνάμεις κοπής είναι μεγαλύτερες όταν η κατεύθυνση κοπής είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της ίνας.[19] Τα ελασματοποιημένα φύλλα λοξομήτου αναφέρθηκαν ότι είναι πιο εύχρηστα από τα μονοκατευθυνόμενα (Miller 1987).

3.1.3 Αποκόλληση.

Στα πλαστικοποιημένα σύνθετα υλικά, οι αποκολλήσεις προκαλούν σοβαρές μειώσεις στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου και πρέπει να αποφεύγονται. Κατά τη διάρκεια της διάτρησης, οι αποκολλήσεις μπορούν να εισαχθούν με τρεις μηχανισμούς:

- Ø ξεφλούδισμα του ανώτερου στρώματος (a),
- Ø διάτρηση από το μη κομμένο στρώμα κοντά στην έξοδο (b) και
- Ø λειτουργία θερμικής καταπόνησης (c).

Στην Εικ. 9 φαίνεται ένα απλό μοντέλο που έχει προταθεί για την πρόβλεψη των επιπέδων ώσης που θα προκαλέσει την απομάκρυνση «εξώθησης στην έξοδο» ή «ξεφλούδισμα στην είσοδο» έχει προταθεί (Sadat et al. 1990).



Εικόνα 9: Μοντέλο μηχανισμού αποκόλλησης [1,58].

Η αποφλοιωμένη περιοχή υποτίθεται ότι είναι κυκλική και το μη κομμένο τμήμα διαμορφώνεται ως ισοτροπική κυκλική πλάκα στερεωμένη στο περίγραμμα του στο κομμένο τμήμα του ελασματοειδούς, το οποίο θεωρείται άκαμπτο (Εικ. 6c). Από την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου που σχετίζεται με την ενέργεια που απαιτείται για την επέκταση της ρωγμής στο έργο που πραγματοποιείται από την κάθετη δύναμη που ασκείται από το τρυπάνι και την ενέργεια παραμόρφωσης και υποθέτοντας τη διάδοση της ρωγμής του Mode I επιτυγχάνεται το κρίσιμο φορτίο στην αρχή της αποκόλλησης.

$$F_a^* = \pi \left\{ (8G_{Ic} E h^3) / [3(1 - \nu^2)] \right\}^{1/2}$$

όπου

- Ø G , είναι ο κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας,
- Ø F είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη ωθήσεως,
- Ø h είναι το άκοπο βάθος κάτω από το εργαλείο,
- Ø E είναι το μέτρο του Young (Young's Modulus) και
- Ø ν είναι ο λόγος Poisson.

Λόγω της παραδοχής που έγινε, το κρίσιμο φορτίο δεν εξαρτάται από το κομμένο κομμάτι του κατεργαζόμενου τεμαχίου, αλλά μειώνεται με το h , αφού το μη κομμένο τμήμα του ελάσματος γίνεται πιο εύκαμπτο. Το μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω βρέθηκε σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία (Sadat 1990). Το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για αποκόλλησης (ξεφλούδισμα), υποθέτοντας ότι η δύναμη αποφλοίωσης σχετίζεται με την οριζόντια δύναμη κοπής με μία σταθερά που ονομάζεται παράγοντας αποκόλλησης. Το ίδιο πρόβλημα μελετήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο δύο συμμετρικών πεπερασμένων στοιχείων σε μια μικρή ζώνη γύρω από την οπή μεταξύ αυτής και του εργαλείου (Sadat 1991). Το άκρο του εργαλείου θεωρείται ότι είναι επίπεδο και το τεμάχιο εργασίας στερεώνεται στην εξωτερική του επιφάνεια. Η αποτυχία θεωρείται ότι συμβαίνει όταν οι ενδοελασματικές τάσεις εφελκυσμού φθάνουν σε μια κρίσιμη τιμή στη διεπιφάνεια μεταξύ των κομμένων και μη κομμένων περιοχών. Και οι δύο περιοχές μοντελοποιήθηκαν ως ισοτροπικά ή ορθοτροπικά υλικά χρησιμοποιώντας φαινομενικές μηχανικές ιδιότητες. Το μοντέλο μπορεί επίσης να αντιπροσωπεύει μια μεταλλική πλάκα στήριξης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις τάσεις που προβλέπονται από την παραπάνω εξίσωση. Η διαδικασία εξάσκησης στην κατάσταση αποκόλλησης εξόδου στις λειτουργίες πριονίσματος μελετήθηκε επίσης χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα του οποίου έδειξαν καλή συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα (Korlev 1988).

3.2 Κοπή (Cutting).

Αρκετές πειραματικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί όπως φαίνεται στη βιβλιογραφία, για τη βελτίωση της κατανόησης της διαδικασίας κοπής σε σχέση με τη μηχανική κατεργασία σύνθετων υλικών (Takeyama 1988). Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πειράματα διαμόρφωσης σε φύλλα εποξειδικού άνθρακα για να μελετηθεί το σχήμα και οι διαστάσεις των θραυσμάτων, η μορφολογία της επιφάνειας του τεμαχίου και οι δυνάμεις κοπής. Στα πειράματα της λεγόμενης «γρήγορης στάσης», το εργαλείο διαμόρφωσης τέθηκε σε στάση σε πολύ μικρή απόσταση, σε περίπου δύο διαμέτρους ινών, προκειμένου να εξεταστεί η περιοχή κοντά στην άκρη του εργαλείου και να προσδιοριστούν οι εμπλεκόμενοι μηχανισμοί αστοχίας. Εξετάστηκε η κατεργασία μονής κατεύθυνσης εποξεικού γραφίτη, τόσο παράλληλα όσο και κάθετα προς την κατεύθυνση της ίνας.

Κατά την κατεργασία κάθετα προς τις ίνες, το εργαλείο πιέζει το σύνθετο μπροστά του προκαλώντας το σπάσιμο και τη δημιουργία ενός τσιπ, ενώ παράλληλα πιέζει προς τα κάτω το υλικό κάτω από το εργαλείο, δημιουργώντας ρωγμές 0.1-0.3 mm βαθιά μέσα στο υλικό. Κατά την κατεργασία παράλληλα προς την κατεύθυνση της ίνας, μια ρωγμή συχνά τρέχει μπροστά από την άκρη του εργαλείου και οι ρωγμές στην επιφάνεια φθάνουν σε βάθη μόνο μιας έως δύο διαμέτρων ινών. Η εξέταση των θραυσμάτων (chips) έδειξε ότι δεν έχουν υποβληθεί σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις και ότι η διαδικασία κοπής αποτελείται από μια σειρά καταγμάτων (fractures). Η αύξηση της γωνίας κλίσης του εργαλείου ελαττώνει ελαφρά την οριζόντια δύναμη κοπής, ενώ δεν παρατηρήθηκε κάποια συγκεκριμένη τάση για

την κατακόρυφη δύναμη. Η αύξηση της γωνίας ανακούφισης μείωσε δραματικά την κατακόρυφη δύναμη και η αύξηση του βάθους κοπής αύξησε σημαντικά την οριζόντια δύναμη κοπής, ενώ η οριζόντια δύναμη παρέμεινε ουσιαστικά αμετάβλητη. Η ορθογώνια κοπή μονοκατευθυνόμενων σύνθετων υαλοεποξικών με ίνες προσανατολισμένες μεταξύ 0 και 90 από την κατεύθυνση κοπής μελετήθηκε ξεκινώντας με μια σειρά από πειράματα περιστροφής (Takeyama 1988).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δυνάμεις κοπής είναι σχετικά μικρές όταν η κοπή γίνεται παράλληλα προς την κατεύθυνση της ίνας, μειώνονται σε ελάχιστες τιμές κατά τη μηχανική κατεργασία σε προσανατολισμό 30° και κατόπιν αυξάνεται σημαντικά καθώς η κατεύθυνση κοπής γίνεται κάθετη προς την κατεύθυνση της ίνας. Χρησιμοποιείται ένα μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της προκύπτουσας δύναμης κοπής ως συνάρτηση του προσανατολισμού των ινών και των ιδιοτήτων των υλικών, με βάση τις υποθέσεις ότι ο σχηματισμός θραυσμάτων πραγματοποιείται σχεδόν κατά συνεχή τρόπο και ότι η διάτμηση συμβαίνει στην κατεύθυνση στην οποία η ενέργεια κοπής είναι ελάχιστη. Καλή συμφωνία του μοντέλου επιτυγχάνεται με πειραματικά αποτελέσματα σε όλο το φάσμα των κατευθύνσεων ινών 30. Οι υπερηχητικές δονήσεις του εργαλείου στα 18 kHz στην κατεύθυνση κοπής αποδείχθηκε ότι μειώνουν δραματικά τις δυνάμεις κοπής και το βάθος της ζώνης βλάβης στο εύρος του προσανατολισμού των ινών από 0 έως 180.

Μια λεπτομερής πειραματική μελέτη φθοράς εργαλείων και φινιρίσματος επιφανειών κατά την κατεργασία εποξεικού γραφίτη ελασματοποιημένων επιφανειών (laminated) με εργαλεία PCD διεξήχθη από τους Ramulu et al. 1991. Δοκίμια κυκλικής διατομής με διάμετρο 152.44 mm, πάχους 25.4 mm, κατεργάστηκαν με περιστροφή της πρόσωσης. Το κοπτικό άκρο του εργαλείου είχε μηδενική γωνία κλίσης και μια γωνία ανακούφισης 12°. Η ταχύτητα κοπής ρυθμίστηκε στα 228.6 m/min με ρυθμό τροφοδοσίας 0.1778 mm ανά λεπτό και βάθος κοψίματος 4.76 mm. Η φθορά αποδείχθηκε ότι αυξήθηκε απότομα με το χρόνο μηχανουργικής κατεργασίας και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε. Η μέση παράμετρος R της επιφανειακής τραχύτητας μεταξύ κορυφής και κοιλάδας R, κυμαινόταν σε 23-37μm. για διαφορετικές ποιότητες υλικών εργαλείων PCD. Παρατηρήθηκε επίσης η μεταβολή της τραχύτητας της επιφάνειας με προσανατολισμό των ινών που είχε αναφερθεί προηγουμένως για τις εργασίες διάτρησης [51-54].

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται στην κοπή μετατρέπεται σε θερμότητα, πράγμα που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στο τεμάχιο εργασίας, το εργαλείο και τα θραύσματα. Έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα περιστροφής σε υαλοεποξικά υλικά με θερμοστοιχεία ενσωματωμένα κάτω από την επιφάνεια κοπής³² προκειμένου να εξεταστεί η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας κοπής και της φθοράς του εργαλείου. Η θερμότητα που παράγεται κατά την κοπή είναι συγκεντρωμένη κοντά στο ρύγχος του εργαλείου και προκαλεί φθορά στο εργαλείο σε αυτήν την περιοχή. Λεπτομερής μελέτη της φθοράς των εργαλείων HSS στις λειτουργίες περιστροφής είναι διαθέσιμη³³. Οι θερμοκρασίες κοπής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου κοπής³³, η οποία σε συμφωνία με μια μελέτη διάτρησης των σύνθετων υλικών⁷ δείχνει ότι ένα σημαντικό κλάσμα της θερμότητας που παράγεται κατά τη μηχανική κατεργασία των σύνθετων υλικών εκκενώνεται από το εργαλείο.

Μια άλλη μελέτη σχετικά με τη φθορά των εργαλείων στην στροφή των εποξειδικών υαλονημάτων με διαφορετικά υλικά εργαλείων, συμπεριλαμβανομένων των τεχνητών καρβιδίων και των κεραμικών³⁴, επιβεβαίωσε τη σημασία της θερμικής αγωγιμότητας του εργαλείου (Brown et al. 1988). Αυτός ο παράγοντας καθορίζει τις θερμοκρασίες κοπής και τις συχνότητες φθοράς.

Μια πειραματική μελέτη της μηχανικής κατεργασίας των κραμάτων αλουμινίου, ενισχυμένων με σωματίδια γραφίτη μέσης διαμέτρου 60μm, και κλάσματος όγκου έως 22%, έδειξε ότι η μείωση των δυνάμεων κοπής οφείλεται στη μείωση των διατμητικών τάσεων και

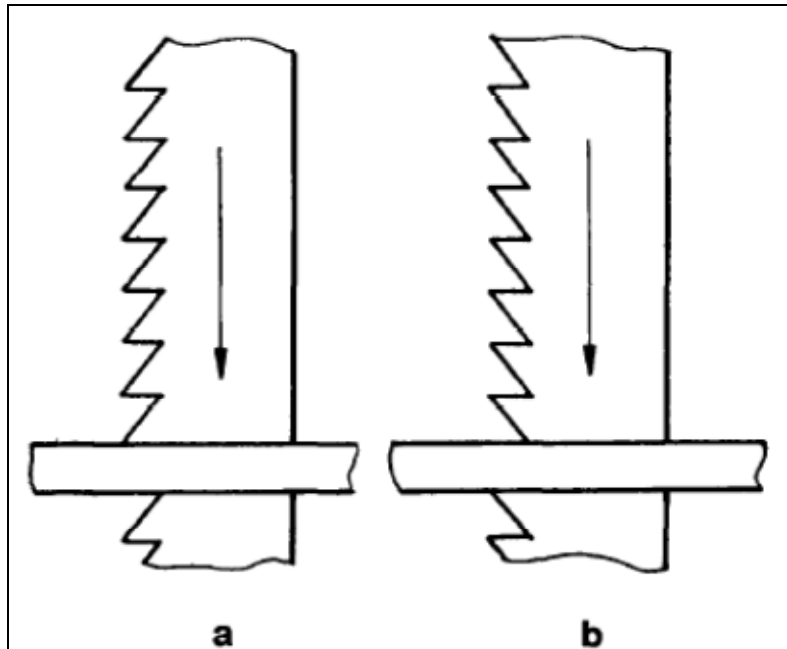
όχι σε χαμηλότερους συντελεστές τριβής στη διασύνδεση κομματιού και θραυσμάτων του (chip-rake). Παρόμοιες διαπιστώσεις μείωσης των δυνάμεων κοπής σε σύνθετα κραμάτων αλουμινίου ενισχυμένων με σωματίδια γραφίτη αναφέρθηκαν και σε άλλες εργασίες 36 - 37. Οι δυνάμεις κοπής και ο σχηματισμός θραυσμάτων στην εμπρόσθια στροφή των MMCS με μικρή ενίσχυση αλουμίνια σε μήτρα αλουμινίου μελετήθηκαν από τους Andersson et al 38. Για ενισχύσεις μικρού κλάσματος όγκου (6 - 12%), ο σχηματισμός θραυσμάτων κυριαρχείται από την πλαστική ροή της μήτρας (Gibson 1985).

Οι ερευνητές παρουσίασαν ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της εφαπτομενικής δύναμης στο εργαλείο. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη θεωρητική πρόβλεψη μιας γραμμικής αύξησης της εφαπτομενικής δύναμης με την αύξηση του πάχους του αδιαμόρφωτου θραύσματος. Η μηχανική της κατεργασίας υλικών ενισχυμένων με ίνες αρχικά μελετήθηκε αναλυτικά από τους Everstine και Rogers 1988. Εξετάστηκε ορθογώνια μηχανική κατεργασία παράλληλη προς την κατεύθυνση της ίνας, η οποία μοντελοποιούσε το ενισχυμένο με ίνες υλικό ως ομοιογενές, ασυμπιεστο και μη εκτάσιμο κατά την κατεύθυνση της ίνας.

3.3 Πριόνισμα (Sawing).

Μια σειρά πειραμάτων διεξήχθη, κόβοντας τα φύλλα εποξικού γραφίτη με ένα κυκλικό πριόνι [9,40,41]. Το πριόνι υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε είχε εξωτερική διάμετρο 57.15 mm, πάχος 0.71 mm και 60 δόντια. Η ταχύτητα τροφοδοσίας διατηρήθηκε σταθερή στα 50.8 mm/min, ενώ δοκιμάστηκαν ταχύτητες κοπής 1, 5, 3, 6, 9 και 12 m/s. Η δύναμη που εφαρμόστηκε κάθετα προς το επίπεδο του ελάσματος (laminar) και η δύναμη τροφοδοσίας μειώθηκαν, ενώ η θερμοκρασία κοντά στη ζώνη κοπής αυξανόταν σταθερά με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Στην περιοχή της επιφάνειας κοπής, ο προσανατολισμός των ινών μεταβλήθηκε σε βάθος d καθώς το εργαλείο έσπρωχνε τις ίνες στην κατεύθυνση τροφοδοσίας. Με την αύξηση της ταχύτητας, η απόσταση d μειώθηκε με τον ίδιο τρόπο που επενεργούσαν οι δυνάμεις κοπής. Παρατηρήθηκαν παραμορφώσεις και ρωγμές που οδηγούν σε αποκόλληση στην επιφάνεια κοπής. Η ενδοελασματική αντοχή σε εφελκυσμό ενός μικρού δείγματος με μία πριονωτή άκρη αυξήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας κοπής, επειδή οι βλάβες μειώθηκαν όπως και οι δυνάμεις του εργαλείου. Η ταχύτητα κοπής περιορίζεται σε μια μέγιστη για την οποία λαμβάνει χώρα η τήξη του υλικού μήτρας. Από την άλλη πλευρά, το μέγεθος βλάβης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας καθώς οι δυνάμεις κοπής γίνονται μικρότερες. Επομένως, η ταχύτητα κοπής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη, χωρίς να υπερβαίνει το αποδεκτό επίπεδο θερμοκρασίας.

Τα σύνθετα υλικά με σπλισμό από ίνες αραμιδίου (laminates) έως και 1/4" σε πάχος μπορούν να κοπούν με πριόνια με μικρές διαφοροποιήσεις στα άκρα τους. Ωστόσο, οι λεπίδες λειτουργούν αντίστροφα (Εικ.10) έτσι ώστε η πτέρνα του δοντιού να εισέρχεται πρώτα στο σύνθετο, πράγμα που δίνει μια πιο αποτελεσματική δράση διάτμησης. Οι άκρες των δοντιών θα πρέπει να προετοιμαστούν για να αφαιρεθούν οι αιχμηρές άκρες που τείνουν να τραβούν τις ίνες Kevlar και να δημιουργούν τις τυχαίες διαφοροποιήσεις των άκρων του εργαλείου (fuzzy). Τα πριόνια διαμαντοειδών λεπίδων χρησιμοποιούνται τόσο για ευθύ πριόνισμα όσο και για πριόνισμα των συνθέτων εποξικού γραφίτη (Antonsson et al. 1987). Τα σύνθετα εποξικού βόριου και βόριου-αλουμινίου μπορούν να κοπούν σε στενές ανοχές χρησιμοποιώντας κυκλικά πριόνια με επικάλυψη με διαμάντι ή πριόνια ζώνης²⁴. Ωστόσο, όταν το εποξικό βόριο συνδέεται με το τιτάνιο, απαιτούνται ψυκτικές ουσίες για την πρόληψη της βλάβης του εποξειδικού πλέγματος (Ho-Cheng et al. 1990).



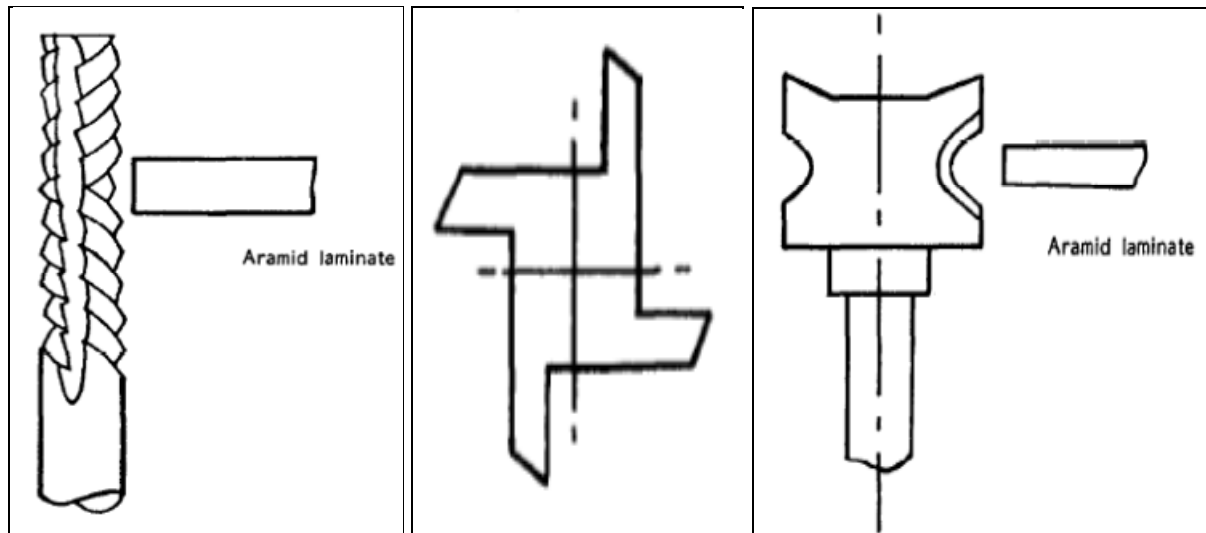
Εικόνα 10: Κατεργασία πριονίσματος σύνθετου αραμιδίου (laminate)[1,40].

Στην Εικ.10 φαίνεται η διεργασία πριονίσματος σύνθετων αραμιδίων: (a) συμβατική διεύθυνση κατεργασίας, (b) κατεργασία αντίστροφης διεύθυνσης.

3.4 Φρεζάρισμα (Routing).

Η δρομολόγηση συχνά απαιτείται για την περικοπή τμημάτων κομματιών. Με εργαλεία ενισχυμένα από γυαλί και άνθρακα με πολλαπλές κοπτικές άκρες είναι δυνατή η δρομολόγηση υλικών κατασκευασμένων από σκυρόδεμα. Όπως και στις εργασίες διάτρησης, οι δυνάμεις κοπής και η ποιότητα της επιφάνειας εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των ινών. Οι μεγαλύτερες δυνάμεις και η χειρότερη ποιότητα εμφανίζονται όταν οι ίνες είναι προσανατολισμένες σε γωνία 45° ως προς την κατεύθυνση κοπής. Τα εργαλεία PCD έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής από τα εργαλεία καρβιδίου [6]. Για τα σύνθετα υλικά με σπλισμό από ίνες αραμιδίου, τα ελικοειδή εργαλεία αντίθετα εργαζόμενα ως προς την επιφάνεια κοπής, που παράγουν εναλλασσόμενες δυνάμεις σε όλη την επιφάνεια κοπής έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Δύο κοπτικά εργαλεία δρομολογητή (bits) αναπτύχθηκαν για σύνθετα υλικά με ενίσχυση αραμιδίου χρησιμοποιώντας την αρχή της διάτμησης των εξωτερικών ινών προς το εσωτερικό του σύνθετου υλικού [18]. Ο αντιτιθέμενος εργαζόμενος ελικοειδής κόπτης χρησιμοποιείται για παχιά τμήματα ή πάνελ σάντουιτς κυψέλης, ενώ ο δρομολογητής σχισμών V είναι σχεδιασμένος για λεπτά φύλλα (Εικόνα 11). Με τα δύο αυτά εργαλεία, η ευθυγράμμιση με το κέντρο της αυλάκωσης ή το κέντρο των απέναντι ελίκων είναι κρίσιμη και δύσκολο να επιτευχθεί με χειροκίνητα εργαλεία.

Στην Εικ.11 δίνεται η ακολουθία για τη διεργασία της δρομολόγησης σύνθετου αραμιδίου (laminate) με (a) ελικοειδές εργαλείο (router bit) ή V-slot, (b) σε πανοραμική άποψη (top view) και (c) σε πλευρική άποψη (side view).



Εικόνα 11: Γεωμετρία εργαλείου και τεμαχίου κατά τη δομολόγηση [1,41].

3.5 Λείανση (Grinding).

Σε μελέτη της λείανσης των μονοκατευθυνόμενων σύνθετων υαλοεποξικών υλικών το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην τοπογραφία της επιφάνειας κοπής και στον προσανατολισμό των ενισχυτικών ιών [43]. Δύο τρόποι αστοχίας παρατηρήθηκαν για τις ίνες γυαλιού. Για γωνίες προσανατολισμού μεταξύ 0 και 60° οι κόκκοι λείανσης «σκάβουν» τις ίνες, πράγμα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αποκόλληση σε βάθος της μήτρας και την αποτυχία ολόκληρης της διατομής της ίνας. Το άκρο της ίνας σχηματίζει μια κοιλάδα στην επιφάνεια του υλικού. Όταν η γωνία λείανσης κυμαίνεται στο εύρος $90 < \theta < 180$, το εργαλείο ωθεί προς τα κάτω τις ίνες που στη συνέχεια προεξέχουν από την επιφάνεια [1,30].

4 Μη συμβατικές – Προηγμένες Μέθοδοι.

Πέρα από τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας σύνθετων υλικών και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα πιο σύγχρονα χρόνια, οι ερευνητές στράφηκαν προς νέες πιο προηγμένες μεθόδους κατεργασίας υλικών. Ανάμεσα σε αυτές τις προηγμένες τεχνικές είναι

- Ø Η κοπή με LASER,
- Ø Η κοπή με νερό, (υδροκοπή),
- Ø Η αφαίρεση υλικού με ηλεκτρικό σπινθήρα EDM),
- Ø Η κοπή με τη χρήση Plasma ,
- Ø Η ηλεκτροχημική λείανση (ECG),
- Ø Η αφαίρεση υλικού με υπέρηχους (USM)

Αυτές οι σχετικά νέες πλέον τεχνικές έχουν εφαρμοστεί στα σύνθετα οργανικής μήτρας με οπλισμό αραμιδίου, γυαλιού, γραφίτη, αλλά επίσης και σε μεταλλικά πλέγματα και σύνθετα κεραμικά πλέγματα.

Η κατεργασία των σύνθετων υλικών είναι δύσκολη λόγω της ετερογένειας και της ανισοτροπίας του υλικού καθώς και της ευαισθησίας στη θερμότητα του υλικού, της υψηλής αποξεστικότητας των ενισχυτικών ινών, της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του, και της λειαντικής φύσης των ενισχυτικών ινών. Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση βλάβης στο τεμάχιο εργασίας και την πολύ υψηλή φθορά εργαλείων.

Ωστόσο, το υλικό και η γεωμετρία των εργαλείων, καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας πρέπει να προσαρμόζονται προκειμένου να μειωθούν οι ρυθμοί παραγωγής θερμότητας ώστε να αποφεύγεται η πρόκληση ζημιών με θερμικά ή μηχανικά μέσα. Οι χαμηλοί ρυθμοί κοπής και η υψηλή φθορά εργαλείων όσο και η κακή ποιότητα της επιφάνειας έχουν δοκιμαστεί.

Οι προηγμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά με στόχο είτε την αύξηση των ποσοστών κοπής, τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας, είτε γενικότερα στις περιπτώσεις όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι είναι αναποτελεσματικές. Οι νέες τεχνικές έχουν εφαρμοστεί στα σύνθετα οργανικής μήτρας με οπλισμό αραμιδίου, γυαλιού, γραφίτη, αλλά επίσης και σε μεταλλικά πλέγματα και σύνθετα κεραμικά πλέγματα (Abrate & Walton, 1992). Στα επόμενα περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά καθώς και πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα καθεμιάς εκ των προηγμένων μεθόδων. (Ιτσόπουλος 2014)

4.1 Αρχή Λειτουργίας Κοπής με Laser

Τα λέιζερ είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για την κατεργασία σύνθετων υλικών. Μια δέσμη υπερύθρου υψηλής ενέργειας επικεντρώνεται σε ένα πολύ μικρό σημείο, συνήθως 0,1-1,0 mm σε διάμετρο και προκαλεί τήξη, εξάτμιση ή χημική αποικοδόμηση σε όλο το βάθος του υλικού. Τα υγρά και τα προϊόντα αποικοδόμησης απομακρύνονται με πίδακα αερίου ομοαξονικό με τη δέσμη λέιζερ. Για τα μη μεταλλικά υλικά, ο αέρας χρησιμοποιείται ως βοηθητικό αέριο επειδή δεν υπάρχει οξείδωση, αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα αέρια όπως CO₂, για σύνθετα από γυαλί και ήλιο (He) για σύνθετα υλικά από βόριο (Flaum et al. 1987, Powell et al. 1987).

Η κοπή με λέιζερ πλαστικών υλικών είναι πολύ αποδοτική, καθώς αυτά τα υλικά έχουν πολύ υψηλό συντελεστή απορρόφησης για υπέρυθρη ακτινοβολία και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που προκαλεί την υψηλή θερμική ενέργεια (Vanderwert 1987). Τα περισσότερα θερμοπλαστικά τεμαχίζονται με τη διάτμηση ενός τοπικού τήγματος που παράγεται από τη δέσμη λέιζερ. Ο μεθακρυλικός πολυμεθυλεστερας (πλεξιγκλάς) κόβεται με εξάτμιση.

Τα θερμοσκληρυνόμενα όπως οι εποξειδικές ρητίνες κόβονται με χημική αποικοδόμηση που απαιτεί υψηλότερη ενέργεια και υψηλότερες θερμοκρασίες από τη διάτμηση τήγματος για θερμοπλαστικά.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των λέιζερ είναι ότι δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου εργασίας, εξαλείφοντας τα προβλήματα που σχετίζονται με την επαφή και τις κραδασμούς και επιτρέποντας έτσι τη μηχανική κατεργασία μικρών ή λεπτών εξαρτημάτων χωρίς να απαιτείται μηχανική δύναμη (Chryssolouris et al., 1985). Περιοχές που με συμβατικά εργαλεία κοπής μοιάζουν αρχικά απρόσιτες μπορούν να προσεγγιστούν με λέιζερ επειδή δεν υπάρχει η συνήθης επιβλαβής επαφή τόσο για το υλικό κατεργασίας όσο και για το εργαλείο κοπής (hard contact). Οι ελάχιστες εσωτερικές και εξωτερικές γωνιακές ακτίνες προσβολής περιορίζονται μόνο από τη σταθερότητα του εξοπλισμού επεξεργασίας και το βάθος της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα. Οι μεταβολές των υλικών αντιμετωπίζονται επίσης εύκολα μέσω απλών ρυθμίσεων του ρυθμού τροφοδοσίας και των επιπέδων ισχύος. Η διαδικασία επεξεργασίας με λέιζερ είναι εύκολα αυτοματοποιημένη, πράγμα που οδηγεί σε βελτιωμένη παραγωγικότητα και προϊόντα υψηλότερης ποιότητας (Chryssolouris et al., 1985, Vanderwert 1987).

4.1.1 Επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού κοπής.

Τρεις παράμετροι είναι σημαντικές στην κοπή με λέιζερ (Lawson 1986):

- Ø η απορρόφηση ενέργειας,
- Ø η θερμική διάχυση και
- Ø η θερμοκρασία αντίδρασης.

