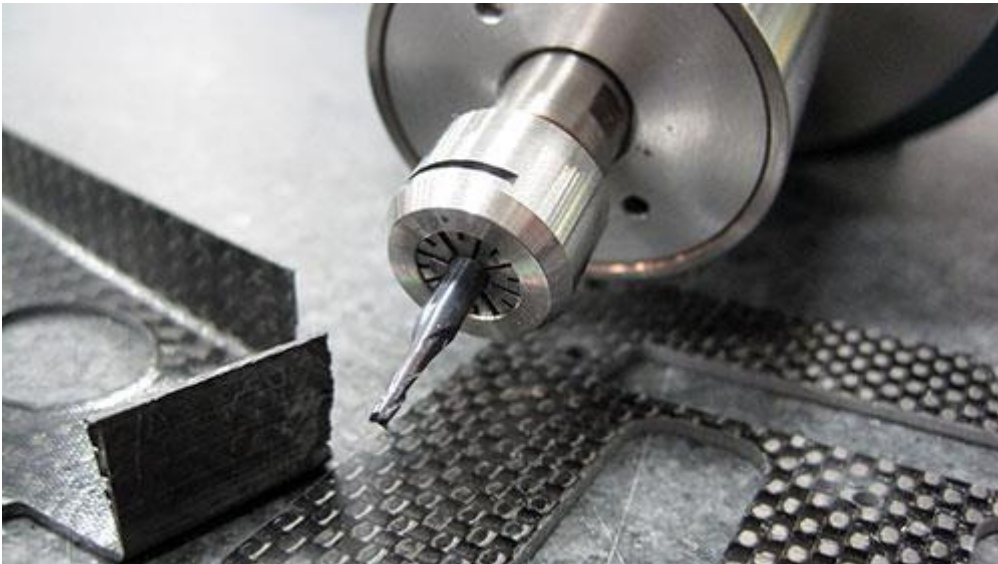


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ. Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ  
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ  
ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΥΤΩΝ.**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ  
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

## ***Πρόλογος***

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπόνησα στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του κύκλου σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολογίας του Α.Τ.Ε.Ι. Πατρών. Η εργασία αναφέρεται στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών μετά από κατεργασία με μεγαλύτερη έμφαση στη διάτρηση. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στην εταιρία ‘ΑΔΑΜΑΝΤ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΕ’ και με βοήθησε να αντιληφθώ με πρακτικό τρόπο τα προβλήματα που προκύπτουν σε πραγματικές συνθήκες εργασίας.

Για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μεγάλο ρόλο έπαιξε η βοήθεια που είχα από τον Δρ.Αντώνη Βαβουλιώτη, διευθύνων σύμβουλο της ΑΔΑΜΑΝΤ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΕ και τον κ. Δημήτριο Αραβαντινό Υπεύθυνο Παραγωγής στην ΑΔΑΜΑΝΤ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΕ’, που στήριξαν την υλοποίηση της εργασίας μου παρέχοντας κάθε είδους βοήθεια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω των Δρ.Στέφανο Τσινόπουλο, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της πτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα, επιπλέον, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε και μου παρέχει στο διάστημα της φοιτητικής μου ζωής αλλά και την συμμετοχή της στην διαμόρφωση της προσωπικότητάς μου.

Ηλιόπουλος Αναστάσιος

Οκτώβριος 2015

## *Περίληψη*

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. Μια από τις πιο βασικές και παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας είναι η διάτρηση, η οποία χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειοψηφία των παρασκευαζόμενων αντικειμένων.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη της ποιότητας των οπών που διανοίχθηκαν με χρήση διαφορετικών παραμέτρων σε δύο πλάκες ινών άνθρακα με διαφορετικό προσανατολισμό ινών στην κάθε μία. Η χρήση διαφορετικών παραμέτρων αποσκοπεί στην επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων για κάθε πλάκα προκειμένου η ποιότητα της οπής να βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων κατά τη μελέτη της με το οπτικό μικροσκόπιο.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας, γίνεται μια προσπάθεια να δοθούν οι ορισμοί που αφορούν τα σύνθετα υλικά, μια σύντομη ιστορική αναδρομή και ταξινόμησή τους. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση ορισμένων εφαρμογών των σύνθετων υλικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παραδοσιακές και σύγχρονες μέθοδοι κατεργασίας των υλικών, με ιδιαίτερη έμφαση στην κατεργασία της διάτρησης. Επίσης παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία για την κατασκευή των πλακών καθώς και της διαδικασίας διάτρησής τους, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Από τα αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι οι συνθήκες που μπορούσαν να μελετηθούν δεν επαρκούν για τη δημιουργία οπών με αποδεκτή ποιότητα. Στη μεγάλη πλειοψηφία των οπών που διανοίχθηκαν υπήρχαν μη αποδεκτά στοιχεία, για τα οποία γίνεται αναλυτικά συζήτηση στο τέταρτο κεφάλαιο.

Τέλος, η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επηρεάζει την ποιότητα της οπής, ωστόσο στα πλαίσια των δυνατοτήτων που παρέχονται σε μια πτυχιακή εργασία δεν κατέστη δυνατή η πλήρης μελέτη όλων των πιθανών συνδυασμών, οδηγώντας μόνο σε συμπεράσματα-οδηγούς.

## *Περιεχόμενα*

<i>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</i>	<b>II</b>
<i>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</i>	<b>III</b>
<i>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</i>	<b>V</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	<b>3</b>
1.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή	3
1.2 Ταξινόμηση και ιδιότητες σύνθετων υλικών	6
1.3 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών	13
1.4 Εφαρμογές σύνθετων υλικών	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	<b>18</b>
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Παραδοσιακές Τεχνικές Επεξεργασίας	18
2.3 Σύγχρονες Τεχνικές Επεξεργασίας	29
2.4 Μέθοδοι Μελέτης Μηχανικών Ιδιοτήτων	36
2.5 Κατεργασιμότητα σύνθετων υλικών	46
2.6 Σκοπός εργασίας	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	<b>51</b>
3.1 Κατασκευή πλακών	51
3.2 Διάτρηση πλακών	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	<b>57</b>
4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	57
4.2 Συζήτηση	71
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ</b>	<b>74</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>75</b>

## Εισαγωγή

Από τα πρώτα χρόνια της εμφάνισης του ανθρώπου πάνω στη Γη, έγινε κατανοητό ότι η δυνατότητα να καλυτερεύσει τους όρους επιβίωσής του περνά μέσα από τη χρήση εργαλείων και κατασκευών με χρήση των υλικών που έδινε απλόχερα η φύση. Αρχικά με τη χρήση πετρωμάτων, ξύλου, δέρματος και άλλων υλικών κατασκευάστηκαν τα πρώτα εργαλεία, τα πρώτα προστατευτικά ρούχα και άλλα αντικείμενα.

Με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη των μεθόδων επεξεργασίας προέκυπταν ολοένα περισσότερα και καλύτερα εργαλεία η χρήση των οποίων διευκόλυνε την καθημερινή δραστηριότητα των ανθρώπων. Μέσα από αυτή την ιστορική εξέλιξη, φτάσαμε σήμερα στην δυνατότητα κατασκευής μεγάλων κτιρίων, αεροπλάνων, διαστημικών σταθμών και άλλων μεγάλων έργων με τη χρήση παραδοσιακών αλλά και σύνθετων υλικών.

Τα σύνθετα υλικά, βρίσκουν πλέον ευρεία εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, λόγω των ιδιοτήτων τους και της ικανότητας που μας παρέχουν για παρασκευή υλικών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η ραγδαία εξάπλωση της χρήσης τους, οδήγησε σε αναζήτηση τρόπων επεξεργασίας ακριβώς λόγω της διαφορετικής σύστασης από τα συμβατικά υλικά. Το γεγονός ότι τα σύνθετα υλικά δεν είναι ομογενή, είναι ανισοτροπικά ενώ σε αρκετές περιπτώσεις συναντώνται ίνες στη σύνθεσή τους, δημιουργεί μεγάλη δυσκολία στην κατεργασία τους.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι κατεργασίας τους όπως είναι η διάτρηση, η τόννευση, το πριόνισμα και η λείανση μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό προϋποθέσεις και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες εργασίας, ωστόσο τα μηχανήματα που θα χρησιμοποιηθούν αναμένεται να έχουν υψηλό βαθμό φθοράς ή και αστοχίας σε ορισμένες περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν και νέες μέθοδοι κατεργασίας όπως η υδροκοπή, η ηλεκτρική εκκένωση, η χρήση laser και η επεξεργασία με υπερήχους είναι μερικές από αυτές. Στην παρούσα εργασία θα γίνει προσπάθεια να παρουσιαστούν οι δυνατότητες των διαφορετικών κατεργασιών και η επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες.

Συγκεκριμένα, στο *πρώτο* κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά που περιλαμβάνει μια σύντομη ιστορική αναδρομή, ορισμούς που αφορούν τα υλικά καθώς και ταξινόμησή τους. Επίσης θα παρουσιαστούν τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών υλικών με χρήση παραδειγμάτων. Στο *δεύτερο* κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση τόσο των παραδοσιακών όσο και των σύγχρονων μεθόδων κατεργασίας των υλικών καθώς και ο σκοπός της εργασίας. Στο *τρίτο* κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η προετοιμασία των πλακών και η διαδικασία της διάτρησης αναλυτικά. Στο *τέταρτο* κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και θα γίνει ο αναλυτικός σχολιασμός για τις συνθήκες διάτρησης και την επίδρασή τους στην ποιότητα των οπών. Τέλος θα γίνει μια τελική ανασκόπηση και ορισμένα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία στο σύνολό της.

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή

### Ορισμός

Τα *σύνθετα υλικά* είναι αυτά που παράγονται συνδυάζοντας δύο ή περισσότερα υλικά, ενώ συχνά αυτά έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους. Τα υλικά συνδυάζονται για να δώσουν στο σύνθετο μοναδικές ιδιότητες οι οποίες δε συναντώνται στα μητρικά υλικά [1]. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις τις οποίες μπορεί κανείς εύκολα να διακρίνει μιας και αυτές δεν είναι διαλυτές η μία στην άλλη. Η μια φάση ονομάζεται μήτρα και συγκρατεί μεταξύ τους τα σωματίδια του δεύτερου υλικού (εγκλείσματα), που ονομάζεται ενίσχυση. Το υλικό της ενισχυτικής φάσης μπορεί να είναι στη μορφή ινών, σωματιδίων ή νιφάδων, ενώ το υλικό μήτρας είναι συνήθως συνεχές και είναι το υλικό με την υψηλότερη σύσταση στο σύνθετο, ενώ οι ποσοτώσεις ποικίλλουν ανάλογα τις επιθυμητές ιδιότητες.

Τα *φυσικά σύνθετα* είναι υλικά που συναντώνται τόσο στα ζώα όσο και στα φυτά. Το ίδιο το ξύλο είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από ίνες κυτταρίνης οι οποίες συγκρατούνται μεταξύ τους από μια πολύ ασθενή ουσία που ονομάζεται λιγνίνη. Η κυτταρίνη συναντάται επίσης στο βαμβάκι, ωστόσο η απουσία της λιγνίνης κάνει το βαμβάκι πολύ ασθενέστερο υλικό από το ξύλο. Τα κόκκαλα είναι επίσης σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται κυρίως από φωσφορικό ασβέστιο και μια πρωτεΐνη που ονομάζεται κολλαγόνο. Το κολλαγόνο υπάρχει επίσης στα μαλλιά και στα νύχια, ωστόσο δεν είναι τόσο σκληρό και ανθεκτικό υλικό όσο όταν συνδυάζεται με το φωσφορικό ασβέστιο. Γίνεται κατανοητό με τα παραδείγματα που αναφέρονται ότι ο συνδυασμός υλικών μπορεί να αλλάξει δραματικά τις ιδιότητες ενός μητρικού υλικού.



Εκτός από τα φυσικά, υπάρχουν και τα *τεχνητά σύνθετα* υλικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το τσιμέντο, τα φύλλα με ίνες υάλου (Fiberglass) και άλλα. Για τα τεχνητά σύνθετα υλικά αφιερώνεται επαρκής χώρος στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.

### ***Ιστορική Αναδρομή***

Από τα αρχαία χρόνια ακόμη, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο. Τα πρώτα σύνθετα υλικά ήταν αυτά που μπορούσαν να βρεθούν έτοιμα στη φύση, όπως το ξύλο, η πέτρα, ο πηλός και τα κόκκαλα. Τα υλικά αυτά είχαν συγκεκριμένες ιδιότητες τις οποίες με την πάροδο του χρόνου ο άνθρωπος κατάφερε να τις βελτιώσει και να τις ενισχύσει.

Από τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο ήταν ένα μείγμα από άχυρο και λάσπη και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή κτισμάτων στην Αρχαία Αίγυπτο περίπου το 5000 π.Χ. Με τη συγκεκριμένη τεχνική, τα τούβλα από πηλό ενισχύονταν από ένα πλέγμα από άχυρα και είχε ως αποτέλεσμα την μείωση των τάσεων συστολής που παρατηρούταν κατά την ξήρανση του πηλού. Ένα σύνθετο υλικό με ηλικία μεγαλύτερη από 6000 χρόνια είναι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου [2]. Οι συγκεκριμένες παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή στην υγρασία σε σχέση με το φυσικό ξύλο, με αποτέλεσμα να μην στρεβλώνονται εύκολα, γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή κάποιων από τα πρώτα ανθρώπινα κτίσματα.



Εικόνα 1: Λεπτομέρεια από κτίσμα. Διακρίνονται τα πλέγματα από το άχυρο μέσα στο τούβλο από πηλό. Φωτογραφία από <http://fugahumana.files.wordpress.com/2012/07/mud-and-straw-brick.jpg>

Περίπου το 1000 π.Χ. στη Μεσοποταμία, οι μηχανικοί της εποχής εφάρμοζαν το βερνίκωμα των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό την προστασία τους από την επιφανειακή φθορά. Αργότερα, κατά τα Ρωμαϊκά χρόνια άλλη μια καινοτομία για την εποχή, ήταν η ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Η ανάμειξη του γύψου με ζωικό τρίχωμα, αποτελούσε μια μέθοδο για την ενίσχυση των ευθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς. Μια μετεξέλιξη της τεχνικής αυτής είναι η χρήση της σιδηρόβεργας που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα των σύγχρονων οικοδομών.

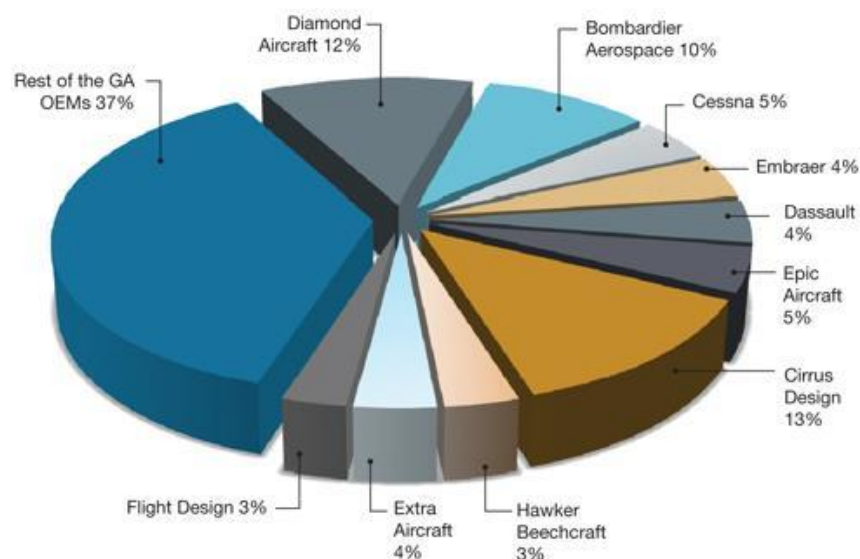
Το 1920 εμφανίστηκε το πρώτο σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα από φαινολική φορμαλδεΰδη και ίνες ξύλου ως ενίσχυση, το οποίο ονομάστηκε βακελίτης προς τιμή του Βέλγου χημικού Leo Baekeland [3]. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε στη ραγδαία ανάπτυξη των σύνθετων υλικών, ενώ παράλληλα πραγματοποιούνταν έρευνες για την ανάπτυξη ινών υάλου υψηλής αντοχής καθώς και ινών βορίου μεγάλης δυσκαμψίας, το 1960. Το 1964 εμφανίστηκαν οι πρώτες εμπορικά διαθέσιμες ίνες άνθρακα, ενώ το 1971 οι ίνες αραμιδίου [4]. Είναι χαρακτηριστικό ότι από όταν εμφανίστηκαν αρχικά μέχρι και σήμερα η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία που εμφανίζουν οι ίνες γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου.



Εικόνα 2: Προϊόντα από βακελίτη. Στα αριστερά απεικονίζεται μια σύγχρονη ντουλάπα για το σπίτι ενώ στα δεξιά απεικονίζεται μια από τις παλαιότερες τηλεφωνικές συσκευές. Εικόνες από <http://www.koligas.gr/newsite/wp-content/uploads/2015/02/115.jpg> και [http://www.museumoftechnology.org.uk/nimages/A0014\\_ex.jpg](http://www.museumoftechnology.org.uk/nimages/A0014_ex.jpg)

Σήμερα, μεγάλο εύρος εφαρμογών καλύπτεται από τα σύνθετα υλικά, μιας και οι τεχνικές σχεδίασης, παρασκευής και ελέγχου τους έχουν αναπτυχθεί σημαντικά και έχουν συμβάλει στη δυνατότητα παρασκευής υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες για κάθε εφαρμογή όπως κτίρια, γέφυρες σκάφη, αμαξώματα αυτοκινήτων δεξαμενές κλπ. Ακόμα πιο προηγμένα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται σε ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες της αεροπορίας και της διαστημικής.