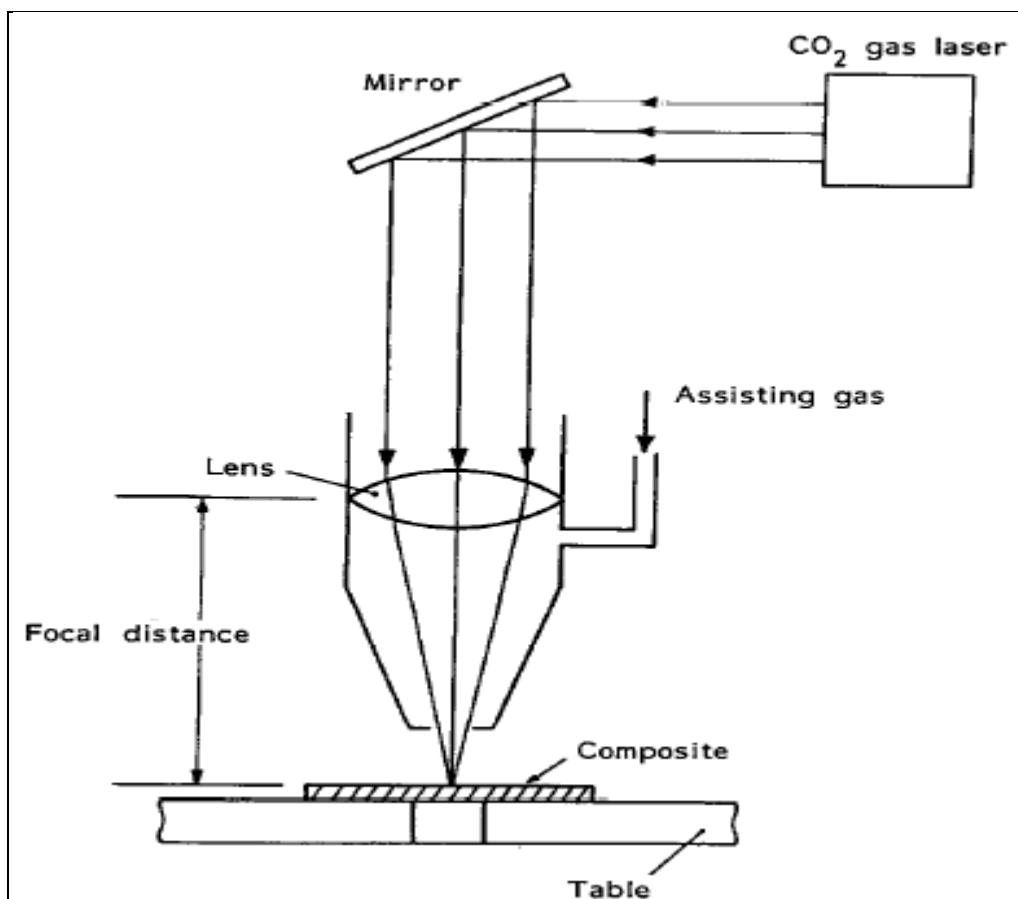
Χρησιμοποιούνται δύο τύποι λέιζερ: το λέιζερ Nd: YAG είναι λέιζερ στερεάς κατάστασης που συνήθως λειτουργεί παλμικά και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος 1.06 μm., το λέιζερ CO₂ είναι ένα ρεύμα λέιζερ που εκπέμπει ενέργεια σε μήκος κύματος 10.6 μm. Οι ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τα λέιζερ CO₂, απορροφούνται καλά από μη μεταλλικά υλικά ενώ τα λέιζερ Nd: YAG δεν απορροφώνται αποτελεσματικά από οργανικές μήτρες (Lawson 1986).

Μια τυπική διάταξη λέιζερ, φαίνεται στην Εικ.12. Με τα σύνθετα υλικά, η κοπή λέιζερ γίνεται μια πιο πολύπλοκη διαδικασία, που συνίσταται από το γεγονός ότι τα συστατικά συνήθως έχουν πολύ διαφορετικές θερμικές αγωγιμότητες, θερμοχωρητικότητες και θερμοκρασίες εξάτμισης (Πίνακας 4.1).

Πειραματικές εργασίες έδειξαν ότι η καλύτερη ποιότητα των κομμένων επιφανειών επιτυγχάνεται όταν οι θερμικές ιδιότητες των ενισχυτικών ινών είναι πλησιέστερες προς εκείνες της μήτρας. Η θερμοκρασία ατμοποίησης του αραμιδίου είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του γυαλιού ή του γραφίτη, έτσι ώστε να απαιτούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες για την κοπή των σύνθετων αραμιδίων. Επίσης, επειδή η θερμική αγωγιμότητα των ινών αραμιδίου είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή των γραφίτη ή των ινών υάλου, η θερμότητα δεν θα απομακρυνθεί όσο υψηλές θερμοκρασίες θα παραμένουν εντοπισμένες στη ζώνη κοπής. Ως αποτέλεσμα, η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα είναι πολύ μικρότερη για σύνθετα υλικά με ενίσχυση αραμιδίου. Όταν το ίδιο υλικό μήτρας ενισχύεται από ίνες αραμιδίου, γυαλιού ή άνθρακα, το σύνθετο υλικό αραμιδίου κόβεται πιο εύκολα, ακολουθούμενο από σύνθετο γυαλί και άνθρακα (Tagliaferri et al. 1987, Caprino et al., 1988).

Πίνακας 4.1 Θερμικές Ιδιότητες ινών και υλικών μήτρας (6,13)

Material	Conductivity (W/m/°K)	Heat capacity (J kg ⁻¹ °K ⁻¹)	Vaporization temperature (°C)	Heat of vaporization (J g ⁻¹)	Density (g cm ⁻³)
Polyester	0.20	1200	350-500	1000	1.25
Aramid	0.05	1420	950	—	1.44
Graphite	50	710	3300	43000	1.85
Glass	1.0	850	2300	31000	2.55



Εικόνα 12: Τυπική διάταξη λέιζερ κοπής CO₂ [10].

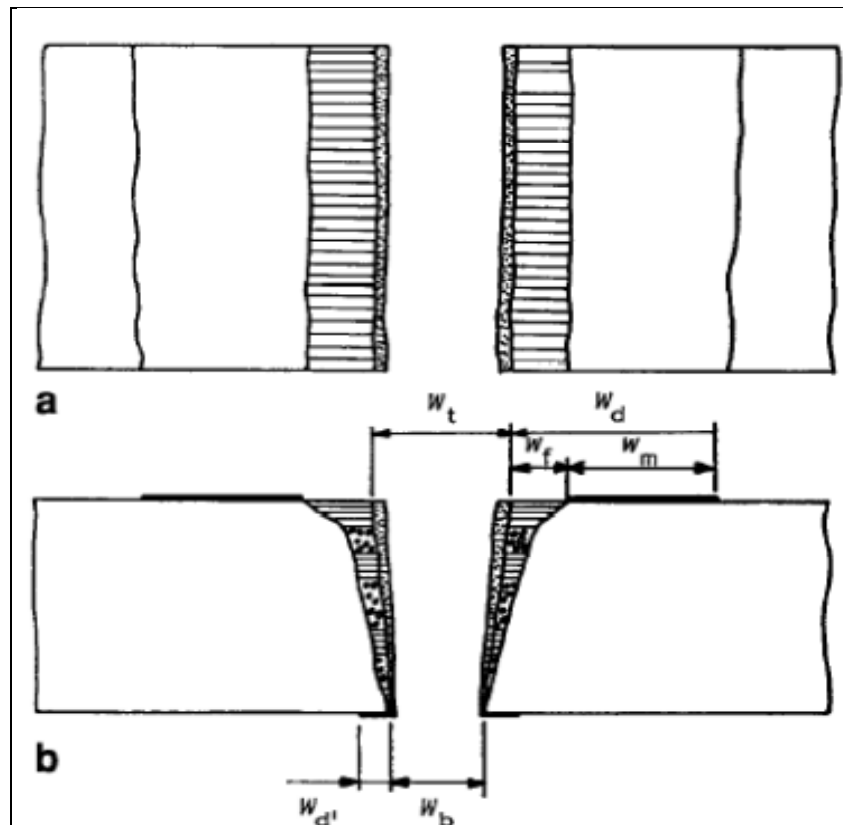
Μια λεπτομερής μελέτη της μορφολογίας της αποκοπής άκρου του εποξειδικού αραμιδίου παρουσιάζει μερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα (Di Ilio 1990). Στην επιφάνεια κοπής, πρώτα παρατηρείται μια στρώση με συσσωμάτωση, ακολουθούμενη από μια ζώνη όπου οι ίνες προεξέχουν από τη μήτρα. Στην επάνω επιφάνεια του δείγματος, μια ευρύτερη σκοτεινή ζώνη στην οποία η μήτρα έχει υποστεί κάποια υποβάθμιση λόγω θέρμανσης από θερμά αέρια και θερμά προϊόντα που έχουν αφαιρεθεί από την εντομή. Τα ίδια χαρακτηριστικά παρατηρούνται για όλες τις σύνθετες οργανικές μήτρες (Tagliaferi 1987).

Η ζώνη συσσωμάτωσης αποτελείται από μια εναπόθεση άνθρακα που προκύπτει από την αποσύνθεση των ινών και της μήτρας που μπορεί να αφαιρεθεί με τρίψιμο με οινόπνευμα ή με μηχανική λείανση. Το μήκος των προεξέχοντων ινών εξαρτάται από τη διαφορά στη θερμοκρασία εξάτμισης μεταξύ των ινών και της μήτρας και τη θερμική αγωγιμότητα των υλικών. Ως αποτέλεσμα, το βάθος διείσδυσης της θερμότητας μέσα στο υλικό είναι υψηλότερο για τα φύλλα με ίνες που είναι προσανατολισμένες κάθετα στρωματοποιημένες

και αυτές οι ταινίες θα εμφανίζουν υψηλότερη ύφεση της μήτρας. Μια μελέτη της κοπής με λέιζερ σύνθετου κράματος αλουμινίου ενισχυμένου με ίνες SiC αποκάλυψε παρόμοια χαρακτηριστικά (Sprow 1987).

Στην κεντρική περιοχή αφαιρούνται τόσο η μήτρα όσο και οι ίνες, στη δεύτερη ζώνη αφαιρείται μόνο η μήτρα και στην τρίτη ζώνη η μήτρα αλουμινίου δεν επηρεάζεται. Η ζώνη 2 έχει πλάτος περίπου 50 μm και σε μικρή περιοχή μεταξύ των ζωνών 2 και 3, η μήτρα έχει λειανθεί και στη συνέχεια επανασηματίζεται.

Μία μελέτη κοπής με λέιζερ ενός υαλοκεραμικού πλέγματος ενισχυμένου με κλάσμα όγκου 50% ευθυγραμμισμένων ινών SiC έδειξε επίσης ίνες που προεξέχουν από τη μήτρα.



Εικόνα 13: Τυπικές επιφάνειες κοπής με λέιζερ (a) κάτωψη, (b) [14].

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το SiC τήκεται στους 2500 ° K περίπου 1000 ° K περισσότερους από η μήτρα και στη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα των ινών SiC σε σύγκριση με την κεραμική μήτρα (Ridealgh 1990). Η ζώνη θερμότητας που επηρεάζεται (HAZ – Heat Affected Zone) ορίζεται ως η περιοχή στην οποία οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν τη θερμοκρασία εξάτμισης της μήτρας. Το πλάτος της HAZ είναι ένα μέτρο της ποιότητας κοπής και εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες των συστατικών [10-14].

4.1.2 Επίδραση των συνθηκών λειτουργίας.

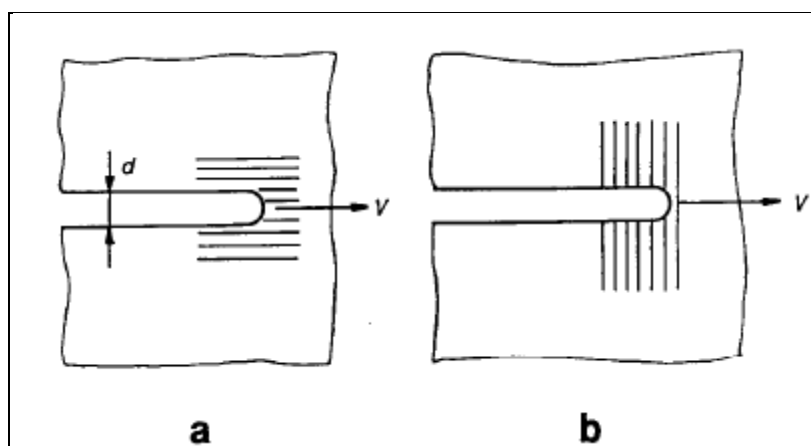
Στις λειτουργίες κοπής λέιζερ μπορούν να μεταβληθούν δύο παράμετροι: η ισχύς εξόδου και η ταχύτητα κοπής. Η ποιότητα κοπής συνήθως μετράται από το μέγεθος της HAZ και τη γεωμετρία της εντομής. Για να ελαχιστοποιηθεί η ζώνη HAZ, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για την παραγωγή πλήρους κοπής.

Για μια δεδομένη στάθμη ισχύος υπάρχει μια μέγιστη ταχύτητα κοπής για την οποία η HAZ είναι ελάχιστο. Σε ταχύτητες πάνω από τη μέγιστη, η δέσμη δεν περνάει από το πάχος του υλικού. Κατά την κοπή των μονοκατευθυντικών επιστρώσεων εποξειδικού άνθρακα, η μέγιστη ταχύτητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν η κατεύθυνση κοπής είναι παράλληλη και όχι κάθετη προς την κατεύθυνση της ίνας. Κατά την κοπή παράλληλα προς την κατεύθυνση της ίνας (Σχήμα 3 (α)), η θερμότητα που απομακρύνεται από τη δέσμη λείζερ από τις ίνες χρησιμεύει για την προθέρμανση του υλικού μπροστά από τη δέσμη και επομένως δεν χάνεται από τη διαδικασία κοπής. Μικρή θερμότητα θα διαχυθεί σε κατεύθυνση κάθετη στην κατεύθυνση κοπής λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας του σύνθετου υλικού στην εγκάρσια κατεύθυνση.

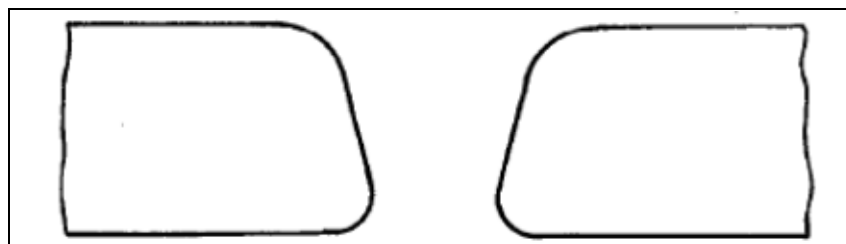
Κατά την κοπή σε μία κατεύθυνση κάθετη προς τις ίνες (Εικ. 14b) η θερμότητα που απομακρύνεται από τη δέσμη από την ίνα χάνεται και έτσι η απόδοση της μεθόδου είναι χαμηλότερη. Με τα ελασματοποιημένα (laminates) ή λιγότερο αγωγίμα σύνθετα όπως το αραμίδιο η επίδραση του προσανατολισμού των ινών είναι αμελητέα. Η αύξηση της ενέργειας εισόδου θα αυξήσει τη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (HAZ) και έτσι είναι δυνατό να προκύψουν πιο στρογγυλοποιημένες επάνω και κάτω επιφάνειες (Εικ. 15). Η απανθρακωμένη περιοχή (charring) αυξάνεται καθώς το πάχος του εξαρτήματος αυξάνεται, λόγω των υψηλότερων επιπέδων ενέργειας που απαιτούνται. Η ταχύτητα και η πίεση των ρεόντων αερίων φάνηκε να επηρεάζουν το πάχος της απανθρακωμένης περιοχής στην επιφάνεια κοπής.

Το πλάτος της εντομής (kerf) δεν είναι σταθερό διαμέσου του πάχους του υλικού και το πλάτος στην κορυφή w_t , είναι γενικά μεγαλύτερο από πλάτος της βάσης w_b . Για τους πολυεστέρες ενισχυμένους με αραμίδια και γυαλί, τόσο w_t , όσο και w_b αυξάνονται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα κοπής (Tagliaferri 1987).

Τελικά το πλάτος w_t , φτάνει σε ένα όριο περίπου ίσο με τη διάμετρο της κοιλότητας κατά την κοπή και το πλάτος w_b , τείνει στο μηδέν (Caprino et al., 1988, DiIlio 1987). Οι εγκάρσιες ρωγμές της μήτρας παρατηρήθηκαν επίσης κοντά στην περικοπή (Chryssolouris et al. 1988, 1990). Η απόσταση των ρωγμών αυξήθηκε μακριά από το άνοιγμα, υποδεικνύοντας ότι οι ρωγμές που προκλήθηκαν καθώς το έλασμα ψύχεται από τη θερμοκρασία σκλήρυνσης υπήρχαν πριν από την κοπή με λέιζερ. Η μέση απόσταση κρακ μπορεί επίσης να μειωθεί αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής [45,65].



Εικόνα 14: Κοπή λέιζερ σε μονοκατευθυντικά σύνθετα:(a)παράλληλα, (b) κάθετα, στη διεύθυνση των ινών [2,43].



Εικόνα 15: Στρογγύλεμα των γωνιών κατά την κοπή λέιζερ με μεγαλύτερη ενέργεια της απαιτούμενης [2,43].

Πίνακας 4.1.2 Τυπικές ταχύτητες κοπής λέιζερ για σύνθετα υλικά (Abrate & Walton, 1992).

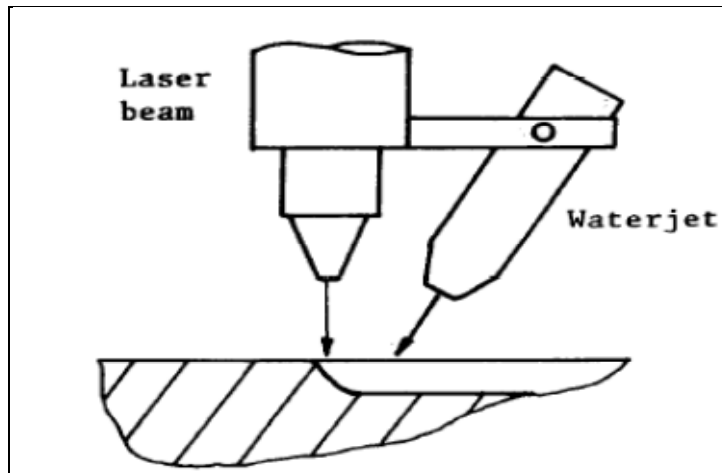
Material	Thickness (mm)	Cutting speed (mm s ⁻¹)	Power (W)
Glass-epoxy	3.2	5	250
	1.6	250	1200
	1.6	86.7	450
Glass-polyethylene	3.2	15	250
	4.8	30	250
Boron-epoxy	8.0	26.7	15 000
SiC-aluminium	0.38	30	150
Aramid-epoxy	2	16-133	500
Graphite-epoxy	0.5	38.1	400
Kevlar-epoxy	1.0	38.1	400
Kevlar-epoxy	2.36	89.7	300
Glass ceramic-SiC fibres	0.9	22	910-1400

Στον παραπάνω Πίνακα 4.1.2 δίνονται πάχη, ταχύτητες κοπής και απαιτούμενη ισχύς για την κοπή διαφόρων σύνθετων υλικών όπως καταγράφηκαν από τους Abrate & Walton 1992.

4.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα και χαρακτηριστικά κοπής λέιζερ.

Ανάμεσα σε άλλες εργασίες μια υπολογιστική μονοδιάστατη ανάλυση της μεταβατικής αγωγιμότητας της θερμότητας κοντά στην κοπτική άκρη παρουσιάστηκε από τον Tagliaferri 1987. Σκοπός της εργασίας ήταν η κατανόηση της ανάπτυξης θερμοκρασιακών βαθμίδων και η εκτίμηση του μεγέθους της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα. Καλή συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα ελήφθη για σύνθετα υλικά με οπλισμό αραμιδίου και γυαλιού.

Μόνο η ποιοτική συμφωνία επιτυγχάνεται με ενίσχυση οπλισμού με ίνες άνθρακα και η διαφορά αποδίδεται στην υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα των ινών, η οποία στη συνέχεια ακυρώνει μια μονοδιάστατη ανάλυση. Σε μια σειρά άρθρων, ο Chryssolouris και οι συνεργάτες του εξέτασαν την αυλάκωση με λέιζερ για σύνθετα υλικά και τις εφαρμογές του σε στροφή και άλεση (milling) με λέιζερ. Ένα αναλυτικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό του βάθους της κοιλότητας από τις παραμέτρους της διεργασίας και τις ιδιότητες του υλικού και με βάση την ισορροπία ενέργειας και την υποτιθέμενη κατανομή θερμοκρασίας, έδωσε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 16: Κοπή λέιζερ υποβοηθούμενο από δέσμη νερού ψύξης [10-14]

Πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα σχετικά με την περιστροφή με λέιζερ και διάφορα προτεινόμενα σχέδια για τόνρους με λέιζερ και μηχανή φρεζαρίσματος με λέιζερ. Η χρήση ενός πίδακα νερού σε συνδυασμό με τη δέσμη λέιζερ προτάθηκε προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα στην αυλάκωση με λέιζερ. Μια δέσμη νερού εκτός άξονα αφαιρεί τη θερμότητα από την επιφάνεια του αντικειμένου προς επεξεργασία μέσω της αλλαγής φάσης (βρασμού) και της μεταφοράς (Εικ16.). Ωστόσο, ο πίδακας νερού απορροφά επίσης ένα μέρος της ενέργειας δέσμης, μειώνοντας την ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας της δέσμης λέιζερ για την εξάτμιση υλικού. Συνολικά, μπορεί να επιτευχθεί μείωση έως 70% της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα με την ενσωμάτωση ενός πίδακα νερού, αποδίδοντας μια αντίστοιχη μείωση του βάθους της κοιλότητας κατά 45%.

4.1.4 Μέθοδοι Κοπής λέιζερ.

Οι μέθοδοι κοπής διαφέρουν και εξαρτώνται από το προς κατεργασία υλικό. Διακρίνονται σε Κοπή Τήξης και Κοπή υψηλής πίεσης.

Κατά την πρώτη μέθοδο (κοπή τήξης) το υλικό αναπτύσσει αρχικά υψηλές θερμοκρασίες έως τη θερμοκρασία τήξης του οπότε και τήκεται από την ενέργεια της ακτίνας Laser. Το αέριο, σε αυτήν την περίπτωση άζωτο σε υψηλή πίεση (10 έως 20 bar), χρησιμοποιείται για να απομακρύνει το τηγμένο υλικό από την κοιλότητα της κοπής. Το αέριο παράλληλα προστατεύει και τα οπτικά εστίασης από πιτσιλίσματα λιωμένου υλικού. Αυτή η μέθοδος κοπής προστατεύει την επιφάνεια κοπής από οξείδωση και χρησιμοποιείται κυρίως για ανοξείδωτο χάλυβα, αλουμίνιο και τα κράματά τους.

Κατά τη δεύτερη μέθοδο (κοπή οξείδωσης) το υλικό θερμαίνεται μέχρι της θερμοκρασίας ανάφλεξης. Το αέριο, σε αυτήν την περίπτωση Οξυγόνο σε μεσαία πίεση (0,4 έως 5 bar) χρησιμοποιείται για να οξειδώσει το υλικό και να απομακρύνει τα οξείδια έξω από το αυλάκι κοπής. Το αέριο παράλληλα προστατεύει και τα οπτικά εστίασης από πιτσιλίσματα λιωμένου υλικού. Η εξωθερμική αντίδραση του Οξυγόνου με το υλικό παρέχει το μεγαλύτερο ποσοστό της απαιτούμενης ενέργειας για την διαδικασία κοπής. Είναι δηλαδή καύση του υλικού, και από την θερμότητα που παράγεται στην καύση λιώνει το υλικό. Αυτή η μέθοδος είναι η ταχύτερη από όλες και χρησιμοποιείται στην οικονομική κοπή των ανθρακούχων χαλύβων.

4.1.5 Παράμετροι κοπής λέιζερ.

Ένα πλήθος παραμέτρων καθορίζουν τη διεργασία της κοπής με λέιζερ, όπως η ισχύς του λέιζερ, η συχνότητα των παλμών, ο τύπος του αερίου κοπής,

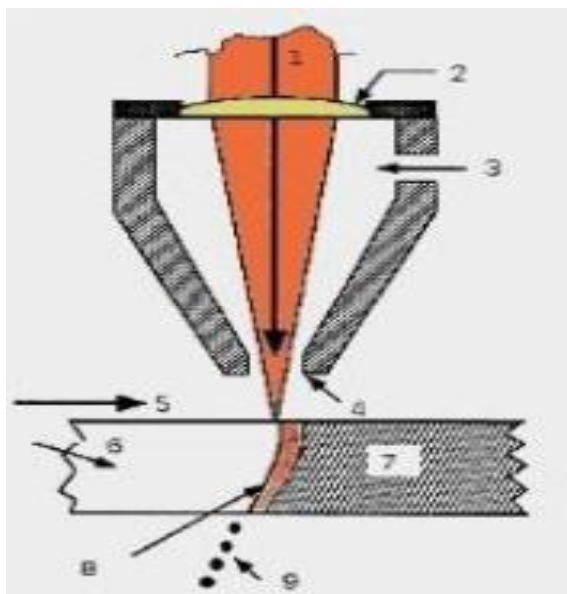
Πιο αναλυτικά:

Η ισχύς του Laser πρέπει να προσαρμόζεται στον τύπο και το πάχος του αντικειμένου που κατεργάζεται δηλ. που πρέπει να κοπεί. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα από άλλες πειραματικές μελέτες της βιβλιογραφίας, η μείωση της ισχύος μπορεί να είναι αναγκαία για την επιτυχία ακρίβειας κατά την κοπή σύνθετων υλικών πολύπλοκων σχημάτων ή πολύ μικρών κομματιών. Αντιθέτως, ισχύς Laser τουλάχιστον 1000 W είναι απαραίτητη για την κοπή φύλλου ανθρακούχου χάλυβα παχύτερου από 8mm. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι όσο μεγαλώνει το πάχος του υλικού, τόσο μεγαλώνουν οι ανωμαλίες στην επιφάνεια κοπής μεταλλικών αντικειμένων και τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ισχύς του Laser. Όσο μεγαλώνει το πάχος του υλικού οι ταχύτητες κοπής, με την ίδια ισχύ της γεννήτριας Laser, μειώνονται σημαντικά.

Όπως η ισχύς έτσι και **η συχνότητα των παλμών** πρέπει να ταιριάζει με την ειδική κάθε φορά εργασία κοπής. Για παράδειγμα, συνιστάται η κοπή των μικρών σχημάτων να γίνεται με μειωμένη συχνότητα παλμών. Η συχνότητα παλμών μειώνεται κατά τη διεργασία της διάτρησης. Η διάτρηση μπορεί να γίνει με πλήρη ισχύ ή σιγά-σιγά χρησιμοποιώντας την «τεχνική της ράμπας» (Ramp Mode). Με αυτή την μέθοδο η ισχύς του Laser αυξάνει σιγά-σιγά, διατηρείται σταθερή μέχρι να ολοκληρωθεί η διάτρηση, και μετά βαθμιαία ξαναπέφτει.

Ο τύπος του αερίου και οι απαιτήσεις της ποιότητας κοπής είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για τον τύπο του αερίου που θα χρησιμοποιηθεί. Εύφλεκτα υλικά, όπως το ξύλο, δεν μπορούν π.χ., να κοπούν με οξυγόνο, αφού το κομμάτι που κόβεται μπορεί να αναφλεγεί. Το οξυγόνο θα έπρεπε να χρησιμοποιείται μόνο σε μεταλλικά κομμάτια με επιφάνεια κοπής απαλλαγμένη από οξειδία. Το οξυγόνο δημιουργεί μία λεπτή επιφάνεια οξειδωσης κατά την εξώθερμη καύση του υλικού. Κατά την κοπή μεταλλικών αντικειμένων με πυρσό Laser (Κοπή Οξειδωσης), η ποιότητα – καθαρότητα του αερίου σε οξυγόνο που χρησιμοποιείται είναι σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα κοπής. Ίχνη υγρασίας ή αζώτου οδηγούν στην δημιουργία γρεζιού. Αυτή η «μόλυνση» ουσιαστικά του αερίου με ξένες ουσίες μπορεί να γίνει κατά την αντικατάσταση της φιάλης και την σύνδεση με όχι απόλυτα καθαρές φιάλες. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερη η χρήση οξυγόνου από δεξαμενή και όχι από φιάλη. Συνιστώμενη καθαρότητα του οξυγόνου: 99,95%. Όταν χρησιμοποιείται οξυγόνο καθαρότητας 99,5% η ταχύτητα κοπής μειώνεται κατά περίπου 10%. Από την άλλη πλευρά η ποιότητα του αζώτου ως αερίου κοπής είναι επίσης πολύ σημαντική για την κοπή ανοξειδωτου χάλυβα με υψηλή πίεση. Ακόμα και ελάχιστα ίχνη οξυγόνου μπορούν να οδηγήσουν στον σχηματισμό ενός λεπτού στρώματος οξειδίου.

Η πίεση του αερίου κοπής είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας της διαδικασίας κοπής. Το πάχος του φύλλου του υλικού που κατεργάζεται σχετίζεται άμεσα με την πίεση του αερίου. Κατά τη μέθοδο κοπής οξειδωσης (κοπή υψηλής πίεσης), τα λεπτά μεταλλικά κομμάτια κόβονται με υψηλότερη πίεση αερίου απ' ό τι τα χοντρά. Η πίεση του αερίου πρέπει να ρυθμίζεται πολύ προσεκτικά, γιατί ακόμα και ελάχιστες αλλαγές στην πίεση του οξυγόνου επηρεάζουν την ποιότητα κοπής. Αν η πίεση είναι πολύ χαμηλή, τα υγρά προϊόντα της οξειδωσης παραμένουν στη βάση του υλικού που κόβεται δημιουργώντας μόνιμο γρέζι που μερικές φορές ξανακλείνει το αυλάκι – την κοιλότητα της κοπής. Αν από την άλλη πλευρά η πίεση είναι υπερβολικά υψηλή οι κάτω άκρες της κοπής καίγονται και τις περισσότερες φορές δεν προκύπτει το επιθυμητό αποτέλεσμα.