**Forecasted GA Composite Structures Requirements by OEM, 2011-2015**  
(estimated market of 10.89 million lb/4,940 metric tonnes)

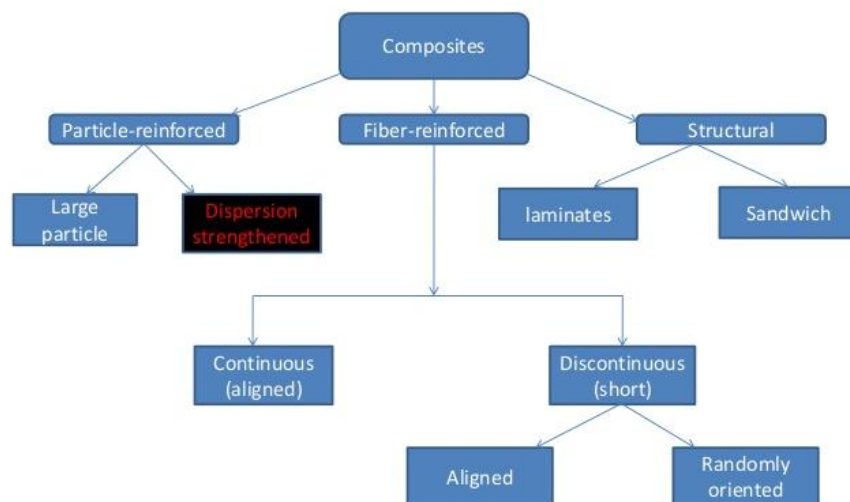


Εικόνα 3: Εκτίμηση για την πορεία της ζήτησης σε σύνθετα υλικά την περίοδο 2011-2015 στην αεροναυπηγική. Τα στοιχεία προέρχονται από έρευνα στο διαδίκτυο, ενώ τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέρχονται από τη διεύθυνση [http://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/resources/images/cdn/cms/0512HPC\\_MarketOutlook\\_PieChart\\_Bottomofpage60.jpg](http://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/resources/images/cdn/cms/0512HPC_MarketOutlook_PieChart_Bottomofpage60.jpg)

## **1.2 Ταξινόμηση και ιδιότητες σύνθετων υλικών**

Η μεγάλη ποικιλία των σύνθετων υλικών δημιουργεί την ανάγκη για την κατηγοριοποίησή τους προκειμένου αυτά να μελετηθούν ως προς τις ιδιότητές τους. Οι βασικοί μέθοδοι κατηγοριοποίησης είναι τρεις [4]:

- (α) Με βάση το υλικό της μήτρας
- (β) με βάση τον τύπο του εγκλείσματος και
- (γ) με βάση το μέγεθος του εγκλείσματος.



Εικόνα 4: Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών. Εικόνα από <http://image.slidesharecdn.com/presentation1-130412055808-phpapp01/95/dispersion-strengthening-4-638.jpg?cb=1365746386>

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναφερθούν επιγραμματικά οι μέθοδοι κατηγοριοποίησης των υλικών καθώς και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται.

### 1.2.1 Ταξινόμηση με βάση το υλικό της μήτρας

#### *Σύνθετα πολυμερικής μήτρας*

Η κατηγορία των σύνθετων πολυμερικής μήτρας είναι η πολυπληθέστερη των σύνθετων υλικών. Έκαναν την εμφάνισή τους το 1920 με το βακελίτη ενώ ακόμη και σήμερα αναπτύσσονται σύνθετα πολυμερικής μήτρας τα οποία θα είναι και στο μέλλον μια κατηγορία υλικών με πολλές εφαρμογές. Τα πιο συνηθισμένα προχωρημένα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούν πολυμερές σαν μητρικό υλικό (π.χ. εποξικές ρητίνες, πολυεστέρα) και λεπτές ίνες σαν ενισχυτικό (γραφίτη, αραμίδια, βόριο).

Η περαιτέρω κατηγοριοποίηση των σύνθετων πολυμερικής μήτρας, διακρίνονται ανάλογα με τη φύση της μήτρας σε θερμοπλαστικές και θερμοσκληραινόμενες. Οι θερμοπλαστικές αποτελούνται από πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου και πολυστυρενίου.

Οι θερμοσκληραινόμενες μήτρες χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν

τριδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι οι πολυεστερικές εποξυδικές και φαινολικές ρητίνες. Ο λόγος που αυτά τα υλικά είναι τα πιο συνηθισμένα σύνθετα είναι το χαμηλό τους κόστος, η υψηλή αντοχή και η απλή διαδικασία παραγωγής. Το μειονέκτημά τους είναι ότι δεν αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες (<300° C)

### ***Σύνθετα μεταλλικής μήτρας***

Τα παραδοσιακά μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σαν υλικά μήτρας προσφέροντας το σημαντικό πλεονέκτημα της δυνατότητας χρησιμοποίησής τους σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες. Οι τύποι ενίσχυσης για μεταλλικές μήτρες περιορίζονται κυρίως σε κεραμικά υλικά μορφής κόκκων ή ινών. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας χρησιμοποιούνται, επίσης, για τις πολύ καλές μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Τα σύνθετα μεταλλικής μήτρας μπορούν να υποστούν κατεργασίες με τις κλασικές μεθόδους και επιπρόσθετα να αποτελέσουν τμήμα μιας κατασκευής το οποίο θα ενωθεί με μια απλή συγκόλληση. Τα δύο βασικά μειονεκτήματα των υλικών αυτών είναι η υψηλή πυκνότητά τους και η δυσκολία κατασκευής τους, που οδηγούν σε κατασκευές μεγάλου βάρους αλλά και υψηλού κόστους αντίστοιχα.

### ***Σύνθετα κεραμικής μήτρας***

Ως κεραμικά υλικά ορίζονται 'όλα τα ανόργανα μη μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C)' [4]. Τα κεραμικά είναι υλικά δύσκαμπτα, εμφανίζουν μεγάλη σκληρότητα, έχουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη και πολύ μικρή σε εφελκυσμό, έχουν χαμηλή πυκνότητα ενώ το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι παρουσιάζουν υψηλότατη πυρίμαχη, αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι η μικροδομή τους επηρεάζει σημαντικά τη μακρομηχανική συμπεριφορά τους.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά ίνες ή κόκκοι. Το πλέον διαδεδομένο σύνθετο υλικό κεραμικής μήτρας είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα είναι από μόνο του ένα σύνθετο υλικό το οποίο περιέχει ανόργανα υλικά και συγκεκριμένα άμμο,

χαλίκι, γαρμπίλι και σκύρα και προκύπτει όταν συνδυαστούν με τσιμεντοκονία και νερό. Παραδοσιακά κεραμικά υλικά είναι ο πυλός, το τσιμέντο, η άργιλος και το γυαλί, υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως με πληθώρα εφαρμογών από την αρχαιότητα.

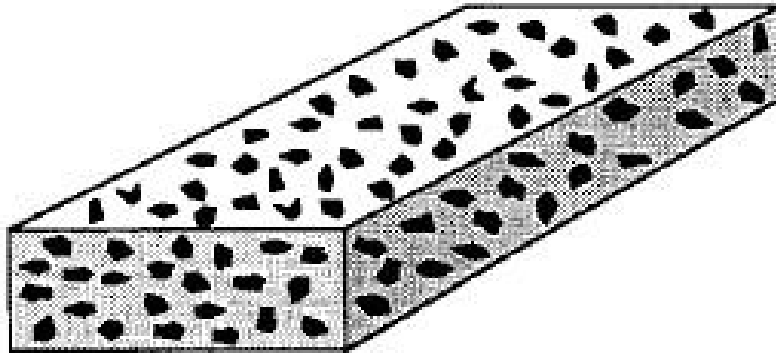
Σήμερα, κυκλοφορούν κεραμικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως προηγμένα καθότι παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές, οπτικές ή μαγνητικές ιδιότητες και προορίζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω μερικά από τα προηγμένα κεραμικά υλικά:

- Οξειδία ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ , πυριτικά γυαλιά)
- Καρβίδια ( $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{WC}$ )
- Νιτρίδια ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{BN}$ )
- Βορίδια ( $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ )
- Πυριτίδια ( $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{TiSi}_2$ )
- Φθορίδια ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{LiF}$ )

### 1.2.2 Ταξινόμηση με βάση τον τύπο του εγκλείσματος

#### *Κοκκώδη σύνθετα υλικά*

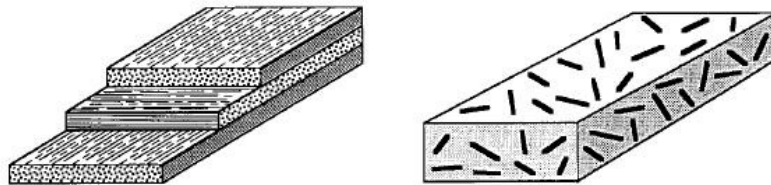
Τα σύνθετα υλικά αυτής της κατηγορίας έχουν μήτρα οποιασδήποτε από τις παραπάνω κατηγορίες (πολυμερική, μεταλλική, κεραμική) και εγκλείσματα τα οποία είναι σε μορφή κόκκων. Το σχήμα, το μέγεθος και το υλικό του κόκκου ποικίλουν με αποτέλεσμα να αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία στον τομέα των συνθέτων υλικών.



Εικόνα 5: Αναπαράσταση κοκκώδους σύνθετου. Τα εγκλείσματα μπορούν να είναι διατεταγμένα μέσα στην πολυμερική μήτρα ή τυχαία διεσπαρμένα. Εικόνα από <http://4.bp.blogspot.com/-yp-Ia6H431Y/TjlUYjouo7I/AAAAAAAAASM/nLnRYQMwxBw/s1600/composite.JPG>

### *Ινώδη σύνθετα υλικά*

Η μήτρα ενός ινώδους συνθέτου υλικού μπορεί να είναι πολυμερική, μεταλλική ή κεραμική. Οι ίνες διακρίνονται ανάλογα με το λόγο μήκους – διαμέτρου  $\frac{l}{a}$ . Όταν ο λόγος αυτός είναι  $\frac{l}{a} \leq 100$ , τότε οι ίνες χαρακτηρίζονται ως κοντές ή ασυνεχείς ενώ όταν ο λόγος είναι  $\frac{l}{a} \geq 100$  χαρακτηρίζονται ως μακριές ή συνεχείς.

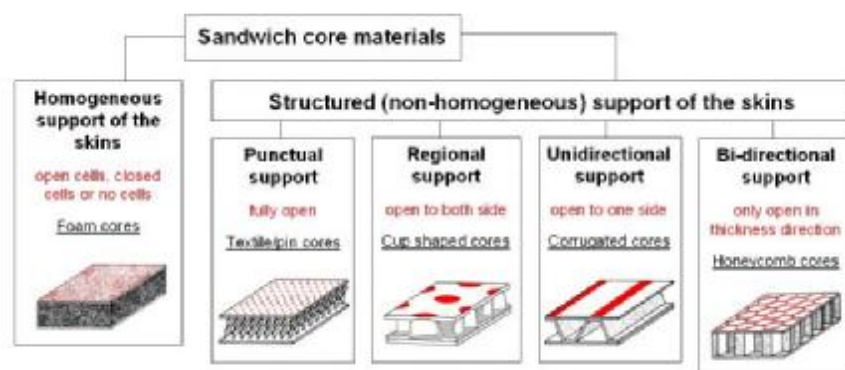


Εικόνα 6: Ινώδη σύνθετα υλικά. Αριστερά η σχηματική αναπαράσταση για υλικά με συνεχής ίνες, ενώ δεξιά η αναπαράσταση για υλικά με ασυνεχής ίνες. Εικόνα από <http://4.bp.blogspot.com/-yp-Ia6H431Y/TjlUYjouo7I/AAAAAAAAASM/nLnRYQMwxBw/s1600/composite.JPG>

Ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες των συνθέτων και βάσει αυτών διαφοροποιούνται σε μονοδιευθυντικά και πολυδιευθυντικά. Τα πολυδιευθυντικά μπορεί να είναι σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης και με ίνες σε πλέξη ύφανσης δύο ή τριών διαστάσεων [5]. Εκτός από τις απόλυτες τιμές των ιδιοτήτων, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν οι ειδικές ιδιότητες, δηλαδή ο λόγος της ιδιότητας προς την πυκνότητα του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική ιδιότητα ενός υλικού τόσο ελαφρύτερο είναι το υλικό ενώ παράλληλα διαθέτει υψηλότερη τιμή της συγκεκριμένης ιδιότητας. Η γνώση των τιμών της ειδικής ιδιότητας βοηθά στο σχεδιασμό του υλικού.

## ‘Σάντουιτς’ Σύνθετα Υλικά

Τα σύνθετα υλικά τύπου σάντουιτς παρουσιάζουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας με αποτέλεσμα να αποσβαίνουν τις μηχανικές ταλαντώσεις ή ακόμη και κρουστικά φορτία ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά. Χρησιμοποιούνται, επίσης, για βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από τη διατήρηση του σχήματός τους ακόμα και κάτω από την επίδραση υψηλών φορτίων. Μερικές από τις χαρακτηριστικές δομές παρουσιάζονται στο σχήμα:



Εικόνα 7: Χαρακτηριστικές δομές ‘σαντουιτς’ σύνθετων υλικών. Εικόνα από [http://www.econcore.com/upload/wysiwyg/images/n\\_Technology\\_SandwichTechnology\\_pic3.jpg](http://www.econcore.com/upload/wysiwyg/images/n_Technology_SandwichTechnology_pic3.jpg)

## Φυσικά Σύνθετα υλικά

Τα φυσικά σύνθετα είναι τα υλικά τα οποία υπάρχουν στη φύση, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το ξύλο, τα οστά, το μπαμπού. Τα σύνθετα υλικά που έχει φτιάξει η φύση από μόνη της παρουσιάζουν δομές που ο άνθρωπος δύσκολα μπορεί να επιτύχει. Για παράδειγμα, ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τεχνητά σύνθετα υλικά σε πληθώρα εφαρμογών αντικαθιστώντας το ξύλο και το δέρμα κάτι που δεν έχει επιτύχει στο βέλτιστο βαθμό, καθώς η αντικατάσταση φυσικών ιστών από τεχνητούς (tissue engineering) δεν είναι καθόλου απλή διαδικασία.

## Πράσινα Σύνθετα Υλικά

Στην πλειοψηφία τους τα πράσινα σύνθετα αυτά προέρχονται κατευθείαν από τη φύση και είναι πιο φιλικά στο περιβάλλον. Μερικά παραδείγματα είναι το ρετσίνι, η φυσική ρητίνη που εκκρίνεται από τα πεύκα, το ήλεκτρο (κεχριμπάρι), το οποίο είναι και το πιο άκαμπτο,



και η λάκα της ανατολής που προέρχεται από δέντρο της Κίνας και βρίσκει εφαρμογές σε βαφές ξύλων.

Φυτικές ίνες και κόκκοι βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές κατασκευές καθότι ανταγωνίζονται τις ίνες και τους κόκκους των μη φυτικών. Το κατά πόσον ένα υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως «πράσινο», εξαρτάται και από το αν το υλικό είναι ανακυκλώσιμο. Για αυτό το λόγο, σε προϊόντα καθημερινής χρήσης χρησιμοποιείται ως μήτρα το πολύ-αιθυλένιο χαμηλής (LDPE) και υψηλής πυκνότητας (HDPE) ενώ το πολύ-βινυλοχλωρίδιο (PVC) έχει αρχίσει να αντικαθίσταται από το ανακυκλώσιμο και φιλικότερο προς το περιβάλλον πολύ-προπυλένιο (PP).

### **1.2.3 Ταξινόμηση με βάση το μέγεθος του εγκλείσματος**

#### ***Μακροσύνθετα***

Στα μακροσύνθετα, ανήκουν τα σύνθετα υλικά των οποίων τα εγκλείσματα είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών ενώ μπορεί να φτάσουν και το ένα μέτρο. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, όπου χρησιμοποιείται η κεραμική μήτρα του τσιμέντου με μεταλλικό έγκλεισμα τις σιδερένιες ράβδους.

#### ***Μικροσύνθετα***

Στα μικροσύνθετα, ανήκουν τα σύνθετα υλικά των οποίων τα εγκλείσματα έχουν μια τουλάχιστον διάσταση της τάξης του μικρομέτρου ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ). Τα περισσότερα από τα κοκκώδη και ινώδη σύνθετα υλικά κατατάσσονται στην κατηγορία αυτή.

#### ***Νανοσύνθετα***

Στα νανοσύνθετα ανήκουν τα σύνθετα υλικά των οποίων το έγκλεισμα έχει τουλάχιστον μια διάσταση της τάξης του νανομέτρου ( $1 \text{nm} = 10^{-9} \text{m}$ ). Είναι τα νεότερα υλικά που αναπτύχθηκαν και είναι μια κατηγορία υλικών στην οποία έχει στραφεί η ερευνητική δραστηριότητα.

### **1.3 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών**

Τα παραδοσιακά υλικά (μέταλλα, κεραμικά, πολυμερικά) έχουν το καθένα εξαιρετικές ιδιότητες ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει νέες ιδιότητες οι οποίες να ανταποκρίνονται ακόμη καλύτερα στις απαιτήσεις τις εκάστοτε εφαρμογής.

Αρχικά, 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 σύνθετα μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ζημιές 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 μη-μαγνητικά (ανάλογα τη μήτρα και το εγκλείσμα), 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.

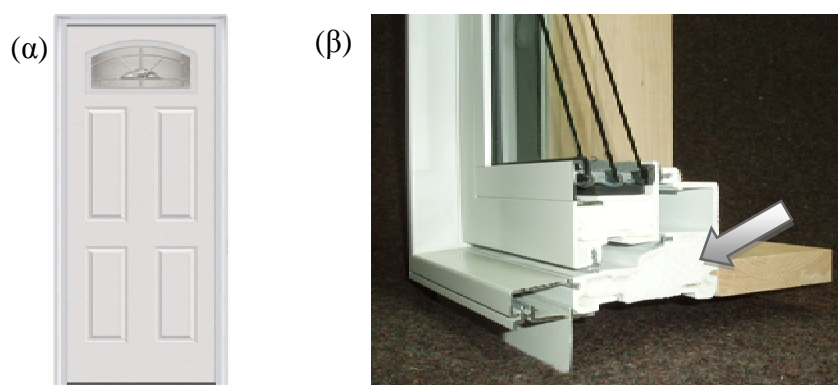
#### **1.4 Εφαρμογές σύνθετων υλικών**

Στο παρόν εδάφιο θα αναφερθούν ορισμένες από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα σύνθετα υλικά, ώστε να δοθεί στον αναγνώστη μια ιδέα του μεγάλου εύρους εφαρμογών.

##### ***Πόρτες και παράθυρα από υαλοβάμβακα***

Ένα από τα πιο διαδεδομένα παραδείγματα σύνθετων υλικών είναι οι πόρτες από υαλοβάμβακα. Οι πόρτες αυτές μοιάζουν πάρα πολύ με το ξύλο, μιας και στην πραγματικότητα αρκετές από αυτές παρασκευάζονται από καλούπια τα οποία ελήφθησαν από ξύλινες πόρτες. Είναι πολύ ανθεκτικές στην υγρασία, δε σκεβρώνουν και έχουν πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες τόσο στον ήχο όσο και στη θερμοκρασία.

Τα πλαίσια των παραθύρων συχνά παρασκευάζονται από σύνθετα FPR, συνήθως fiberglass. Ο λόγος είναι ότι τα παραδοσιακά αλουμινένια πλαίσια παρουσιάζουν δύο μειονεκτήματα τα οποία δεν υπάρχουν στα πλαίσια από fiberglass. Το πρώτο είναι ότι το αλουμίνιο είναι θερμοαγώγιο υλικό μεταφέροντας τη ζέστη είτε μέσα από το σπίτι προς τα έξω είτε το αντίστροφο. Το fiberglass παρουσιάζει μικρότερη αγωγιμότητα στη θερμότητα προσφέροντας καλύτερη μόνωση.



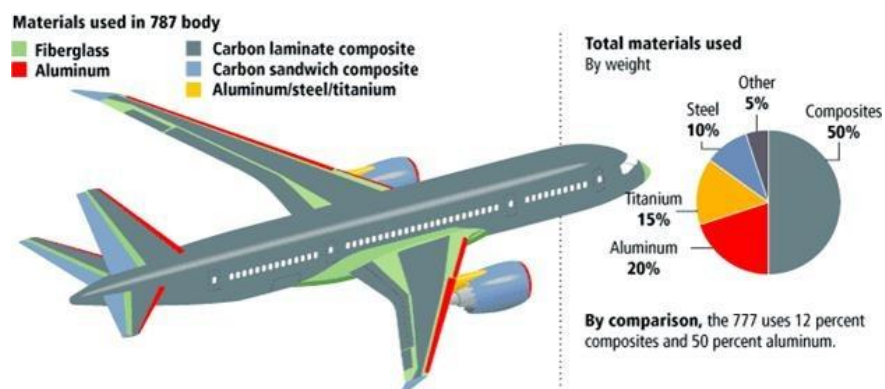
Εικόνα 8: (α) Πόρτα από υαλοβάμβακα και (β) η τομή ενός παραθύρου από σύνθετο με υαλοβάμβακα. Εικόνες από <http://www.greenbuildingadvisor.com/sites/default/files/Thermotech%20triple-glazed%203.jpg>

Το δεύτερο ισχυρό πλεονέκτημα του fiberglass είναι ότι ο συντελεστής διαστολής του είναι σχεδόν ίδιος με του γυαλιού, μιας και το fiberglass αποτελείται σχεδόν κατά 70% από γυαλί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μεταβολές που προκαλούνται από τη θερμική διαστολή ή συστολή να είναι πανομοιότυπες σχεδόν και για τα δύο υλικά αποτρέποντας την ανάπτυξη τάσεων, ρωγματώσεων ή κενών ανάμεσα τους και άρα καλύτερη απόδοση.

### **Εφαρμογές σε μέσα μεταφοράς**

Μιλώντας κανείς για σύνθετα υλικά και τις εφαρμογές τους στα μέσα μεταφοράς, ουσιαστικά αναφέρεται στη μείωση του βάρους. Αν και οι χάλυβες στις περισσότερες μορφές τους είναι ένα ισχυρό, με διάρκεια στην αντοχή και φτηνό υλικό, λόγω του σιδήρου που περιέχεται ως κύριο υλικό, είναι βαριά εξαρτήματα, τα οποία είναι επιρρεπή στη διάβρωση και στην κόπωση. Φυσικά υπάρχουν και άλλα υλικά, όπως το αλουμίνιο, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ο λόγος αντοχής/βάρους των περισσότερων σύνθετων είναι κατά πολύ υψηλότερος από τον αντίστοιχο λόγο για ένα χάλυβα ή το αλουμίνιο. Η μείωση του βάρους είναι πολύ κρίσιμος παράγοντας για τη χρήση σύνθετων υλικών στα μέσα μεταφοράς, όπως τα πλοία, τα τρένα ακόμη και τα αυτοκίνητα, μιας και το λιγότερο βάρος απαιτεί χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου.

Στα αεροπλάνα η μείωση της κατανάλωσης μπορεί να είναι μέχρι και μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη. Αρκεί να σκεφτεί κανείς τη δυναμική ενέργεια που απαιτείται για να ανυψωθεί ένα κιλό στο ύψος των 10 km που πετά ένα αεροπλάνο. Η ενέργεια αυτή παρέχεται από το καύσιμο το οποίο επίσης προσθέτει βάρος και έχει ως αποτέλεσμα την ακόμη μεγαλύτερη ανάγκη για καύσιμο.



Εικόνα 9: Τα μέρη ενός αεροπλάνου τύπου Boeing 787. Εικόνα από [http://edallcoin.fatcow.com/ecollege/upload-files/Materials-used-in-Aircraft\\_131A0/clip\\_image002.jpg](http://edallcoin.fatcow.com/ecollege/upload-files/Materials-used-in-Aircraft_131A0/clip_image002.jpg)

Ακριβώς γι' αυτό, χρησιμοποιούνται ελαφριά και ανθεκτικά σύνθετα υλικά σε μέρη του αεροπλάνου όπως τα φτερά, οι κινητήρες κ.ά. ώστε να εξασφαλιστεί περισσότερο ωφέλιμο φορτίο για τους επιβάτες και τις αποσκευές. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι μιλώντας για διαστημικές μεταφορές το όφελος από τη μείωση του βάρους πολλαπλασιάζεται.

Όσον αφορά τα επίγεια μέσα μεταφοράς, η χρήση των σύνθετων υλικών έχει πλέον διαδοθεί ευρύτατα. Εκτός από την ανάγκη για μείωση του βάρους, υπάρχει και η ανάγκη για τη μείωση της αδράνειας μιας και η κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται κατακόρυφα κατά την επιτάχυνση του οχήματος. Οι ρητίνες με ενίσχυση ινών άνθρακα ή αραμιδίου, αν και μέχρι πρότινος θεωρούνταν πολύ προχωρημένα σύνθετα υλικά, χρησιμοποιούνταν πλέον κατά κόρον στη βιομηχανία, μιας και η μαζική παραγωγή επιτρέπει τη δραματική μείωση του κόστους. Εξίσου διαδεδομένη είναι και η χρήση ινών άνθρακα στις θαλάσσιες μεταφορές, όπου η βιομηχανία τις έχει επιλέξει για τη μείωση του βάρους και την υψηλή αντοχή τους.

Η μείωση της κατανάλωσης και η αύξηση του κόστους καυσίμου είναι οι οδηγοί στην έρευνα που διεξάγεται από τη βιομηχανία μεταφορών. Το κλειδί για τη μείωση της κατανάλωσης είναι η μείωση του βάρους αλλά και της αδράνειας. Για το λόγο αυτό, αναμένεται στο μέλλον να εντατικοποιηθεί η χρήση ινών άνθρακα και αραμιδίου. Το πρόβλημα του μεγάλου κόστους παραγωγής αναμένεται να λυθεί με την κατακόρυφη αύξηση του όγκου της παραγωγής.

### ***Στρατιωτικές εφαρμογές***

Η επαρκής θωράκιση των στρατιωτών απασχολούσε ανέκαθεν το στρατιωτικό προσωπικό. Η αρχαιότερη καταγεγραμμένη πανοπλία, καταγράφεται στη δυναστεία των Shang στην Κίνα πριν από 3600 χρόνια. Ο πανοπλία τότε ήταν φτιαγμένη από δέρμα και καβούκια χελώνας. Το επόμενο βήμα ήταν η Ελληνική πανοπλία φτιαγμένη από μπρούτζο και καταγράφεται πριν από 3500 χρόνια. Το ξύλο και άλλα κοινά υλικά χρησιμοποιήθηκαν ως πανοπλίες ή υλικά για ασπίδες μιας και ήταν φτηνά και ελαφριά. Στη συνέχεια, ο σίδηρος και ο χάλυβας πήραν τη θέση τους, όντας ακόμη ισχυρότερα υλικά, ωστόσο αύξησαν κατακόρυφα το βάρος της πανοπλίας. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και στις στρατιωτικές εφαρμογές σημαντικός παράγοντας είναι η μείωση του βάρους. Για παράδειγμα, η θωράκιση ενός πλοίου στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα μπορούσε να έχει πάχος μέχρι και 45 εκατοστά, οδηγώντας σε κατακόρυφη αύξηση του βάρους.

Η νέα γενιά θωράκισης σχεδιάζεται με γνώμονα την αντοχή σε σφαίρες, σε εκρήξεις ή ακόμη και επιθέσεις με δέσμη laser. Εφαρμογές θωράκισης ωστόσο μπορούν να χαρακτηριστούν και όσες αποβλέπουν σε προστασία από ηλεκτρική τάση (π.χ. εργαζόμενοι ΔΕΗ) όπου η χρήση εύκαμπτων υλικών είναι απαραίτητη.

Ένα από τα συνήθη προϊόντα είναι τα σύνθετα με ίνες αραμιδίου (Kevlar™, Twaron™) τα οποία χρησιμοποιούνται σε αλεξίσφαιρα γιλέκα αλλά και κράνη. Τα προηγούμενης γενιάς γιλέκα χρησιμοποιούσαν τιτάνιο ή χάλυβα τα οποία σταδιακά αντικαταστάθηκαν από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας ενισχυμένες με αφρούς ή ακόμη και κεραμικά σύνθετα. Τα πιο εξωτικά σύνθετα ωστόσο χρησιμοποιούνται στη θωράκιση οχημάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις τα κλειδιά για την εξέλιξη των εφαρμογών είναι η αποτελεσματική προστασία, η μείωση του βάρους αλλά και της κατανάλωσης. Τα σύνθετα είναι η μοναδική κατηγορία υλικών που μπορεί να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλες τις απαιτήσεις.

Στη στρατιωτική βιομηχανία τα σύνθετα ήρθαν για να μείνουν. Τα νέα δεδομένα που θέτουν οι νανοσωλήνες άνθρακα καθώς και τα νανοςύνθετα προσφέρουν εξαιρετικές δυνατότητες για θωράκιση ακόμα και για όπλα που βρίσκονται σε στάδιο μελέτης, όπως τα laser ακτίνων-X και δέσμης νετρονίων. Βέβαια, τα παραπάνω δεν αναμένεται να γίνουν πραγματικότητα στο κοντινό μέλλον, ωστόσο βρίσκονται ήδη στα πλάνα των ερευνητών μηχανικών.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 *Εισαγωγή*

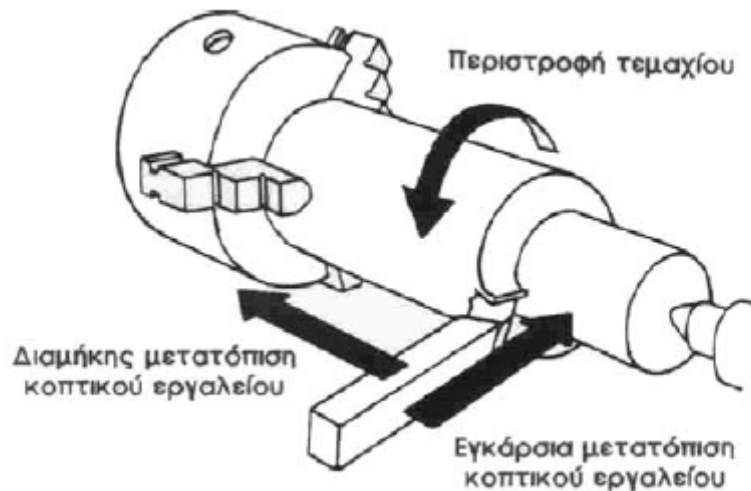
Στο Κεφάλαιο 2 θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή των παραδοσιακών και σύγχρονων τεχνικών επεξεργασίας των υλικών. Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη θα αναφερθούν επιγραμματικά οι μέθοδοι μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών ώστε να γίνει κατανοητό το πώς προκύπτουν οι τιμές που δίνονται για κάθε παράμετρο του υλικού. Στο τέλος του κεφαλαίου και ενώ έχει δοθεί το υπόβαθρο των τεχνικών επεξεργασίας και των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού θα παρουσιαστεί ο σκοπός της εργασίας.

### 2.2 *Παραδοσιακές Τεχνικές Επεξεργασίας*

Με τον όρο *παραδοσιακές* αναφερόμαστε στις τεχνικές εκείνες οι οποίες χρησιμοποιούνται από παλιά για την κατεργασία των μετάλλων, κεραμικών, πολυμερών και οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται για την κατεργασία των σύνθετων υλικών, δηλαδή η τόννευση, το φρεζάρισμα, η διάτρηση και η λείανση [6]. Η αναλυτική παρουσίαση κάθε μιας από τις τεχνικές επεξεργασίας και της πλήρους περιγραφής τους, ξεφεύγει από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Για το λόγο αυτό θα δοθούν όσο το δυνατό μικρές σε έκταση περιγραφές της κάθε μιας με σκοπό να αποκτήσει ο αναγνώστης μια σφαιρική ιδέα των διεργασιών που χρησιμοποιούνται σε ένα μηχανουργείο. Εξαίρεση θα αποτελέσει η τεχνική της διάτρησης, καθώς είναι η διεργασία που θα χρησιμοποιηθεί για την περάτωση της πτυχιακής.

## Τόρνευση

Η τόρνευση είναι μια μηχανουργική κατεργασία κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφική κίνηση της ατράκτου, όπου προσδένεται κατάλληλα το υπό μορφοποίηση τεμάχιο και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση τόρνευσης

Με τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόννου. Με αυτόν τον τρόπο, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκους μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές κατά την τόρνευση παρουσιάζονται στην Εικόνα 10.

Η τόρνευση σαν κατεργασία χρησιμοποιείται από πολύ παλιά, γύρω όμως στο 1400 μ.Χ. εμφανίστηκαν οι πρώτοι τόννοι που στην αρχή κινούνταν με μυϊκή δύναμη ή με νερό σαν τους κατοπινούς υδρόμυλους. Η τεχνολογία της κοπής σε εργαλειομηχανή τόρνευσης χρονολογείται αρκετούς αιώνες πριν, κατεργάζοντας ακόμα και ειδικές μορφές όπως σπείρωμα κ.λπ. Οι διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει το κατεργαζόμενο τεμάχιο με την τόρνευση, απαιτούν διαφορετικό συνδυασμό κινήσεων, όπως και χρησιμοποίηση του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται, εξαρτάται και από το είδος της παραγόμενης επιφάνειας αλλά και από το αν η τόρνευση είναι εξωτερική ή εσωτερική.



Η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις κινήσεις του τεμαχίου και του εργαλείου για την τόννευση, είναι ο τόννος. Ο τόννος αποτελεί μια από τις περισσότερες παραγωγικές εργαλειομηχανές και το 40% περίπου των εργασιών κοπής των μετάλλων γίνονται σε τόννο. Οι σύγχρονοι τόννοι έχουν τη δυνατότητα παραγωγής καμπύλων εξαρτημάτων, με μεγάλο αριθμό ακρίβειας και μεγάλες ταχύτητες παραγωγής.



Εικόνα 11: Ένας σύγχρονος τόννος. Εικόνα από [http://www.emboridis.gr/images/1\\_43209.jpg](http://www.emboridis.gr/images/1_43209.jpg)

Σε έναν τόννο, σημαντικό ρόλο για τις δυνατότητες κατεργασίας ενός τεμαχίου παίζουν ο αριθμός στροφών που μπορεί να επιτευχθεί από τον τόννο, το πλήθος των ταχυτήτων του, η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα και το συνολικό βάρος του τεμαχίου προς μορφοποίηση.

Οι τόννοι μπορούν να είναι συμβατικοί πράγμα που σημαίνει πως καθοδηγούνται από τον χειριστή που κάνει όλες τις απαραίτητες κινήσεις και ρυθμίσεις για την κατεργασία, ή να είναι τόννοι ψηφιακά καθοδηγούμενοι όπου οι κινήσεις αλλά και οι ρυθμίσεις απαιτούν πολύ μικρή συμμετοχή του παραδοσιακού χειριστή μια και τις αναλαμβάνει μια ηλεκτρονική μονάδα καθοδήγησης που την χειρίζεται προγραμματιστής. Η τεχνολογία όμως της κοπής κατά βάση παραμένει η ίδια. Έτσι οι επιλεγόμενες ταχύτητες κοπής, οι προώσεις, τα κοπτικά εργαλεία και οι άλλες παράμετροι, καθορίζονται και στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα.

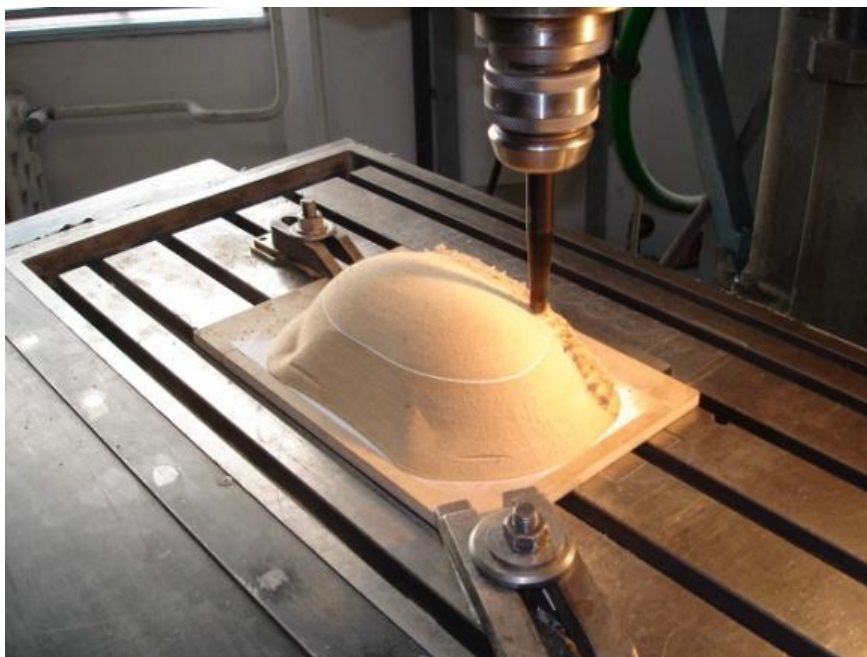
Για την κοπή στην τόννευση χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία συνήθως από χάλυβα εργαλείων, ταχυχάλυβα, σκληρά μέταλλα και κεραμικά. Η διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου εξαρτάται κατά πολύ από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο και από τη γεωμετρία της κόψης του. Όπως κάθε κοπτικό εργαλείο έτσι και τα κοπτικά εργαλεία της τόννευσης έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής που εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως οι συνθήκες κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση και βάθος κοπής), η γεωμετρία του εργαλείου, το υλικό του εργαλείου, το κατεργαζόμενο υλικό και το υγρό κοπής. Η βέλτιστη επιλογή των

παραγόντων αυτών οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου με αποτέλεσμα την οικονομικότερη κατεργασία.

### **Φρεζάρισμα**

Με το φρεζάρισμα κατεργάζονται τεμάχια από διάφορα υλικά όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος, συνθετικά υλικά με επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές, αυλάκια ακόμα και οδοντωτοί τροχοί. Τα τεμάχια αυτά, συνήθως εκχονδρίζονται ή φινιρίζονται ενώ όταν απαιτούνται πολύ καλές επιφάνειες, σαν τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η λείανση. Στο φρεζάρισμα τα απόβλητα απομακρύνονται από ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο. Το εργαλείο αυτό διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο, ενώ για να μπορεί να εισέρχεται το εργαλείο στο κατεργαζόμενο κομμάτι, οι κοπτικές ακμές έχουν την μορφή του σφήνα που έχει και το εργαλείο τόννευσης.