- 1= Ακτίνα Laser,
- 2=Φακός Εστίασης,
- 3=Είσοδος Βοηθητικού Αερίου,
- 4=Κεφαλή Κοπής(μπεκ),
- 5=Κατεύθυνση Κοπής,
- 6=Επιφάνεια Κοπής,
- 7=Κάθετη Τομή Φύλλου Εργασίας,
- 8=Στρώμα Τήξης,
- 9=Απομάκρυνση Τηγμένης Μάζας

Εικόνα 17: Χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής λέιζερ [32].

Η επιλογή του σωστού ακροφύσιου (διάμετρος και τύπος ακροφυσίου) για την εκπομπή του αερίου στη κοπή είναι πολύ σημαντική. Για παράδειγμα, στην κοπή υψηλότερης πίεσης χρησιμοποιούνται ακροφύσια με μεγαλύτερο στόμιο απ' ότι στην κανονική κοπή. Παραμορφωμένο στόμιο, π.χ. σχήματος ωοειδούς μετά από κάποια σύγκρουση, έχει το ίδιο αποτέλεσμα με μία όχι καλά εστιασμένη έκκεντρη ακτίνα Laser, δηλαδή κοπή που έχει λάθη κατευθυντικότητας. Αν το ακροφύσιο είναι λίγο μεγαλύτερο, η κοπή καταναλώνει περισσότερο αέριο, αλλά η ποιότητά της δεν επηρεάζεται αρνητικά σε αισθητό βαθμό. Αν το ακροφύσιο είναι πολύ μικρό, η κοπή δεν είναι καθαρή και τα υγρά οξείδια κολλάνε στην κάτω άκρη της επιφάνειας κοπής. Σε ακραίες περιπτώσεις η κοπή δεν ολοκληρώνεται και τα αντικείμενα παραμένουν ενωμένα με τη λαμαρίνα.

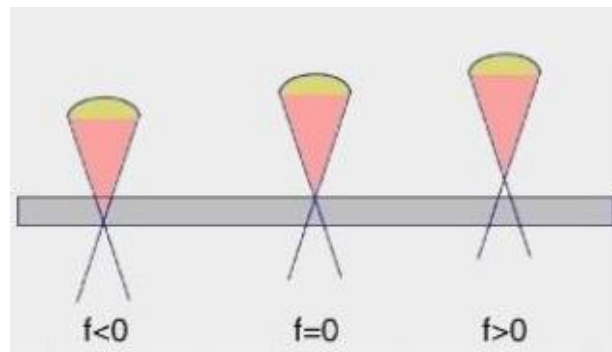
Η απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια του φύλλου κοπής διατηρείται στην προγραμματισμένη τιμή με κάποιο σύστημα ελέγχου του ύψους χωρίς να έρχεται σε επαφή με το κομμάτι που δουλεύεται. Η απόσταση αυτή είναι πολύ σημαντική για την ποιότητα κοπής με Laser. Κατ' αρχήν, όσο μικρότερη είναι, τόσο καλύτερα τα ποιοτικά αποτελέσματα κοπής. Όμως, για λόγους ασφαλείας των εργαλείων, μία ελάχιστη απόσταση, περίπου 0,65 mm, είναι συνετό να τηρείται.

Τα χαρακτηριστικά οπτικών του λέιζερ επίσης είναι σημαντικός παράγοντας για την κοπή. Τα οπτικά εστίασης εστιάζουν την ακτίνα σε ένα μόνο σημείο περνώντας από το στόμιο του ακροφυσίου. Αυτή η εστίαση γίνεται είτε με φακό σεληνιούχου ψευδαργύρου ή με παραβολικό κάτοπτρο. Ο φακός εστίασης πρέπει να διατηρείται πάντα καθαρός και να ελέγχεται για πιθανές φθορές. Οποιαδήποτε προσβολή από άλλα υλικά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του, αφού απορροφάται μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας του Laser, με αποτέλεσμα την παραμόρφωσή του. Αν κάτι τέτοιο συμβεί αυτό η εστία ανεβαίνει ψηλότερα. Πολύ μεγάλη ρύπανση οδηγεί στην καταστροφή του φακού. Οποιαδήποτε παραμόρφωση του φακού έχει αποτέλεσμα να σχηματίζεται γρέζι και να αυξάνει ο βαθμός ανωμαλίας (τραχύτητα) στις επιφάνειες κοπής. Στον ανθρακούχο χάλυβα δημιουργείται το φαινόμενο των μικροκρατήρων μέσα στη μάζα του μετάλλου, δημιουργούνται σημεία τήξης και αεριοποίησης του υλικού, οπότε η ποσότητα του αεριοποιημένου υλικού εκφεύγει προς τα επάνω, το υλικό που βρίσκεται δίπλα στο σημείο που δημιουργήθηκε το κενό ρέει για να το γεμίσει, και δημιουργείται μικρός κρατήρας που στερεοποιείται και παραμένει όταν η λαμαρίνα κρυώσει. Για τις εστιακές αποστάσεις συνήθως για την κοπή χρησιμοποιούνται οπτικά συστήματα με εστιακή απόσταση 12,7 και

19 mm. Τα συστήματα με εστιακή απόσταση 12,7 mm χρησιμοποιούνται για κοπή λεπτών υλικών. Για παχύτερα υλικά χρησιμοποιούνται οπτικά με εστιακή απόσταση στα 19 mm. Η μικρότερη εστιακή απόσταση στα λεπτά υλικά έχει ως αποτέλεσμα στενότερο αυλάκι – κοιλότητα κοπής και μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος για την ίδια – σταθερή ισχύ της γεννήτριας Laser.

Ως συνέπεια, οι ταχύτητες κοπής με τα οπτικά των 12,7 mm είναι ελαφρά μεγαλύτερες για το ίδιο πάχος υλικού και ισχύ της γεννήτριας. Με φακούς αυτής της εστιακής απόστασης κόβονται συνήθως λεπτά υλικά – μικρού πάχους για λόγους οικονομίας. Τα οπτικά των 19 mm έχουν το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου βάθους εστίας, δηλαδή διαθέτουν δυνατότητα κοπής σε μεγαλύτερα πάχη – βάθη.

Η ακριβής θέση της Εστίας σε σχέση με το Υλικό είναι σημαντική προϋπόθεση για καλά αποτελέσματα κοπής.



Εικόνα 18: Θέση εστίασης ως προς το πάχος των υλικών [32].

4.1.6 Ταχύτητες και Επιταχύνσεις κοπής λέιζερ.

Η ταχύτητα κοπής πρέπει να βρίσκεται σε αντιστοιχία με τον τύπο και το πάχος του υλικού.. Μικρότερη ή μεγαλύτερη ταχύτητα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας κοπής, δημιουργία γρεζιού και μεγάλες γραμμές πάνω στην επιφάνεια κοπής, τις λεγόμενες και “γραμμές υστέρησης”, καθώς ο πυρσός φεύγει από το σημείο κοπής γρηγορότερα απ' ό,τι θα χρειαζόταν για να την ολοκληρώσει τη διαδικασία. Οι σύγχρονοι μηχανισμοί αυτόματου ελέγχου, οι εργαλειομηχανές CNC, αναλαμβάνουν πλέον τον έλεγχο και ρυθμίζουν την επιτάχυνση αυτόματα, ανάλογα με το προς κατεργασία υλικό αφού διαθέτουν βιβλιοθήκες με τις θερμομηχανικές ιδιότητες τω περισσοτέρων σύνθετων υλικών.

Οι θερμικές ιδιότητες των μεταλλικών υλικών έχουν σημαντική επίδραση στην ευκολία κοπής με Laser. Η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η ανακλαστικότητα είναι τρεις από αυτές. Αυτές οφείλονται στην σύνθεση των υλικών και τις μεθόδους παραγωγής τους. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, τα κράματα – σύνθετα αλουμινίου κόβονται σε πάχος μόνο περίπου το 30% του πάχους που κόβεται ο χάλυβας. Η ποιότητα κοπής εξαρτάται από τον τύπο του σύνθετου πάντα. Η περίπτωση κοπής μη μεταλλικών υλικών κοπής Laser πρέπει να ελέγχεται ξεχωριστά σε κάθε ειδική περίπτωση. Φυσικά οργανικά υλικά όπως το δέρμα, το ξύλο, το πεπιεσμένο χαρτόνι και το χαρτί μπορούν να κοπούν με καλά αποτελέσματα, αλλά με έναν ελαφρύ αποχρωματισμό της επιφάνειας κοπής οφειλόμενο στην ενανθράκωση. Από την άλλη πλευρά οργανικά συνθετικά όπως το ακρυλικό (πλεξιγκλάς/φάιμπερ γκλας), το PVC και η πολυουρεθάνη μπορούν να κοπούν με καλά αποτελέσματα αλλά πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προφύλαξης για την παγίδευση και απαγωγή των επικίνδυνων για την υγεία καπναερίων που παράγονται. Ανόργανα υλικά όπως

κρύσταλλο ή κεραμικά μπορούν να κοπούν αλλά πάλι πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις για την αποφυγή ρωγμών από την τοπική αύξηση ενέργειας και θερμότητας.

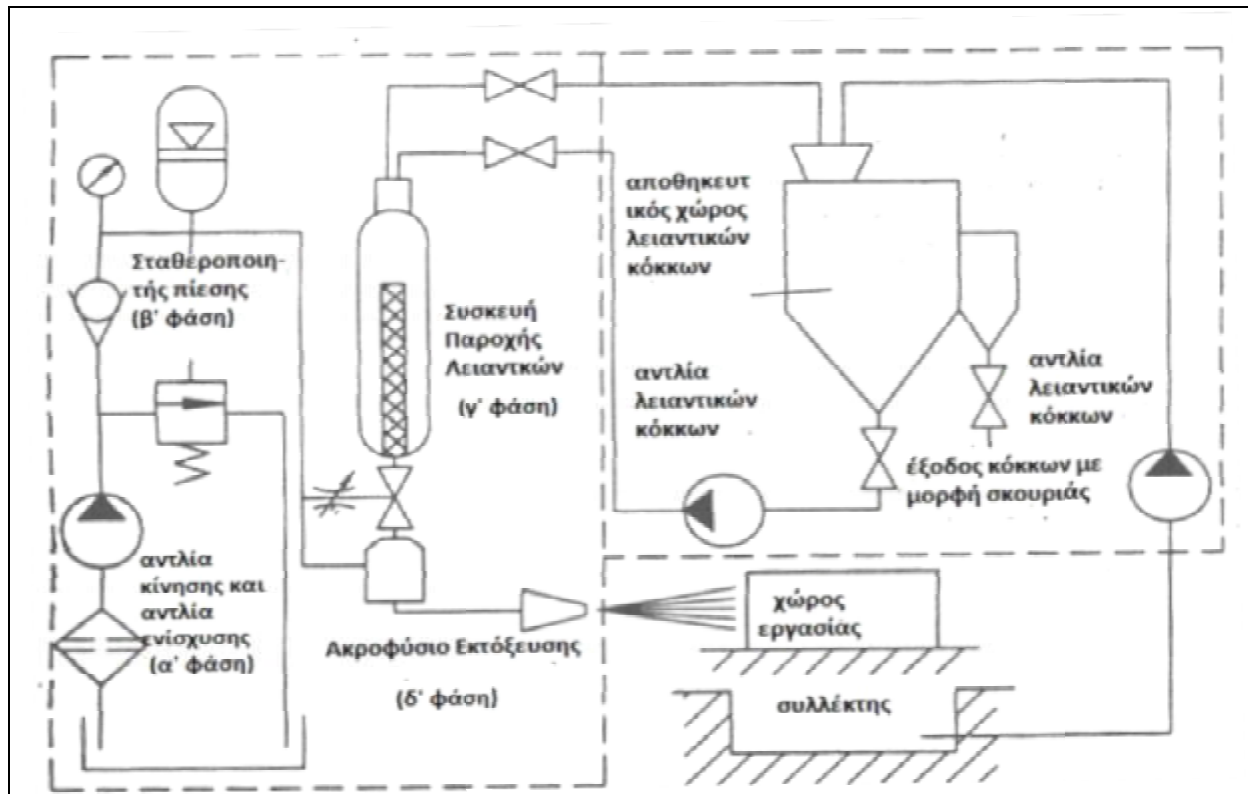
4.2 Μέθοδος Υδροκοπής – Αρχή λειτουργίας.

Η υδροκοπή είναι μια βιομηχανική τεχνική για την κοπή δοκιμίων. Στην υδροκοπή χρησιμοποιείται μια δέσμη νερού υψηλής πίεσης, η οποία λειτουργεί ως κοπτικό εργαλείο. Όταν πρόκειται για μαλακά υλικά, όπως το ξύλο ή ελαστομερή υλικά, χρησιμοποιείται μόνο νερό. Αντίθετα, όταν πρόκειται για σκληρότερα υλικά, όπως ο χάλυβας, το τιτάνιο ή σύνθετα υλικά, τότε χρησιμοποιούνται και πρόσθετα αποξεστικά σωματίδια ως εναιώρημα στο νερό. Η υδροκοπή είναι η προτιμότερη μέθοδος, όταν δεν είναι επιθυμητή η μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται με άλλες μεθόδους.

Η υδροκοπή είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία, το πρώτο σύστημα έχει εγκατασταθεί το 1971. Χρησιμοποιείται σε προηγμένα σύνθετα υλικά με οργανικές, μεταλλικές και κεραμικές μήτρες για εργασίες όπως κοπή, λείανση, στροφή και διάτρηση. Η αρχή είναι να παράγεται ένα λεπτό φιλμ νερού με πολύ υψηλές πιέσεις και υψηλές ταχύτητες και, κατά την κρούση, το υλικό αφαιρείται με εντοπισμένη διάτμηση. Χρησιμοποιούνται πιέσεις μέχρι 400 MPa και οι διάμετροι της δέσμης νερού είναι στην περιοχή 0.08-0.5 mm. Με καθαρό νερό μπορούν να κοπούν ελασματοποιημένα αραμιδικά-εποξικά ή υαλο-εποξικά μέχρι πάχους 6.35 mm, ενώ για το γραφίτη-εποξικό το ανώτερο όριο είναι περίπου 0.15 mm. Η απόδοση βελτιώνεται σημαντικά όταν προστίθενται λειαντικά σωματίδια. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούν να κοπούν ελασματοποιημένα εποξειδικά γραφίτη έως πάχους 10 mm και για πάχος 3.17 mm μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταχύτητα κοπής 1m/min- που είναι σχεδόν τετραπλάσια από εκείνη των παραδοσιακών μεθόδων (Abrate & Walton 1992).

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της υδροκοπής περιλαμβάνουν τις υψηλές ταχύτητες κοπής, την απουσία ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας με λέιζερ και την απομάκρυνση της σκόνης. Το πλάτος κοπής κυμαίνεται μεταξύ 0.5-2.5 mm και μπορούν να διατηρηθούν ανοχές των 0.4 mm, τα οποία είναι επαρκή τόσο για τις μηχανικές όσο και για τις κολλητικές ενώσεις. Το σύστημα είναι πολύ ευέλικτο και μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί (Doyle et al. 1990, Howarth et al. 1990, Adams, 1986). Έχουν ταυτοποιηθεί αρκετά μειονεκτήματα της κατεργασίας ύδατος. Σε υψηλές ταχύτητες κοπής, εισάγονται αποκολλήσεις διαχωρισμοί στο τεμάχιο εργασίας. Είναι δυνατή η εμφάνιση προβλημάτων στα σύνθετα κοπής αραμιδίου που εκλύουν τις ίνες, και σε μερικές περιπτώσεις η απορρόφηση υγρασίας κατά την κοπή ύδατος μπορεί να οδηγήσει σε αποκολλήσεις.

Η τεχνική της υδροκοπής βασίζεται στη χρήση νερού υπερβολικά υψηλών πιέσεων (UHP - Ultra Hydro Pressure) ως τέμνον εργαλείο. Το νερό εξέρχεται των σωληνώσεων εντός των οποίων κυκλοφορεί, μέσω ενός πολύ μικρού ακροφυσίου με την πολύ υψηλή πίεση που αναφέρθηκε παραπάνω, η οποία υπενθυμίζεται ότι είναι στατική πίεση. Κατά την έξοδο του νερού από το ακροφύσιο η πολύ υψηλή αυτή στατική πίεση μετατρέπεται σε δυναμική (πίεση ταχύτητας). Στην πραγματικότητα το νερό κατά την έξοδο μοιάζει ως σύντομη έκρηξη υψηλής πίεσης με δυνατότητα κοπής π.χ ξύλου και άλλων υλικών.



Εικόνα 19: Ο κύκλος του νερού στην υδροκοπή [32].

Ουσιαστικά η τεχνική της υδροκοπής βασίζεται στην αρχή της μιας ακτίνας νερού πολύ υψηλής ταχύτητας άρα και μεγάλης δύναμης, ικανής να κόψει διάφορα υλικά. Βασική διαδικασία είναι η ροή του νερού με τη βοήθεια αντλίας που μέσω των υδραυλικών σωληνώσεων καταλήγει στο στόμια εκτόξευσης.

Η εργαλειομηχανή παράγει και ελέγχει νερό σε πολύ υψηλές πιέσεις (συχνά μεγαλύτερες από 6.000 bar) κάτι που απαιτεί μεγάλη προσοχή αφού σε αυτές τις πιέσεις μία διαρροή μπορεί να προκαλέσει μόνιμη ζημιά διάβρωσης στα εξαρτήματα της μηχανής. Στις μέρες μας οι κατασκευαστές των εργαλειομηχανών υδροκοπής έχουν φροντίσει για την σύνθετη τεχνολογία υλικών και την εφαρμοσμένη μηχανική των τέμνων-άκρων οπότε ο χρήστης χρειάζεται μόνο να είναι πεπειραμένος στη βασική λειτουργία της υδροκοπής.

Βασικές μονάδες της εργαλειομηχανής είναι οι αντλίες ενίσχυσης και κίνησης. Αυτές οι αντλίες (α -φάση), δημιουργούν την υψηλή πίεση στο νερό, ενώ μετέπειτα ο σταθεροποιητής (β -φάση) διατηρεί σταθερή την υψηλή πίεση του νερού ώστε στη συνέχεια στο στόμιο εκτόξευσης (δ -φάση) να μετατρέψει την υψηλή σταθερή πίεση σε μία υπερηχητική ακτίνα υδροκοπής. Επίσης για την λειαντική υδροκοπή (abrasive waterjet) υπάρχει η συσκευή παροχής λειαντικών (γ - φάση) μαζί με τον απαραίτητο αποθηκευτικό χώρο των κόκκων και την αντλία κίνησής τους.

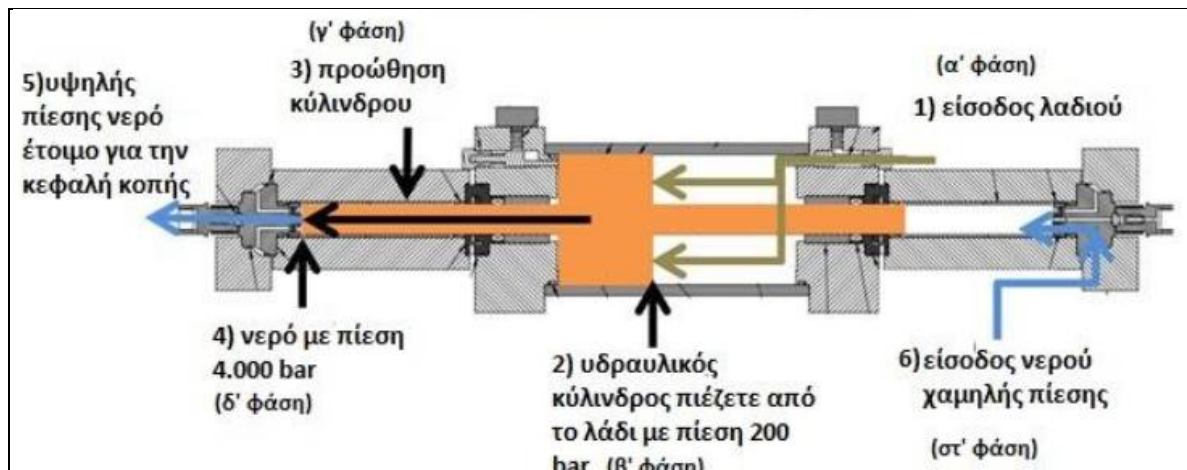
Αναλυτικότερα τα επιμέρους τμήματα της εργαλειομηχανής περιγράφονται ως ακολούθως:

- ∅ Η άμεση αντλία κίνησης λειτουργεί όπως μία αντλία χαμηλής πίεσεως. Είναι συνήθως μια τριβάθμια αντλία (Εικ.20) που λειτουργεί με την προϋπόθεση ότι η στάθμη του νερού, που ελέγχεται με αυτοματισμό, βρίσκεται στο σωστό επίπεδο. Οι αντλίες αυτές μπορούν να παραδώσουν μέγιστη συνεχή πίεση λειτουργίας 10%-25% μικρότερη από την ονομαστική τους τιμή στις μονάδες των αντλιών ενίσχυσης,.



Εικόνα 20: Αντλίες (α) Άμεσης κίνησης, (β) Ενίσχυσης (model 50i –S IIESL)

- Ø Στην αντλία ενίσχυσης υπάρχουν δύο κυκλώματα υγρού, το κύκλωμα του νερού και του υδραυλικού κυκλώματος. Το κύκλωμα του νερού αποτελείται από τα φίλτρα στην είσοδο του νερού, την αντλία προώθησης, τον ενισχυτή και τον σταθεροποιητή πίεσης.
- Ø Ο σταθεροποιητής πίεσης είναι ένα σύστημα ρύθμισης - σταθεροποίησης της πίεσης σε επίπεδα χαμηλότερα της πίεσης εισόδου. Το νερό της βρύσης αρχικά φιλτράρεται, στη συνέχεια μεταφέρεται στην ενισχυτική αντλία όπου η πίεση του νερού από τα 6 bar συμπιέζεται έως και 6000 bar. Στη συνέχεια μέσω των υδραυλικών και πριν φτάσει το νερό στην κοπτική κεφαλή περνάει πρώτα από τον σταθεροποιητή πίεσης. Ο σταθεροποιητής πίεσης εξασφαλίζει ότι το νερό εξέρχεται από την κεφαλή κοπής συνεχώς και με σταθερή πίεση. Χωρίς το σταθεροποιητή το νερό θα είχε μεταβλητή πίεση αφήνοντας σημάδια στο υλικό που κόβεται.
- Ø Το υδραυλικό κύκλωμα, για τη δημιουργία του νερού υψηλής πίεσης, αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα, την υδραυλική αντλία, την δεξαμενή λαδιού, την πολλαπλή και το έμβολο (Εικ.21). Ένα ηλεκτρικό μοτέρ κινεί την υδραυλική αντλία, που τραβά το λάδι από τη δεξαμενή και το συμπιέζει στα 200 bar. Το υπό πίεση λάδι διοχετεύεται στην πολλαπλή διανομής όπου οι βαλβίδες του συλλέκτη αποστέλλουν το υπό πίεση υδραυλικό λάδι στη μία ή στην άλλη πλευρά του εμβόλου (α - φάση). Το εισερχόμενο λάδι πιέζει το έμβολο (β - φάση) της εμβολοφόρου παλινδρομικής αντλίας, με πίεση 200bar, στην απέναντι πλευρά. Το προωθούμενο έμβολο συμπίεσης του νερού (γ φάση) ανεβάζει την πίεση του νερού στα 4000bar (δ - φάση). Ο ενισχυτής είναι ουσιαστικά μία παλινδρομική αντλία με το έμβολο να παλινδρομεί δεξιά - αριστερά, παρέχοντας υψηλής πίεσης νερό από τη μία πλευρά σε κάθε παλινδρόμηση του εμβόλου. Κατά την διάρκεια της συμπίεσης του νερού από τη μία πλευρά, χαμηλής πίεσης νερό γεμίζει την άλλη πλευρά του ενισχυτή (στ - φάση). Το υδραυλικό λάδι, της πλευρά που συμπιέσε το νερό, εξέρχεται από τον θάλαμο με το άνοιγμα της κατάλληλης βαλβίδας και στη συνέχεια ψύχεται κατά την διάρκεια της επιστροφής του στην δεξαμενή συγκέντρωσης ώστε να συμμετέχει στον επόμενο κύκλο λειτουργίας του ενισχυτή.



Εικόνα 21: Το κύκλωμα του νερού στην αντλία ενίσχυσης – ροή νερού υψηλής πίεσης [32].

Οι μονάδες υδροκοπής είναι σχεδιασμένες για μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ επίσης έχουν σχεδιαστεί ώστε πιθανές αστοχίες να γίνονται με ασφάλεια. Τα συστήματα υδροκοπής αποτυγχάνουν σταδιακά και όχι στιγμιαία, καθώς οι συνδέσεις και τα σφραγισμένα μέρη αρχίζουν σιγά-σιγά να εμφανίζουν δαρροές μέσα από ειδικά σχεδιασμένες οπές. Συνίσταται ο χειριστής ή ο υπεύθυνος συντήρησης να προβαίνει σε περιοδικό έλεγχο τακτικά (π.χ εβδομαδιαία) ενώ υπάρχουν και αισθητήρες τερματισμού στη μονάδα άντλησης για την προστασία από την φθορά της αντλίας. Η αντιμετώπιση προβλημάτων ενός ενισχυτή είναι αρκετά απλή, καθώς η διαρροή ζεστού νερού δηλώνει απώλεια υψηλής πίεσης ενώ διαρροή κρύου νερού υποδεικνύει απώλεια χαμηλής πίεσης. Μόλις η αντλία υψηλής πίεσης έχει δημιουργήσει την πίεση του νερού, το νερό μεταφέρεται στην κοπτική κεφαλή. Εκτός από την μεταφορά του νερού υψηλής πίεσης τα υδραυλικά παρέχουν ελεύθερη κυκλοφορία στην κοπτική κεφαλή. Ο πιο κοινός τύπος της υψηλής πίεσης υδραυλικών είναι ειδικός σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα.

Συνοψίζοντας αξίζει να σημειωθεί ότι αρχικά η υδροκοπή ως τεχνική εφαρμόστηκε αποκλειστικά για μαλακά υλικά. Ωστόσο, η προσθήκη αποξεστών ως εναιώρημα στο νερό, οδήγησε σε συνδυασμό με την εξέλιξη των αντλιών υψηλής πίεσης, στα σημερινά συστήματα υδροκοπής τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε σκληρά σύνθετα υλικά [11]. Τα συστήματα υδροκοπής μπορούν πλέον να κόβουν υλικά με διάμετρο μικρότερη από 380 μm. Οι αποξεστές που χρησιμοποιούνται συχνά είναι σωματίδια λυγνίτη ή οξειδία του αλουμινίου, τα οποία βοηθούν στην κοπή σκληρών και σύνθετων υλικών.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υδροκοπής είναι η δυνατότητα να κόβεται το τεμάχιο χωρίς να αλλοιώνεται η εσωτερική του δομή, καθώς επίσης και η δυνατότητα για ψύξη κατά την κοπή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι παρατηρούμενες μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τα συστήματα υδροκοπής είναι δυνατόν να κατασκευάσουν περίπλοκα σχήματα, ενώ υποστηρίζουν και κεφαλές τρισδιάστατης διαμόρφωσης για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στο τελικό σχήμα [12]. Η λεπτή δέσμη του νερού, έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρότερη απώλεια σε υλικό, εξοικονομώντας σημαντικά τη δαπάνη αγοράς και ανακύκλωσης υλικού. Λόγω της φύσης των μηχανημάτων υδροκοπής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά σε κάθε βιομηχανική εφαρμογή όπως οι αφροί, τα πλαστικά, το δέρμα, η πέτρα, το γυαλί, τα κεραμικά, τα σύνθετα υλικά.

4.2.1 Καθαρή Υδροκοπή.

Καθαρή υδροκοπή είναι η αρχική μέθοδος κοπής με νερό. Η μεγαλύτερη χρήση της έγινε για την κοπή των προϊόντων χαρτιού, σφράγισης υλικών, πλαστικών, αφρών,

υφασμάτων, εσωτερικών τμημάτων αυτοκινήτου. Ως τεχνική δημιουργεί τη λιγότερη υγρασία στο υλικό, η κοπή μπορεί να είναι εξαιρετικά ακριβής. Τα χαρακτηριστικά της καθαρής υδροκοπής είναι :

- Ø λεπτή ακτίνα κοπής (0,004 έως 0.010 της ίντας διάμετρο),
- Ø εξαιρετικά λεπτομερής γεωμετρία,
- Ø πολύ μικρή απώλεια υλικού κατά την κοπή,
- Ø κοπή γρήγορη - υψηλής ταχύτητας χωρίς παραγωγή θερμότητα,
- Ø ακριβής διάμετρος κοπής στο κατεργαζόμενο υλικό,
- Ø κοπή σε ελαφριά και μαλακά υλικά,
- Ø εξαιρετικά χαμηλές δυνάμεις κοπής.

Πλέον είναι ώριμη η άποψη ότι η υδροκοπή είναι μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού που μπορεί να περιγραφεί ως μια υπερηχητική διαδικασία διάβρωσης. Η στατική πίεση και η πίεση ταχύτητας μπορούν να ειπωθούν ως δύο ευδιάκριτες μορφές ενέργειας, με την πίεση του νερού της αντλίας να μετατρέπεται σε υψηλή ταχύτητα του νερού μέσω του ακροφύσιου που υπάρχει στο τέλος των σωληνώσεων των υδραυλικών εγκαταστάσεων. Το ακροφύσιο έχει μια μικρή οπή από την οποία το νερό περνά μετατρέποντας τη δυναμική ενέργεια (πίεση) του νερού σε κινητική (ταχύτητα). Για παράδειγμα νερό πίεσης περίπου 2760 bar μπορεί να λάβει ταχύτητα έως και 2 Mach ενώ με πίεση 4130 bar προκύπτει ταχύτητα πάνω από 3 Mach.