Η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου αποτελεί και την κύρια κίνηση κοπής. Για την συνέχεια της κοπής το κατεργαζόμενο κομμάτι, το οποίο είναι "δεμένο" στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, μετατοπίζεται με προκαθορισμένο ρυθμό που είναι η πρόωση. Κατά την διάρκεια της κοπής, τα κοπτικά δόντια μιας φρέζας εισέρχονται και εξέρχονται το καθένα από το κομμάτι μέσα σε ένα μικρό μέρος της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα κοπτικά δόντια να προλαβαίνουν να παράγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά, όπως το εργαλείο της τόννευσης το οποίο εκτελεί συνεχή κοπή. Η κοπή για αυτό τον λόγο στο φρεζάρισμα, λέγεται διακοπτόμενη.



Εικόνα 12: Μια φρέζα σε ώρα εργασίας. Το τεμάχιο είναι δεμένο στην τράπεζα της εργαλειομηχανής και τα περιστρεφόμενα 'δόντια' του κοπτικού εργαλείου απομακρύνουν το υλικό για τη διαμόρφωση του τεμαχίου

Ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, το φρεζάρισμα διακρίνεται σε περιφερικό ή μετωπικό φρεζάρισμα. Στο περιφερικό φρεζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει κυλινδρική μορφή, κόβοντας τα απόβλητα από το τεμάχιο με περιφερειακά διατεταγμένες κοπτικές ακμές. Τα προκύπτοντα απόβλητα έχουν στην περίπτωση αυτή σφηνοειδές σχήμα. Αντίστοιχα στο μετωπικό φρεζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι κάθετος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο έχει, εκτός των περιφερειακών κοπτικών ακμών του και κοπτικές ακμές στο μπροστινό πρόσωπό του. Η διαμόρφωση διαφόρων μορφών και τεμαχίων στη φρέζα, απαιτεί και διάφορους τύπους εργαλειομηχανών για οικονομικότερη κατεργασία.

Για τα διάφορα είδη φρεζαρίσματος, χρησιμοποιούνται διαφορετικών μορφών κοπτικά εργαλεία. Συνήθως τα εργαλεία αυτά κατασκευάζονται από ταχυχάλυβα επειδή επιτρέπει την χρησιμοποίηση υψηλότερων ταχυτήτων κοπής από τους κοινούς χάλυβες εργαλείων. Πολύ συχνά χρησιμοποιούνται και πλακίδια σκληρομετάλλων (ιδίως στο μετωπικό φρεζάρισμα). Ο αριθμός των στροφών του κοπτικού εργαλείου, εξαρτάται, όπως και στην τόννευση, από την επιθυμητή ταχύτητα κοπής. Η ταχύτητα κοπής στο φρεζάρισμα αντιπροσωπεύει την κίνηση του κοπτικού δοντιού στον χρόνο.

### **Διάτρηση**

Τα περισσότερα από τα μηχανολογικά εξαρτήματα διαθέτουν τρύπες διαφόρων μορφών και μεγεθών. Τις περισσότερες φορές τέτοιες οπές διανοίγονται με διάτρηση, χρησιμοποιώντας ένα δράπανο, μια εργαλειομηχανή CNC ή χειροτρύπανο. Στην εικόνα 13 παρουσιάζονται τα εργαλεία για τη διάνοιξη οπών.

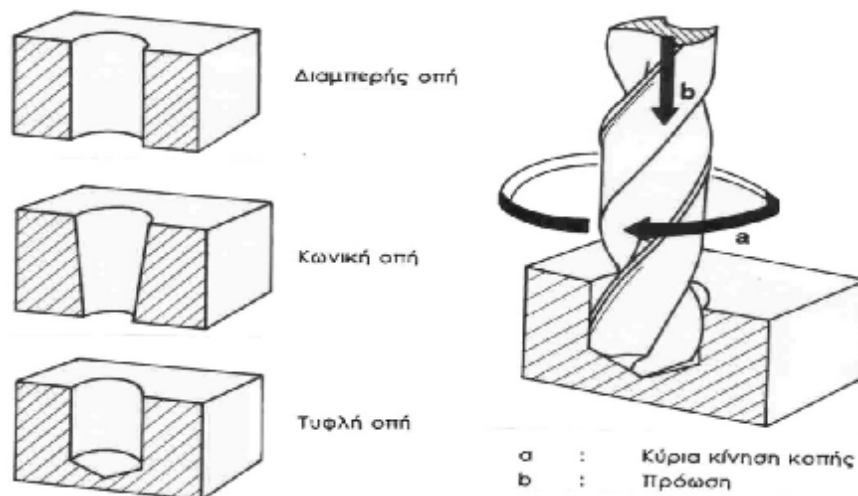


Εικόνα 13: Αριστερά φαίνεται ένα κολωνάτο δράπανο, στο κέντρο μια εργαλειομηχανή CNC και δεξιά ένα χειροτρύπανο.

Η διάτρηση σαν χρησιμοποιείται για κατεργασία οπών σε αντικείμενα μεταλλικά, μη μεταλλικά αλλά και στα σύνθετα υλικά και πρέπει κατά τη χρήση του να λαμβάνονται υπόψη μια σειρά παράγοντες όπως είναι η θερμική διαχείριση, η φθορά του εργαλείου και οι αποκολλήσεις.

Το κοπτικό εργαλείο (τρυπάνι) που χρησιμοποιείται για την διάτρηση σε πλήρες υλικό έχει δύο κοπτικές ακμές ενώ για την εξέλιξη της διάτρησης απαιτείται το κοπτικό αυτό εργαλείο να κάνει ταυτόχρονα δύο κινήσεις. Η κύρια κίνηση κοπής είναι η περιστροφή του τρυπανιού, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις υπάρχει δυνατότητα αυτό που περιστρέφεται να είναι το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η ταχύτητα κοπής, που εξαρτάται από τον αριθμό στροφών του εργαλείου, λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή της στην περιφέρεια του τρυπανιού, ενώ μειώνεται προς το κέντρο του.

Η δεύτερη κίνηση για την διάτρηση είναι η ευθεία μετακίνηση του τρυπανιού προς το κομμάτι. Η κίνηση αυτή καθορίζεται σαν πρόωση του εργαλείου και ελέγχει το πάχος του παραγόμενου αποβλήτου άρα και τις αντίστοιχες αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της πρόωσης τόσο μεγαλύτερο είναι και το πάχος του αποβλήτου και αντίστοιχα μεγαλύτερες οι δυνάμεις κοπής.



Εικόνα 14: Διάφοροι τύποι οπών και επεξήγηση της κίνησης του κοπτικού

Το τρυπάνι χαρακτηρίζεται ως ελικοειδές λόγω των ελικοειδών αυλακιών που φέρει στο ωφέλιμο μήκος του. Τα ελικοειδή αυλάκια που φέρει το τρυπάνι εξυπηρετούν τους παρακάτω κυρίως σκοπούς:

- δημιουργούν τις απαραίτητες κοπτικές ακμές,
- οδηγούν τα απόβλητα από την θέση διάτρησης προς τα έξω,
- δίνουν την δυνατότητα στο υγρό κοπής να φτάνει στην θέση κοπής.

Τα δεδομένα της κοπής μπορούν να υπολογιστούν από τις πιο κάτω σχέσεις:

- Ταχύτητα κοπής :  $V_k = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$  (mm/min)
- Ταχύτητα πρόωσης:  $V_f = f \cdot n$  (mm/min)

Η εργαλειομηχανή που δίνει την δυνατότητα μετακίνησης και περιστροφής του τρυπανιού και που χρησιμοποιείται για την διάτρηση είναι το δράπανο ή η εργαλειομηχανή CNC. Τα δράπανα διακρίνονται ανάλογα με το βάρος τους σε ελαφρά, μέσου μεγέθους βαρέως τύπου, ανάλογα με τη θέση της ατράκτου σε κατακόρυφα και οριζόντια, ως προς τον τρόπο κίνησης της ατράκτου σε χειροκίνητα, μηχανοκίνητα και πεπιεσμένου αέρα και ως προς την ακρίβεια κατεργασίας σε κοινής ακριβείας και μεγάλης ακριβείας.



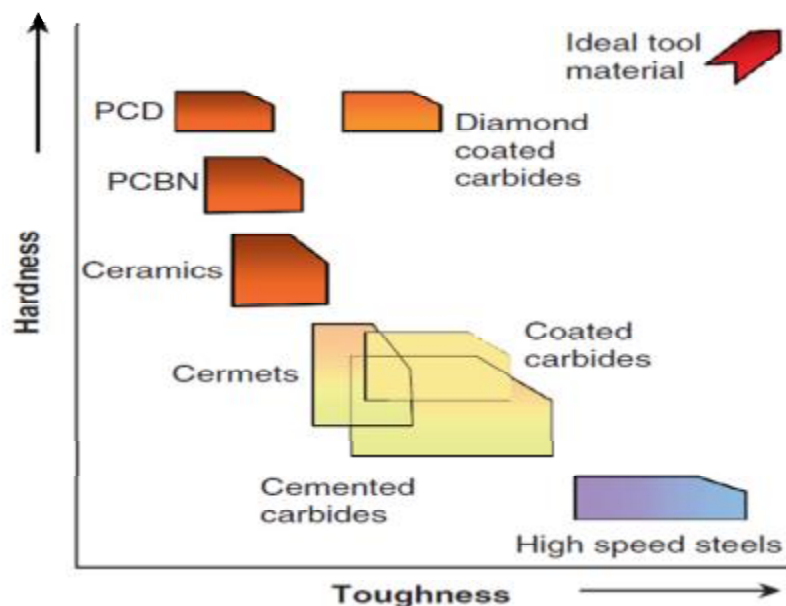
Εικόνα 15 Διάφορα είδη τρυπανιών που χρησιμοποιούνται σε δράπανα. Εικόνα από [https://www.kentrovidas.gr/uploads/1\\_51Q57GD1GSL\\_AA500.jpg](https://www.kentrovidas.gr/uploads/1_51Q57GD1GSL_AA500.jpg)

Το στέλεχος στο τρυπάνι, μπορεί να έχει μορφή κόλουρου κώνου και σπάνια κυλινδρική. Τα τρυπάνια με κυλινδρικό στέλεχος συγκρατούνται με ειδικούς σφιγκτήρες που προσαρμόζονται στην άτρακτο του δραπάνου με το κωνικό τους στέλεχος που είναι τυποποιημένο και λέγεται κώνος Μόρς. Τα μεγάλα τρυπάνια επίσης, φέρουν στελέχη με τον τυποποιημένο αυτόν κώνο. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως τα τρυπάνια είναι ο ταχυχάλυβας ή σπάνια ο ανθρακούχος χάλυβας και τα σκληρομέταλλα. Για την επιλογή του κατάλληλου για κάθε εργασία εργαλείου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν με διαφορετικούς τρόπους αυτή την επιλογή. Έτσι το μέγεθος της οπής που θα κατεργαστεί καθορίζει την διάμετρο του τρυπανιού που θα χρησιμοποιηθεί.

Υλικό (MPa)	Εγκάρσια αντοχή Εφελύσσ., TRS (MPa)	Αντοχή σε θλίψη, $\sigma_c$ (MPa)	Αντοχή σε θραύση, KIC, (MPa $\text{m}^{-1/2}$ )	Σκληρότητα		Επιτετατική θερμοκρασία διαστολής, $\alpha$ ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	Θερμική αγωγιμότητα, $k$ ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )
				HV30	Κρούση (MPa)		
ΑΙΣ22	950	1900	4.0	2100	15	4.7	10.5
ΑΙΣ23- ΠC	900	1500	4.5	2200	17	3.0	16.7
αίλιου ΑΙΣ2	700	-	5.5	2330	-	3.5	10.5
ΒΙΑΚΩΝ	900	2500	6.5	2870	17	3.2	20-25
κωκίτις [αξ. σελ]	1900	5580	12	600	14	4.3-5.6	80
PCBN	700-1200	2500	4.5	-	27-33	3.2-3.2	110-200
PCBN	800-1950	7700	3.0-9.0	-	39-51	1.5-3.8	543
συνθετικό diamond film	1300	9000	5.5-8.5	-	85-100	3.84	900-2200
σκλη crystal diamond	1350	9100	9.4	-	70-88	0.8-4.8	600-2100

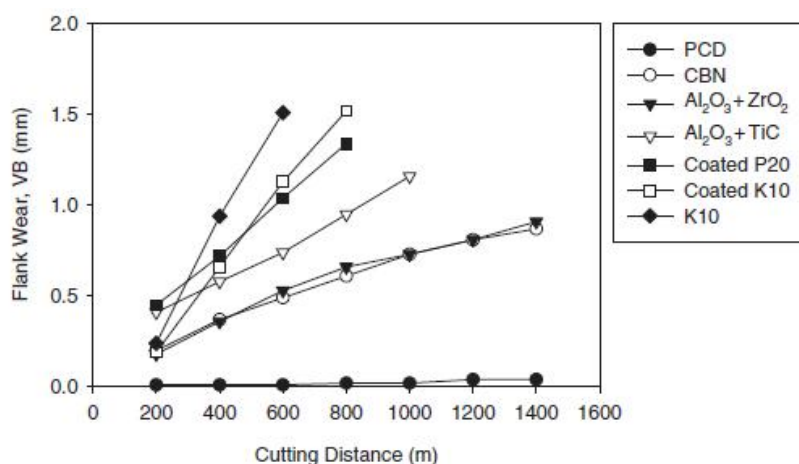
Εικόνα 16: Ιδιότητες κοπτικών [6]

Τα είδη των κοπτικών κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες σε σχέση με την αντοχή την ανθεκτικότητα και την σκληρότητα. Οι κατηγορίες αυτές είναι ο χάλυβας υψηλής ταχύτητας (HSS), τα κοπτικά από καρβίδιο (Cemented Carbides) και τα κεραμικά κοπτικά (Ceramics/Superhard Materials) τα πολυκρυσταλλικά με διαμάντι (Polycrystalline Diamond), τα πολυκρυσταλλικά με νιτρίδιο του βορίου (Polycrystalline Cubic Boron Nitride) και τα επιδιαμαντωμένα καρβίδια (Diamond Coated Carbides). Ανάλογα με τη χρήση του κοπτικού επιλέγεται το κατάλληλο για τις συνθήκες κοπτικό. Ένας πρότυπος οδηγός επιλογής [6] φαίνεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Πρότυπος οδηγός επιλογής κοπτικού για τη διάτρηση, με βάση τη σκληρότητα του υλικού και την αντοχή του [6]

Η φθορά που αναπτύσσεται στα τρυπάνια επηρεάζει την κοπτική ικανότητά τους και μπορεί να γίνει αντιληπτή από το στρογγύλεμα που δημιουργείται στις εξωτερικές γωνίες των κύριων κοπτικών ακμών στην μύτη του εργαλείου. Αν το κοπτικό εργαλείο συνεχίσει να κόβει, ιδιαίτερα σε διάτρηση τυφλής οπής, θερμαίνεται σημαντικά λόγω της μεγαλύτερης τριβής με τελικό αποτέλεσμα την θραύση του.



Εικόνα 18: Πλευρική φθορά συναρτήσει της χρήσης του κοπτικού, μετρούμενη σε m κοπής [6]

Οι τύποι φθοράς που συναντώνται σε ένα κοπτικό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως φαίνεται πιο κάτω:

- **Πλευρική φθορά (Flank Wear):** Οφείλεται στην ολίσθηση / τριβή του εργαλείου επάνω στο τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης (Adhesion) και διάβρωσης / τριβής (Abrasion), που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής. Η πλευρική φθορά προκαλεί σταδιακή μείωση του βάθους κοπής.
- **Φθορά κρατήρα (Crater Wear):** Σε αυτή την περιοχή αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως και οι μηχανικές τάσεις κατά την κοπή. Μέγιστη φθορά παρατηρείται μάλιστα στο σημείο όπου η θερμοκρασία κατά την κοπή είναι μέγιστη. Η φθορά κρατήρα μπορεί να αυξήσει τη γωνία εργασίας και να μειώσει τη δύναμη κοπής.
- **Αποκολλήσεις (Chipping):** Τα εργαλεία που υποβάλλονται σε ασυνεχείς κοπτικές συνθήκες είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε σμίλευση. Οι αποκολλήσεις κατηγοριοποιούνται

περισσότερο στη μικροθραύση του κοπτικού παρά στη συμβατική φθορά. Ο σχηματισμός ψευδοακμής έχει επίσης μια τάση να προκαλεί τη σμίλευση εργαλείων.

- **Φθορά λόγω ψευδοακμής:** Η ψευδοακμή δημιουργείται από αλεπάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου τα οποία προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.

Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να τροχίζεται την κατάλληλη στιγμή. Το τρόχισμα του τρυπανιού μπορεί να γίνεται με το χέρι αλλά για την αποφυγή λαθών, ιδιαίτερα στις κοπτικές γωνίες, προτιμάται να γίνεται με την βοήθεια ειδικής συσκευής, ενώ η χρήση ψυκτικού υγρού κατά το τρόχισμα είναι απαραίτητη για την αποφυγή της υπερθέρμανσης των κοπτικών ακμών.

### **Λείανση**

Η λείανση είναι μια μηχανουργική κατεργασία αποβολής υλικού με κοπτικό εργαλείο τον λειαντικό τροχό που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και χρησιμοποιείται συνήθως μετά από κάθε διεργασία για την επιφανειακή μορφοποίηση του τεμαχίου. Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από πολλές κοπτικές ακμές, τους λειαντικούς κόκκους οι οποίοι είναι άμορφοι χωρίς καθορισμένη γεωμετρία. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ενεργούν ταυτόχρονα στην αποβολή υλικού μεγάλος αριθμός λειαντικών κόκκων. Άρα, η λείανση είναι κατεργασία κοπής πολλαπλής σημειακής επαφής.



Εικόνα 19: Διάταξη λείανσης εργαστηρίου. Εικόνα από [http://www.priniotakis.gr/catalog2/images/Tegramin-30\\_with\\_suspensions.jpg](http://www.priniotakis.gr/catalog2/images/Tegramin-30_with_suspensions.jpg)



Υπάρχουν διαφορετικά είδη λείανσης, τα οποία αναφέρονται επιγραμματικά: επίπεδη λείανση η οποία κατεργάζεται επίπεδες επιφάνειες, κυλινδρική λείανση για την κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών, λείανση μορφής κατά την οποία ο λειαντικός τροχός έχει ειδικά διαμορφωμένο περίγραμμα, το οποίο αποδίδει στο τεμάχιο κατά την κατεργασία.

Το βασικό εξάρτημα της λείανσης είναι ο λειαντικός τροχός. Το υλικό τους είναι φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο ( $Al_2O_3$ ), ανθρακοπυρίτιο (SiC), διαμάντι, κυβικός βοριονιτρίτης (CBN) ενώ αποτελείται από τους λειαντικούς κόκκους που είναι από πολύ σκληρό υλικό και παίζουν τον ρόλο μικροσκοπικών κοπτικών εργαλείων, το δεσμό που είναι το συνδετικό υλικό που συγκρατεί τους κόκκους μεταξύ τους και αποδίδει γεωμετρική μορφή στον τροχό, το πορώδες που είναι το σύνολο των κενών που σχηματίζονται στο εσωτερικό του τροχού και διευκολύνουν την απομάκρυνση των αποβλήτων και την πρόσβαση του υγρού κοπής στη θέση κατεργασίας.

Οι τροχοί κορούνδιου χρησιμοποιούνται για λείανση σκληρών και συνεκτικών υλικών. Οι κόκκοι ανθρακοπυριτίου έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από τους κόκκους κορούνδιου και χρησιμοποιούνται για όλα τα ψαθυρά υλικά – μαλακά ή σκληρά – καθώς επίσης για τα πολύ μαλακά υλικά. Η χρήση τροχών από CBN βαίνει συνεχώς αυξανόμενη καθώς παρέχουν πιο αποτελεσματική λείανση ενώ το μοναδικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος.

Ένα κρίσιμο μέγεθος των δίσκων λείανσης, είναι η σκληρότητα, η οποία εκφράζει τη σχετική δύναμη συγκράτησης του κόκκου από το δεσμό και όχι τη σκληρότητα του κόκκου. Σημαντικό ρόλο παίζει η αναλογία ανάμιξης των υλικών κόκκων και δεσμού και το κενό μεταξύ αυτών. Ο τροχός χαρακτηρίζεται ανάλογα με τη σκληρότητά του σε εξαιρετικά μαλακός, πολύ μαλακός, μαλακός, μέσης σκληρότητας, σκληρός, πολύ σκληρός και εξαιρετικά σκληρός.

Η λείανση όπως ήδη αναφέρθηκε αρχικά είναι μια σχεδόν απαραίτητη διεργασία η οποία ακολουθεί κάθε παραδοσιακή τεχνική, μιας και απομακρύνει όλες τις ατέλειες που δημιουργούνται και δίνει στο τελικό δοκίμιο μια λεία επιφάνεια χωρίς τραχύτητα.

## 2.3 Σύγχρονες Τεχνικές Επεξεργασίας

Με τον όρο *σύγχρονες* εννοούμε τις κατεργασίες που αναπτύχθηκαν κατά τα τελευταία 20-30 χρόνια για την επεξεργασία των υλικών. Παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τις παραδοσιακές, κάποιες αποτελούν εξέλιξή τους, ωστόσο όλες είναι σχεδιασμένες ώστε να εξοικονομούν χρόνο και να βελτιστοποιούν τις ιδιότητες που επιθυμούνται να υπάρχουν στο τελικό τεμάχιο.

### *Υδροκοπή*

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 [7]. Η υδροκοπή είναι η προτιμότερη μέθοδος, όταν δεν είναι επιθυμητή η μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται με άλλες μεθόδους.



**Εικόνα 20:** Κεφαλή υδροκοπής. Εικόνα από <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/applications/composite.aspx>

Η συγκεκριμένη τεχνική χρονολογείται από το 1933, όταν και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην κοπή χαρτιού [8]. Η πίεση του νερού ωστόσο ήταν χαμηλή και επέτρεπε τη χρήση της τεχνικής σε πολύ μαλακά υλικά. Το 1956, ο Carl Johnson κατασκεύασε μια παραλλαγή της μεθόδου [9] με χρήση υψηλής πίεσης νερού, η οποία ήταν ικανή να κόβει

πλαστικά υλικά, ενώ το 1958 ο Billie Schwacha [10] καθιέρωσε ένα σύστημα υπερ-υψηλής πίεσης για την κοπή σκληρών υλικών. Ο λόγος που η υδροκοπή θεωρείται προηγμένη τεχνική κοπής, έχει να κάνει με το γεγονός ότι στα αρχικά της στάδια ήταν μια τεχνική που χρησιμοποιούταν 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  $\mu\text{m}$ .

Στα συστήματα υδροκοπής, το κοπτικό εργαλείο είναι συνδεδεμένο σε μια αντλία νερού υψηλής πίεσης. Η αντλία φροντίζει να εκτοξευεται το νερό από το στόμιο με πολύ μεγάλη ταχύτητα ώστε να επιτυγχάνεται η κοπή του τεμαχίου. Οι αποξεστές που χρησιμοποιούνται είναι σωματίδια λυχνίτη ή οξειδία του αλουμινίου, τα οποία βοηθούν στην κοπή σκληρών και σύνθετων υλικών.

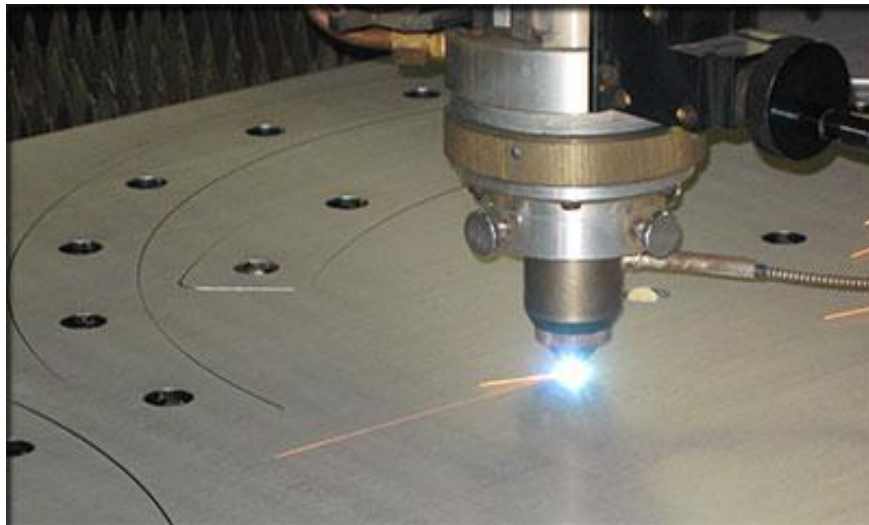
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υδροκοπής είναι η δυνατότητα να κόβεται το τεμάχιο χωρίς να αλλοιώνεται η εσωτερική του δομή, καθώς επίσης και η δυνατότητα για ψύξη κατά την κοπή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι παρατηρούμενες μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τα συστήματα 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 και πολλά άλλα υλικά.

### *Λείζερ*

Η τεχνολογία κοπής με δέσμη laser ανήκει στις προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας υλικών και είναι κυρίως βιομηχανική τεχνική. Ωστόσο, χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές μικρότερων δυνατοτήτων όπως οι χομπίστες, μικρές επιχειρήσεις και εργαστήρια μαθητών και φοιτητών. Η κοπή με laser χρησιμοποιεί μια λεπτή δέσμη laser η οποία ακολουθεί ένα προ-σχεδιασμένο μοτίβο για να κόψει το τεμάχιο στο επιθυμητό σχήμα. Το τεμάχιο κόβεται είτε λόγω τήξης, είτε εξατμίζεται είτε απομακρύνεται με χρήση αερίου υπο πίεση. Η επιφάνεια κοπής θεωρείται εξαιρετικά επίπεδη και δεν χρειάζεται συνήθως περαιτέρω

επεξεργασία (λείανση) [13]. Η πρώτη εφαρμογή laser χρονολογείται το 1965, οπότε και χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη οπών σε διαμάντια [14]. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε στην αεροναυπηγική για την κοπή τιτανίου. Γύρω στο 1970 έκαναν και την εμφάνισή τους και τα πρώτα laser με CO<sub>2</sub>, τα οποία ωστόσο δεν ήταν αρκετά ισχυρά και αρχικά περιορίστηκαν στην κοπή μη μεταλλικών υλικών [15].

Η δέσμη laser παράγεται μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης ή λαμπτήρες οι οποίοι βρίσκονται σε μια κλειστή κοιλότητα η οποία περικλείεται από καθρέφτες. Η δέσμη ανακλάται συνεχώς μεταξύ των καθρεφτών μέχρι να αποκτήσει αρκετή ενέργεια ώστε να δημιουργήσει μια μονοχρωματική δέσμη η οποία θα εξέλθει από την κοιλότητα. Η δέσμη που παράγεται έχει διάμετρο η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100 μm, ενώ με τη χρήση κατάλληλων καθρεφτών μπορεί να ελλατωθεί μέχρι τα 25 μm. Προτού αρχίσει να κόβεται το τεμάχιο με τη δέσμη laser συνήθως χρησιμοποιούνται παλμοί οι οποίοι δημιουργούν την αρχική οπή. Στη συνέχεια και προκειμένου το αποτέλεσμα να είναι κατά το δυνατόν λεία επιφάνεια, η δέσμη περιστρέφεται όπως ένα τυπικό τρυπάνι [16].



**Εικόνα 21:** Κεφαλή Laser κατά την κοπή. Εικόνα από <http://www.maximumind.com/laser-cutting-maximum-industries.html>

Τα πλεονεκτήματα της κοπής με laser είναι η ευκολία στη χρήση, η απουσία επιφανειακών προσμίξεων (όπως στην περίπτωση των δίσκων κοπής), η απουσία στρεβλώσεων του τεμαχίου και η δυνατότητα κοπής υλικών που είναι αδύνατο να κοπούν με άλλες παραδοσιακές μεθόδους.

Υπάρχουν 3 βασικοί τύποι laser: Τα laser CO<sub>2</sub>, τα laser νεοδυμίου (Nd) και τα laser νεοδυμίου-υτρίου-αλουμινίου-λυχνίτη (Nd-YAG), τα οποία χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις

απαιτήσεις κοπής [16]. Τα laser CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται πλέον σε όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές για κοπή χάλυβα, αλουμινίου, τιτανίου, πλαστικών και άλλων υλικών. Τα laser Nd χρησιμοποιούνται για σκληρά υλικά όπου απαιτείται περισσότερη ενέργεια δέσμης ενώ τα laser Nd-YAG χρησιμοποιούνται κυρίως για την κοπή και χάραξη μετάλλων και κεραμικών. Λόγω των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στη δέσμη, είναι απαραίτητη η παροχή ψύξης για τη σωστή λειτουργία των laser. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι κοπής με δέσμη laser:

- Εξάχνωση: η δέσμη θερμαίνει την επιφάνεια μέχρι το σημείο βρασμού με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια τρύπα η οποία βαθιάνει εξαχνώνοντας το υλικό. Η μέθοδος κοπής χρησιμοποιείται σε υλικά που δεν τήκονται.
- Τήξη: Τα μεταλλικά υλικά θερμαίνονται μέχρι το σημείο τήξης με τη χρήση δέσμης laser και στη συνέχεια ένα αέριο που βρίσκεται υπό πίεση αναλαμβάνει να κόψει το τεμάχιο χωρίς ανάγκη με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας.
- Θερμικό σοκ: Τα ψαθυρά υλικά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε μεταβολές θερμοκρασίας. Μια δέσμη laser αναλαμβάνει να θερμάνει τοπικά το υλικό με ταυτόχρονη διαστολή του και στη συνέχεια αναπτύσσεται μια ρωγμή κατά μήκος της επιθυμητής διαδρομής ώστε το τεμάχιο να λάβει το σχήμα του.

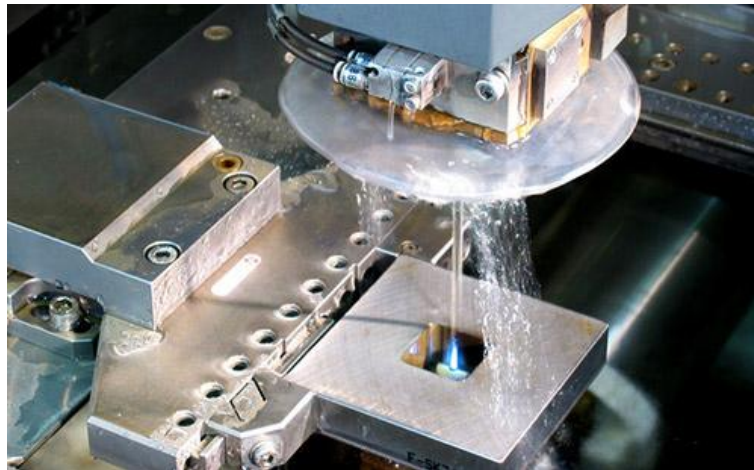
Το βασικό πλεονέκτημα της κοπής με δέσμη laser είναι η ιδιαίτερα μικρή επιφανειακή τραχύτητα. Ενδεικτικά οι τιμές επιφανειακής τραχύτητας είναι 10 μm για την κοπή ενός φύλλου πάχους 1 mm. Το βασικό μειονέκτημα των laser είναι η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Η αποδοτικότητα των βιομηχανικών laser ποικίλει από 5% μέχρι 45% [17] και εξαρτάται από τον τύπο του laser, το υλικό του τεμαχίου, το πάχος και το ρυθμό κοπής.

### ***Κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση***

Η ηλεκτρική εκκένωση είναι μια κατεργασία όπου το υλικό απομακρύνεται μέσω επάλληλων ηλεκτρικών εκκενώσεων με τη χρήση ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα την μορφοποίηση του τεμαχίου στο επιθυμητό σχήμα [18]. Μεταξύ των ηλεκτροδίων αναπτύσσεται ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο του οποίου η ένταση αυξάνεται καθώς τα ηλεκτρόδια πλησιάζουν και το διηλεκτρικό που βρίσκεται ανάμεσα σπάει με αποτέλεσμα να

υπάρχει ροή ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση υλικού και από τα δύο ηλεκτρόδια.

Το 1943, δύο Ρώσοι επιστήμονες, οι B. R. Lazarenko και N. I. Lazarenko ανέλαβαν να ερευνήσουν τρόπους για να εξαλείψουν τη διάβρωση του βολφραμίου από σπινθήρες. Η έρευνά τους απέτυχε, ωστόσο ανακάλυψαν ότι η διάβρωση ήταν πιο ελεγχόμενη όταν γινόταν μέσα σε διηλεκτρικό. Αυτό οδήγησε στην πρώτη διάταξη για την κατεργασία δύσκολα κατεργάσιμων υλικών όπως το βολφράμιο [18]. Σχεδόν ταυτόχρονα, μια άλλη ομάδα αποτελούμενη από τους Harold Stark, Victor Harding, και Jack Beaver ανέπτυξαν μια διάταξη για την απομάκρυνση θραυσμάτων από τρυπάνια σε χυτό αλουμίνιο. Η διάταξή τους μπορούσε να παράξει 60 σπινθήρες το δευτερόλεπτο, ενώ μεταγενέστερες διατάξεις άυξησαν σημαντικά τον αριθμό των σπινθήρων με αποτέλεσμα την ταχύτερη κοπή [18].



**Εικόνα 22:** Κεφαλή ηλεκτρικής εκκένωσης. Εικόνα από <http://www.precise-metals.com/precision-laser-cutting-wire-edm-services.html>

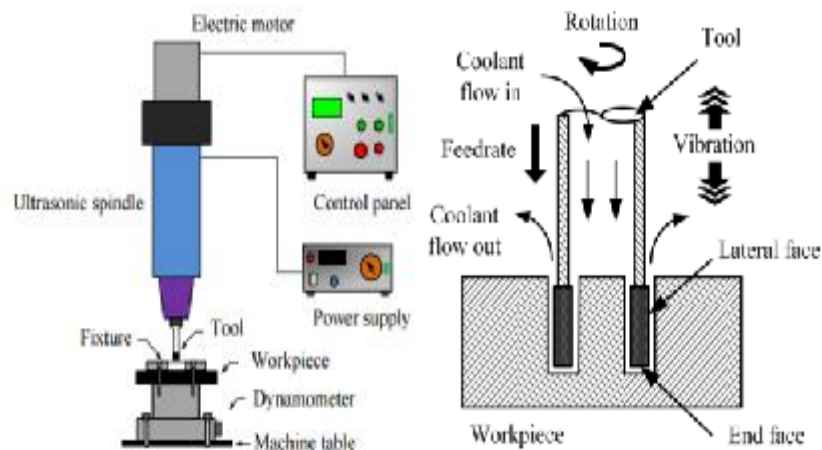
Η κατεργασίες με ηλεκτρική εκκένωση χρησιμοποιούνται σε αγώγιμα κυρίως υλικά, αν και τελευταία έχουν αναπτυχθεί και μέθοδοι για κεραμικά υλικά [19]. Έχει τη δυνατότητα να κατεργαστεί περίπλοκα σχήματα και κοιλότητες, ενώ μπορεί ακόμη να κατεργαστεί και σκληρυμένο χάλυβα χωρίς την ανάγκη για θέρμανση πριν την κατεργασία. Σε κάθε περίπτωση, ο χειριστής χρειάζεται να καθορίζει κάθε φορά τις παραμέτρους εκείνες που είναι κατάλληλες για το κάθε υλικό και ποικίλλουν ανάλογα με το είδος, το ρυθμό κοπής καθώς και το τελικό επιφανειακό αποτέλεσμα όσον αφορά την τραχύτητα.

Πλεονεκτήματα της κοπής με ηλεκτρική εκκένωση είναι η δυνατότητα κοπής σε περίπλοκα σχήματα, η απουσία επιφανειακών προσμίξεων κατά την κοπή και η απουσία περεταίρω επεξεργασίας της επιφάνειας μετά την κοπή. Τα βασικά μειονεκτήματα της κοπής με ηλεκτρική εκκένωση είναι ο χαμηλός ρυθμός κοπής, η πιθανότητα πυρκαγιάς, η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και η απαίτηση για κατασκευή νέων ηλεκτροδίων για κάθε κοπή [20].

## Κατεργασία με υπερήχους

Κατά την υπερηχητική κατεργασία, χρησιμοποιούνται υψηλής συχνότητας παλμούς οι οποίες δημιουργούνται σε ένα κοπτικό εργαλείο το οποίο είναι εβαπτισμένο σε λειαντικό μέσο και το οποίο διεισδύει με ελεγχόμενη ταχύτητα στο δοκίμιο. Είναι μια μη-θερμική μη-ηλεκτρική και μη-χημική μέθοδος που μπορεί να δημιουργήσει οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα, ακόμη και σε σκληρά υλικά όπως οι ίνες άνθρακα. Η υπερηχητική κατεργασία είναι προτιμότερη για τα σκληρά υλικά, μιας και τα μαλακά απορροφούν μεγάλο μέρος της ενέργειας των δονήσεων κάνοντας τη διεργασία λιγότερο αποτελεσματική.

Το κοπτικό εργαλείο τυπικά πάλλεται με μικρό πλάτος, περίπου 0.025 mm και έχει συχνότητα 20 με 100 kHz με αποτέλεσμα να διεισδύει προοδευτικά στο δοκίμιο. Οι παλμοί μεταφέρουν μεγάλη ενέργεια στους κόκκους του υλικού, το οποίο αποκολλάται και απομακρύνεται από την οπή με μορφή μικροσκοπικών ρινισμάτων. Το δοκίμιο βρίσκεται σε ροή νερού προκειμένου να απομακρύνονται τα θραύσματα.