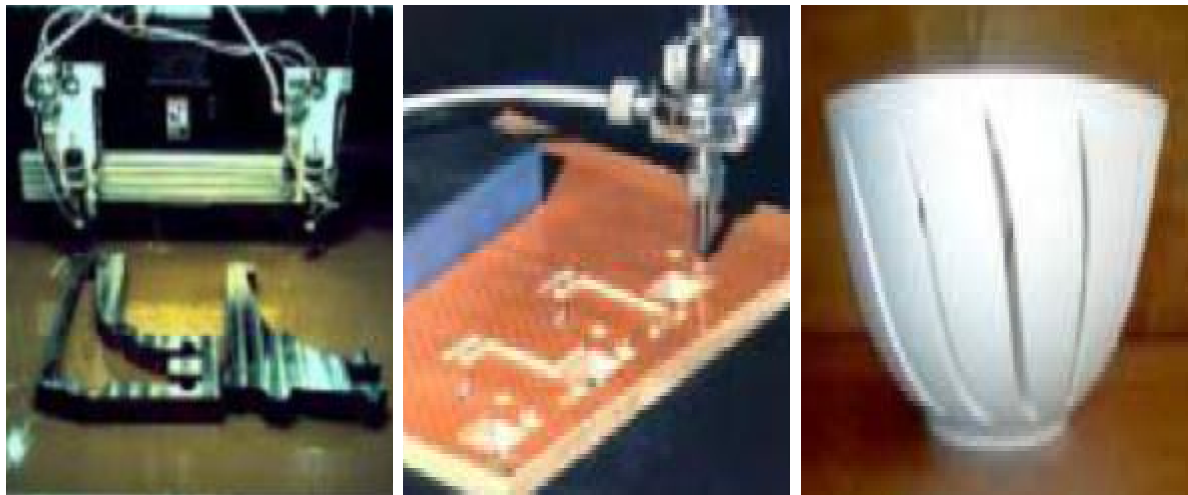
Η άκρη του ακροφυσίου κατακευάζεται από τρεις τύπους υλικών (ζαφείρι, ρουμπίνι και διαμάντι). Το ζαφείρι είναι το πιο κοινό υλικό, δημιουργεί στο νερό ρεύμα αρκετάς καλής ποιότητας και σε συνδιασμό με την καλή ποιότητα νερού έχει διάρκεια ζωής 50-100 ώρες. Επίσης η διάρκεια ζωής του ζαφειριού στην λειαντική υδροκοπή είναι η μισή από αυτή της καθαρής υδροκοπής. Το ρουμπίνι ταιριάζει περισσότερο στην λειαντική υδροκοπή και το κόστος του είναι σχεδόν ίδιο με το ζαφείρι ενώ η διάρκεια ζωής του είναι 80-150 ώρες. Το διαμάντι έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (800-2.000 ώρες) αλλά είναι 10 με 20 φορές πιο ακριβό. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε 24ωρες διεργασίες ενώ σε αντίθεση με τους άλλους τύπους ακροφυσίων, μπορεί μερικές φορές να καθαριστεί υπερηχητικά και να επαναχρησιμοποιηθεί.

4.2.2 Αποξεστική Υδροκοπή (Abrasive waterjet).

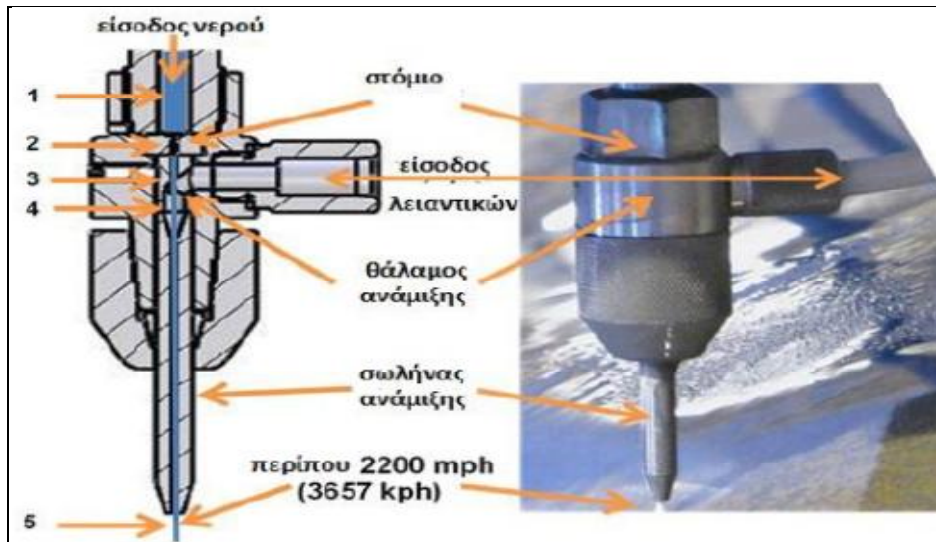
Η διαφορά της υδροκοπής με χρήση λειαντικού υγρού ως προς την καθαρή υδροκοπή συνίσταται στην επιπρόσθετη χρήση λειαντικού - αποξεστικού υγρού. Τα μόρια του λειαντικού υγρού σε συνδιασμό με το νερό υψηλής πίεσης, έχουν τη δυνατότητα να κόβουν ισχυρότερα υλικά όπως μέταλλα , πέτρες, κεραμικά, αλουμίνιο και σύνθετα υλικά.

Τα χαρακτηριστικά της αποξεστικής - λειαντικής υδροκοπής είναι (Ιτσόπουλος 2014):

- Ø Εξαιρετικά ευέλικτη διαδικασία,
- Ø Κοπή χωρίς παραγωγή θερμότητας,
- Ø Κοπή χωρίς μηχανικές καταπονήσεις,
- Ø Εύκολος προγραμματισμός της εργαλειομηχανής, με ευκολία μικρορυθμίσεων,
- Ø Λεπτό πάχος κοπής (0.5mm - 1.3mm διάμετρο),
- Ø Εξαιρετικά λεπτομερής γεωμετρία,
- Ø Μεγάλη διάμετρο κοπής στο κατεργαζόμενο υλικό (εώς και 250mm),
- Ø Μικρή απώλεια υλικού κατά την κοπή,
- Ø Μικρές δυνάμεις κοπής (κάτω από τα 32N),
- Ø Ελάχιστη έως και καθόλου εμφάνιση γρεζιού.



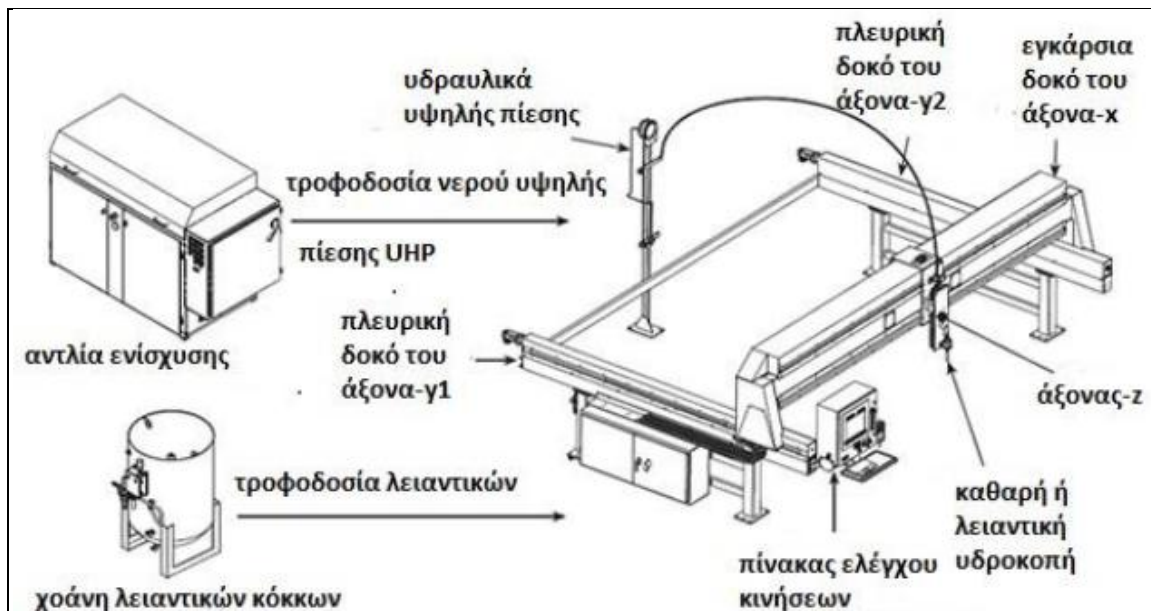
Εικόνα 22: Υδροκοπή αποξεστική (α)σε τιτάνιο, (β) σε γραφίτη, (γ) σε αλουμίνιο.



Εικόνα 23: Σωλήνας ανάμιξης και στόμιο εκτόξευσης σε τομή.

Στη λειαντική υδροκοπή η κοπή ξεκινάει με καθαρή υδροκοπή στην συνέχεια μέσα στο ακροφύσιο προστίθεται το αποξεστικό-λειαντικό υγρό και ενώνετε με το νερό στον σωλήνα ανάμιξης λίγο πριν το στόμιο εκτόξευσης. Στο τέλος του σωλήνα ανάμιξης υπάρχει το στόμιο εκτόξευσης που βρίσκονται τα ευγενή υλικά ζαφείρι,ρουμπίνι ή διαμάντι (Εικ.23).

Το λειαντικό που χρησιμοποιείται είναι σκληρή άμμος που είναι ειδικά επικαλυμμένη και σε συγκεκριμένα μεγέθη. Το πιο κοινό λειαντικό είναι ο γρανίτης που είναι σκληρό και ανέξοδο υλικό. Διαφορετικά μεγέθη γρανίτη χρησιμοποιούνται για κάθε διεργασία για παράδειγμα 0.125 mm παράγουν ομαλή επιφάνεια, 0.177 mm είναι η πιο κοινή χρήση και τα 0.297 mm κόβουν λίγο γρηγορότερα από τα 0.177 mm με ελαφρώς τραχύτερη επιφάνεια. Ο σωλήνας ανάμιξης (σχήμα 3.15) επιταγχύνει τα λειαντικά μόρια όπως ο σωλήνας του όπλου, ενώ το μεγεθός τους σχετίζεται με το μέγεθος του στομίου. Οι σωλήνες έχουν μήκος περίπου 8 cm, εξωτερική διάμετρο $\frac{1}{4}$ της ίντσας και η εσωτερική διάμετρος κυμαίνεται από 0.020-0.060 ίντσες. Σημαντική τεχνολογική πρόοδο στην υδροκοπή ήταν η εφεύρεση σωληνών ανάμιξης με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από συνθετικό καρβίδιο του βολφραμίου. Η απόστασή μεταξύ του σωλήνα ανάμιξης και του προς κοπή υλικού πρέπει να είναι από 0,025cm - 0,50cm. Μια τυπική διάταξη υδροκοπής δίνεται στην Εικ.24.



Εικόνα 24: Τυπική διάταξη εργαλειομηχανής υδροκοπής [32].

Μια τυπική διάταξη του συστήματος AWJ (Abrasive Waterjet) αποτελείται από αντλία υψηλής πίεσης, λειαντικό σύστημα παράδοσης, ακροφύσιο, σύστημα οπισθέλκουσας και σύστημα συλλογής [26, 27]. Οι δέσμες νερού (υδατοπίδακες) σχηματίζονται με την εκκένωση του πεπιεσμένου νερού διαμέσου ενός στομίου μικρής διαμέτρου (Εικ.24). Τα σωματίδια λείανσης συμπαρασύρονται στο ρεύμα ύδατος μέσω ενός ακροφυσίου ανάμιξης. Σε αυτή τη διαδικασία, η ορμή από το ρεύμα νερού μεταφέρεται στα λειαντικά σωματίδια. Οι κρούσεις σωματιδίων στο τεμάχιο εργασίας αφαιρούν υλικό μέσω διάβρωσης και διάτμησης [22, 28]. Το ακροφύσιο τριβής πρέπει να παράγει ένα συνεκτικό εστιασμένο ρεύμα και να διαθέτει μια λογική διάρκεια ζωής. Συνήθως κατασκευάζονται από καρβίδιο βολφραμίου ή καρβίδιο βορίου και χρησιμοποιούνται γενικά δύο σχέδια: το μονό ύδωρ με πλευρική λειαντική τροφοδοσία και το πολλαπλό πίδακα νερού με κεντρική λειαντική τροφοδοσία²³. Ο τελευταίος σχεδιασμός λέγεται ότι αυξάνει τη διάρκεια ζωής του θαλάμου ανάμιξης.

Τα πιο προηγμένα συστήματα χρησιμοποιούν έναν πίνακα τοποθέτησης x-y για να μετακινήσουν το τμήμα καθώς ο πίδακας παραμένει σε σταθερή θέση. Για σύνθετα

εξαρτήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ρομπότ για τη μετακίνηση του πίδακα νερού. Σε αυτή την περίπτωση, ο χειριστής πρέπει να είναι ικανός για κατεργασία με ελάχιστα επίπεδα κραδασμών, δεδομένου ότι τυχόν ταλαντώσεις θα αντανακλώνται αυτόματα στην επιφάνεια κοπής. Απαιτείται επίσης υψηλή επαναληψιμότητα επειδή ο χειριστής πρέπει να επιστρέφει τον πίδακα στην αρχική του θέση μέσα σε μία διάμετρο του πίδακα, προκειμένου να αποφευχθεί μια ασυνέχεια στην κοπή [22]. Ο συλλέκτης έχει σχεδιαστεί με μια μικρή μονάδα κενού για να τραβήξει μακριά το νερό και τα λειαντικά σωματίδια. Συνήθως σχεδιάζεται έτσι ώστε να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του πυθμένα του δείγματος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η έκθεση του πίδακα στον αέρα και να μειωθεί ο θόρυβος. Ο συγχρονισμός της κίνησης του συλλέκτη και εκείνης του πίδακα αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο σε περιπτώσεις όπου το μέρος που πρόκειται να κατασκευαστεί είναι ακίνητο και ο πίδακας νερού είναι σε κίνηση.

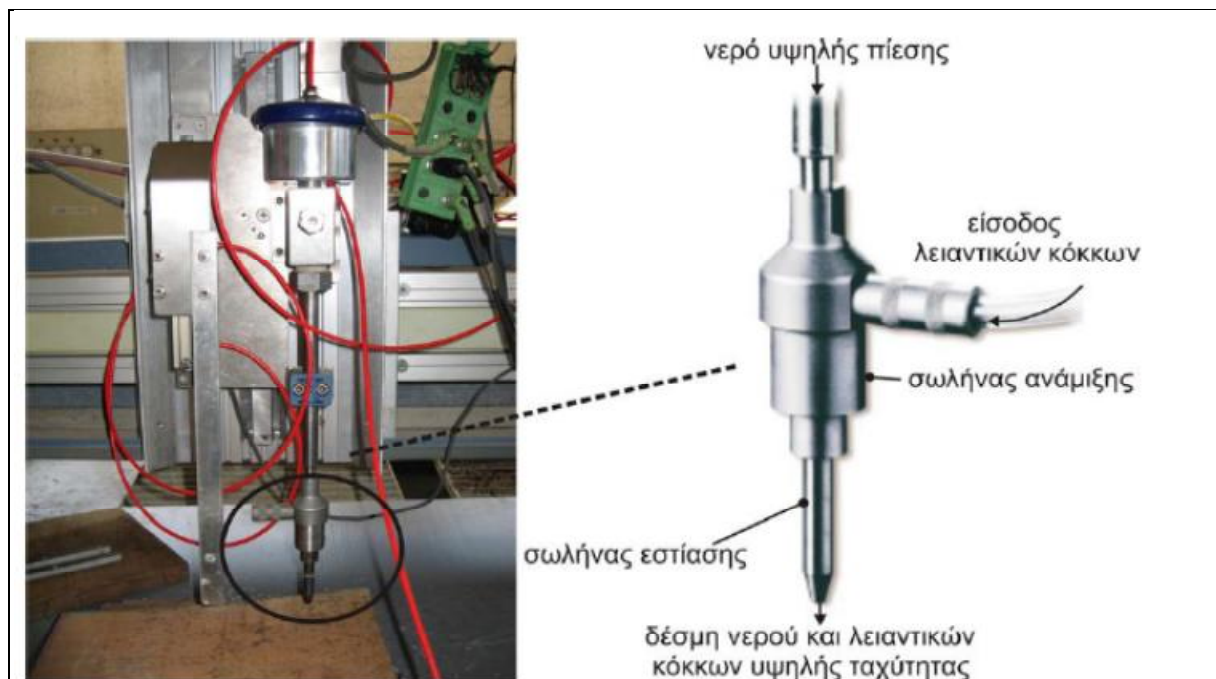
Η κοπή AWJ (Abrasive Water Jet) ελέγχεται από πέντε τύπους παραμέτρων [23]: υδραυλικές, λειαντικές, το θάλαμο ανάμειξης, τη μετατόπιση και τις παραμέτρους υλικού τεμαχίου. Οι υδραυλικές παράμετροι αποτελούνται από τη διάμετρο του στομίου νερού και την πίεση παροχής. Οι υψηλότερες πιέσεις δέσμης νερού γενικά παράγουν ομαλότερες επιφάνειες και υψηλότερους ρυθμούς απομάκρυνσης υλικού. Εντούτοις, η ευαισθησία της κυματοειδούς επιφάνειας στην αστάθεια και στο ρυθμό μετατόπισης ή στην ταχύτητα ροής είναι πιο έντονη σε υψηλότερες πιέσεις [29].

Οι λειαντικές παράμετροι είναι η ροή του λειαντικού μέσου, καθώς και η φύση του υλικού και το μέγεθος των σωματιδίων. Τα πιο συνηθισμένα εμπορικά λειαντικά που χρησιμοποιούνται είναι γρανίτης, οξειδίο του αργιλίου και καρβίδιο του πυριτίου [28, 30]. Το μέγεθος, το σχήμα και η τραχύτητα αυτών των κόκκων επηρεάζουν την ικανότητα εφαρμογής της AWJ. Τα σκληρότερα λειαντικά είναι πιο αποτελεσματικά στην κοπή σκληρών υλικών, αλλά αυξάνουν επίσης τη φθορά του υλικού του ακροφυσίου. Ως εκ τούτου, η επιλογή του υλικού λειαντικών είναι το αποτέλεσμα ενός συμβιβασμού [28].

Όταν χρησιμοποιούνται λειαντικά από καρβίδιο του πυριτίου ή από οξειδίου του αργιλίου για κεραμικά, ο ρυθμός κοπής θα αυξηθεί κατά 200% - 500% σε σχέση με τους ρυθμούς που επιτυγχάνονται με τις συμπεριφορές γρανίτη [29]. Οι τραχείς κόκκοι είναι πολύ πιο αποτελεσματικοί από τους στρογγυλεμένους κόκκους για τη γρήγορη διάβρωση του υλικού [30]. Η ενσωμάτωση ομοιόμορφου μεγέθους σωματιδίων αντί για σωματίδια με διακύμανση μεγεθών παράγει ένα ομαλότερο φινίρισμα επιφάνειας, αλλά για κάθε υλικό, θα υπάρχει μια διαφορετική βέλτιστη περιοχή μεγεθών σωματιδίων που θα μεγιστοποιήσει το βάθος διεύθυνσης [30]. Το μήκος, το σχήμα και η διάμετρος του θαλάμου ανάμειξης είναι επίσης σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και τη διάρκεια ζωής ενός κρίσιμου στοιχείου. Ωστόσο, αυτές οι παράμετροι δεν είναι υπό τον έλεγχο του χρήστη του συστήματος. Οι παράμετροι μετατόπισης περιλαμβάνουν το ρυθμό κοπής και την απόσταση κοπής.

Η μέγιστη ταχύτητα κοπής καθορίζεται κυρίως από το υλικό μήτρας. Για παράδειγμα, οι ρυθμοί κοπής για τα σύνθετα Al / SiC είναι μόνο ελαφρώς χαμηλότεροι από αυτούς για το καθαρό αλουμίνιο [29], και οι ρυθμοί κοπής για τα σύνθετα υλικά είναι ανεξάρτητοι από τον προσανατολισμό των ινών τους [24]. Με πολυστρωματικά σύνθετα υλικά, οι υψηλές ταχύτητες μετακίνησης προκαλούν σοβαρές αποκολλήσεις [31, 32].

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, το τζετ (δέσμη νερού) είναι λυγισμένο προς τα πίσω και το μέτωπο κοπής καθίσταται καμπύλο. Υπό αυτές τις συνθήκες, εφαρμόζεται μία σημαντική κάθετη δύναμη στα χαμηλότερα στρώματα που οδηγούν σε αποκόλληση. Οι ίνες αραμιδίου κόβονται καλά, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται φθαρμένες στην επιφάνεια όπως συμβαίνει με τις συμβατικές μεθόδους μηχανικής κατεργασίας.



Εικόνα 25: Μορφή ακροφυσίου υδροκοπής [32].

Οι ίνες βορίου, που είναι σκληρές και ανθεκτικές, έχουν την τάση να σπάσουν αντί να κοπούν, αφήνοντας μια μικρή μάζα από ίνες που προεξέχουν από την επιφάνεια [31, 32]. Τυπικές ταχύτητες κοπής για ένα σύστημα AWJ δίνονται στον Πίνακα 4.2.2 για διάφορα σύνθετα υλικά και οι τυπικές αποστάσεις κοπής κυμαίνονται στο εύρος (6.35 – 25.4) mm ή και περισσότερο [25,33].

Πίνακας 4.2.2 Τυπικές ταχύτητες κοπής (mm/s) για διάφορα σύνθετα υλικά (Abrate & Walton, 1992).

Material	Thickness (mm)						
	0.79	1.60	3.18	6.36	12.7	19.1	50.8
Ceramic matrix composites							
SiC fibre in SiC		1.1	0.6	0.45			
ZrO ₂ -MgO			0.8	0.7			
Al ₂ O ₃ /CoCrAl _y (80%/20%)			0.95	0.65			
Al ₂ O ₃ /CoCrAl _y (60%/40%)			0.95	0.65			
Al ₂ O ₃ /SiC (7.5%) (SiC abrasives)			2.7	1.4			
SiC/TiB ₂ (15%)			0.29	0.15			
Metal matrix composites							
Mg/B ₄ C (15%)	70	30	15	10		4	
Al/SiC (15%)	70		17	10	5		
Al/SiC (25%)				9.5	5		
Al/mullite (5%)	75	35	20	12	7.5	5	2.5
Al/Al ₂ O ₃ (15%)	65	28	15	8	4		
Organic matrix composites							
Carbon/carbon composites	42	32	22	13	7.5	4	0.85
Epoxy/glass composites	105	95	76	42	17	12	5
Graphite/epoxy composites	74	63	52	40	15	10	4.2

Τα τεμάχια που λαμβάνονται με κοπή AWJ είναι συνήθως κωνικά (taper) [27,34]. Ο λόγος της κωνικής εντομής (kerf taper ratio), ορίζεται ως το μέγιστο πλάτος εντομής στην άνω επιφάνεια του κομματιού προς το πλάτος του πυθμένα και μπορεί να κυμαίνεται στο εύρος (0.8 – 1.6) καθώς ο ρυθμός μετατόπισης αυξάνει και εξαρτάται από το μέγεθος των λειαντικών σωματιδίων. Η μηχανική ακρίβεια απαιτεί κοπή με ελάχιστη ή καθόλου κωνικότητα και συνεπώς προσεκτική επιλογή μεγέθους σωματιδίων και ταχύτητας μετακίνησης. Τα τυπικά πλάτη εντομών κοπής κυμαίνονται στο εύρος (0.5 - 2.5) mm [35]. Για περιπτώσεις τυφλής κοπής, το βάθος κοπής μειώνονται καθώς ο ρυθμός μετατόπισης αυξάνεται [27].

4.2.3 Διάτρηση και Διάνοιξη - Εισχώρηση με Υδροκοπή (WJ - Drilling & Piercing).

Οι οπές μπορούν να διανοιχθούν με την τεχνική υδροκοπής χρησιμοποιώντας τρεις βασικές προσεγγίσεις: (α) εισχώρηση (piercing) που είναι κατάλληλη για οπές μικρής διαμέτρου, (β) κοπή σε κυκλική διαδρομή για οπές μεγάλης διαμέτρου και (γ) φρεζάρισμα τυφλών οπών [29].

Η διάτρηση παράγεται με βάνες και πιέσεις ταχείας ενεργοποίησης στην περιοχή των 200-400 MPa. Οι χρόνοι διάτρησης μειώνονται καθώς αυξάνεται η πίεση του νερού [28]. Ο ρυθμός διείδυσης τείνει να μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος λόγω της ροής επιστροφής που μειώνει την ταχύτητα του σωματιδίου και παρεμβαίνει στη διαδικασία κρούσης. Τα εύθραυστα υλικά όπως το γυαλί απαιτούν χαμηλότερες πιέσεις, ενώ τα κεραμικά απαιτούν πολύ υψηλότερες πιέσεις. Η βλάβη στο τεμάχιο εργασίας μπορεί να εισαχθεί κατά τη διάρκεια της διάτρησης με θραύση κατά την κρούση λόγω της φόρτισης, της ρωγμής και της αποκόλλησης λόγω της ανάπτυξης υψηλής υδροδυναμικής πίεσης [22,36]. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να εξαλειφθούν με τη μείωση της πίεσης ή του μεγέθους του πίδακα, αυξάνοντας την απόσταση κοπής ή υποστηρίζοντας το υλικό στο κάτω μέρος [29]. Οι διανοιγμένες οπές είναι κωνικές, η διάμετρος στην κορυφή είναι μεγαλύτερη από εκείνη στο κάτω μέρος. Ο λόγος κωνικής εντομής αυξάνεται με την απόσταση, αλλά η φθορά στην επάνω επιφάνεια του προς κατεργασία κομματιού λόγω της πρόσκρουσης των λειαντικών σωματιδίων μειώνεται για μικρές αποστάσεις κατεργασίας (stand off) [27].

4.2.4 Φρεζάρισμα με Υδροκοπή (WJ - Milling).

Μία κοιλότητα ομοιόμορφου βάθους μπορεί να φρεζαριστεί με την εφαρμογή ενός ομοιόμορφου – σταθερού ρυθμού μετατόπισης με έναν ομοιόμορφο χρόνο έκθεσης του πίδακα νερού πάνω από την επιφάνεια του υλικού [29]. Για το φρεζάρισμα μιας κοιλότητας πεπερασμένου μεγέθους απαιτούνται πολλές επαναλαμβανόμενες κινήσεις και ο χρόνος έκθεσης στο τέλος κάθε διαδρομής είναι αναγκαστικά μεγαλύτερος καθώς το ακροφύσιο επιβραδύνεται, σταματά και επιταχύνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ο χρόνος παραμονής στο τέλος κάθε διαδρομής μπορεί να εξαλειφθεί με την κάλυψη του αντίστοιχου τμήματος του κατεργαζόμενου τεμαχίου με ένα σκληρό υλικό [29].

Οι δοκιμές σε σύνθετα υλικά άνθρακα έδειξαν ότι η μεταβολή του μέσου ρυθμού μετατόπισης μεταξύ 0.2 και 0.5 m/s δεν επηρεάζει το ρυθμό απομάκρυνσης όγκου ενώ επίσης και το βάθος κοπής μπορεί να ελέγχεται άμεσα με μεταβολή του ρυθμού μετατόπισης [29]. Η χρήση γρανίτη οδήγησε σε έναν ρυθμό απομάκρυνσης μεγαλύτερο όγκου κατά 13%.

4.2.5 Τόρνευση με Υδροκοπή (WJ - Turning).

Η τόρνευση (turning) με υδροκοπή πραγματοποιείται μέσω της περιστροφής του τεμαχίου, ενώ ο πίδακας τροφοδοτεί νερό συνεχώς και στις 3 διαστάσεις XYZ. Πειράματα έχουν δείξει την επίδραση του ρυθμού μετατόπισης στην κυματοειδή επιφάνεια του τεμαχίου κατεργασίας [29]. Οι ρυθμοί κατεργασίας για Mg/B₄C (15% B4) είναι 38% χαμηλότεροι από εκείνους για αλουμίνιο προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια κυματομορφή στην επιφάνεια [29]. Με τις παραδοσιακές μεθόδους τόρνευσης οι ταχύτητες κατεργασίας των σύνθετων υλικών Mg/B₄C και Al/SiC είναι περίπου 15-20 φορές πιο χαμηλές από αυτές του αλουμινίου.

Η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στον επιφανειακό κυματισμό του προς κατεργασία κομματιού, κατά την τόρνευση σύνθετων υλικών Mg/B₄C, έχει μελετηθεί [30]. Η στροφή μίας ράβδου Mg/B₄C διαμέτρου 2.5cm σε διάμετρο 0.64cm πραγματοποιήθηκε με ένα πέρασμα, με μια ταχύτητα διαδρομής 10 mm/min και με παροχή 0.27 kg/min λειαντικών σε ισχύ 12 kW. Αυτή η δοκιμή έδειξε ότι μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί απομάκρυνσης υλικού. Οι επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με υδροκοπή δεν παρουσιάζουν αλλαγές στη μικροδομή του υλικού, ενώ η τραχύτητα της επιφάνειας εξαρτάται περισσότερο από το μέγεθος των λειαντικών σωματιδίων.

4.3 Μέθοδος κατεργασίας με Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machining – EDM)

Η βασική αρχή της (EDM – Electrical Discharge Machining) στηρίζεται στην παρατήρηση ότι κάθε φορά που πλησιάζουν μεταξύ τους τα άκρα δύο αγωγών συνδεδεμένων με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής, προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση, και από τον παραγόμενο σπινθήρα, την υψηλή θερμοκρασία και τη δράση ηλεκτρικών μοριακών δυνάμεων αποσπάται ποσότητα υλικού και από τους δύο αγωγούς. Παρ' όλα αυτά δεν υπήρξε καμία εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης μέχρι το 1943, όταν δύο Σοβιετικοί επιστήμονες, οι B.R. και N.I. Lazarencο κατάφεραν να εκμεταλλευτούν το φαινόμενο για την κατεργασία υλικών. Οι ως άνω ερευνητές ανέπτυξαν σερβομηχανισμό (αντί της χειροκίνητης λειτουργίας), για EDM, αυξάνοντας έτσι τόσο το βαθμό ελέγχου της κατεργασίας, όσο και την πιστότητα αυτής. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών στις μέρες μας χρησιμοποιούνται μοντέρνες CNC υψηλών προδιαγραφών με δυνατότητα κατεργασίας έως και έξι αξόνων [31-32].

4.3.1 Αρχή Λειτουργίας EDM.