Εικόνα 23: Μια τυπική διάταξη εργαλειομηχανής για την υπερηχητική κατεργασία

Οι τεχνικές που παρουσιάστηκαν αναλυτικά, θα αξιολογηθούν στον παρακάτω πίνακα για καλύτερη σύγκριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους, καθώς και για να γίνει αντιληπτός ο λόγος που πρέπει κάθε φορά να επιλέγεται η κατεργασία ανάλογα με το δοκίμιο. Ακολουθεί ο πίνακας με τη συνολική αξιολόγησή τους [6].

	Μηχανικές	Ηλεκτρική εκκένωση	Υπερηχητική κατεργασία	Υδροκοπή	Laser
Κόστος κεφαλαίου	5	2	1	6	4
Λειτουργικό κόστος	4	2	1	5	5
Εργαλείο/αναλώσιμα κόστος	3	1	4	6	6
Κόστος κατεργασίας	4	2	1	5	5
Χρόνος διεκπεραίωσης	5	1	3	4	4
Μέγεθος μηχανήματος	5	1	3	6	6
Πλεονεκτήματα	Καλό φινίρισμα επιφάνειας	Κοπή πολύπλοκων εξαρτημάτων	Πολύ καλή επιφάνεια, ελάχιστη βλάβη, αξιόπιστα προϊόντα	Δεν έχουμε θερμικές βλάβες, πάχος τεμαχίου	Στενά κοψίματα, υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας, υψηλή ευελιξία
Μειονεκτήματα	Φθορά του κοπτικού εργαλείου, Αποκολλήσεις υλικού	Ακριβά εργαλεία και εξοπλισμό, χαμηλή απόδοση αφαίρεσης υλικού, μερική θερμική βλάβη	Φθορά του εργαλείου, πολύ χαμηλή απόδοση αφαίρεσης υλικού	Μεγάλο επίπεδο θορύβου, λύματα, μεγάλο σε μέγεθος	Θερμικές βλάβες, αναθυμιάσεις και σκόνης

Πίνακας 1: Αξιολόγηση μηχανημάτων κατεργασίας σύνθετων υλικών ( 1: Λιγότερο επιθυμητό,6: Επιθυμητό )



## 2.4 Μέθοδοι Μελέτης Μηχανικών Ιδιοτήτων

Στην επόμενη παράγραφο, θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση των μεθόδων μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών. Οι μέθοδοι μελέτης διακρίνονται σε καταστροφικές και μη καταστροφικές ανάλογα με το εάν το υπό εξέταση δοκίμιο καταστρέφεται ή όχι κατά τη δοκιμή.

Για λόγους εξοικονόμησης χώρου, θα γίνει σύντομη περιγραφή των καταστρεπτικών μεθόδων, καθώς αυτές θα χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό μέρος, ενώ οι μη καταστροφικές μέθοδοι θα αναφερθούν ονομαστικά. Αρχικά θα δοθούν κάποιο ορισμοί [21] οι οποίοι συναντώνται στη συνέχεια της παρούσης παραγράφου.

Φορέας λέγεται κάθε σώμα το οποίο φέρει εξωτερικά φορτία. Άξονας ενός φορέα λέγεται η γραμμή που συνδέει τα κέντρα βάρους των κάθετων τομών του κατά τη διεύθυνση της μεγαλύτερης διάστασής του. Γενικά διακρίνονται τα ακόλουθα είδη φορέων:

- Ράβδος είναι ένας φορέας, του οποίου η μια διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες και καταπονείται μόνο από αξονικά φορτία, δηλαδή φορτία κατά τη διεύθυνση του άξονά της. Οι καταπονήσεις που μπορούν να υφίστανται οι ράβδοι είναι μόνο εφελκυσμός και θλίψη.
- Δοκός είναι ένας φορέας, του οποίου η μια διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες και καταπονείται από κάθε είδος φορτίου. Οι δοκοί μπορούν να υφίστανται όλα τα είδη καταπόνησης.
- Τόξο είναι ένα είδος δοκού, αλλά με καμπύλο άξονα.
- Δίσκος είναι ο φορέας εκείνος, του οποίου η μια διάσταση θεωρείται αμελητέα σε σχέση με τις άλλες δύο. Σύμφωνα με την περιγραφή του, ο δίσκος έχει δύο άξονες. Οι καταπονήσεις που μπορούν να υφίστανται οι δίσκοι είναι μόνο εφελκυσμός και θλίψη κατά μήκος των μεγάλων διαστάσεών τους.
- Πλάκα είναι ένας δίσκος, στον οποίο, όμως, εφαρμόζεται κάθε είδους καταπόνηση. Η πλάκα μπορεί να δεχθεί κάθε είδους φορτίσεις.
- Κέλυφος είναι ένα είδος δίσκου με καμπύλη μέση επιφάνεια.

Τα φορτία (δυνάμεις και ροπές), που καταπονούν ένα σώμα ανάλογα με τη χρονική συνάρτηση που τα περιγράφει, τον τρόπο δράσης τους και την έκταση της περιοχής δράσης.

Ανάλογα με τη χρονική διάρκεια, κατατάσσονται σε μόνιμα φορτία (καταπονούν ένα σώμα μόνιμα ή για μεγάλο χρονικό διάστημα), κρουστικά φορτία (επιβάλλονται για ελάχιστο χρονικό διάστημα) και εναλλασσόμενα φορτία (μεταβάλλονται χρονικά σύμφωνα με μια περιοδική συνάρτηση). Ανάλογα με τον τρόπο δράσης τους κατατάσσονται σε επιφανειακά (εκείνα που δρουν στο όριο του σώματος) και καθολικά φορτία (αυτά που ασκούνται σε κάθε μόνιο του σώματος). Τέλος ανάλογα με την περιοχή δράσης τους υπάρχουν τα συγκεντρωμένα φορτία (αυτά που δρουν σε ένα υλικό σημείο του συνόρου του σώματος) και τα γραμμικά κατανεμημένα φορτία (αυτά που ενεργούν πάνω σε μια γραμμή, στην επιφάνεια του σώματος).

Οι ιδιότητες ενός δοκιμίου, μπορούν να μελετηθούν με τις δοκιμές εφελκυσμού, με τη δοκιμή σκληρότητας, τη δοκιμή κρούσης, τη δοκιμή κόπωση και τον ερπυσμό. Όλες οι προαναφερθείσες δοκιμές καταστρέφουν το δοκίμιο το οποίο τελικά δεν θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μικρά δοκίμια από ολόκληρο το τεμάχιο προκειμένου να γίνει ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων.

### ***Εφελκυσμός***

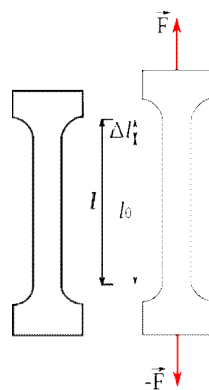
Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Το δοκίμιο υπόκειται σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση  $\Delta l$ . Εφελκυσμός ονομάζεται η καταπόνηση δοκιμίου, όταν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις  $F$ , που είναι ίσες και αντίθετες, ενεργούν κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου και τείνουν να αυξήσουν το μήκος του. Θλίψη ονομάζεται η αντίθετη του εφελκυσμού καταπόνηση, δηλαδή όταν οι ίσες και αντίθετες δυνάμεις  $F$  τείνουν να ελαττώσουν το μήκος του δοκιμίου [22].

Το μηχάνημα εφελκυσμού είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να προκαλεί την επιμήκυνση του υλικού με έναν σταθερό ρυθμό, να μετράει το φορτίο που εφαρμόζεται στο υλικό, καθώς επίσης και τις προκαλούμενες επιμηκύνσεις. Η δοκιμασία εφελκυσμού διαρκεί μικρό χρόνο και είναι καταστρεπτική, εφόσον το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και σπάει. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και η αντίστοιχη επιμήκυνση καταγράφονται και σχεδιάζεται η λεγόμενη καμπύλη τάσης εφελκυσμού-παραμόρφωσης.



Εικόνα 24: Αριστερά φαίνεται μια τυπική διάταξη για τις δοκιμές εφελκυσμού, ενώ δεξιά διακρίνονται οι διαφορετικοί τύποι προτυποποιημένων δοκιμίων που χρησιμοποιούνται κατά τη δοκιμασία του εφελκυσμού.

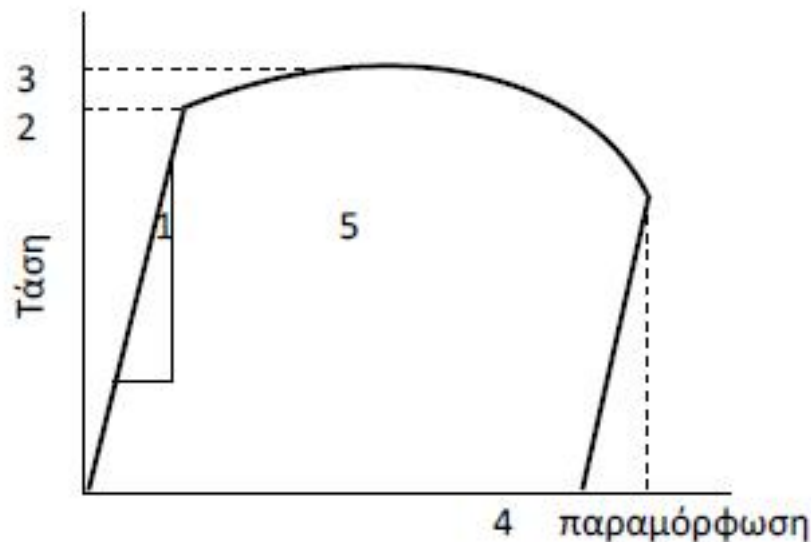
Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία θα συγκρατηθεί στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, έχουν ισχυρότερη διατομή.



Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού. Αριστερά το δοκίμιο στο αρχικό του μήκος, ενώ δεξιά φαίνεται το δοκίμιο κατά τον εφελκυσμό με την αντίστοιχη επιμήκυνση  $\Delta l$ . Εικόνα από [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a7/Eprouvette\\_traction\\_force\\_elongation.svg/204px-Eprouvette\\_traction\\_force\\_elongation.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a7/Eprouvette_traction_force_elongation.svg/204px-Eprouvette_traction_force_elongation.svg.png)

Το απαιτούμενο φορτίο που παράγει μια ορισμένη επιμήκυνση καταγράφεται καθώς το δοκίμιο εφελκύεται με σταθερό ρυθμό και προκύπτει η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Η μηχανική τάση,  $f$  σε MPa ( $\text{N/mm}^2$ ), ορίζεται ως  $f = \frac{F}{A}$ , όπου  $F$  (σε kN) είναι η δύναμη εφελκυσμού και  $A$  (σε  $\text{mm}^2$ ) η αρχική διατομή του δοκιμίου. Η παραμόρφωση είναι η αύξηση του μήκους του δοκιμίου ανά μονάδα μήκους δοκιμής. Η μηχανική παραμόρφωση,  $\varepsilon$ , ή ειδική επιμήκυνση ( $\varepsilon\%$ ), ορίζεται ως  $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$  ή αλλιώς  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ , όπου  $l$  το μήκος του δοκιμίου για δεδομένο φορτίο και  $l_0$  το αρχικό μήκος του δοκιμίου.

Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης χωρίζεται σε δύο περιοχές, την περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης και την περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης. Ελαστική χαρακτηρίζεται η προσωρινή παραμόρφωση που αναιρείται τελείως όταν πάψει να υπάρχει η αιτία (το φορτίο) που την προκάλεσε, το δε δοκίμιο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Η ελαστική περιοχή της καμπύλης του σχήματος είναι το αρχικό γραμμικό της τμήμα. Πλαστική είναι η μόνιμη παραμόρφωση που παραμένει και μετά την άρση της αιτίας που την προκάλεσε. Η πλαστική περιοχή είναι το μη γραμμικό τμήμα της καμπύλης και αρχίζει μόλις η ολική τάση υπερβεί το όριο ελαστικότητας.



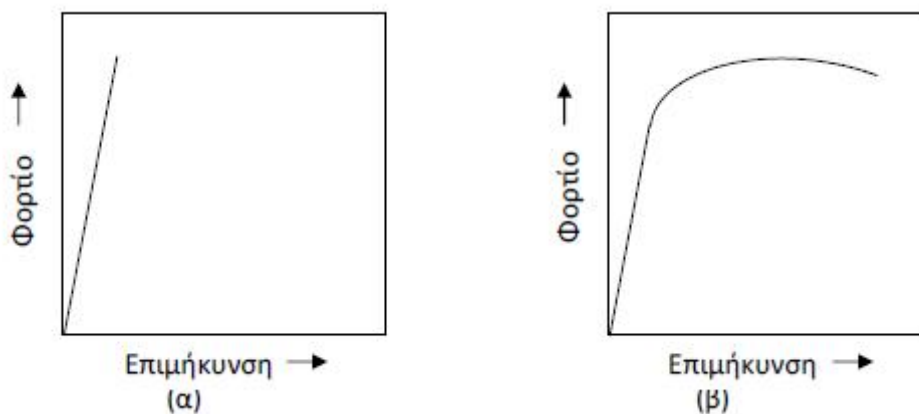
Εικόνα 26: Τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης [22]. 1) Μέτρο ελαστικότητας, 2) όριο διαρροής, 3) αντοχή σε εφελκυσμό, 4) πλαστιμότητα, 5) συνεκτικότητα.

Η κλίση της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι το μέτρο ελαστικότητας,  $E$ , ή μέτρο Young. Η γραμμικότητα της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι η γραφική παράσταση του νόμου του Hooke  $\sigma = E \cdot \epsilon$  όπου  $E$ , το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό ή μέτρο Young. Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  εκφράζει την ακαμψία του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε πλαστική παραμόρφωση. Το όριο διαρροής, όπως και το  $E$ , έχει μεγάλη πρακτική σημασία καθώς εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε μόνιμη παραμόρφωση και δείχνει την ευκολία με την οποία ένα μέταλλο μπορεί να μορφοποιηθεί.

Η μηχανική τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου, που ονομάζεται αντοχή σε εφελκυσμό. Μετά την αντοχή σε εφελκυσμό, το δοκίμιο αρχίζει να δημιουργεί «λαιμό», που ορίζεται ως ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε μια μικρή περιοχή του δοκιμίου και η

μηχανική τάση στο διάγραμμα του σχήματος μειώνεται. Αυτή η μείωση της τάσης συμβαίνει διότι η μηχανική τάση και η παραμόρφωση ορίζονται σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου. Η τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

Μια άλλη σημαντική μηχανική ιδιότητα που προσδιορίζεται με τη δοκιμασία του εφελκυσμού είναι η πλαστιμότητα, που εκφράζει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα υλικό χωρίς να θραυστεί. Η πλαστιμότητα εκφράζεται είτε ως επί τοις εκατό επιμήκυνση κατά τη θραύση ή επί τοις εκατό μείωση της διατομής κατά τη θραύση. Ο συνδυασμός πλαστιμότητας και αντοχής περιγράφεται από τον όρο συνεκτικότητα ή δυσθραυστότητα, η οποία προσδιορίζεται από την δοκιμή εφελκυσμού, ως το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μέχρι το σημείο θραύσης. Η δυσθραυστότητα αποτελεί μέρος της απαιτούμενης ενέργειας ανά μονάδα όγκου για τη θραύση του υλικού και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια μέχρι τη θραύση.



Εικόνα 27: Χαρακτηριστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό: (α) συμπεριφορά ψαθυρού υλικού, (β) συμπεριφορά όλκιμου υλικού.

Στην περίπτωση που το υλικό συμπεριφέρεται ως ψαθυρό, δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, διότι η θραύση επέρχεται πριν την παραμόρφωση. Στην περίπτωση που το υλικό συμπεριφέρεται ως όλκιμο, η μόνιμη παραμόρφωση που πραγματοποιείται συνοδεύεται συνήθως από σκλήρυνση του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζει την πλειονότητα μετάλλων και κραμάτων. Το όριο διαρροής είναι συνήθως η μέγιστη τάση που επιτρέπεται να παραλάβει μια κατασκευή, διότι πέρα από αυτό υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Το όριο διαρροής εξαρτάται από τη φύση του υλικού και παίρνει διάφορες τιμές, από πολύ μικρές για κάποια πλαστικά, έως πολύ μεγάλες για υλικά όπως το τιτάνιο και διάφορα κράματα χάλυβα. Δεν έχουν όλα τα υλικά όριο διαρροής, παρά μόνο τα σχετικά όλκιμα, όπως τα μέταλλα, τα κράματα και τα πολυμερή. Τα ψαθυρά υλικά, όπως τα κεραμικά και τα μεγάλης σκληρότητας

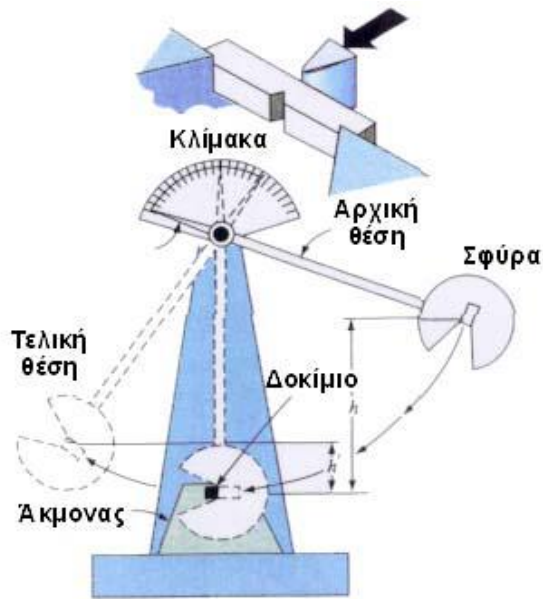
κράματα είναι δυνατόν να παρουσιάζουν ταχεία διάδοση ρωγμών και ψαθυρή αστοχία με θραύση αμέσως μόλις η τάση ξεπεράσει την ελαστική περιοχή.

Τέλος, πολλές φορές σε διάφορα κράματα παρατηρείται διαφορετικής μορφής καμπύλη  $\sigma=f(\epsilon)$ , στη γειτονιά του σημείου διαρροής, δηλαδή κατά το πέρασμα από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, παρουσιάζεται μια ασυνέχεια του σημείου διαρροής και εμφανίζεται ένα ανώτερο και ένα κατώτερο σημείο διαρροής. Το φαινόμενο αυτό πολλές φορές οφείλεται στην ύπαρξη διαταραχών στις διαχωριστικές επιφάνειες των κόκκων. Γενικά, τα κράματα είναι ανθεκτικότερα, αλλά λιγότερο όλκιμα από τα καθαρά μέταλλα. Η θερμοκρασία, οι προσμίξεις, η προηγούμενη κατεργασία του υλικού, η ταχύτητα φόρτισης του υλικού και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο κράματα και μέταλλα. Το όριο διαρροής και η μέγιστη τάση σε εφελκυσμό αυξάνονται σημαντικά στις χαμηλές θερμοκρασίες και ελαττώνονται αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Επίσης, γενικά, το μέτρο ελαστικότητας ελαττώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας, εφόσον η δομή του υλικού δεν αλλάζει.