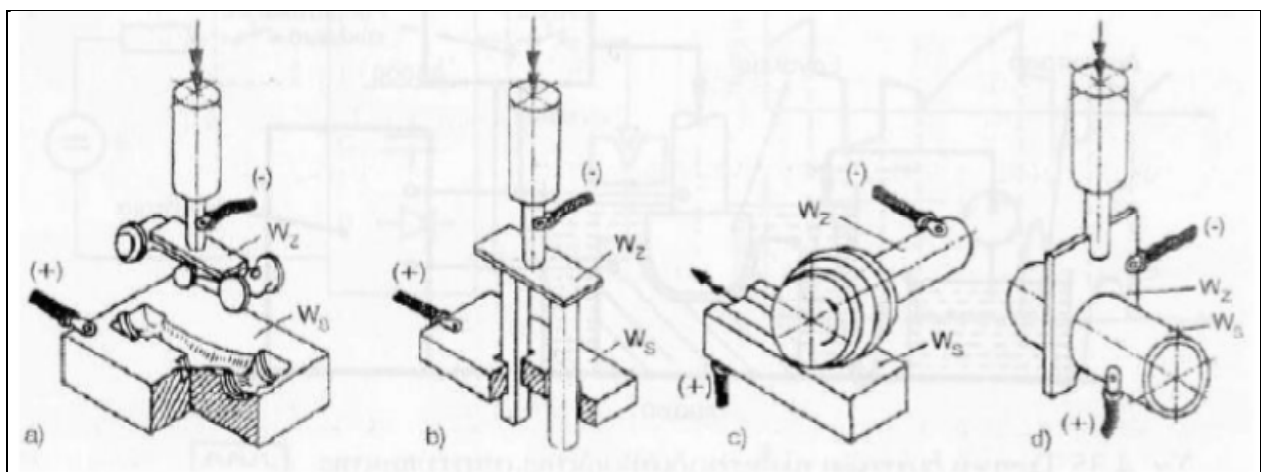
Η ηλεκτροδιάβρωση είναι κατεργασία κατά την οποία γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο ηλεκτρικά αγώγιμο κατεργαζόμενο τεμάχιο με τη χρήση ηλεκτρισμού. Είναι βέβαια εφικτή και η κατεργασία ημιαγώγιμων υλικών. Κατά τους Koenig, Dauw, Levy & Panten, υπάρχει μια τιμή της ειδικής αντίστασης ρ (ohm*m) του υλικού, κάτω από την οποία η ηλεκτροδιάβρωση είναι εφικτή. Αυτό το όριο ονομάζεται κατώφλι αγωγιμότητας, και η τιμή του είναι $\rho=100$ ohm*cm (ειδική αγωγιμότητα 0,01S/cm). Πιο σωστά, υπάρχει ένα εύρος τιμών της ειδικής αντίστασης ρ των υλικών, με κέντρο την τιμή 100 ohm*cm, στην οποία 'μόλις' εμφανίζεται σπινθήρας. Είναι δηλαδή πιθανό κάποιο υλικό με λίγο μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από 100 ohm*cm να ηλεκτροδιαβρώνεται, ενώ ένα υλικό με μικρότερη ειδική αντίσταση να μην ηλεκτροδιαβρώνεται. Προφανώς τα περισσότερο αγώγιμα υλικά εμφανίζουν τα λιγότερα προβλήματα ηλεκτροδιάβρωσης.

Η κατεργασία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο παλμών συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, υψηλής συχνότητας, μέσω ενός ηλεκτροδίου ή σύρματος. Το ηλεκτρόδιο-εργαλείο (Εικ.25-κεφαλή του εργαλείου), τοποθετούμενο με υψηλή ακρίβεια πολύ κοντά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χωρίς όμως να έρχεται σε επαφή μαζί του, αποφορτίζει το δυναμικό του στο τεμάχιο (που συνήθως είναι το θετικό ηλεκτρόδιο), διαμέσου ενός μονωτικού διηλεκτρικού υγρού (ως διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται συνήθως έλαια βασισμένα σε παραφινικές, ναφθενικές και αρωματικές ενώσεις), στο οποίο είναι εμβαπτισμένα και το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο. Κατά την εκκένωση δημιουργούνται σπινθήρες στο πολύ μικρό διάκενο (σταθερό, από 25 έως 50 μm) μεταξύ των δύο επιφανειών.

Η θερμοκρασία του σπινθήρα που παράγεται βρίσκεται συνήθως μέσα σε ένα εύρος θερμοκρασίας (8000 – 12000) $^{\circ}\text{C}$, με αποτέλεσμα μετά από κάθε εκκένωση να λαμβάνει χώρα επιφανειακή τήξη ή και εξάχνωση των υλικών, από την παραγόμενη κατά τη διάσπαση του διάκενου θερμική ενέργεια και αφαίρεση υλικού και στα δύο ηλεκτρόδια. Υπενθυμίζεται ότι τόσο το κομμάτι όσο και το χρησιμοποιούμενο εργαλείο πρέπει να είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το εργαλείο, συνήθως είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο του συστήματος. Δεδομένου ότι η ροή του ηλεκτρισμού γίνεται από τον θετικό πόλο προς τον αρνητικό η σύνδεση του αρνητικού πόλου στο κοπτικό εργαλείο, προκαλεί αποκόλληση ιόντων από τον θετικό πόλο που είναι το προς κατεργασία κομμάτι και έτσι προκαλείται αφαίρεση υλικού και τελικά η διαμόρφωση του αντικείμενου. Για την υλοποίηση της διαδικασίας αφαίρεσης υλικού πρέπει το εργαλείο να μπορεί να κινείται για να πλησιάζει συνεχώς και να κρατά σταθερή μια μικρή απόσταση, το “διάκενο κατεργασίας”, από την επιφάνεια του κομματιού, από την οποία και αφαιρείται υλικό. [6]. Στην Εικ.25 δίνονται μερικές δυνατότητες κατεργασίας υλικών με ηλεκτροδιάβρωση, όπου με W_s σημειώνεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο, με W_z το εργαλείο και \mathfrak{A} πρόωση.

Με τη γενική έννοια του όρου η ηλεκτροδιάβρωση περιλαμβάνει δύο τεχνικές:

- Ø Την **ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης**, όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του “εργαλείου-ηλεκτρόδιου” στο “κατεργαζόμενο τεμάχιο-ηλεκτρόδιο”
- Ø Την **ηλεκτροδιάβρωση σύρματος** (wire EDM), όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγωγίμο σύρμα.



Εικόνα 26: Κατεργασίες αποβολής υλικού με ηλεκτροδιάβρωση (α)κοπή, (β) διάτρηση, (c) λείανση, (δ) κατάτμηση [49]

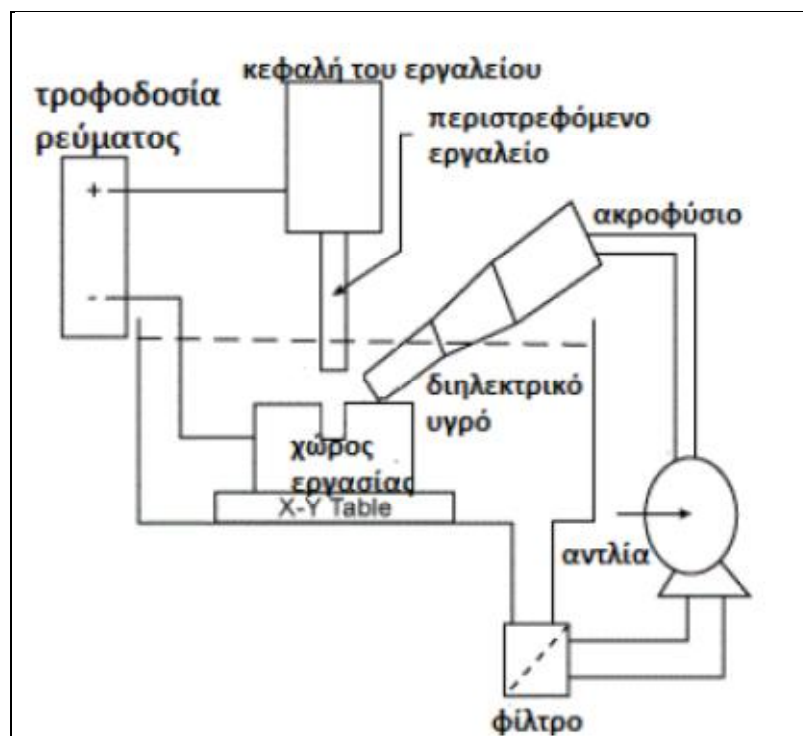
4.3.2 Τεχνολογίες Ηλεκτροδιάβρωσης.

Στην ηλεκτροδιάβρωση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο κατεργαζόμενο αγώγιμο τεμάχιο με τη βοήθεια ελεγχόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η τυπική διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται στην Εικ.27, όπου διακρίνονται τα βασικά μέρη:

- ∅ Η εργαλειομηχανή,
- ∅ Η γεννήτρια τροφοδότησης ρεύματος,
- ∅ Το σύστημα παροχής διηλεκτρικού.

4.3.3 Ηλεκτροδιάβρωση Σύρματος (wire EDM).

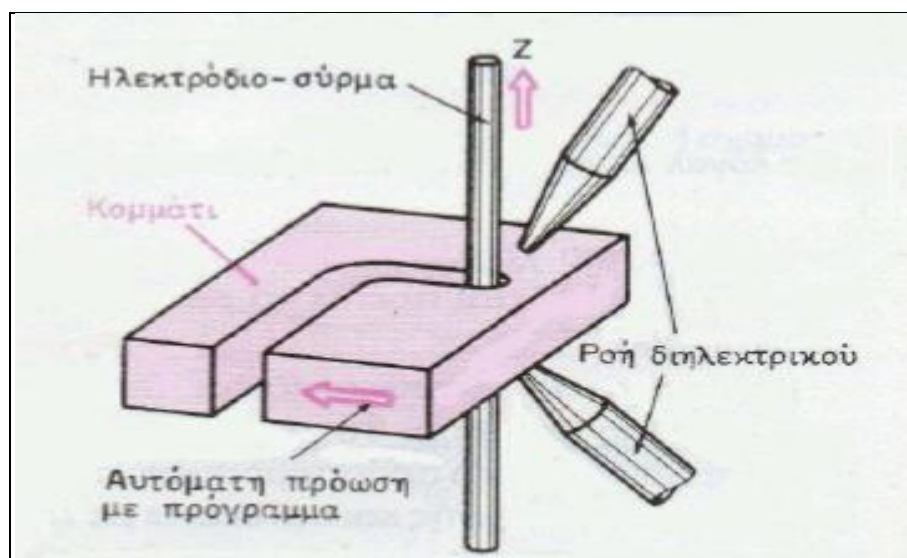
Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο-εργαλείο ειδικό λεπτό (διαμέτρου 0.025 – 0.3mm) αγώγιμο σύρμα από χαλκό ή ορείχαλκο και για διαμέτρους μικρότερες από 0.15mm μολυβδαίνιο, και όχι εργαλεία - ηλεκτρόδια ειδικά κατεργασμένα σε μορφή και μέγεθος. Οι συνήθεις εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος κατεργάζονται κομμάτια μορφής πλάκας, για περιμετρική κοπή ή για την διάνοιξη οπών με ορισμένο απλό ή πολύπλοκο σχήμα. Η κατεργασία είναι ελεγχόμενη από Η/Υ, και η κίνηση του σύρματος καθορίζεται από σύστημα CNC. Το σύρμα, με τη βοήθεια ειδικής κατάλληλης διατάξεως εκτυλίξεως, τανύσεως και περιελίξεως (Εικ. 28) διαπερνάει κάθετα, κατά τον άξονα “Z”, την κατεργαζόμενη μεταλλική πλάκα- κομμάτι συνεχώς με σταθερή ταχύτητα και φορά τέτοια, που εξασφαλίζει στο διάκενο κατεργασίας άφθαρτο πάντοτε εργαλείο.



Εικόνα 27: Αρχή λειτουργίας Ηλεκτροδιάβρωσης [32].

Το τραπέζι της εργαλειομηχανής, πάνω στο οποίο είναι προσδεδεδεμένο το κομμάτι-πλάκα, κινείται ταυτόχρονα με το σύρμα κατά τους άξονες κατεργασίας “X” και “Y” του τραπεζιού, ενώ καθ’ όλη τη διάρκεια της κατεργασίας το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το

σύρμα βρίσκονται συνεχώς εμβαπτισμένα μέσα σε κατάλληλο δοχείο μη-αγώγιμου υγρού διηλεκτρικού. Οι ταυτόχρονες κινήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, και οι οποίες γίνονται βάσει του προγράμματος κατεργασίας CNC, είναι αυτές που προκαλούν την “κοπή” ή την “αποκοπή” του επιθυμητού επιπέδου σχήματος. Σε ορισμένους τύπους εργαλειομηχανών, η σχετική κίνηση μπορεί να γίνει και αντίθετα, δηλαδή το κομμάτι να παραμένει σταθερό και το κατακόρυφο σύρμα να κινείται κατά τους άξονες “X” και “Y”. Επίσης είναι σύνηθες πολλές εργαλειομηχανές κοπής με σύρμα να διαθέτουν ειδική διάταξη για την διάνοιξη της “αρχικής οπής” (ελάχιστη διάμετρος 0.8 mm), απ’ όπου θα περάσει το σύρμα για να γίνει δυνατή η έναρξη της κατεργασίας. Στις περισσότερες εργαλειομηχανές του είδους, το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται στις φάσεις εκχονδρίσεως είναι καθαρό νερό, συνεχώς ψεκαζόμενο στο διάκενο κατεργασίας, διότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ακριβείας ενώ επιτυγχάνονται μεγάλοι ρυθμοί αφαιρέσεως υλικού. Ειδικά διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται μόνο στις φάσεις αποπεράτωσης και γενικά όπου είναι επιθυμητή πολύ καλή ποιότητα της επιφάνειας κοπής, ενώ στη γρήγορη μεταφορά νέου διηλεκτρικού στο διάκενο κατεργασίας και στην ταχεία απομάκρυνση των προϊόντων των εκκενώσεων βοηθά η συνεχής κίνηση του σύρματος .



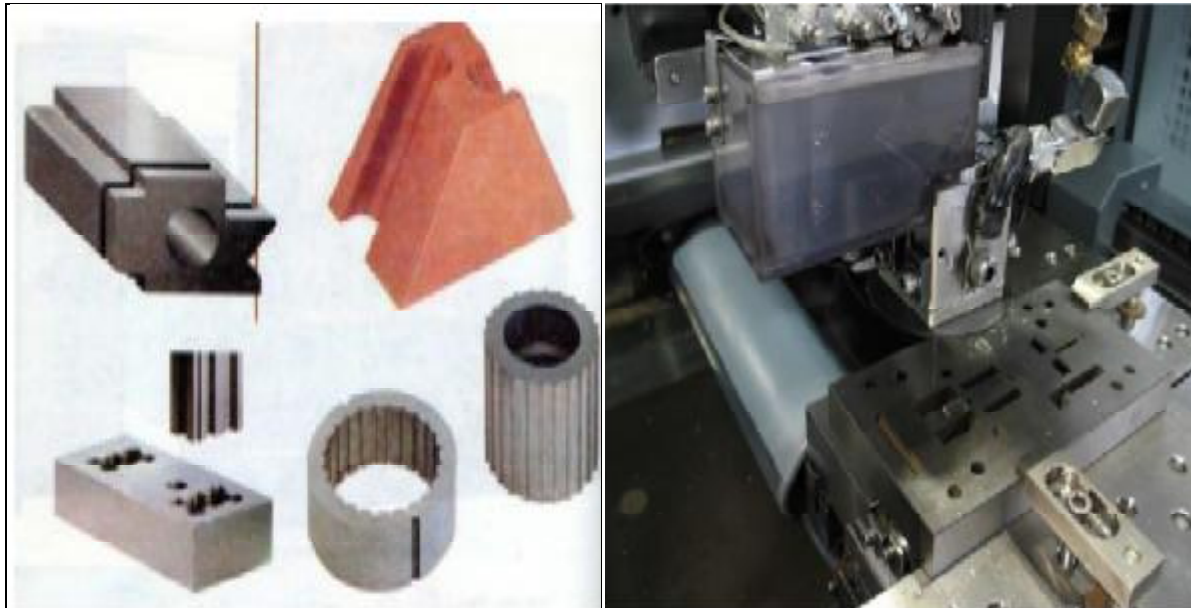
Εικόνα 28: Αρχή μεθόδου EDM σύρματος [53].

Σε αντίθεση με την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, που θα περιγραφεί στα επόμενα, στην οποία το κατεργάσιμο τεμάχιο συνδέεται συνήθως στην κάθοδο, στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος το προς κατεργασία κομμάτι συνδέεται συνήθως στην άνοδο και επιπλέον εφαρμόζονται παλμοί μικρότερης διάρκειας, αλλά πολύ μεγαλύτερης έντασης.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος προσφέρουν πρακτικά μηδενική φθορά εργαλείου, άρα και μεγάλη διάρκεια ζωής, με αποτέλεσμα μεγάλη εξοικονόμηση στην κατασκευή τους και μείωση του συνολικού κόστους της κατεργασίας για μαζικότερη παραγωγή. Επίσης εξασφαλίζουν μικρούς χρόνους κατεργασίας (οι ρυθμοί αφαιρέσεως υλικού μπορούν να φτάσουν έως και 8500 mm³/min), μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια (της τάξεως 2μm) και καλή επιφανειακή ποιότητα (τραχύτητα επιφάνειας ως και 1μm). Με μικρές τροποποιήσεις το ίδιο βασικό πρόγραμμα CNC μπορεί επίσης να εκτελέσει τόσο την κοπή μήτρας όσο και την κοπή με εκβάθυνση μέσω κίνησης με εμβολισμούς. Παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου και κατεργασμένα κομμάτια παρουσιάζονται στην Εικ.29. Η μείωση του κόστους κατασκευής του καλουπιού στις περιπτώσεις αυτές, φτάνει και το 50% περίπου συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους. Ο μοναδικός ίσως άμεσος περιορισμός στη χρήση

της μεθόδου, έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται για την κοπή επιπέδων σχημάτων μέχρι ένα μέγιστο πάχος 100mm (Ιτσόπουλος 2014).

Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 1970 ως εναλλακτική λύση στη μηχανική κοπή σωλήνων, κελυφών, κ.τ.λ.. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας CNC και τη χρήση επικαλυμμένων συρμάτων (coated wires), η μέθοδος βρίσκει ευρύτατες εφαρμογές στην κατασκευή μητρών, εξαρτημάτων και γενικά τρισδιάστατων γεωμετριών με μικροκοπή ακριβείας (precision micro-machining) στην αεροναυπηγική και σε βιοτεχνολογικά εξαρτήματα. [6]



Εικόνα 29: Κατεργασμένα κομμάτια - μήτρες σε εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

4.3.4 Ηλεκτροδιάβρωση Αποτύπωσης (sinker EDM).

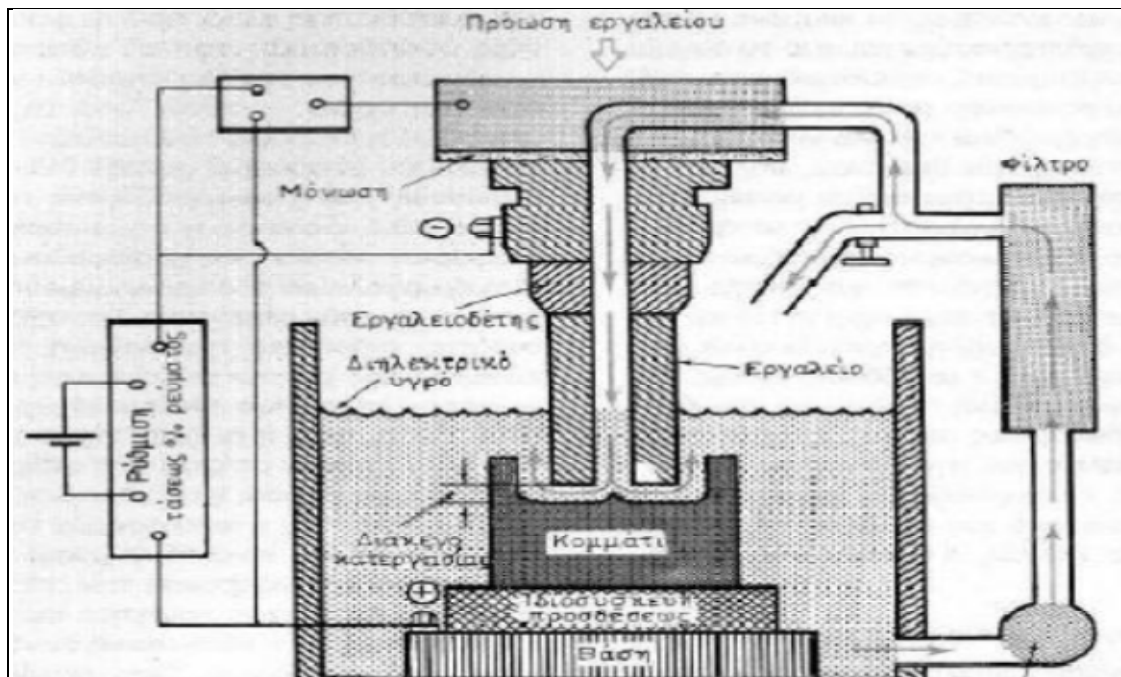
Η βασική ιδέα στην ηλεκτροδιάβρωση, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, είναι η αφαίρεση υλικού από κάποιο κατεργαζόμενο αγωγίμο τεμάχιο με τη βοήθεια ελεγχόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων. Τα βασικά μέρη της τεχνικής αυτής παραμένουν ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω στην ηλεκτροδιάβρωση ως μέθοδο.

Η δεύτερη τεχνική της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης διαφέρει ως προς την πρώτη στο ότι το εργαλείο, που συνήθως είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο του συστήματος, πρέπει να μπορεί να κινείται για να πλησιάζει συνεχώς και να κρατά σταθερή μια μικρή απόσταση, το “διάκενο κατεργασίας”, από την επιφάνεια του κομματιού, από την οποία και αφαιρείται υλικό. Για το λόγο αυτό προσαρμόζεται σε ειδική υποδοχή του μηχανισμού πρόωσης κατά τον άξονα “Z” της εργαλειομηχανής. Το κομμάτι, που ηλεκτρικά αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο, προσδένεται πάνω στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Και τα δύο, κομμάτι και εργαλείο, (Εικ.29) είναι εμβαπτισμένα μέσα σε δοχείο γεμάτο με μονωτικό διηλεκτρικό υγρό (παραφινέλαιο, έλαιο μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια) που ανακυκλοφορείται συνεχώς.

Η διάταξη ανακυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού, εκτός από την αντλία περιλαμβάνει φίλτρο καθαρισμού (Εικ.31) και ενδεχομένως, εναλλάκτη θερμότητας διηλεκτρικού, νερού- για την απαγωγή της εκλυόμενης από τις εκκενώσεις, θερμότητας. Κομμάτι και εργαλείο συνδέονται αντίστοιχα σε ειδική ηλεκτρική τροφοδοτική μονάδα (γεννήτρια), που παρέχει την αναγκαία τάση και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος, καθώς και τη διάρκεια και τη συχνότητα των εκκενώσεων. Το αυτόματο

σύστημα ελέγχου του μηχανισμού πρόωσης του εργαλείου, εξασφαλίζει συνεχώς κατά την διάρκεια τη κατεργασίας ένα σταθερό διάκενο 25 έως 50 μm μεταξύ των απέναντι επιφανειών εργαλείου - κομματιού.

Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εργαλείο-κομμάτι γίνεται μόνο, όταν η εφαρμοζόμενη από την τροφοδοτική μονάδα τάση είναι ίση προς την “τάση διασπάσεως” του μεταξύ τους διακένου. Αρχικά δεν υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, γιατί στο διάκενο υπάρχει διηλεκτρικό το οποίο είναι μονωτής.



Εικόνα 30: Τυπική διάταξη κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης με αποτύπωση [32].

Ωστόσο, καθώς το διάκενο μειώνεται, μειώνεται και η αντίστασή του, με αποτέλεσμα μετά από ένα συγκεκριμένο διάκενο και κάτω να δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση και να έχουμε ροή ρεύματος, η οποία συντελεί στην ανάπτυξη θερμότητας. Η τάση διασπάσεως του διακένου εξαρτάται τόσο από το σχήμα και την απόσταση στην οποία βρίσκονται μεταξύ τους τα δύο ηλεκτρόδια, όσο και από τις μονωτικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού υγρού, και είναι της τάξεως των 15 έως 25 Volt.

Στην πραγματικότητα αυτό που συμβαίνει μετά από κάθε εκκένωση είναι επιφανειακή τήξη (ή ακόμα και εξάχνωση) από την παραγόμενη κατά την διάσπαση του διακένου θερμότητα - και αφαίρεση υλικού και στα δύο ηλεκτρόδια. Στις αντίστοιχες θέσεις των εκκενώσεων δημιουργούνται πολύ μικροί αβαθείς κρατήρες - κοιλότητες. Στο τέλος κάθε εκκένωσης, το λιωμένο υλικό σε σφαιροειδή μορφή παρασύρεται από το διηλεκτρικό υγρό που κυκλοφορεί, απομακρύνεται από τον κρατήρα και συγκρατείται μέσα στο φίλτρο (Εικ. 30).

Όπως αναφέρθηκε, εκτός από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, κατά την εκκένωση γίνεται αφαίρεση υλικού και από το εργαλείο, γεγονός ανεπιθύμητο, καθώς μειώνει τη διάρκεια ζωής του και συντελεί στην αύξηση του κόστους της κατεργασίας. Το ζήτημα αυτό όμως λύνεται με τη σωστή επιλογή διαφόρων παραμέτρων, όπως είναι το κατάλληλο για την κατεργασία υλικό εργαλείου, η σωστή ρύθμιση της γεννήτριας τροφοδοτήσεως για την διάρκεια, την ένταση και τη συχνότητα των εκκενώσεων, και η πολικότητα των ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται στην πράξη πολύ σημαντική ασυμμετρία φθοράς, η οποία φτάνει στο επίπεδο 99,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο - κομμάτι και μόνο 0,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο - εργαλείο.

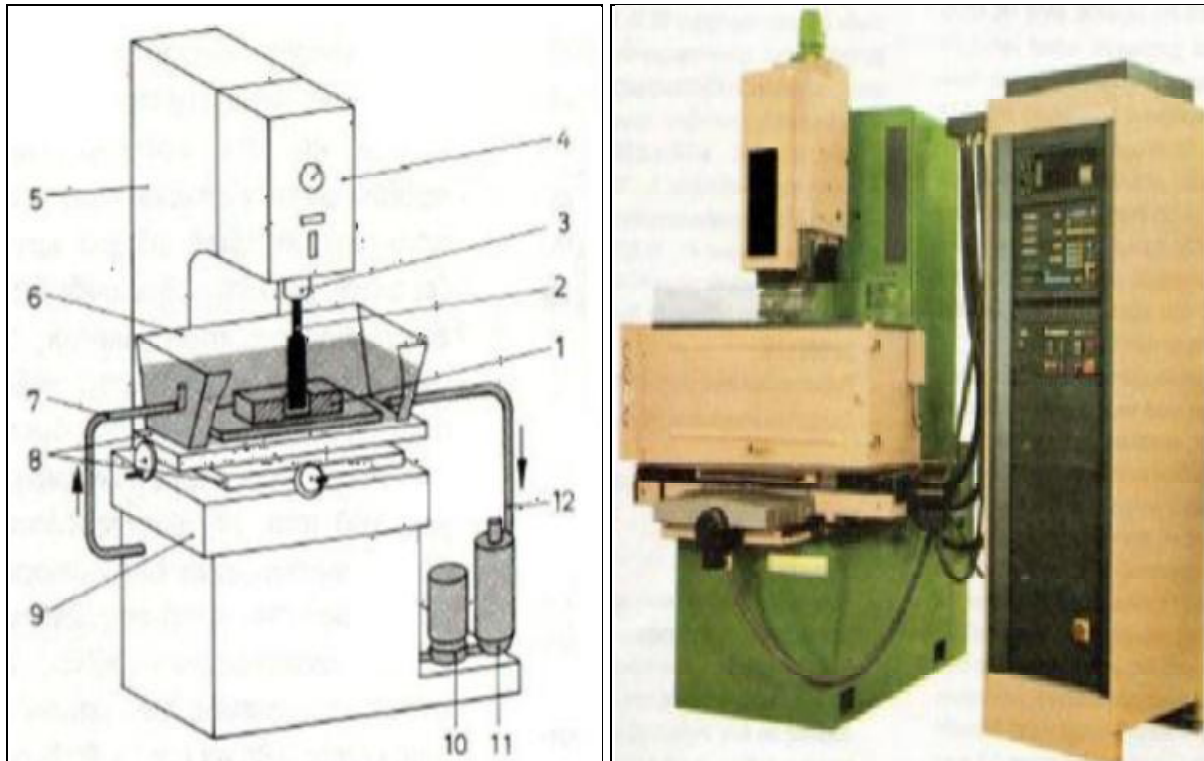
Επειδή η διάσπαση του διακένου, δηλαδή η ηλεκτρική εκκένωση, πραγματοποιείται μεταξύ των στοιχειωδών επιφανειών ελάχιστης αποστάσεως εργαλείου - κομματιού, δημιουργείται βαθμιαία, με συνεχή και σταθερή πρόωση, κοιλότητα στο κομμάτι ακριβώς αντίστοιχη της μορφής του εργαλείου. Εκείνο που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι, αντίθετα με τις συμβατικές μεθόδους κοπής, δε χρειάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση καμιά απολύτως επιβολή μηχανικής δυνάμεως από το εργαλείο προς το τεμάχιο για την αφαίρεση του υλικού. Έτσι, είναι δυνατό τα εργαλεία/ηλεκτρόδια να κατασκευάζονται από σχετικά μαλακά και ευκολοκατέργαστα υλικά, όπως είναι ο χαλκός, ο ορείχαλκος, ο γραφίτης κ.α. [6]

4.3.5 Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής Ηλεκτροδιάβρωσης

Μια εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης πρέπει οπωσδήποτε να μπορεί να ελέγχει και να ρυθμίζει το διάκενο της κατεργασίας, ώστε αυτό να παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκειά της. Γι' αυτό και είναι εξοπλισμένη με μηχανισμό ακριβείας, για την αυτόματη πρόωση της κεφαλής προσδέσεως του εργαλείου – ηλεκτροδίου κατά τον άξονα “Z”. Ο ρόλος του συγκεκριμένου μηχανισμού είναι ο έλεγχος του διακένου, έτσι ώστε να γίνεται σωστά η αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο και να προστατεύεται το εργαλείο. Επίσης, μέσω του ελέγχου του διακένου, ελέγχεται και η τάση διάσπασής του, και έτσι αποφεύγονται λανθασμένες εκκενώσεις και βραχυκυκλώματα.

Πολλές εργαλειομηχανές φέρουν κατάλληλη διάταξη εργαλειοθήκης και μηχανισμό που καθιστά δυνατή την αυτόματη εναλλαγή των εργαλείων – ηλεκτροδίων, προκειμένου να γίνονται ευκολότερα οι κατεργασίες που απαιτούν τη χρήση πάνω του ενός εργαλείων, αλλά και να μειώνεται ο χρόνος για την περάτωσή τους.

Οι περισσότερες εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σήμερα, είναι εξοπλισμένες με μονάδα CNC για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους, καθώς η χρήση τους έχει επεκταθεί σε τομείς που απαιτούν ποσότητα και μεγάλη ταχύτητα για μαζική παραγωγή, ακρίβεια στις διαστάσεις και χαρακτηριστικά υψηλής ποιότητας. Αυτός είναι ο τομέας της αεροναυπηγικής, όπου η EDM χρησιμοποιείται για την κατεργασία σκληρομετάλλων, για τη διάνοιξη οπών ακριβείας, και ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου χρησιμοποιείται στην κατεργασία μεγάλων καλουπιών διαμορφώσεως μερών αυτοκινήτων. Στην (Εικ.30) παρουσιάζεται μια τυπική CNC εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης.



Εικόνα 31: Αναλυτικά τμήματα εργαλειομηχανής ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης [32].

Η αρίθμηση των τμημάτων της εργαλειομηχανής ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης έχει ως ακολούθως:

1. Κομμάτι προς κατεργασία,
2. Εργαλείο – ηλεκτρόδιο,
3. Κεφαλή – φορέας του εργαλείου,
4. Κιβώτιο μηχανισμού πρόωσης του εργαλείου,
5. Κορμός,
6. Λεκάνη,
7. Σωλήνας προσαγωγής του διηλεκτρικού υγρού,
8. Support (μηχανισμός μετακίνησης) για δύο κάθετες κινήσεις,
9. Τράπεζα,
10. Αντλία διηλεκτρικού,
11. Φίλτρο,
12. Σωληνώσεις επιστροφής διηλεκτρικού.

4.3.6 Τροφοδοσία Ρεύματος.

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης, κομμάτι και εργαλείο συνδέονται στη γεννήτρια τροφοδοσίας, η οποία αποτελεί ειδική ηλεκτρική μονάδα που παρέχει την αναγκαία τάση και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος, καθώς και τη διάρκεια και τη συχνότητα των εκκενώσεων. Οι γεννήτριες τροφοδοσίας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η παραγωγή των παλμών:

- ∅ Περιστρεφόμενες παλμογεννήτριες, οι οποίες έχουν πολύ περιορισμένη εφαρμογή.
- ∅ Γεννήτριες αποφόρτισης ή αποθήκευσης, με κυκλώματα τροφοδοσίας μέσω πυκνωτών, πηνίων ή συνδυασμών τους.

Ø Στατικές παλμογεννήτριες, όπου το σύστημα τροφοδοσίας της τάσης συνδέεται μέσω συστοιχίας διακοπών με τον αγωγό εκκένωσης. Η διάρκεια και η σειρά των εκκενώσεων εξαρτάται κυρίως από την διαδοχή των φάσεων λειτουργίας των διακοπών.

Ο κύριος παράγοντας καθορισμού της μορφής των παλμών της τάσης και της έντασης του ρεύματος, είναι το διάκενο μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου. Στην πραγματικότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, οι συνθήκες που επικρατούν στο διάκενο μεταβάλλονται συνεχώς, λόγω της αλλαγής των ιδιοτήτων του διηλεκτρικού και ανάλογα με τις συνθήκες αποβολής υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται με μια στοχαστική σειρά διάφορες μορφές παλμών.

Στην Εικ.32 δίνονται οι διάφορες μορφές παλμών που παράγονται από μια στατική παλμογεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα για τους παλμούς ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

Ø Η χρονική διάρκεια του παλμού, t_i δίνεται από τη σχέση: $t_i = t_d + t_e$

Όπου: t_d είναι η χρονική διάρκεια κατά την πρώτη φάση της εκκένωσης, - δημιουργία της εκκένωσης,

t_e είναι η χρονική διάρκεια κατά την δεύτερη φάση της εκκένωσης - διατήρηση της εκκένωσης,

Ο λόγος χρονικής επαφής τ δίνεται από τη σχέση

$$\tau = \frac{t_i}{t_p}$$

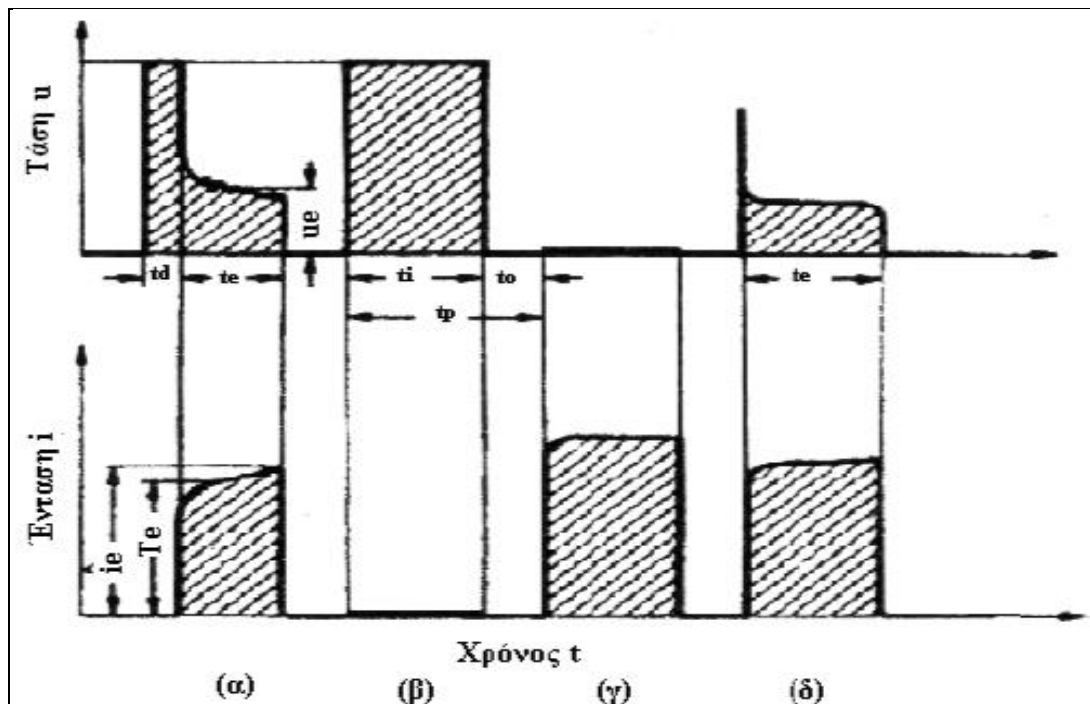
Όπου: t_p είναι η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών,

t_i είναι η χρονική διάρκεια του παλμού,

Ως συχνότητα εκκένωσης, f_e , ορίζεται ο αριθμός των πραγματοποιούμενων εκκενώσεων στον αγωγό εκκένωσης στη μονάδα του χρόνου ($f_e = 1/t_e$), και f_p είναι ο αριθμός των τασικών παλμών στη μονάδα του χρόνου ($f_p = 1/t_p$).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν τρεις κατηγορίες για τις γεννήτριες τροφοδότησης όπου για την παραγωγή παλμών με περίοδο από 1 έως 2000msec, η μέγιστη τάση κυμαίνεται από 40 έως 400V και το ρεύμα απαλλαγής κυμαίνεται από 0,5 έως 500A.

Στην πράξη, για να επιτευχθεί σχετική συντόμευση στο χρόνο κατεργασίας, η κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων ή η ταυτόχρονη κατεργασία περισσότερων τεμαχίων, χρησιμοποιούνται συχνά και πολλαπλού τύπου γεννήτριες, δηλαδή γεννήτριες που μπορεί να τροφοδοτούν συγχρόνως περισσότερα του ενός εργαλεία, είτε διαδοχικά, είτε και ταυτόχρονα.



Εικόνα 32: Παλμοί τάσης και έντασης ρεύματος σε μια στατική παλμογεννήτρια [2]

Στην Εικ. 32 φαίνονται ειδικότερα (α) ο παλμός εκκένωσης (κανονικό διάκενο), (β) ο παλμός εν κενώ (πολύ μεγάλο διάκενο), (γ) κατάσταση βραχυκυκλώματος (μηδενικό διάκενο), (δ) εσφαλμένη εκκένωση (πολύ μικρό διάκενο).

4.3.7 Διηλεκτρικό Υγρό.

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης γίνεται μέσα σε ένα μέσο κατεργασίας που συνήθως είναι διηλεκτρικό υγρό. Οι κύριες χρήσεις του διηλεκτρικού αυτού είναι:

- Ø Η δημιουργία διακένου ορισμένης διηλεκτρικής σταθεράς,
- Ø Η απομάκρυνση από το διάκενο των αναιρουμένων τεμαχιδίων,
- Ø Η ψύξη της περιοχής κατεργασίας για την απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας από τις αλληπάλληλες διασπάσεις.

Το διηλεκτρικό υγρό που χρησιμοποιείται, με την κίνηση της αντλίας φιλτράρεται για να καθαρίσει από τα υπολείμματα της κοπής και στην συνέχεια επιστρέφει στην δεξαμενή. Τα κατάλληλα διηλεκτρικά υγρά είναι, συνήθως, ενώσεις υδρογονανθράκων (βενζίνη, πετρέλαιο, έλαια μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη κλπ). Τελευταία, για τη μικροκατεργασία και για την κοπή με ηλεκτροδιάβρωση με κινούμενο σύρμα - ηλεκτρόδιο, επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα και με απιονισμένο νερό ως μέσο κατεργασίας.

4.4 Μέθοδος κοπής με plasma.

Η διεργασία κοπής με Plasma ξεκίνησε στο χρονικό πλαίσιο του Β' Παγκοσμίου πολέμου όταν η ανάγκη για γρήγορη κατασκευή αεροπλάνων ήταν επιτακτική. Αρχικά δημιουργήθηκε η κοπή Πλάσματος, με ένα προστατευτικό αέριο να περιβάλλει το τόξο κοπής και έτσι να ελαχιστοποιεί τις οξειδώσεις στην επιφάνεια κοπής. Με το πέρασμα των χρόνων η κοπή με Πλάσμα βελτιώθηκε σημαντικά περιορίζοντας την διάμετρο του ακροφυσίου, η

θερμοκρασία στο σημείο κοπής αυξήθηκε σημαντικά, ενώ και η ταχύτητα του εκτοξευόμενου αερίου αυξήθηκε εντυπωσιακά, μειώνοντας τον χρόνο εξαέρωσης του υλικού που έπρεπε να κοπεί.

Σήμερα τα μηχανήματα είναι διπλής τάσης και υπάρχουν γεννήτριες από 100 μέχρι 400 Αμπέρ, αλλά υπάρχουν και μικρότερες για ελαφρύτερες δουλειές. Η Τεχνολογία Υψηλής Ευκρίνειας μεγάλωσε τα πλεονεκτήματα της κοπής με Πλάσμα, κάνοντας δυνατή την κοπή μαλακού χάλυβα από 0.3mm μέχρι και 160mm. Προβλέπεται ότι στο άμεσο μέλλον η κοπή με plasma θα αντικαταστήσει στις περισσότερες εφαρμογές την κοπή με λέιζερ. [7]

4.4.1 Συνθήκες δημιουργίας πλάσματος.

Τόσο στη Φυσική όσο και στη Χημεία ονομάζουμε πλάσμα την κατάσταση της ύλης στην οποία αυτή δεν λαμβάνει συγκεκριμένο όγκο και σχήμα που να οφείλεται στην ίδια (όπως συμβαίνει στα αέρια), και επιπλέον βρίσκονται ελεύθερα και όχι σε μοριακούς δεσμούς τα ηλεκτρικά φορτισμένα ατομικά της σωματίδια (ιόντα και ηλεκτρόνια). Υπάρχουν τρεις τουλάχιστον ορισμοί του πλάσματος:

- Ø Πλάσμα είναι ιονισμένο αέριο σε θερμοκρασία ,περίπου, 10^9 βαθμών Kelvin.
- Ø Πλάσμα είναι ένα μερικώς ιονισμένο αέριο. Δηλαδή ένα αέριο στο οποίο κάποια (αλλά όχι όλα) από τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται είναι ιόντα και ηλεκτρόνια. Το μερικώς ιονισμένο πλάσμα μπορεί να έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από το πλήρως ιονισμένο πλάσμα, για παράδειγμα της τάξης των 500 βαθμών Κελσίου. Τα ηλεκτρόνια σε ένα μερικώς ιονισμένο πλάσμα είναι πολύ πιο «θερμά» και δεν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με τα υπόλοιπα σωματίδια του αερίου. Ο βαθμός ιονισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία (και αντίστροφα).
- Ø Πλάσμα είναι η κατάσταση της ύλης η οποία αποτελείται από ελεύθερα ιόντα και ηλεκτρόνια. [8]

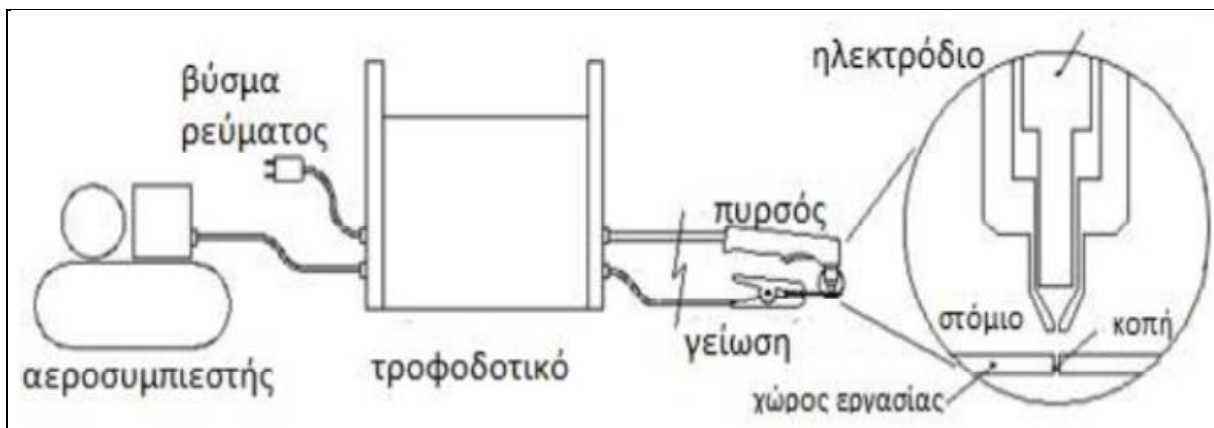
Το πλάσμα αποτελεί την τέταρτη κατάσταση της ύλης (οι υπόλοιπες τρεις είναι η στερεή, η υγρή και η αέρια). Το πλάσμα διαφέρει από ένα μη-ιονισμένο αέριο. Σχηματίζεται όταν ένα αέριο γίνει πολύ θερμό με αποτέλεσμα ηλεκτρόνια να δραπετεύσουν από το άτομό τους και να γίνονται ελεύθερα (ελεύθερα ηλεκτρόνια). Το πλάσμα συνίσταται επομένως από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα (άτομα ή μόρια που έχουν χάσει ή αποκτήσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια), και είναι υπεριοιτισμένη κατάσταση της ύλης. Το πλάσμα μπορεί να προκύψει από ένα αέριο στο οποίο έχει δοθεί αρκετή ενέργεια για να αποχωριστούν τα άτομα από τα ηλεκτρόνιά τους (ιονισμός) ώστε να παραχθεί ένα νέφος από ιόντα και ηλεκτρόνια. Το πλάσμα εκδηλώνει διαφορετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες από τις αντίστοιχες των αερίων.

Η θερμοκρασία, για παράδειγμα, στην οποία τα σωματίδια του πλάσματος αποκτούν συγκεκριμένη κατανομή ταχυτήτων εξαρτάται από τον βαθμό ιονισμού (και κατ' επέκταση την ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου που προκαλεί τον ιονισμό, ή την ένταση της ακτινοβολίας αν αυτή είναι η αιτία του ιονισμού). Η παραγωγή πλάσματος με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου έχει σημαντικές τεχνολογικές εφαρμογές, καθώς τεχνολογικές διεργασίες που μέχρι τώρα πραγματοποιούνταν με χρήση μη-ιονισμένων-αερίων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορούν πλέον να γίνονται με χρήση πλάσματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το οικονομικό όφελος είναι προφανές, καθώς δαπανάται λιγότερη ενέργεια. Επίσης, διεργασίες ανέφικτες με χρήση αερίων γίνονται τεχνικά δυνατές με χρήση πλάσματος.

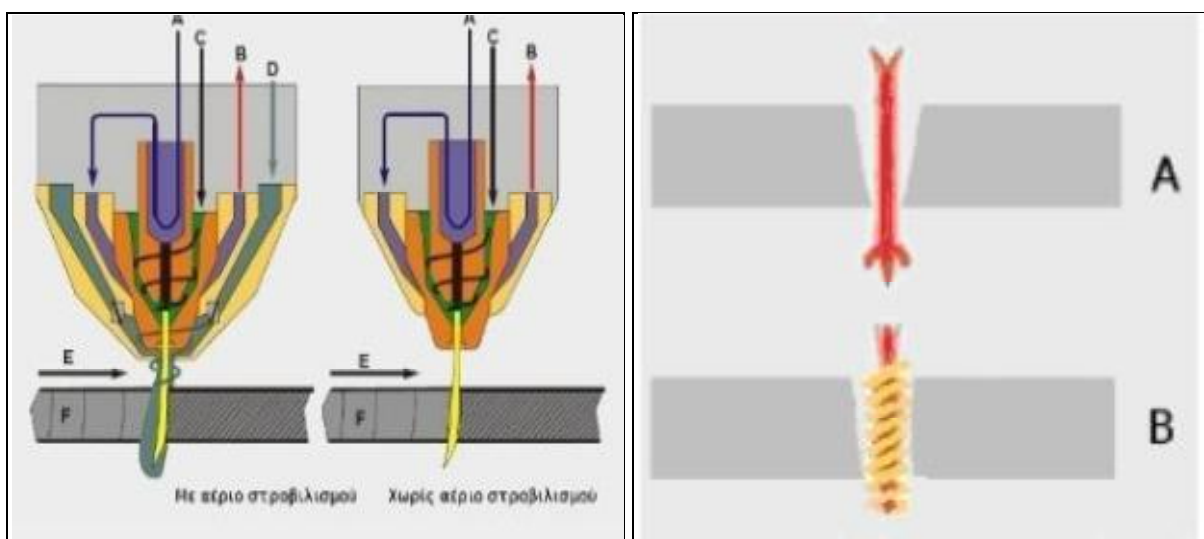
4.4.2 Αρχή λειτουργίας εργαλειομηχανής κοπής με πλάσμα.

Στην (Εικ.33) δίνονται τα επιμέρους εξαρτήματα μιας μηχανής πλάσματος, όπου παρατηρείται ο αεροσυμπιεστής, το τροφοδοτικό, ο πυρσός και η γείωση. Ο πυρσός πλάσματος χρησιμοποιεί ένα ακροφύσιο (beck) από κάποιο κράμα χαλκού για να περιορίσει το ρεύμα του ιονισμένου αερίου και να εστιάζει την ενέργειά του σε μία πολύ μικρή περιοχή. Το αέριο σε κατάσταση πλάσματος που βγαίνει με ορμή από το ακροφύσιο μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα στην προς κοπή λαμαρίνα την οποία και τήκει με ταυτόχρονη απομάκρυνση του τηγμένου μετάλλου από την ίδια τη ροή του πλάσματος.

Εξέλιξη στην τεχνολογία των μηχανών κοπής με πλάσμα είναι εξαγωγή από το ακροφύσιο ενός ευγενούς αερίου με περιδίνηση. Η εισαγωγή της τεχνολογίας περιδίνησης του αερίου υποβοηθά την κοπή με πολλούς τρόπους. Αρχικά η περιδίνηση αυξάνει την ψύξη. Τα μη ιονισμένα άτομα του αερίου είναι βαρύτερα και μικρότερης θερμοκρασίας από τα ιονισμένα, και καθώς αναγκάζονται σε περιδίνηση κατανέμονται στο εξωτερικό της περιδινούμενης στήλης του αερίου. Αυτό το ψυχρότερο φράγμα προστατεύει το χάλκινο ακροφύσιο (Εικ. 34). Όσο αυξάνει η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, τόσο μεγαλώνει το ποσοστό ιονισμένων ατόμων, αλλάζοντας τον "ιδανικό λόγο" 30%/70% (30% πλάσμα, 70% ψυχρό αέριο), και η ψύξη μειώνεται, μικραίνοντας τη ζωή του ακροφυσίου. Τα ακροφύσια σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε συγκεκριμένο φάσμα έντασης ρεύματος.



Εικόνα 33: Τυπικά επιμέρους τμήματα μηχανής πλάσματος.



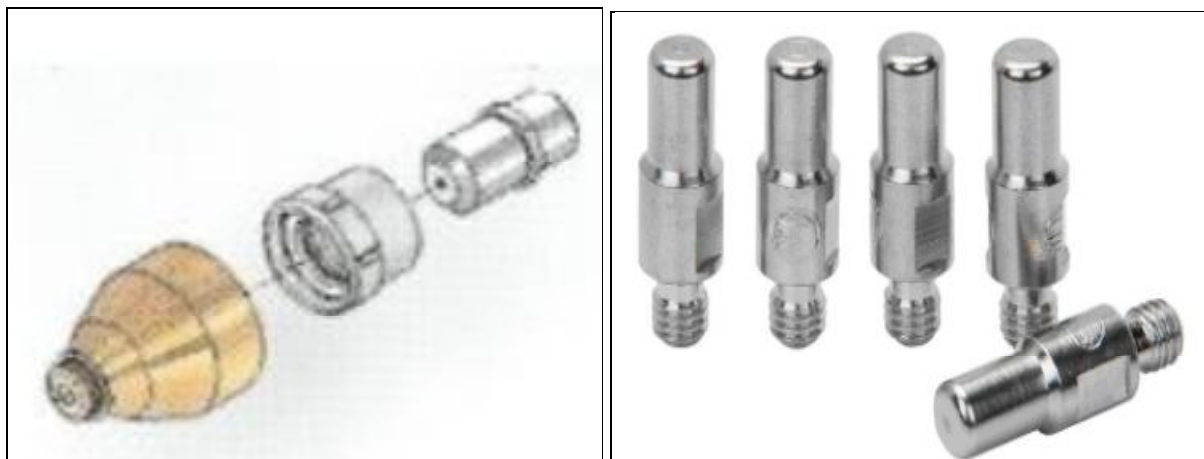
Εικόνα 34: Τομή ακροφυσίου - πυρσού πλάσματος με και χωρίς αέριο περιδίνησης (Swirl gas) – Επίδραση της περιδίνησης στην ποιότητα κοπής.

Στην (Εικ.34) η αναλυτική κατασκευαστική δομή του ακροφυσίου – πυρσού πλάσματος διακρίνεται στα ακόλουθα τμήματα:

- A Είσοδος ψυκτικού,
- B Έξοδος ψυκτικού,
- C Αέριο Πλάσματος,
- D Αέριο περιδίνησης [Swirl Gas],
- E Κατεύθυνη κοπής και
- F Επιφάνεια κοπής

Αναφορικά επίσης με τη μορφή κοπής η περίπτωση A αναφέρεται σε ευθεία ροή αερίου με την επιφάνεια κοπής φρεζαριστή και στις δύο πλευρές, ενώ η περίπτωση B αναφέρεται σε περιδίνηση αερίου με τη μία επιφάνεια κοπής κάθετη.

Η περιδίνηση του αερίου βελτιώνει την καθετότητα και την ποιότητα κοπής. Αν το αέριο του πλάσματος δεν έμπαινε σε περιστροφή, το αποτέλεσμα θα ήταν κοπή "φρεζαριστή", δημιουργία δηλαδή κωνικότητας, και στις δύο πλευρές του αυλακιού κοπής (A περίπτωση). Αναγκάζοντας το αέριο να περιδινείται, το τόξο κατανέμεται ομοιόμορφα στην μία πλευρά της "κολώνας", οπότε η κοπή από εκεί είναι "κάθετη" (B Περίπτωση). Εάν αλλάξει η φορά της περιδίνησης (ανάποδα από τη φορά περιστροφής των δεικτών του ρολογιού, αν πριν ήταν σύμφωνη με αυτήν), η κάθετη πλευρά θα αλλάξει αντιδιαμετρικά. Καθώς το ιονισμένο αέριο (το τόξο του πλάσματος) στριφογυρίζει, το ηλεκτρικό τόξο προσβάλλει κάθετα και σε όλο της το πλάτος την πλευρά του φύλλου που θα κόψουμε. Όταν γίνεται αυτό η ενέργεια κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το πάχος της κοπής του αντικειμένου εργασίας. Αυτή η ισοκατανομή της ενέργειας έχει αποτέλεσμα πιο "τετράγωνη" κοπή, ενώ από την αντίθετη πλευρά η επιφάνεια κοπής έχει μία γωνία κλίσης από 5 μέχρι 8 μοιρών. Η εισαγωγή αερίου προστασίας περιορίζει ακόμα περισσότερο το τόξο και ψύχει το ακροφύσιο. Αυτό το αέριο εισάγεται μετά τον ιονισμό του αερίου του πλάσματος, στην άκρη του ακροφυσίου.



Εικόνα 35: Εξαρτήματα του ακροφυσίου – ηλεκτρόδια [26].

Υπάρχουν τρία κύρια εξαρτήματα στο άκρο του πυρσού:

- A Το Ηλεκτρόδιο
- B Ο Ελεγκτής Περιδίνησης Αερίου (Gas ή Swirl Baffle)
- Γ Το Ακροφύσιο (beck)

Αυτά τα εξαρτήματα είναι αναλώσιμα. Φθείρονται με τη λειτουργία της μηχανής και πρέπει να αντικαθίστανται. Στην (Εικ. 35) φαίνονται τα εξαρτήματα σε σειρά: Ηλεκτρόδιο, Ελεγκτής Περιδίνησης Αερίου, Ακροφύσιο). Οι πυρσοί - ακροφύσια, μπορεί να έχουν κάπως

διαφορετική σχεδίαση, αλλά όλοι απαραίτητα έχουν τα τρία εξαρτήματα που επιτελούν τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. [9]

4.4.3 Εκκίνηση κοπής με πλάσμα.

Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του συνεχούς ρεύματος που παράγει η Γεννήτρια Ισχύος του Πλάσματος. Το ακροφύσιο συνδέεται στο θετικό πόλο αλλά απομονώνεται κατά την λειτουργία και είναι ηλεκτρικά μονωμένο μέσω ενός ανοιχτού διακόπτη (relay). Τα βήματα της διαδικασίας στο σύστημα με την εντολή έναυσης του τόξου έχουν ως ακολούθως:

1. Ο κεντρικός διακόπτης (relay) στην Πηγή Ισχύος ενεργοποιείται στέλνοντας ισχυρή αρνητική τάση στο Ηλεκτρόδιο.
2. Το Αέριο αρχίζει να ρέει προς την τσιμπίδα και υποχρεώνεται σε περιδίνηση από τον Ελεγκτή Περιδίνησης (Swirl Baffle ή Swirl Control).
3. Οι συνήθως ανοικτές επαφές στο κύκλωμα του ακροφυσίου κλείνουν, συνδέοντάς το με τον θετικό πόλο της γεννήτριας.
4. Μία γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων παρέχει υψηλής τάσης και συχνότητας δυναμικό ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το ακροφύσιο. Αυτό προκαλεί τη δημιουργία μικρού σπινθήρα ανάμεσα στο ακροφύσιο και το ηλεκτρόδιο που ιονίζει το αέριο που τα περιβάλλει.
5. Η δημιουργία αυτού του ιονισμένου "διαδρόμου" προκαλεί την έκλυση μεγαλύτερου τόξου συνεχούς ρεύματος ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το ακροφύσιο. Αυτό ονομάζεται Πιλοτικό Τόξο.
6. Το πιλοτικό τόξο ωθείται έξω από το ακροφύσιο, παρασυρόμενο από το ρεύμα του αερίου, και έρχεται σε επαφή με τη λαμαρίνα.
7. Το κύριο τόξο παράγεται όταν το πιλοτικό τόξο έρχεται σε επαφή με τη λαμαρίνα (με την προϋπόθεση πως η τσιμπίδα είναι αρκετά κοντά). Ο ηλεκτρονόμος (relay) του ακροφυσίου ανοίγει βγάζοντας το ακροφύσιο από το κύκλωμα. Έχουν δημιουργηθεί οι συνθήκες για τη δημιουργία τόξου.
8. Το κύριο τόξο ενισχύεται με παροχή ρεύματος μεγαλύτερης έντασης, μετά την απομόνωση του ακροφυσίου από το κύκλωμα με το άνοιγμα του κεντρικού διακόπτη (relay).

Εάν υπάρξουν ειδικές συνθήκες και το ακροφύσιο παραμείνει μέσα στο κύκλωμα, τότε έχουμε τη δημιουργία διπλού τόξου. Όπως περιγράψαμε προηγουμένως, το ακροφύσιο πρέπει να παραμένει μέσα στο κύκλωμα μόνο κατά τη φάση του πιλοτικού τόξου. Αν μείνει στο κύκλωμα και στη φάση του τόξου κοπής, θα καταστραφεί γιατί θα δεχτεί υψηλές εντάσεις κοπής. Το διπλό τόξο παράγεται από διάτρηση με ακίνητο πυρσό. Ο πυρσός πρέπει να τοποθετείται αρκετά κοντά στο υλικό ώστε να επιτρέψει στο πιλοτικό τόξο να έλθει σε επαφή μαζί της, για να μπορέσει να ξεκινήσει το κυρίως τόξο. Τα "πιτσιλίσματα" λιωμένου υλικού, στα αρχικά στάδια της διάτρησης τινάζονται προς όλες τις κατευθύνσεις αλλά προς τα πλάγια. Καθώς η διάτρηση προχωρά βαθύτερα, το ρεύμα αερίου "φυσάει" μέσα στο κοίλωμα, και ανακλάται προς τα επάνω, παρασύροντας κατακόρυφα προς τα επάνω και το τηγμένο υλικό. Αν αυτό το υλικό συγκεντρωθεί ανάμεσα στο ακροφύσιο και το υλικό, αφού είναι

καλός αγωγός του ρεύματος, θα κρατήσει το ακροφύσιο μέσα στο κύκλωμα, ακόμα και όταν ο ηλεκτρονόμος (relay) ανοίξει προσπαθώντας να το απομονώσει. Ένα τέτοιο σενάριο μπορεί να καταστρέψει ολόκληρο το εμπρόσθιο άκρο του πυρσού. [9]

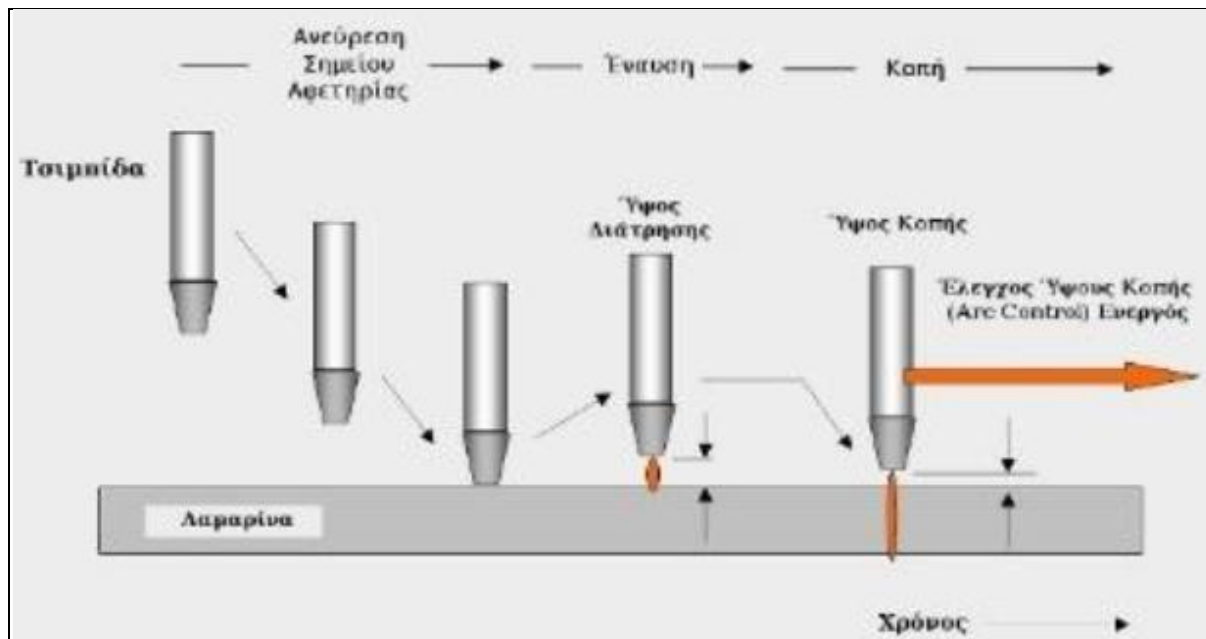
4.4.4 Απόσταση ακροφυσίου – πυρσού με το προς κατεργασία υλικό.