#### ***Αντοχή σε κρούση - Δυσθραυστότητα***

Η δυσθραυστότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών. Ο έλεγχός της γίνεται μέσω τυποποιημένης δοκιμής κρούσης με τη βοήθεια μηχανής εκκρεμούς σφύρας. Οι διαφορετικοί τύποι δοκιμής είναι η δοκιμή Charpy και η δοκιμή Izod. Και οι δυο ανωτέρω τεχνικές βασίζονται στη μέτρηση του μηχανικού έργου, που χρειάζεται για τη θραύση ενός τυποποιημένων διαστάσεων δοκιμίου στο οποίο έχει γίνει κατάλληλη χαραγή σχήματος V.

Στην περίπτωση της δοκιμής Charpy, το δοκίμιο συγκρατείται στα δύο του άκρα ως αμφιέριστος δοκός, ενώ στην περίπτωση της δοκιμής Izod, το δοκίμιο είναι πακτωμένο από το ένα άκρο στο άλλο (πρόβολος). Το όργανο που χρησιμοποιείται ονομάζεται εκκρεμές και για τη θραύση του δοκιμίου χρησιμοποιεί μια βαριά σφύρα. Η διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ της τελικής και της αρχικής θέσης της σφύρας δίνει και το απαιτούμενο για τη θραύση μηχανικό έργο.



Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής κρούσης [21].

Ανάλογα με το ποσόν ενέργειας, που δαπανάται κατά τη θραύση στα πλαίσια της δοκιμής της κρούσης, τα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε όλκιμα και ψαθυρά υλικά. Τα όλκιμα υλικά απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας ( $> 100 \text{ J}$ ) κατά τις πρότυπες δοκιμές κρούσης, δηλαδή χαρακτηρίζονται από υψηλή δυσθραυστότητα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των όλκιμων υλικών είναι η σημαντική πλαστική παραμόρφωση που προηγείται της θραύσης. Τα όλκιμα υλικά έχουν συνήθως μέτρια έως χαμηλή σκληρότητα και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν εν ψυχρώ, είναι δηλαδή εύπλαστα και ευήλατα.

Όλκιμα υλικά είναι τα περισσότερα καθαρά μέταλλα (Fe, Al, Cu, Pb) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως και αρκετά από τα κράματα, όπως π.χ. οι χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ο μπρούντζος (Cu-Sn), ο ορείχαλκος (Cu-Zn), όταν δεν έχουν υποστεί κατεργασίες σκλήρυνσης.

Τα ψαθυρά (ή εύθραυστα) υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας ( $< 40\text{-}50 \text{ J}$ ) κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα. Τα κεραμικά υλικά, το γυαλί, ο γύψος κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία. Επίσης ορισμένα κράματα, όπως οι χάλυβες μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα μετά από σκλήρυνση (βαφή) και τα περισσότερα είδη χυτοσίδηρου, εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά. Σε αντίθεση με τα όλκιμα υλικά, τα ψαθυρά υλικά σπάζουν απότομα χωρίς καμία προειδοποίηση (δηλαδή χωρίς να έχει προηγηθεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση) και παρουσιάζουν μεγάλη, συνήθως, σκληρότητα. Γι' αυτό το λόγο δε διαμορφώνονται εν ψυχρώ. Οι επιφάνειες θραύσης ενός ψαθυρού υλικού, μετά από δοκιμή εφελκυσμού, δεν παρουσιάζουν σημαντική παραμόρφωση, ενώ, μικροσκοπικά, χαρακτηρίζονται από κοκκώδη μορφολογία (σχήμα 3.3α και β).

Η τιμή της δυσθραυστότητας των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική σύσταση και την κρυσταλλική δομή του υλικού, αλλά και από την θερμοκρασία. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ορισμένα όλκιμα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε ψαθυρά.

### ***Κόπωση***

Οι περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές δεν υφίστανται την επίδραση ενός χρονικά σταθερού φορτίου. Τις περισσότερες φορές ο τύπος και η τιμή του φορτίου μεταβάλλονται με το χρόνο. Έτσι, πολλά από τα τεχνικά υλικά υπόκεινται σε χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία ή τάσεις στις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές, στις οποίες συμμετέχουν ως λειτουργικά εξαρτήματα. Αυτές οι τάσεις, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, καταπονούν το υλικό σε εφελκυσμό και σε θλίψη και η μέγιστη τιμή της τάσης δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Τέτοιες περιοδικές καταπονήσεις υφίστανται πολλά μεταλλικά εξαρτήματα, όπως ο διωστήρας στις μηχανές εσωτερικής καύσης, τα αμορτισέρ των αυτοκινήτων, τα πτερύγια των αεροσκαφών και πολλά άλλα.

Οι επαναλαμβανόμενες αυτές μηχανικές καταπονήσεις, που αναπτύσσονται σε υλικά - εξαρτήματα μηχανών και κατασκευών, πολύ συχνά οδηγούν, μετά από κάποιες συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, σε αστοχίες που είναι γνωστές ως αστοχίες λόγω κόπωσης. Πολύ απλά, κόπωση μπορεί να οριστεί ως η χαρακτηριστική χρονικά μεταβαλλόμενη καταπόνηση, η οποία μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού (θραύση από κόπωση). Το όριο διαρροής είναι μέτρο της λεγόμενης στατικής αντοχής του υλικού. Στην περίπτωση της κόπωσης, το αντίστοιχο όριο είναι κατώτερο του στατικού και αντιστοιχεί στη δυναμική αντοχή του υλικού.

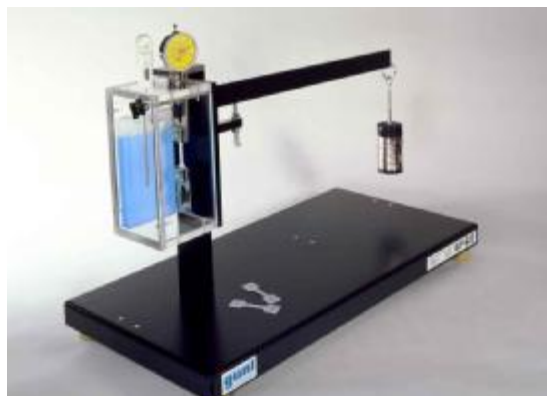
Ο κύκλος ή περίοδος φόρτισης είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο εναλλαγής της τιμής της τάσης (από μέγιστη σε μέγιστη ή από ελάχιστη σε ελάχιστη τιμή). Μετά από περίοδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος φόρτισης (ή αριθμού κύκλου φορτίσεως) το υλικό αστοχεί (σπάει). Κατά τη δοκιμή κόπωσης, το δοκίμιο υπό μορφή προβόλου περιστρέφεται μέσω κατάλληλου σφινγκτήρα και φορτίζεται με κατακόρυφο φορτίο  $W$  στο ελεύθερο άκρο. Για κάθε περιστροφή  $180^\circ$  το φορτίο  $W$  αλλάζει φορά, πραγματοποιούνται πολλές δοκιμές με διαφορετικό φορτίο  $W$  και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ( $N$ ), που απαιτείται για την αστοχία (θραύση) του υλικού.



Η αστοχία λόγω κόπωσης έχει αφετηρία κάποια επιφανειακή ατέλεια του υλικού. Η ρωγμή που διαδίδεται λόγω κόπωσης δημιουργεί ραβδώσεις στην επιφάνεια φόρτισης του μετάλλου, που η κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε ένα κύκλο εναλλαγής της τάσης. Η επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης περιλαμβάνει συνήθως τρεις χαρακτηριστικές περιοχές: την περιοχή Α, που είναι η περιοχή έναρξης της ρωγμής κόπωσης, την περιοχή Β, που αποτελεί την επιφάνεια διάδοσης της ρωγμής λόγω κόπωσης και η οποία έχει μορφολογία παρόμοια με την εξωτερική επιφάνεια αχιβάδας και τέλος την περιοχή Γ, που αποτελεί την επιφάνεια τελικής θραύσης με χαρακτηριστική κοκκώδη (τραχιά) μορφολογία, η οποία προκαλείται από την ασταθή διάδοση της ρωγμής γύρω από τα όρια των κόκκων του μετάλλου.

### ***Ερπυσμός***

Η πλαστική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) ενός υλικού ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης ( $\sigma$ ), του χρόνου επιβολής της τάσης ( $t$ ), καθώς και της θερμοκρασίας ( $T$ ), ονομάζεται ερπυσμός. Πρακτικά, η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού αποκτά σημαντικές τιμές σε υψηλές θερμοκρασίες και πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της τιμής  $0,4 \cdot T_m$  (το σημείο τήξεως). Μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξεως εμφανίζουν ερπυσμό ακόμα και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο ερπυσμός παρατηρείται επίσης σε υλικά, τα οποία καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. οι εναλλάκτες θερμότητας, οι αντιστάσεις κλιβάνων, τα εξαρτήματα στο εσωτερικό θαλάμων καύσης, οι πτερωτές αεροστρόβιλων και αμοστρόβιλων.



**Εικόνα 29: Πειραματική διάταξη ερπυσμού**

Οι δοκιμές του ερπυσμού συνίστανται στην εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και στην ακριβή μέτρηση της παραμόρφωσης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Γι' αυτό και ο προσδιορισμός της καμπύλης  $\epsilon$ - $t$  (ερπυσμού) ενός μεταλλικού υλικού θεωρείται επίπονη διαδικασία και απαιτεί όργανα μέτρησης υψηλής ακριβείας, όπως π.χ. επιμηκυσιόμετρο, το οποίο να μην επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

### ***Μη καταστροφικοί έλεγχοι***

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (Non Destructive Testing – NDT) είναι τεχνικές μελέτης των δοκιμίων με τις οποίες προσδιορίζονται οι ιδιότητές τους να καταστρέφεται το δοκίμιο κατά τη μελέτη. Στη βιβλιογραφία [24, 25] αναφέρεται πλήθος τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου, ο ισπουδαιότερες από τις οποίες είναι:

- Οπτική επιθεώρηση (Visual inspection-VI)
- Έλεγχος με διεισδυτικό υλικό (Liquid penetrant testing-LT)
- Έλεγχος με χρήση μαγνητικών σωματιδίων (Magnetic Particle Testing- MPT)
- Έλεγχος με χρήση ρευμάτων αυτεπαγωγής (Eddy current Testing-ET)
- Έλεγχος με χρήση Υπερήχων (Ultrasonic testing-UT)
- Ακτινογραφικός έλεγχος (Radiographic Testing-RT)
- Μέθοδος ακουστικής εκπομπής (Acoustic emission monitoring-AE)

Η ποικιλία μεθόδων που χρησιμοποιείται στους μη καταστροφικούς ελέγχους, επιτρέπει στο μηχανικό την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλογα με το υπό εξέταση δοκίμιο και την επιθυμητή ιδιότητα που χρειάζεται να εξεταστεί.

## 2.5 Κατεργασιμότητα σύνθετων υλικών

Η κατεργασιμότητα των υλικών αναφέρεται στην ευκολία ή δυσκολία με την οποία μπορούν αυτά τα υλικά να κατασκευαστούν. Η κατεργασιμότητα δεν είναι παρα μια εκτίμηση της ανταπόκρισης του υλικού σε ένα σύστημα κατεργασίας, όπου περιλαμβάνονται το ίδιο το υλικό, το εργαλείο κοπής, οι εργαλειομηχανές και οι τις συνθήκες κοπής. Η κατεργασιμότητα δεν είναι εύκολο να μετρηθεί ποσοτικά, κρίνεται όμως από τρεις παραμέτρους:

1. Η φθορά του εργαλείου
2. Η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται και
3. Το φινίρισμα επιφάνειας.

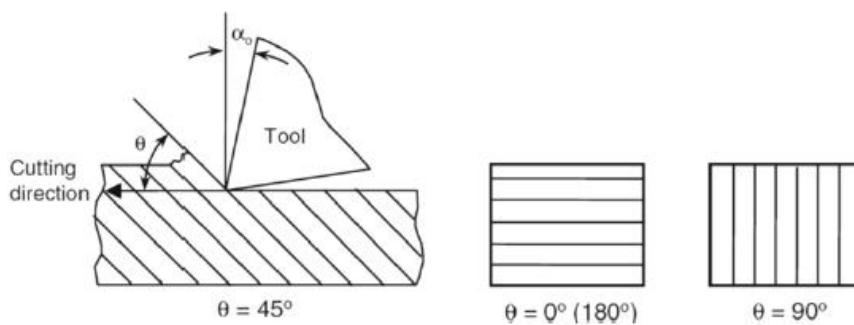
Ως εκ τούτου, καλή κατεργασιμότητα σημαίνει λιγότερη φθορά του εργαλείου, χαμηλές δυνάμεις κοπής, άρα και κατανάλωση ενέργειας, και τέλος καλό φινίρισμα επιφάνειας. Η κατεργασιμότητα μπορεί επίσης να αξιολογηθεί από τον τύπο των ρινισμάτων που απομακρύνονται αλλά και τις θερμοκρασίες κοπής, δεδομένου ότι υπάρχει ένας συσχετισμός μεταξύ του μεγέθους των ρινισμάτων που και το φινίρισμα της επιφάνειας [6].

Η κατεργασιμότητα των υλικών που αποτελούνται από διαφορετικές φάσεις, όπως οι ίνες άνθρακα σε εποξική μήτρα, καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ινών και της μήτρας, από την περιεκτικότητα σε ίνες αλλά και τον προσανατολισμό τους. Οι δυνάμεις κοπής που παράγεται κατά την κατεργασία των ινών μπορεί να είναι στιγμιαία υψηλή. Ο προσανατολισμός των ινών, όπως και το είδος τους επηρεάζουν το μέγεθος των ρινισμάτων και την εμφάνιση της επιφάνειας. Από την άλλη μεριά, η μήτρα ως συνδετικό είναι πολύ ασθενέστερη μηχανικά από τις ίνες και η επιρροή της στην κατεργασιμότητα είναι ασήμαντη. Ωστόσο, η μήτρα επηρεάζει το είδος των ρινισμάτων που παράγονται. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες είναι εύθραυστες, οι θερμοπλαστικές έχουν την ικανότητα να αντέχουν μεγάλες ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις.

Οι θερμοκρασίες κοπής εξαρτώνται από τις θερμικές ιδιότητες και τον προσανατολισμό των ινών, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την κατεργασιμότητα. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των ινών άνθρακα βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας που παράγεται μακριά από τη ζώνη κοπής. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της φθοράς του εργαλείου, αλλά διευρύνει επίσης τη ζώνη υψηλής θερμοκρασίας [6]. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του

ψυκτικού μέσου, η απορρόφηση υγρασίας από τη μήτρα ή των ινών μπορούν να επηρεάσουν τη μορφή και τις μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής της μήτρας και των ινών οδηγούν σε θερμικές καταπονήσεις που μπορεί να απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και να οδηγήσει σε παραμόρφωση [6].

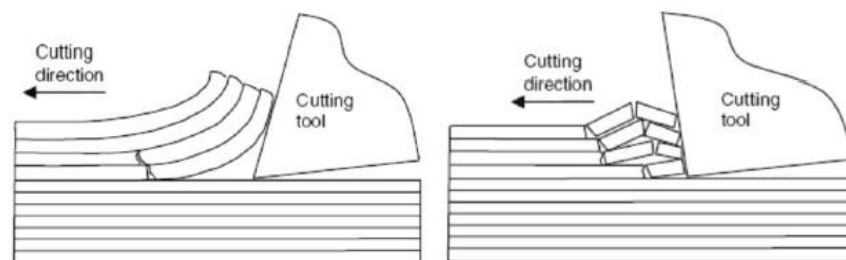
Τα εργαλεία μορφοποίησης των σύνθετων υλικών θα πρέπει να είναι ικανά να αντέχουν την θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω τριβής τόσο με τις ίνες όσο και με τα ρινίσματα που προκύπτουν κατά τη μηχανική κατεργασία. Η γεωμετρία του εργαλείου πρέπει να παρέχει μια αιχμηρή ακμή ικανή να κόψει τις ίνες αλλά και με τέτοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά που να εξασφαλίζουν το καλύτερο δυνατό φινίρισμα.



Εικόνα 30: Σχετικός προσανατολισμός κοπτικού εργαλείου και ινών

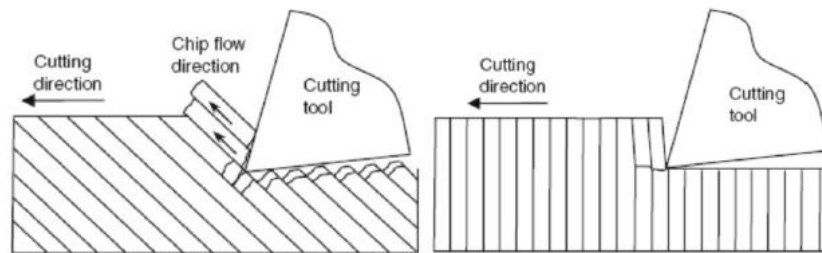
Οι διαδικασίες σχηματισμού και απομάκρυνσης ρινισμάτων στη μηχανική κατεργασία μονής κατεύθυνσης ελασματοποιημένων προϊόντων κατηγοριοποιούνται, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών και τη γωνία κλίσης του κοπτικού, σε πέντε διαφορετικούς τύπους [6], οι οποίοι παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στον τύπο I, παρατηρούνται θετικές γωνίες κοπής και διεύθυνση κοπής παράλληλη στο διαμήκη άξονα των ινών, οπότε τα ρινίσματα απομακρύνονται με τη μορφή φλοίδας. Αντίθετα στον τύπο II, παρατηρούνται αρνητικές γωνίες κοπής και τα ρινίσματα απομακρύνονται έχοντας ακαθόριστο σχήμα, λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται.



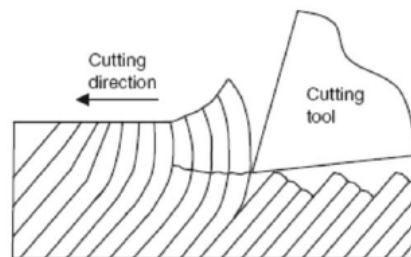
Εικόνα 31: Αριστερά ο τύπος I και δεξιά ο τύπος II για τα ρινίσματα που παράγονται κατά την κοπή

Οι τύποι III και IV παρατηρούνται για κατεργασίες με προσανατολισμό ινών  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  και για όλες τις γωνίες κοπής. Οι ίνες κόβονται λόγω διατμητικής τάσης και απομακρύνονται είτε με συνεχή (τύπος III) είτε με ασυνεχή (τύπος IV) τρόπο.