Όλα τα συστήματα αυτόματης τοποθέτησης του άκρου του πυρσού κάνουν χρήση κάποιας μεθόδου ανίχνευσης του ύψους του από το υλικό ώστε να τοποθετήσουν το άκρο του σωστό ύψος από αυτό. Μία μέθοδος είναι η Μέθοδος Επαφής και Απομάκρυνσης. Το άκρο του πυρσού κατεβαίνει αργά μέχρι να αποκτήσει επαφή με το υλικό και ανυψώνεται στο σωστό αρχικό ύψος κάνοντας χρήση κάποιου χρονισμού ή κάποιας κωδικοποίησης. Αν η επαφή δεν γίνει αντικείμενο σωστής επεξεργασίας, τότε ο πυρσός μπορεί να παραμείνει σε επαφή με τη λαμαρίνα λόγω αναπηδήσεων της λαμαρίνας ή στρεβλώσεών της.

Το ακροφύσιο θα παραμείνει στο κύκλωμα και θα δεχτεί εντάσεις κοπής για τις οποίες δεν είναι προορισμένο, με αποτέλεσμα να καταστραφεί. Η δυσλειτουργία του Πιλοτικού Τόξου μερικές φορές μπορεί να συμβεί και ο ηλεκτρονόμος (relay) του ακροφυσίου να μην το απομονώνει. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται σε βραχυκύκλωση του relay ή σε κάποια βραχυκυκλωμένη αντίσταση. Και σε αυτή την περίπτωση το ακροφύσιο το διατρέχει ρεύμα μεγαλύτερης έντασης από τις προδιαγραφές του, και καταστρέφεται.

Όπως αναφέρθηκε το διπλό τόξο συνήθως συμβαίνει κατά τη διαδικασία της διάτρησης. Μερικές τεχνικές που μπορούν να μας βοηθήσουν να το αποφύγουμε είναι οι ακόλουθες:

- ∅ Η αργή κίνηση του πυρσού. Η μηχανή προγραμματίζεται έτσι ώστε στη φάση της δημιουργίας του κυρίως τόξου να κινεί τον πυρσό αργά. Η ταχύτητα της κίνησης είναι μικρή, περίπου στο 5 μέχρι 10% της κανονικής ταχύτητας κοπής, και διαρκεί μόνο για περιορισμένο χρόνο. Ανύψωση του ακίνητου πυρσού κατά τη διάτρηση. Το πιτσίλισμα του τηγμένου υλικού κατά τη διάτρηση δεν μπορεί να εκτοξευθεί πάνω στο ακροφύσιο αφού αυτό κινείται, έτσι μειώνεται η πιθανότητα διπλού τόξου.
- ∅ Ανύψωση του ακίνητου πυρσού κατά τη διάτρηση (σχήμα 5.2). Όταν δημιουργείται το κυρίως τόξο, ο πυρσός αρχίζει να απομακρύνεται από τη λαμαρίνα, οπότε το λιωμένο υλικό δεν μπορεί εύκολα να πλήξει το ακροφύσιο. Η ανύψωση συνεχίζεται για το χρονικό διάστημα που είναι προγραμματισμένο και μετά ο πυρσός κατεβαίνει στο σωστό ύψος κοπής αφού η μηχανή έχει αρχίσει να την κινεί με την ταχύτητα κοπής.
- ∅ Ύψος αρχικής διάτρησης μεγαλύτερο από το κανονικό (Διάτρηση με ακίνητο πυρσό). Το μεγαλύτερο ύψος κάνει πιο δύσκολο στο τηγμένο υλικό που εκτοξεύεται προς τα επάνω να δημιουργήσει "γέφυρα" ανάμεσα στο ακροφύσιο και τη λαμαρίνα, μειώνοντας τις πιθανότητες για τη δημιουργία διπλού τόξου. Αυτή η μέθοδος προφύλαξης είναι η λιγότερο αποτελεσματική.



Εικόνα 36: Μεταφορική κίνηση τσιμπίδας [32].

Στην (Εικ.36) δίνεται η κίνηση του ακροφυσίου (τσιμπίδας), κατά την ανεύρεση του σημείου αφεταιρίας για την έναυση και την κοπή. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταβλητές που επηρεάζουν τη διαδικασία κοπής πρέπει να ελέγχονται όλες πολύ προσεκτικά για να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ποιότητα κοπής και διάρκεια ζωής των αναλωσίμων (ηλεκτρόδιο και ακροφύσιο) καθώς και η υψηλότερη παραγωγικότητα της μηχανής [9].

4.4.5 Παράμετροι ποιότητας κοπής.

Σημαντικός παράγοντας για μια καλή ποιότητα κοπής είναι η καθαρότητα του αερίου. Αυτή επίσης σχετίζεται άμεσα με την όσο το δυνατό μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των αναλωσίμων. Ελάχιστες απαιτήσεις καθαρότητας του Αζώτου είναι το 99,995% και για το Οξυγόνο το 99,5%. Αν τα επίπεδα καθαρότητας είναι χαμηλότερα από τα ελάχιστα συνιστώμενα μπορούν αν συμβούν τα παρακάτω:

- Ø Αδυναμία του τόξου να διεισδύσει σε λεπτά υλικά ανεξάρτητα από την ένταση του ρεύματος
- Ø Αυξομειώσεις στην ποιότητα κοπής, ανάλογα με τον βαθμό μόλυνσης του αερίου.
- Ø Εξαιρετικά μικρή διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου, που βρίσκεται στον άκρο του πυρσού.
- Ø Εμφάνιση ενός λεπτού μαύρου στρώματος καταλοίπων στο ηλεκτρόδιο και το στόμιο του ακροφυσίου. Όσο μεγαλύτερη η μόλυνση, τόσο εντονότερο το στρώμα των καταλοίπων. Όταν το αέριο είναι καθαρό, το ηλεκτρόδιο και το εσωτερικό του μπεκ θα αποκτούν όψη σαν να έχουν περάσει από διαδικασία αμμοβολής.

Εξίσου σημαντικοί παράγοντες για την ποιότητα κοπής είναι η πίεση και η ταχύτητα του αερίου. Πιο αναλυτικά κάθε ακροφύσιο είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί με μια βέλτιστη ένταση ρεύματος σε συνδυασμό με μία δεδομένη πίεση κατά τη ροή του αερίου. Γενικότεροι παράμετροι για τη δημιουργία του τόξου πλάσματος είναι η ένταση ρεύματος 50A έως 350A,

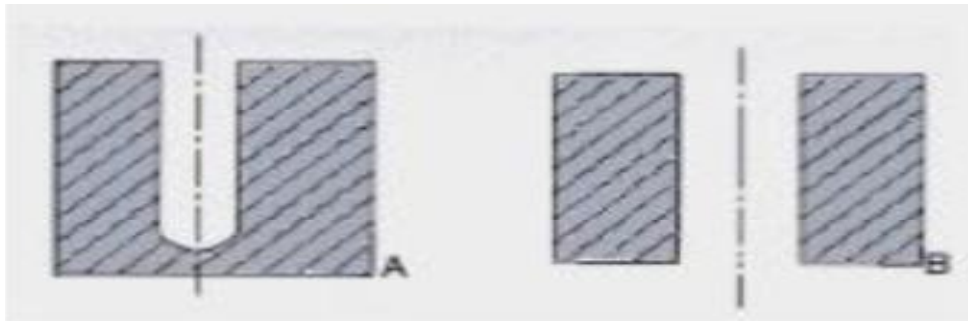
τάση ρεύματος 27V έως 31V και ροή αερίου 2 έως 40lt/min (η χαμηλότερη κλίμακα ροής αερίου είναι για το αέριο πλάσματος και η υψηλότερη για το προστατευτικό αέριο). Πιθανές μεταβολές στην ένταση του ρεύματος και την πίεση του αερίου είναι δυνατόν να προκαλέσουν κάποια λειτουργικά προβλήματα όπως:

- Ø Αύξηση της πίεσης άνω του συνιστώμενου ορίου είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μείωση της διάρκειας ζωής του ηλεκτροδίου,
- Ø Η εμφάνιση βαθιάς κοιλότητας στο κέντρο του ηλεκτροδίου αποτελεί ένδειξη μιας ροής του αερίου σε ταχύτητα μεγαλύτερη από τη συνιστώμενη,
- Ø Η γρήγορη και έντονη περιδίνηση του αερίου πλάσματος είναι δυνατόν να οδηγήσει σε γρήγορη φθορά του ηλεκτροδίου, με παράλληλη εμφάνιση βαθιάς κοιλότητας στο κέντρο του.
- Ø Η εμφάνιση πολλών μικρών οπών στην άκρη του ηλεκτροδίου αποτελεί ένδειξη αντίστοιχης βλάβης στο εσωτερικό του ακροφύσιου. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνιστούν ταχύτητα ροής των αερίων μικρότερη της συνιστώμενης. Ουσιαστικά μια μικρή ταχύτητα ροής έχει ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη δημιουργία τόξων ανάμεσα στο ακροφύσιο και το ηλεκτρόδιο.
- Ø Το άζωτο ως χρησιμοποιούμενο αέριο συχνά παρουσιάζει πρόβλημα κατά την έναυση του τόξου. Εάν επίσης δεν προκύπτει σπινθήρας από τον πυρσό σε συνθήκες υψηλής πίεσης τότε αυτό μπορεί να οφείλεται σε διακοπτόμενο τόξο.
- Ø Ανεπαρκής ροή αερίων στο στάδιο της έναυσης δημιουργεί το φαινόμενο του “αργού σπινθήρα”. Το τόξο καθυστερεί πολύ να φτάσει από το σημείο εκκίνησης στο στοιχείο εκπομπής (emitting element). Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι το ηλεκτρόδιο θα έχει γύρω από το κοίλωμα ένα αρκετά ομοιόμορφο δαχτυλίδι από λιωμένο υλικό που περιβάλλει τον πυρήνα. Η επιφάνεια θα δίνει την εντύπωση πως το εμπρόσθιο μέρος του ηλεκτροδίου έχει καλυφθεί από “πιτσιλίσματα” κόλλησης (solder splash).

4.4.6 Χαρακτηριστικά ποιότητας εντομής κοπής (kerf).

Ως εντομή κοπής ορίζεται το πλάτος του υλικού (κάθετα στον πυρσό και τον άξονα κοπής) που αφαιρείται κατά την διαδικασία κοπής.. Η εντομή κοπής επηρεάζεται από τρεις κύριες μεταβλητές:

Ταχύτητα Κοπής: Αύξηση της ταχύτητας κοπής με σταθερές τις υπόλοιπες μεταβλητές προκύπτει μια πιο στενή εντομή κοπής. Αυτή η εντομή κατά τη διεργασία υπό τις παραπάνω συνθήκες θα συνεχίσει να στενεύει μέχρι του σημείου που δεν θα υπάρχει πλέον η ικανότητα διείδυσης στο υλικό (Εικ.37Α). Αντίθετα με μειωμένη ταχύτητα κίνησης της τσιμπίδας το αποτέλεσμα θα είναι μια πιο πλατιά εντομή κοπής μέχρι του σημείου που θα συμβεί απώλεια του τόξου (Εικ.37Β). Στην Εικ.37 δίνεται ένα χαρακτηριστικό στιγμιότυπο μιας αποτυχημένης κοπής με χαρακτηριστικό μια στενή εντομή (Α), και μιας ολοκληρωμένης κοπής με μια πιο πλατιά εντομή.



Εικόνα 37: Εντομή κοπής (kerf) σε σχέση με την ταχύτητα κοπής [2].

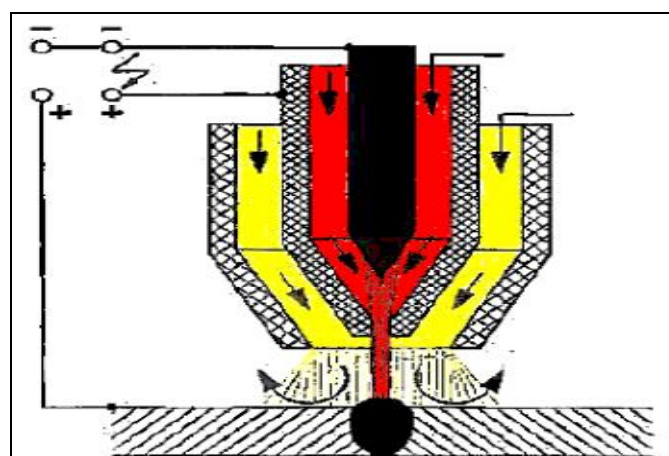
Ένταση του ρεύματος Κοπής: Αύξηση της έντασης του ρεύματος με σταθερές τις υπόλοιπες μεταβλητές προκύπτει μια πιο πλατιά εντομή κοπής. Περαιτέρω αύξηση της έντασης του ρεύματος η εντομή θα συνεχίσει να μεγαλώνει μέχρι τη στιγμή που θα καταστραφεί το μπεκ. Από την άλλη πλευρά μείωση της έντασης του ρεύματος, οδηγεί σε μια πιο στενή εντομή κοπής, μέχρι που θα χαθεί η ικανότητα διείσδυσης στο υλικό (Εικ. 37Α).

Ύψος Κοπής: Ως ύψος κοπής ορίζεται η απόσταση ανάμεσα στην τσιμπίδα και την επιφάνεια του υλικού που κατεργάζεται, αφού τελειώσει η φάση της διάτρησης. Τα περισσότερα μοντέρνα συστήματα χρησιμοποιούν κάποιο σύστημα αισθητήρων με ανάδραση τάσης τόξου. Με την αύξηση της τάσης του τόξου αυξάνει το ύψος κοπής και διευρύνεται η εντομή κοπής. Αν συνεχίσει να αυξάνει το ύψος κοπής θα χαθεί κάποια στιγμή η ικανότητα κοπής. Μείωση του ύψους κοπής θα οδηγήσει σε στενότερη εντομή κοπής και τελικά, σε απώλεια της ικανότητας κοπής.

Τάση του Τόξου: Η τάση του τόξου δεν είναι ανεξάρτητη μεταβλητή. Εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος, από τη διάμετρο του στομίου του ακροφυσίου, το ύψος κοπής, την ταχύτητα ροής του αερίου και την ταχύτητα κοπής.

4.4.7 Αέρια κοπής πλάσματος.

Τα αέρια που απαιτούνται για τις περιπτώσεις κοπής πλάσματος είναι το αέριο έναυσης, το αέριο προστασίας και το αέριο κοπής. Το αέριο έναυσης και το αέριο κοπής είναι το ίδιο αρχικό αέριο που στη φάση της έναυσης είχε τη μορφή αερίου και στη συνέχεια παίρνει τη μορφή πλάσματος για την πραγματοποίηση της κοπής.



Εικόνα 38: Μορφή πυρσού σε τομή.

Στην Εικ.38 με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η διαδρομή του αερίου κοπής και με κίτρινο χρώμα η διαδρομή του αερίου προστασίας ή αερίου ψύξης. Οι μεταβλητές που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την απόφαση του συνδυασμού των αερίων που θα χρησιμοποιηθούν είναι:

- Ø Ο τύπος και το πάχος του υλικού
- Ø Η επιθυμητή ποιότητα κοπής
- Ø Η ταχύτητα και Το κόστος παραγωγής

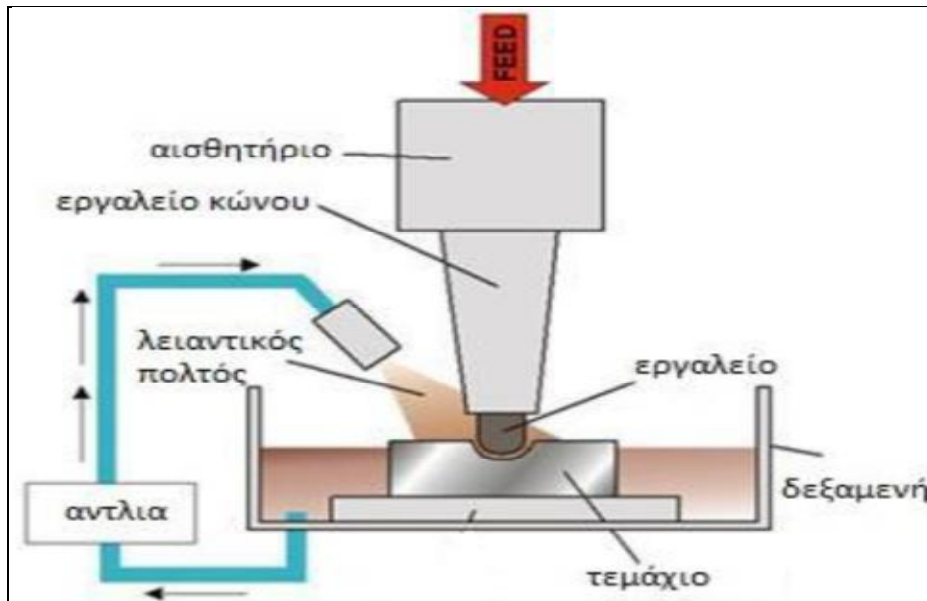
4.5 Μέθοδος αφαίρεσης υλικού με κατεργασία υπερήχων (*Ultrasonic Machining*)

Σε αυτή τη μέθοδο η κατεργασία γίνεται με τη χρήση υπέρηχων. Σε γενικές γραμμές η συσκευή αποτελείται από μία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, από ένα ηλεκτρομαγνητικό ή πιεζοηλεκτρονικό μετατροπέα της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικές δονήσεις και από ένα σύστημα ενίσχυσης και εστίασης των δονήσεων.

Η μηχανική κατεργασία υπερήχων περιγράφει τις διαδικασίες στις οποίες ένα άλλο ακίνητο εργαλείο δονείται σε υψηλές συχνότητες. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των λειαντικών σωματιδίων που περιέχονται σε ένα υγρό πολτό και το τεμάχιο εργασίας, αφαιρούν το υλικό με διάβρωση καθώς το εργαλείο δονείται. Οι μετατοπίσεις εργαλείων είναι μικρές, συνήθως μερικά χιλιοστά της ίντσας σε συχνότητες της τάξης των 20 kHz. Ο τύπος και το μέγεθος των λειαντικών κόκκων που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια με αυτά που υπάρχουν στους τροχούς λείανσης. Αυτή η διαδικασία είναι διαφορετική από τις παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας, ενισχυμένες με την προσθήκη υπερηχητικών δονήσεων του εργαλείου, οι οποίες μερικές φορές αναφέρονται και ως τεχνικές επεξεργασίας υπερήχων. Οι κοιλότητες και οι διαμορφώσεις που θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους μπορούν να κατασκευαστούν σε φύλλα εποξεικού γραφίτη ή υαλο-εποξικές με μηχανική κατεργασία υπερήχων [44]. Έχει διερευνηθεί η επίδραση του υλικού εργαλείων, της συγκέντρωσης των λειαντικών σωματιδίων στον πολτό, της απόδοσης και του επιφανειακού φινιρίσματος στις σπές διάτρησης σε κεραμικά υλικά [45]. Τα εργαλεία από ανοξείδωτο χάλυβα διαπιστώθηκε ότι έχουν καλύτερη απόδοση από τα εργαλεία από μαλακό χάλυβα ή χάλυβα υψηλής ταχύτητας.

4.5.1 Αρχή λειτουργίας κοπής με χρήση υπερήχων - USM.

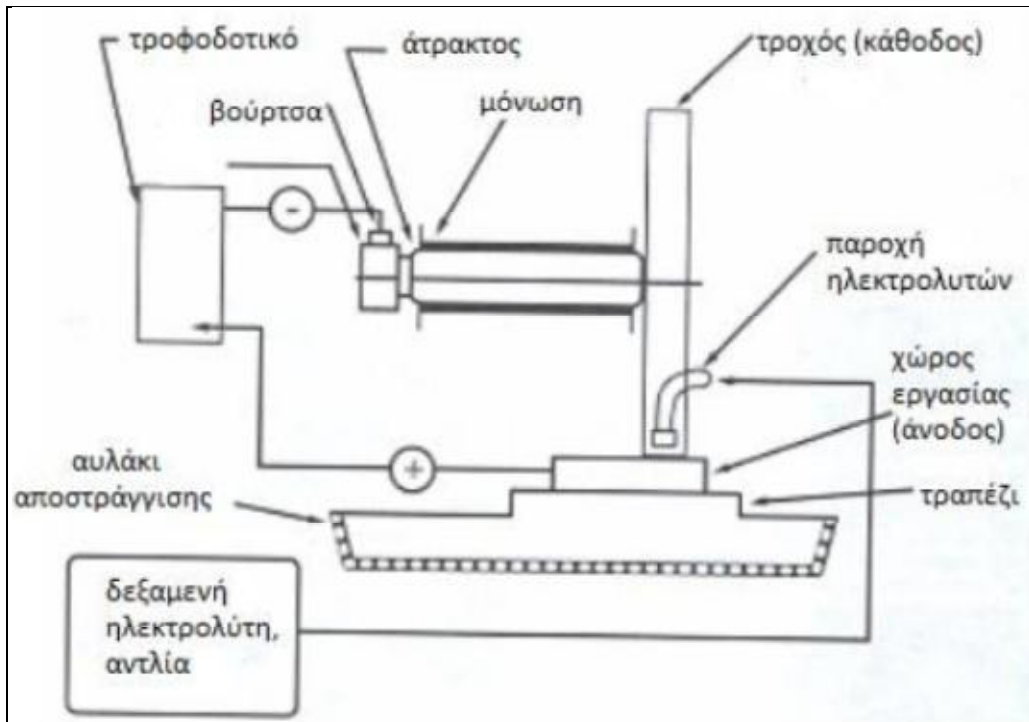
Σήμερα η μέθοδος αυτή πέρα από τις μεγάλες δυνατότητες της, τα τελευταία χρόνια επίσης η μέθοδος αυτή θεωρείται και η ασφαλέστερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μη συμβατικές – προηγμένες μεθόδους κατεργασίας υλικών. Σε αυτή την άποψη καταλήγουν πολλοί ερευνητές λόγω του ότι κατά αυτή τη μέθοδο δεν χρησιμοποιείται ρεύμα υψηλής τάσης, φλόγα, κοπή, χημικά ή επικίνδυνες μηχανικές κινήσεις. Σήμερα εφαρμόζεται στην απομάκρυνση ψαθυρών καταλοίπων από στιβαρά υλικά (καθαρισμός καταλοίπων βενζίνης ή πετρελαίου από ηλεκτρομηχανικούς ψεκαστήρες στους κινητήρες οχημάτων) και πιθανόν στο μέλλον να υπάρξουν και άλλες πιο παραγωγικές εφαρμογές. [11]



Εικόνα 39: Αρχή λειτουργίας κοπής υπερήχων [32].

4.6 Μέθοδος αφαίρεσης υλικού με Ηλεκτροχημική λείανση (Electrochemical Grinding – ECG)

Η μέθοδος αυτή, ονομάζεται και ηλεκτρολυτική λείανση, είναι συνδυασμός της ηλεκτροχημικής κατεργασίας και της συμβατικής λείανσης. Η εργαλειομηχανή μοιάζει με μία συμβατική λειαντική μηχανή, με τη διαφορά ότι το εργαλείο- ο λειαντικός τροχός- εδώ είναι μία περιστρεφόμενη κάθοδος, εφοδιασμένη με κόκκους λειαντικού υλικού. Ο τροχός είναι από μεταλλικό συνδετικό υλικό και έχει κόκκους είτε από διαμάντι είτε από οξείδιο του αλουμινίου. Το λειαντικό υλικό δρα σαν μονωτικό μεταξύ του τροχού και του κομματιού και απομακρύνει με μηχανική δράση τα προϊόντα της ηλεκτρόλυσης από τη περιοχή κατεργασίας. Μεταξύ του κομματιού και του τροχού κυκλοφορεί ηλεκτρολύτης για την εξυπηρέτηση της ηλεκτροχημικής φάσης της κατεργασίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της αφαίρεσης υλικού γίνεται ηλεκτρολυτικά και μόνο ένα 5% γίνεται από τη λειαντική δράση του τροχού. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, γενικά, στις περιπτώσεις υλικών υψηλής σκληρότητας (καρβίδια, ειδικά κράματα όπως Hastelloy, Inconel, Monel, κτλ) όπου η χρήση συμβατικών μεθόδων λείανσης θα συνεπαγόταν τη ταχύτερη φθορά των τροχών. [12] Είναι μια τεχνολογία μη συμβατικής κοπής που δεν έχει συχνή χρήση και αναμένεται να αναπτυχθεί τα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 40: Αρχή λειτουργίας Ηλεκτροχημικής λείανσης [32].

5 Συζήτηση.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αποτίμηση των προηγμένων μεθόδων κατεργασίας σύνθετων υλικών. Αναφέρονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών στα πλαίσια μια συγκριτικής μελέτης. Πριν από όλα όμως παρατίθενται μερικά από τα χαρακτηριστικά (πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα) των σύνθετων υλικών.

5.1 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών.

Τα παραδοσιακά υλικά (μέταλλα, κεραμικά, πολυμερικά) χρησιμοποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή λόγω κάποιων εξαιρετικών ιδιοτήτων. Ωστόσο ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει νέες ιδιότητες οι οποίες να ανταποκρίνονται ακόμη καλύτερα στις απαιτήσεις τις εκάστοτε εφαρμογής.

Τα σύνθετα υλικά είναι ελαφρύτερα συγκρινόμενα με τα περισσότερα ξύλα και μέταλλα. Σε ένα υλικό, συνήθως μέταλλο, η αντοχή συνδυάζεται με μεγάλη μάζα. Στα σύνθετα υλικά μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα και μικρή μάζα και μεγάλη αντοχή. Αυτό είναι ένα σημαντικό στοιχείο στις κατασκευές, όπου τα φορτία μικραίνουν σημαντικά, στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική, όπου η μικρότερη μάζα επιτρέπει τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, μικρότερη αδράνεια με σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες πλοήγησης. Τα σύνθετα με εγκλείσματα ίνες κυρίως, παρουσιάζουν σημαντικά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας ειδικά στη διεύθυνση των ινών. Η δυνατότητα κατευθυντικότητας του μέτρου ελαστικότητας τα κάνει ιδιαίτερα δημοφιλή μεταξύ των μηχανικών που σχεδιάζουν τις διάφορες κατασκευές. Τα υλικά αυτά μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι βλάβες που μπορούν να προκληθούν επιφανειακά είτε από τον καιρό είτε από τη χρήση επικινδύνων χημικών. Τα σύνθετα κερδίζουν έδαφος σε εφαρμογές αποθήκευσης και χειρισμού χημικών, ενώ παρέχουν εξαιρετική προστασία απέναντι στα φυσικά φαινόμενα και τις μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας.

Άλλα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά είναι οι μονωτικές τους ιδιότητες, το γεγονός ότι μπορούν να είναι μη-μαγνητικά (ανάλογα τη μήτρα και το έγκλεισμα), ενώ παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Όλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά συνδυάζονται με το γεγονός ότι οι μηχανικοί μπορούν να τα παρασκευάσουν σε όποιες διαστάσεις και σχήμα χρειάζεται η εφαρμογή. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα που έχουν να διατηρούν το σχήμα τους ανεξαρτήτως συνθηκών είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς και το γεγονός ότι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής με μικρό κόστος συντήρησης. Μερικά από τα μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι το υψηλό επίπεδο ερπυσμού που παρουσιάζουν, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά και ανάλογα με τη μήτρα η ικανότητα τους να αντέχουν ακραίες εξωτερικές συνθήκες.

5.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατεργασιών.

Οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας αποβολής υλικού (δηλαδή η κοπή με την χρήση τόννου, φρέζας ή πλάνης κ.α.) παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ø Υψηλή ακρίβεια.
- Ø Μεγάλη ποικιλία υλικών.
- Ø Ευελιξία στις γεωμετρικές μορφές.
- Ø Κατάλληλη για μικρή ποσότητα παραγωγής.

Οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας αποβολής υλικού παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα :

- Ø Σχετικά χαμηλό βαθμό εκμετάλλευσης του υλικού. (σε ορισμένα υλικά όπως υπερκράματα, πυρίμαχα, κεραμικά και χάλυβες υψηλής αντοχής)
- Ø Η πρόσδοση πλαστικού έργου μέσω των διατμητικών τάσεων για τη δημιουργία αποβλήτου, καθορίζεται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και είναι ο βασικός μηχανισμός κοπής. Ένα ποσοστό ενέργειας προσδίδεται στο υλικό για την κοπή και ακολούθως απομακρύνεται με τη μορφή θερμότητας συσσωρευμένη στην μεγάλη ποσότητα των αποβλήτων.
- Ø Η θερμότητα που παραμένει στη μάζα του υλικού είναι η αιτία δημιουργίας προβλημάτων παραμόρφωσης των υλικών, αλλά και των ρηγματώσεων στην επιφάνεια που έχει προκύψει από την αφαίρεση του υλικού. Η παραμόρφωση αυτή είναι το αποτέλεσμα των παραμενουσών τάσεων οι οποίες είναι εντονότερες όταν η γεωμετρία του σχήματος που κόβεται είναι αρκετά πολύπλοκη.
- Ø Η αναγκαστική τις περισσότερες φορές θερμική επεξεργασία (αποτατική ανόπτηση κ.λ.π.) για την ομαλοποίηση των τάσεων που έχουν αναπτυχθεί στη μάζα του υλικού. Αυτό έχει σαν συνέπεια την άνοδο του κόστους του παραγόμενου προϊόντος δεδομένου ότι οι θερμικές επεξεργασίες, αλλά και οι εργασίες αφαίρεσης των οξειδίων (τρόχισμα) κυρίως από την κάτω πλευρά του αφαιρούμενου τμήματος έχουν χρόνο εργασίας και χρήση αναλώσιμων υλικών λείανσης, άρα κόστος.
- Ø Χαμηλό ρυθμό παραγωγής.
- Ø Σημαντική φθορά του εργαλείου κοπής.

Οι μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας αποβολής υλικού (δηλαδή η κοπή με την χρήση LASER, η υδροκοπή, η ηλεκτροδιάβρωση, η κοπή με πλάσμα, κτλ) παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

- Ø Βελτιωμένες απαιτήσεις στη ποιότητα κοπής, καθώς προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και φινίρισμα της επιφάνειας.
- Ø Μεγάλο βαθμό εκμετάλλευσης του υλικού και χρήση νέων υλικών.
- Ø Κοπή πολύπλοκης γεωμετρίας.
- Ø Ελάχιστη έως μηδενική φθορά της εργαλειομηχανής.
- Ø Λειτουργία χωρίς έντονο θόρυβο.
- Ø Μη θερμική παραμόρφωση των υλικών.

Οι μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας αποβολής υλικού παρουσιάζουν τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Ø Υψηλό κόστος αγοράς των εργαλειομηχανών, κυρίως για μικρά μηχανουργία.
- Ø Χειρισμό από εξειδικευμένο χρήστη.

Η πλέον κατάλληλη μέθοδος κοπής είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, τα ζητούμενα από μία μέθοδο κοπής είναι να υπάρχει η μέγιστη δυνατή ικανοποίηση των παρακάτω :

- Ø Μεγάλη ταχύτητα κοπής και άρα μείωση του κόστους κοπής
- Ø Βελτιωμένες απαιτήσεις ποιότητας κοπής
- Ø Ενδεχόμενη χρήση νέων υλικών
- Ø Ακρίβεια των διαστάσεων του προϊόντος
- Ø Κοπή πολύπλοκης γεωμετρίας
- Ø Αυτοματοποίηση των συστημάτων κοπής (συστήματα CNC)

5.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κοπής Λείζερ.

Η τεχνολογία κοπής με Laser παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Ø Υψηλή ακρίβεια. Καθώς η χρήση του αντίστοιχου φακού εστίασης δημιουργεί το ανάλογο πάχος στη δέσμη κοπής και σε συνδυασμό με την τεχνολογία CNC είναι η μοναδική τεχνολογία που επιτρέπει κοπή ή χάραξη πολύπλοκων σχημάτων.
- Ø Εξαιρετική ποιότητα κοπής.
- Ø Μικρό πλάτος ίχνους κοπής – εντομής (kerf).
- Ø Μεγάλη ταχύτητα κοπής.
- Ø Πολύ μικρή ζώνη θερμικού φορτίου σε σύγκριση με άλλες τεχνικές θερμικής κοπής.
- Ø Πολύ μικρή εφαρμογή θερμότητας, στην περιοχή του ίχνους εντομής – κοπής με αποτέλεσμα τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση του κατεργασμένου υλικού.
- Ø Κοπή πολλών διαφορετικών τύπων υλικών συμπεριλαμβανομένων και σύνθετων.
- Ø Κοπή και χάραξη με το ίδιο εργαλείο.
- Ø Δυνατότητα κοπής σύνθετων γεωμετρικών σχημάτων, μικρών οπών.
- Ø Καμία επαφή ανάμεσα στο υλικό και το εργαλείο διαμόρφωσής του, επομένως εφαρμογή μηδενικών δυνάμεων στο αντικείμενο που κατεργάζεται.
- Ø Εύκολος και άμεσος έλεγχος της ισχύος του Laser σε πλατύ φάσμα (1-100%) που κάνει δυνατή την μείωση της ισχύος όταν κόβονται απότομες και πολύ μικρές γωνίες.
- Ø Το επίστρωμα οξειδίων στην επιφάνεια κοπής, που δημιουργείται από τον πυρσό λείζερ, είναι πολύ λεπτό και εύκολα αφαιρούμενο.
- Ø Κοπή με Laser με υψηλής πίεσης Άζωτο κάνει δυνατή κοπή ελεύθερη οξειδώσεων.

Η τεχνολογία κοπής με Laser παρουσιάζει τα ακόλουθα Μειονεκτήματα :

- Ø Αναθυμιάσεις. Η κοπή πλαστικών υλικών παράγει τοξικούς καπνούς από το λιωμένο υλικό και απαιτεί καλά αεριζόμενο περιβάλλον.
- Ø Περιορισμοί των υλικών κοπής. Δεν κόβεται με Laser ο χαλκός και το αλουμίνιο γιατί αντανακλούν πολύ φως και έχουν μεγάλο πάχος . Επίσης εύθραυστα και διαφανή υλικά όπως το γυαλί και το κρύσταλλο.
- Ø Απαιτείται υψηλή ενέργεια για την λειτουργία του Laser.
- Ø Ρυθμός Παραγωγής. Ενώ η κοπή με Laser είναι μια γρήγορη διαδικασία ο ρυθμός παραγωγής εξαρτάται απο τον τύπο του Laser, το πάχος και το είδος του υλικού.

5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Υδροκοπής (Waterjet).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υδροκοπής είναι η δυνατότητα κοπής του τεμαχίου χωρίς την αλλοίωση της εσωτερικής του δομής, καθώς επίσης και η δυνατότητα για ψύξη κατά την κοπή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι παρατηρούμενες μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τα συστήματα υδροκοπής είναι δυνατόν να κατασκευάσουν περίπλοκα σχήματα, ενώ υποστηρίζουν και κεφαλές τρισδιάστατης διαμόρφωσης για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στο τελικό σχήμα [12]. Η λεπτή δέσμη του νερού, έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρότερη απώλεια σε υλικό, εξοικονομώντας σημαντικά τη δαπάνη αγοράς και ανακύκλωσης υλικού. Λόγω της φύσης των μηχανημάτων υδροκοπής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά σε κάθε βιομηχανική εφαρμογή όπως οι αφροί, τα πλαστικά, το δέρμα, η πέτρα, το γυαλί, τα κεραμικά, τα σύνθετα και πολλά άλλα υλικά

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας υδροκοπής συνοψίζονται στα ακόλουθα :

- Ø Ευελιξία στη παραγωγή

- Ø Ακρίβεια κοπής
- Ø Μικρό πλάτος κοπής
- Ø Δεν επιφέρεται στο τεμάχιο επιφανειακή σκλήρυνση
- Ø Δεν δημιουργείται θερμική καταπόνηση
- Ø Δεν προκύπτει καπνός, αναθυμιάσεις και σκόνες
- Ø Είναι φιλική στο περιβάλλον
- Ø Το λειαντικό υγρό, ο γραφίτης είναι μη τοξική φυσική ουσία και ανακυκλώσιμη.

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας υδροκοπής συνοψίζονται στα ακόλουθα :

- Ø Μικρή ταχύτητα κοπής σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, άρα και μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας
- Ø Κακή ποιότητα κοπής για τα χοντρά μέταλλα γιατί δημιουργείται κώνικη διάτρηση με αποτέλεσμα να προκαλεί λανθασμένες διαστάσεις
- Ø Η χρησιμοποίηση νερού με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα προκαλεί σκουριά και αναγκάζει τον χρήστη να επενδύσει στο φιλτράρισμα και τον απιονισμό του νερού. [5]

5.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα αφαίρεσης υλικού με Ηλεκτροδιάβρωση.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης της ηλεκτροδιάβρωσης συνοψίζονται στα εξής:

- Ø Με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι δυνατή η κοπή υλικών πολύπλοκων σχημάτων που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο να παραχθούν με συμβατικά εργαλεία κοπής.
- Ø Η μέθοδος προσφέρει εξαιρετική κοπή σε σκληρά υλικά με ελάχιστες ανοχές για την επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών.
- Ø Είναι δυνατή η κοπή πολύ μικρών τεμαχίων εργασίας τα οποία με συμβατικές μεθόδους και εργαλεία κοπής θα οδηγούσαν σε καταστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου από υπερπίεση του εργαλείου κοπής.
- Ø Δεν υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ του εργαλείου και του σημείου εργασίας. Ως εκ τούτου, λεπτά τμήματα και αδύναμα υλικά μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς καμία παραμόρφωση.
- Ø Μπορεί να επιτευχθεί καλό φινίρισμα επιφάνειας.
- Ø Μπορούν να ανοιχτούν εύκολα οπές.

Στα μειονεκτήματα χρήσης της ηλεκτροδιάβρωσης συγκαταλέγονται:

- Ø Ο αργός ρυθμός αφαίρεσης υλικού.
- Ø Ο πιθανός κίνδυνος πυρκαγιάς που συνδέεται με τη χρήση διηλεκτρικών με βάση το πετρέλαιο.
- Ø Ο επιπλέον χρόνος και το κόστος που προκύπτει για τη δημιουργία ηλεκτροδίων στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης.
- Ø Η φθορά του ηλεκτροδίου όταν αναπαράγει ευκρινείς γωνίες στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Ø Η ειδική κατανάλωση ενέργειας και γενικά η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ υψηλή.
- Ø Υπερβολική φθορά του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Ø Τα μη ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά δεν μπορούν να κατεργαστούν.

5.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα κοπής με πλάσμα.

Τα πλεονεκτήματα κοπής με πλάσμα είναι :

- Ø Η κοπή πλάσματος είναι εφικτό να γίνεται με μεγάλη ταχύτητα. Ειδικότερα οι αυτόματες εργαλειομηχανές πλάσματος είναι πέντε φορές πιο γρήγορες από ό, τι οι παραδοσιακές εργαλειομηχανές και είναι σε θέση να κόψουν έως και 1m/min .
- Ø Η κοπή πλάσματος μπορεί να διαχειριστεί ένα ευρύ φάσμα υλικών και πάχους αυτών. Ειδικότερα με την κατάλληλη εκλογή αερίων η κοπή με αυτόματες εργαλειομηχανές πλάσματος μπορούν να επιτύχουν ακριβείς διεργασίες σε μεγάλη ποικιλία μετάλλων και πάχους.
- Ø Παρουσιάζει μεγάλη ευκολία χρήσης. Οι αυτόματες εργαλειομηχανές πλάσματος απαιτούν οριακή κατάρτιση, που τις καθιστά φιλικές προς το χρήστη.
- Ø Τα συστήματα κοπής πλάσματος δεν περιορίζονται μόνο στην κοπή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες , ευθυγραμμίζοντας το υλικό τέλεια.
- Ø Η κοπή πλάσματος προσφέρει μεγάλη ασφάλεια όταν οι εργαλειομηχανές πλάσματος χρησιμοποιούν φυσικό αέριο κοπής που δεν είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο.
- Ø Η κοπή με δέσμη πλάσματος είναι μια οικονομικά αποδοτική εφαρμογή, είναι φθηνότερη από την υδροκοπή και την κοπή με Laser.

Τα μειονεκτήματα της κοπής με πλάσμα είναι :

- Ø Ότι προκαλεί σκλήρυνση στις ακμές των υλικών λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.
- Ø Τα υπολείμματα σκουριάς λόγω της κοπής αναγκάζουν ένα επιπλέον καθαρισμό στο κατεργαζόμενο υλικό.
- Ø Το κόστος των αυτόματων εργαλειομηχανών πλάσματος σε σχέση με τις χειροκίνητες.
- Ø Ο καπνός, η σκόνη και τα αέρια που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της κοπής.

5.6 Ανακεφαλαίωση.

Η τεχνολογική πρόοδος και οι συνεχόμενα αυξανόμενες απαιτήσεις για κατασκευές ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες, οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών. Η αύξηση της αντοχής και η ταυτόχρονη μείωση του βάρους έχουν ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, το χαρακτηριστικό μέγεθος των νέων υλικών είναι οι υψηλές τιμές του λόγου αντοχή / βάρος, σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά. Τα νέα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε ένα πλήθος κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, τα τεχνικά έργα, καθώς επίσης και οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων καθημερινής χρήσης. Στην κατηγορία των νέων υλικών συγκαταλέγονται και τα σύνθετα υλικά (composite materials), που ήδη παρουσιάζουν ευρύτατη εφαρμογή σε πολλούς κατασκευαστικούς τομείς. Η ιδέα της κατασκευής και της χρήσης σύνθετων υλικών προέρχεται από την αρχαιότητα. Επίσης η ανάπτυξη νέων τεχνικών, η χρησιμοποίηση νέων πρώτων υλών και η ποικιλία των διάφορων υλικών οδήγησε στην παραγωγή όλο και πιο βελτιωμένων υλικών. Η βασική ιδέα της ανάπτυξης ενός σύνθετου υλικού είναι η φυσική ανάμειξη δύο ή περισσοτέρων υλικών με σκοπό την δημιουργία ενός νέου υλικού το οποίο θα έχει τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των αρχικών υλικών. Έτσι, κάνοντας μια κατάλληλη επιλογή των αρχικών υλικών, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα σύνθετο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες. Από το γεγονός αυτό συμπεραίνουμε ότι ο μεγάλος αριθμός των συνδυασμών των υλικών δημιουργεί πολλούς τύπους σύνθετων υλικών. Ένας από τους πιο γνωστούς και πλέον διαδεδομένους τύπους είναι τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Composites) όπου μία συνεχής φάση που ονομάζεται μήτρα (matrix) ενισχύεται με ίνες (fibers). Οι πιο γνωστές μήτρες είναι οι πολυμερικές και οι τύποι ινών που συνήθως

χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά είναι οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι ίνες γυαλιού (glass fibers), οι ίνες aramid (Kevlar), οι κεραμικές ίνες (ceramic fibers) και τέλος οι πολυμερικές ίνες (polymeric fibers). Η συμπεριφορά, η επάρκεια και το χαμηλό κόστος των πολυμερικών αυτών υλικών, είχε ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση των μετάλλων σε πολλές κατασκευές. Έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στην ανάπτυξη των πολυμερικών υλικών, στις αρχές της δεκαετίας του 20ου αιώνα, διαδραμάτισε η χημεία δημιουργώντας μία νέα επιστήμη που είχε μία ραγδαία ανάπτυξη, την επιστήμη των πολυμερών.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν την αιχμή της τεχνολογίας αυτή τη στιγμή, γιατί καταφέρνουν να συνδυάσουν αρμονικά μεταξύ τους τις ιδιότητες διαφορετικών παραδοσιακών υλικών. Κυρίως, καταφέρνουν να επιτύχουν παραπλήσιες ή και καλύτερες ιδιότητες από αυτές των παραδοσιακών υλικών με ταυτόχρονη εξάλειψη των μειονεκτημάτων τους. Η ραγδαία εξάπλωση της χρήσης των σύνθετων υλικών, οδηγεί σε νέες μεθόδους κατεργασίας τους, αλλά και βελτίωση των παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας, προκειμένου αυτές να μπορούν να τα μορφοποιήσουν. Τόσο οι παραδοσιακές τεχνικές όσο και οι σύγχρονες, συνδυάζονται αρμονικά για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα και το κατεργαζόμενο αντικείμενο να είναι έτοιμο να αντεπεξέλθει στις πραγματικές συνθήκες χρήσης του.

Η τελευταία θέση αποδεικνύεται από το υλικό που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες όπου κατά τρόπο συνοπτικό αλλά και συνεκτικό αποδόθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των πιο σύγχρονων τεχνικών κατεργασίας σύνθετων υλικών. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι οι νέες μέθοδοι κατεργασίας βρίσκονται ακόμα σε διαρκή εξέλιξη και ανάπτυξη και αυτό αποδεικνύεται από το πλήθος των νέων ερευνητικών εργασιών που εξακολουθούν να παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Από την ως άνω μελέτη γίνεται προφανές ότι υπάρχει μεγάλο πεδίο γνώσης αναφορικά με κάθε μία από τις προηγμένες μεθόδους κατεργασίας σύνθετων υλικών. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχει γίνει ουσιαστικά η αναγνώριση των βασικών χαρακτηριστικών των μεθόδων, ενώ στόχος για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η παρακολούθηση της ανάπτυξης και της εξέλιξης κάθε μίας ξεχωριστά για μια σε βάθος ανάλυση.

6 Αναφορές

1. Abrate S., Walton D., Machining of composite materials Part – I: Traditional Methods, Composites in Manufacturing Vol3(2), pp.75 – 84,
2. Abrate S., Walton D., Machining of composite materials Part – II: Non Traditional Methods, Composites in Manufacturing Vol3(2), pp.85 – 94,
3. Adams, R.B. ‘Waterjet machining of composites’ Composites in Manufacturing, Los Angeles, CA, USA, Jan 13-16, 1986, SME Paper EM86-113
4. Anantha, R., Krishnamurthy, R. and Gokularathnam, C.V.J. ‘Machining performance of toughened zirconia ceramic and cold compact alumina ceramic in ultrasonic drilling’ Mechanical Working Technology 20 (1989) pp 365-376
5. Andersson, C.H., Stahl, J.E. and Andersson, M. ‘Plastic deformation and machining properties of some low volume fraction short-fibre reinforced metal matrix composite materials’, in Mechanical and Physical Behaviour of Metallic and Ceramic Composites, Proc 9th Riso Int Symp on Metallurgy and Mater Sci Sept 5-9 (1988), S.I. Andersen et al. eds, pp 263-268,
6. Anon A., ‘Abrasive-water-jet cutting shapes metal matrix and organic matrix composites’ Am Mach Auto Manuf 132 (1988) pp 17,
7. Antonsson, A.B. and Runmark, S. ‘Airborne fibrous glass and dust originating from worked reinforced plastics’ Am Indust Hygiene Assoc J 48 No 8 (1987) pp 684-687
8. Bak, D.J. ‘Drill senses hardness changes as it passes through stackups’ Design News 45 (1989) pp 182-183,
9. Beard, T. ‘Machining composites -‘new rules and tools’ Modern Machine Shop 61 No 11 (April 1989) pp 74-85,
10. Brown, C.A. and Surappa, M.K. ‘Machinability of a cast aluminum alloy-graphite particle composite’ Mater Sci Eng A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing A102 No 1, (1988) pp 31-37,
11. Γκοτσοπούλου Ι., Κρεμαστιώτη Α., Σύνθετα Υλικά σε νέες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, Πτυχιακή Εργασία, ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ 2008,
12. Chryssolouris G., Sheng P., and Choi, W.C. ‘Investigation of laser grooving for composite materials’ Annals of the CIRP 37 No 2 (1988) pp 161-164,
13. Chryssolouris G., Bredt J., Kordas, S. and Wilson, E. ‘Theoretical aspects of a laser machine tool’ J Eng for Industry 110 (1988) pp 65-70,

13. Chryssolouris, G., Sheng, P. and Choi, W.C. 'Three dimensional laser machining of composite materials' J Eng Mater and Technol 112 No 4 (1990) pp 387-392,
14. Chryssolouris, G. and Sheng, P. 'Aspects of surface quality for laser machining of composite materials' 1990 Transactions of NAMRI/SME pp 250-255,
15. Chryssolouris, G. and Choi, W. C. 'Theoretical aspects of laser grooving' Proc 14th Conf on Production Research and Technology Society of Manufacturing Engineers (1987) pp 323-331,
16. Cronjager, L. and Meister, D. 'Drilling of fibre and particle reinforced aluminum', in Composite Material Technology 1991, Proc of 14th Annual Energy Sources Technology Conf and Exhibition, Houston, TX, Jan 20-23, 1991, Vol 37, pp 185-189,
17. Di Ilio, A., Tagliaferri, V. and Veniali, F. 'Tool life and hole quality in drilling aramid and fibrous composites', in Composite Material Technology 1991. Proc of 14th Annual Energy Sources Technology Conf. and Exhibition, Houston, TX, Jan 2, 1991, ASME Publ. PD-Vol 37, pp 203-207,
18. Δρίτσος 2001, («ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ», Πάτρα 2001, 2η έκδοση»
19. Doran, J.H. and Maikish, C.R. 'Machining boron composites' Composites Materials in Engineering Design, B.R. Noton, Ed., ASM, 1973, pp 242-250,
20. Engemann, B.K. 'Water jet cutting of fiber reinforced composite materials' Industrial and Production Engineering 3 (1981),
21. Everestine, G.C. and Rogers, T.G. 'A theory of machining of fibre-reinforced materials' J Coma Mater 5 (1971) DD 74-106 Sadat, A.B., 'Machining of graphite/epoxy compd & materials' SAMPE Q 19 No 2 (Jan 1988) pp 104,
22. Friend, C.A., Clyne, R.W. and Valentine, G.G. 'Machining graphite composite materials', Composite Materials in Engineering Design. B.R. Noton. Ed. (ASM 1073) DD 217-224,
23. Gibson, P.R., Clegg, A.J. and Das, A.A. 'Production and evaluation of squeeze-cast graphitic Al-Si alloys' Mater Sci Technol (1985) pp 559-567,
24. Gindy, N.N.Z. 'Selection of drilling conditions for glass fibre reinforced plastics' J Research 25 No 8 (1988) 1317-1327 Lambert, B.K. 'Cutting and drilling of composite materials' Carbide and Tool J 19 No 5 (1987) pp 31-34,
25. Griswold, N.C., Massanvek, WA. and Hougk, C.L. 'Morphological structures in analysis and inspection of hole quality in fibre composites' J Testing and Evaluation 17 No 5 (1989) pp 281-286,

26. Ηλιόπουλος Α., Μηχανουργικές Κατεργασίες σε Σύνθετα Υλικά – Μελέτη επίδρασης στις μηχανικές ιδιότητες αυτών, Πτυχιακή Εργασία ΤΕΙΔΕ, 2015,
27. Hamatani, G. and Ramulu, M. ‘Machinability of high temperature composites by abrasive waterjet’ Machining Con&sites, M. Taya, M. Ramulu, Eds. ASME M.D.-V01 12, Presented at ASME Winter Annual Meeting, Chicago, IL, Nov 27-Dee 2 (1988) pp 45-62,
28. Hashish, M. ‘Machining of advanced composites with abrasive waterjets’ Manufacturing Review 2 No 2 (1989) pp 142-150,
29. Hashish, M. ‘Turning with abrasive-waterjets - a first investigation’ J Eng for Industry 109 No 4 (1987) pp 281-290, Hickey, J. ‘Drilling graphite composites’ Modern Machine Shop (March 1987) pp 84-90 82 Composites Manufacturing No. 2 1992,
30. Ho-Cheng, H. and Dahran, C.K.H. ‘Delamination during drilling in composite laminates’ J Eng for Industry 112 (1990) pp 236-239-
31. Ho-Cheng, H. ‘Failure analysis of water jet drilling in composite laminates’ Int J Machine Tools and Manufacture 30 No 3 (1990), pp 423-429,
32. Ιτσόπουλος Σ., Σύγχρονες μη συμβατικές εργαλειομηχανές κοπής – Τεχνολογία λειτουργίας και ελέγχου, Πτυχιακή Εργασία ΤΕΙ Καβάλας, 2014,
33. Inouk, H. and Kawaguchi; I. ‘Study on the grinding mechanism of glass fiber reinforced plastics’ J Eng Mater Technol 12 (1990) pp 341-345, Kinknid, R. ‘Quality holes in composites with PCD cutting tools’ Cutting Tool Engineering 40 No 3 (1988) pp 50-52,
34. Jain, V.K., Sreenivasa Rao, P., Choudhary, S.K. and Rajurkar, K.P. ‘Experimental investigations into traveling wire electro-chemical spark machining (TW-ECSM) of composites’ J Eng for Industry 13 (1991) pp 75-84,
35. Jain, V.K., Tandon, S. and Kumar, P. ‘Experimental investigations into electrochemical spark machining of composites’ J Eng for Industry 112 (1990) pp 194-197
36. Kim, T.J. and Posner, L. ‘Piercing and cutting of ceramics with abrasive-waterjets’ Proc Symposium on Machining of Ceramic Materials and Components, ASME, PED 17 (1985) pp 19-24,
37. Konig, W., Dauw, D.F., Levy, G. and Panten, U. ‘EDM – future steps towards the machining of ceramics’ CIRP Annals, Manufacturing Technology 37 (2) (1988) p 623,
38. Konig, W., Wulf, C., Grawq P. and Wiiiierscheid, H. ‘Machining of fibre reinforced plastics’ Manufacturing Technology CZRP Annals 34 No 2 (1985) pp 537-548,
39. Konig, W. and GraS, P. ‘Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets’ Annals of the CZRP 38 No 1 (1989) pp 119-124

40. Konig, W., Grass, P., Heintze, A., Okcy, F. and Schmitz-Justin, C. 'Developments in drilling & contouring composites containing Kevlar' *Production Engineer* 63 No 8 (1984) pp 56-61,
41. Koplev, A. 'Cutting of CFRP with single edge tool' *Proc 3rd Int Conf Comp Mater, ICCM3, Paris, 1980*, pp 1597-1605,
42. Koplev, A., Lystrap, A. and Vorm, T. 'The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP' *Composites* 14 No 4 (1983) pp 371-376,
43. Lambert. B.K. 'Finding low-cost methodology when machining composites' *Cutting Engineering* 39(7) pp.20 -22
44. Lamkert, B.K. 'Find low-cost methodology when machining composites' *Cutting Tool Engineering* 39 No 7 (1987) pp 20-22,
45. Lau, W.S., Wang, M. and Lee, W.B. 'Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials' *Znf J Machine Tools and Manufacture* 30(2) (1990) pp 297-308,
46. Lawson, W. E. 'Laser cutting of composites' in *Composites in Manufacturing* (Society of Manufacturing Engineers, Los Angeles, CA, USA, 1986) pp 1-10,
47. Mackey, B.A. 'How to drill precision holes in reinforced plastics in a hurry' *Plastics Engineering* (1980) pp 22-24,
48. Mello, M.D. 'Laser cutting of non-metallic composites' *Proc SPIE - Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering* 668 (1986) pp 288-290
49. Miller, J.A. 'Drilling graphite/epoxy at Lockheed' *Am Much Auto Mu&131 No 10* (Ott 1987) pp 70-71,
50. Miner, L.H. 'Cutting and machining Kevlar aramid composites' *Proc Kevlar Composites Symposium, El Segundo, CA, Dee 4-6, 1979*, pp. 85-93,
51. Nagao, T. and Hatamura, Y. 'Investigation into drilling laminated printed circuit board using a torque-thrust-temperature sensor' *Annals of the CZRP* 37 No 1 (1988) vv 79-82,
52. Nakamura. M.. Kanavama. K. and Hirai, Y. 'Electra-discharge machining' of ' transfhрмаiion toughened ZrO-NbC ceran&composite' *Material and Manufacturing Processes* 4 No 3 (1989), pp 425-437,
53. Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., Σύνθετα Υλικά, ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ 2007,
54. Radkkrishnan, T and Wu, S.M. 'On-line hole quality evaluation for drilling composite materials using dynamic data' *.Z Eng for Industry* 103 (1981) pp 119-125,
55. Ramulu, M. and Taya, M.I. 'EDM machinability of SiCw/Aw composites' *J Mater Sci* 24 No 3 (1989) pp 1103-1 108,

56. Ramulu, M., Faridnia, M., Garb & J.L. and Jorgensen, J.E. 'Machining of graphite/epoxy composite materials with polycrystalline diamond (PCD) tools' *J Eng Mater Technol* 13 (1991), pp 430-436,
57. Rohatgi, P.K., Murali, N., Shetty, H.R. and Chandrashekhar, R. 'Improved machinability of graphite particle-aluminum alloy composites' *Mater Sci Eng* 26 (1976) pp 115-122,
58. Sadat, A.B. 'Machining of composites' *Encyclopedia of Composites*, Vol3 (1990) pp 95-102,
59. Sadat, A.B., Chan, W.S. and Wane, B.P. 'Delamination of graphite/epoxy laminate during drilling operation' *Composite Material Technology 1990*, ASME PD. Vol32, D. Hui, T.J. Kozik, Eds pp 85-88 (1990),
60. Sadat, A.B., Chan, W.S. and Wang, B.P. 'Prediction of edge delamination load in a sawing operation of graphite/epoxy laminate', in *Composite Material Technology 1991*, Proc of 14th Annual Energy Sources Technology Conf and Exhibition, Houston, TX, Jan 20-23, 1991, pp 113-116,
61. Sadat, A.B. 'The effect of cutting speed and width of cut on interlaminar tensile strength of graphite/epoxy composite material' *ASTM J Composite Technology and Research* 10 No 4 (1988) pp 173-176,
62. Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R. and Malhotra, S.K. 'High speed steel tool wear studies in machining of glass-fibre reinforced plastics' *J Mater Sci* 132 No 2 (1989) pp 327-336,
63. Sakuma, K., Yokoo, Y. and Seto, M. 'Study on drilling of reinforced plastics (GFRP and CFRP)' *Bulletin of JSME* 27 No 228 (1984) pp 1237-1244,
64. Sakuma, K. and Seto, M. 'Tool wear in cutting glass fibre reinforced plastics (the relationship between cutting temperature and tool wear)' *JSME Bulletin* 24 No 190 (1981) pp 748-755,
65. Sakuma, K. and Seto, M. 'Tool wear in cutting glass fibre reinforced plastics (the relationship between fibre orientation and tool wear)' *JSME Bulletin* 26 No 218 (1983) pp 1420-1427,
66. Sprow, E.E. 'Cutting composites: three choices for any budget', *Tooling & Product* 43 No 12 (1987) pp 46-50,
67. Tagliaferri, V., Caprino, G. and Diterlizzi, A. 'Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites' *J Mach Tools Manu* 30 No 1 (1990) pp 77-84,

68. Takeyama, H. and Iijima, N. 'Machinability of glass fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining' CIRP Annals 37 No 1 (1988) pp 93-96
69. Vanderwert, T. L. 'Machining plastics with lasers' Manufacturing Engng (Nov 1983) pp 55-58,
70. Wong," T.L., Wu, SM. and 'Croy,' 'GM. 'An analysis of delamination in drilling composite materials' Proc 14th SAMPE Tech Conf 1982, pp 471-483.