Εικόνα 32: Τύπος III (αριστερά) και τύπος IV (δεξιά)

Ο Τύπος V παράγει ακανόνιστη επιφάνεια μιας και ρινίσματα διαφορετικών μορφολογιών λόγω του διαφορετικού μήκους των ινών. Αυτές κόβονται σε διαφορετικά σημεία, με αποτέλεσμα το ακανόνιστο σχήμα.



Εικόνα 33: Τύπος V

Οι ίνες άνθρακα παράγουν αιχμηρά ρινίσματα με πολύ μικρή παραμόρφωση δίνοντας οδοντωτές επιφάνειες. Η αυτο-λιπαντική δράση των ινών άνθρακα βοηθά στην εύκολη ολίσθηση του κοπτικού πάνω στην μήτρα, καθιστώντας τις ίνες άνθρακα πιο επιρρεπείς σε αποκόλληση κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Γενικά, κατά την κατεργασία υπάρχει μια μείωση στην δύναμη κοπής με την αύξηση της γωνίας κλίσης του κοπτικού, δεδομένου ότι τα ρινίσματα που δημιουργούνται στην επιφάνεια απομακρύνονται πιο εύκολα καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται [26].

Η μελέτη των πολυκατευθυντικών ελασμάτων έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή στις περισσότερες εφαρμογές, τα αντικείμενα έχουν σχηματιστεί χρησιμοποιώντας πολλές στρώσεις ινών στις επιθυμητές μορφολογίες. Η παραγωγή ρινισμάτων κατά την κοπή πολυδιευθυντικών στρώσεων μοιάζει αρκετά με την κοπή μονοδιευθυντικών στρώσεων. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε στρώση συμπεριφέρεται ανεξάρτητα από τις στρώσεις που το περιβάλλουν. Τα φύλλα ινών άνθρακα  $0^\circ$  τείνουν να λυγίζουν και η αποφλοίωση που

ακολουθεί μοιάζει με τις αποφλοιώσεις Τύπου I και II. Αντίθετα, στα φύλλα άνθρακα με γωνίες  $45^\circ$  και  $90^\circ$  τείνουν να αποφλοιώνονται σύμφωνα με τον τύπου III.

Η γεωμετρία του κοπτικού έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Για  $0$  έως  $5^\circ$  η συνολική δύναμη μειώνεται, στη συνέχεια όμως αυξάνεται μέχρι και τη γωνία  $10^\circ$ . Κατά τη μελέτη κοπής των πολυκατευθυντικών ινών βρέθηκε [27] ότι σημαντικό ρόλο παίζουν και άλλες παράμετροι όπως το βάθος κοπής και η ταχύτητα.

Τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, παράγονται συνήθως σε ημιολοκληρωμένη μορφή, οπότε απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για την τελική μορφοποίηση του αντικειμένου. Η διάτρηση είναι μια από αυτές. Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάτρηση είναι η απαγωγή της θερμότητας, η φθορά του εργαλείου και αποκόλληση ινών. Κακή θερμική αγωγιμότητα της ίνας θα προκαλέσει συσσώρευση γύρω από την περιοχή κοπής και τελικά θέρμανση του κοπτικού, εκτός από το μορφοποιούμενο τεμάχιο. Επίσης, οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ των ινών και της μήτρας καθιστά δύσκολη την επίτευξη ακρίβειας όσον αφορά τις διαστάσεις των διανοιγμένων οπών. Εκτός αυτού, οι ίνες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή φθορά στο κοπτικό καθώς αυξάνει η δύναμη που απαιτείται για την κοπή τους.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, πρέπει κανείς να είναι προσεκτικός κατά την επεξεργασία σύνθετων υλικών. Δεν αρκεί μόνο το μορφοποιούμενο αντικείμενο να είναι δομημένο σωστά, απαιτούνται επίσης σωστές παράμετροι στο εργαλείο μορφοποίησης προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα στο τελικό αντικείμενο.

## 2.6 Σκοπός εργασίας

Οι τεχνικές κατεργασίας των σύνθετων υλικών, δίνουν τη δυνατότητα στο μηχανικό να κατασκευάσει εργαλεία και αντικείμενα σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία, ικανά να ανταπεξέλθουν στις συγκεκριμένες συνθήκες κάθε εφαρμογής. Για την επεξεργασία των σύνθετων υλικών χρειάζεται κανείς να είναι προσεκτικός ώστε να μην υποβαθμίσει τις μηχανικές ή άλλες ιδιότητες του υλικού κατά την επεξεργασία. Από τις πιο διαδεδομένες κατεργασίες είναι η διάτρηση. Ωστόσο η κατεργασία αυτή, υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού μιας και αναπτύσσονται τάσεις τόσο κατά τη διάρκεια της διάτρησης όσο και παραμένουσες.

Στην παρούσα εργασία θα κατασκευαστούν δύο πλάκες στις οποίες θα διανοιχθούν οπές με χρήση διαφορετικών παραμέτρων με σκοπό να προσδιοριστούν οι παράμετροι εκείνοι που θα οδηγήσουν στη διάνοιξη μιας οπής με τις βέλτιστες ιδιότητες.

Πιο συγκεκριμένα, θα κατασκευαστούν δύο πολυστρωματικές πλάκες αποτελούμενες από ίνες άνθρακα εμποτισμένες σε εποξική ρητίνη οι οποίες θα αναπτυχθούν στρωματικά με δυο διαφορετικούς τρόπους. Στην πρώτη πλάκα, οι ίνες θα έχουν όμοιο προσανατολισμό ινών άνθρακα  $0^\circ$  και στη δεύτερη θα αναπτυχθούν με εναλλασσόμενο προσανατολισμό σε σχετική γωνία των ινών  $0/90^\circ$ .

Στη συνέχεια με κατάλληλο προγραμματισμό της εργαλειομηχανής CNC θα διανοιχθούν οπές των 5 [mm] με χρήση διαφορετικών τιμών ταχύτητας κοπής και πρόωσης. Θα μελετηθεί η επίδραση στην ποιότητα των οπών τόσο των διαφορετικών αυτών παραμέτρων όσο και η επίδραση του προσανατολισμού των ινών σε κάθε πλάκα.

Τέλος θα γίνει συζήτηση για τα αποτελέσματα αλλά και για τους τρόπους βελτιστοποίησης της ποιότητας των οπών, αφού πρώτα αυτές χαρακτηριστούν οπτικά ως προς το αν είναι αποδεκτή η ποιότητά τους ή όχι. Στο τελικό συμπέρασμα θα καταλήξουμε στις βέλτιστες παραμέτρους διάνοιξης οπής για τις συγκεκριμένες πλάκες. Το κριτήριο της επιλογής είναι οι παραμορφώσεις και οι ατέλειες που θα δημιουργηθούν να μην εκτείνονται πέρα από έναν δακτύλιο πάχους 1 [mm] από τα όρια της οπής.

## Κεφάλαιο 3

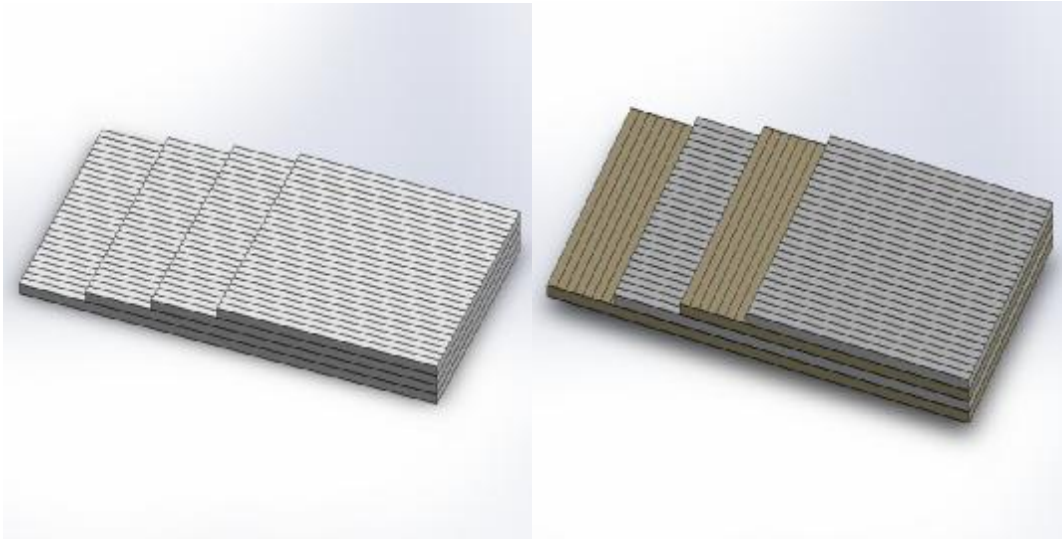
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής των δύο πλακών που μελετήθηκαν. Επίσης θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία της διάτρησης.

### 3.1 Κατασκευή πλακών

Για την πραγματοποίηση της εργασίας χρειάζεται αρχικά να κατασκευάσουμε δύο πλάκες ινών άνθρακα IMS 65 εμβαπτισμένες σε εποξική ρητίνη EP 6809 [Prepreg Carbon Fiber Sheet EF6809/IMS-(65)24K/194/33%RW300mm wide]. Πιο συγκεκριμένα ο αριθμός των ινών σε κάθε στρώση θα είναι 24000K με διάμετρο ίνας 5 [μm] και πυκνότητα 1.78 [gr/cm<sup>3</sup>],εμβαπτισμένες σε εποξική ρητίνη πυκνότητας 1.23 [g/cc].Η πρώτη πλάκα θα περιέχει 36 στρώσεις ινών άνθρακα με όμοιο προσανατολισμό ( $\theta=0^\circ$ ), ενώ η δεύτερη πλάκα θα περιέχει 36 στρώσεις με ίνες εναλλασσόμενου προσανατολισμού γωνίας [ $\theta=0/90^\circ$ ]. Οι πλάκες θα έχουν συνολικό πάχος 5 [mm].

Για την κατασκευή των πλακών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο φύλλο ινών άνθρακα εμβαπτισμένο σε εποξική ρητίνη [Prepreg Carbon Fiber Sheet EF6809/IMS-(65)24K/194/33%RW300mm wide] το οποίο κόπηκε σε διαστάσεις 200x200 [mm<sup>2</sup>]. Για την πρώτη πλάκα οι στρώσεις τοποθετήθηκαν με όμοιο προσανατολισμό [ $0^\circ$ ] ενώ για τη δεύτερη πλάκα η σχετική γωνία μεταξύ τους θα είναι [ $0/90^\circ$ ], όπως φαίνεται στην εικόνα 33.





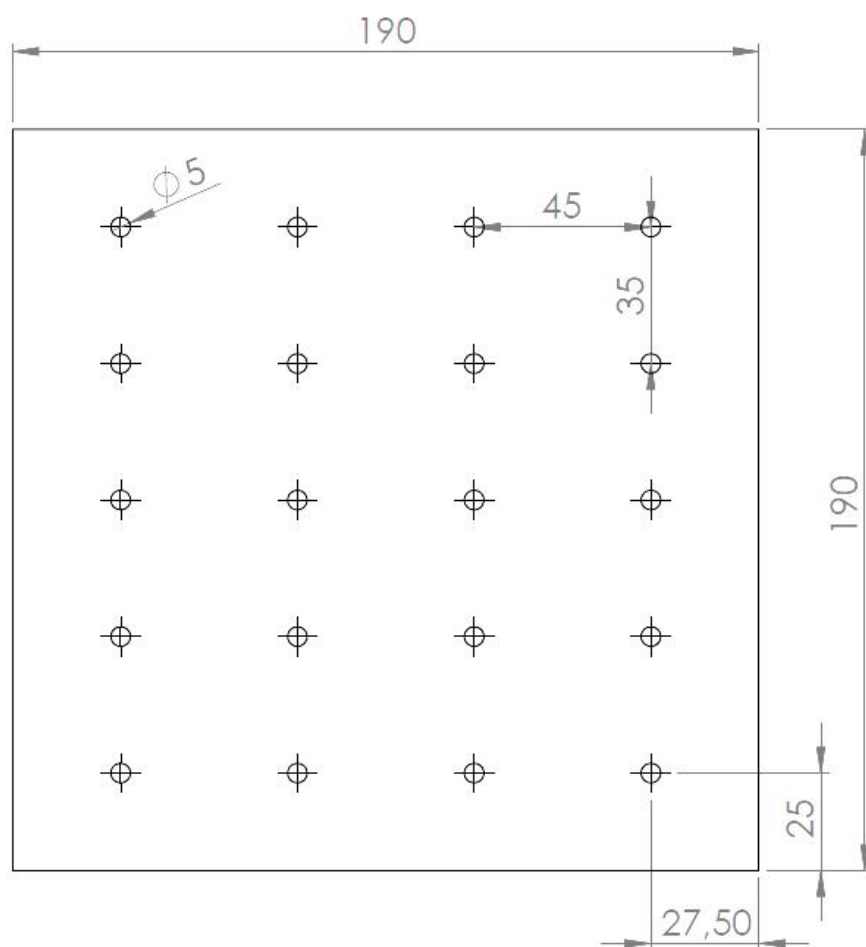
Εικόνα 34: Αριστερά φαίνεται η πλάκα ινών άνθρακα με κατεύθυνση ινών 0°. Δεξιά φαίνεται η πλάκα ινών άνθρακα με σχετικές διευθύνσεις σε γωνία 0/90°.

Αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα παρακάτω:

1. Το ρολό πρέπει να βγει από την κατάψυξη και να παραμείνει εντός της σακούλας PE μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Απαιτούνται 48h για ένα πλήρες ρολό, ενώ η κοπή και το στρώσιμο γίνεται στους 15-27°C.
2. Τα απαιτούμενα κομμάτια που θα αποτελούν τις στρώσεις κόβονται από το αρχικό ρολό του προεμποτισμένου (Prepreg). Οι κοπές πρέπει να γίνονται σε καθαρή επιφάνεια εργασίας αποφεύγεται η μόλυνση από υγρασία και από άλλους παράγοντες.
3. Το καλούπι πρέπει να έχει καθαριστεί καλά με ξύστρα και ακετόνη για να απομακρυνθούν υπολείμματα από προηγούμενη χρήση.
4. Εφαρμόζεται το μέσο αποκόλλησης.
5. Κάθε 4 στρώσεις εκτελείται de-bulking εκτός αν υπάρχει άλλη απαίτηση.
6. Τοποθέτηση Αναλωσίμων
7. Διαδικασία de-bulking:
8. Θερμοσκλήρυνση (Curing) στον Αυτόκλειστο Φούρνο.

### 3.2 Διάτρηση πλακών

Για την οπτική μελέτη των οπών και την ποιότητα κοπής, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές παράμετροι, συγκεκριμένα διαφορετικές ταχύτητες κοπής και ταχύτητες πρόωσης. Η διάτρηση έγινε με χρήση τρυπανιού πάχους 5 [mm] κατασκευασμένο από τιτάλιο με επικάλυψη κοβαλτίου (HSS TiCo). Κατά την κοπή, χρησιμοποιήθηκε σαπουνόλαδο για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών.



Εικόνα 35: Κάτοψη πλακών

Οι ταχύτητες πρόωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0,05 – 0,15 [mm/rev] με βήμα 0,05 [mm/rev] (3 βήματα), ενώ οι ταχύτητες κοπής είναι 20 – 60 [mm/min] με βήμα 10 [mm/min] (5 βήματα). Επίσης για τις ίδιες ταχύτητες κοπής μετρήθηκε η ποιότητα της οπής με μεταβαλλόμενη πρόωση. Συνολικά μελετήθηκε η ποιότητα 20 οπών σε κάθε πλάκα. Για τη διάτρηση χρησιμοποιήθηκε η κάτοψη που παρουσιάζεται στην Εικόνα 33.



Εικόνα 36: Αριστερά παρουσιάζεται η CNC φρέζα που χρησιμοποιήθηκε και δεξιά το κοπτικό εργαλείο (TiCo)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί αναλυτικά το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη CNC φρέζα:

```
PROGRAM 00419  
(ILIOPOULOS TRYPES CARBON 09/15)  
T1 M06 (F5)  
(TRYPES SE CARBON 5MM PAXOS)  
(KENTRO PANW ARISTERA)  
G00 G90 Z100.  
G00 G54 G90 X27.5 Y-25.  
G98  
G43 H01 Z40. S1275 M03  
M08  
G83 Q1. Z-7.5 F64. R1.  
(I)  
X72.5 F127.  
X117.5 F191.
```

*M97 P100 (METABALOMENH)*

(2)

*S1910*

*X27.5 Y-60. Z-7.5 F95. R1.*

*X72.5 F191.*

*X117.5 F286.*

*M97 P100*

(3)

*S2550*

*X27.5 Y-95. Z-7.5 F127. R1.*

*X72.5 F255.*

*X117.5 F382.*

*M97 P100*

(4)

*S3185*

*X27.5 Y-130. Z-7.5 F160. R1.*

*X72.5 F318*

*X117.5 F477*

*M97 P100*

(5)

*S4000*

*X27.5 Y-165. Z-7.5 F200. R1.*

*X72.5 F400*

*X117.5 F600.*

*M97 P100*

*M09*

*G00 G80 G90 Z100.*

*Y100.*

*M30*

*N100 (METABALOMENH)*

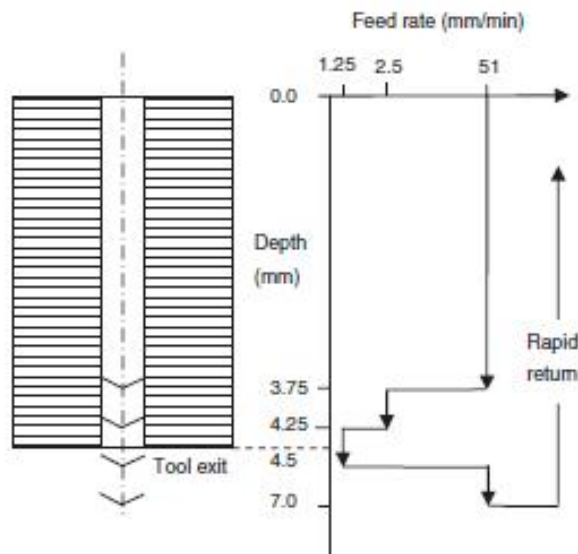
*G90 X162.5 Z-3.75 F51. R1.*

*X162.5 Z-4.75 R-3. F2.5*

*X162.5 Z-7.5 R-4. F1.25*

*M99*

Για τη μεταβαλλόμενη πρόωση, οι συνθήκες κοπής είναι:  $V_f = 5,1$  [mm/min] για βάθος μέχρι 3,75 [mm], στη συνέχεια  $V_f = 2,5$  [mm/min] για βάθος 3,75 [mm] μέχρι 4,75 [mm] και τέλος κατά την έξοδο η  $V_f = 1,25$  [mm/min]. Σχηματικά η μεταβαλλόμενη πρόωση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 37: Σχηματική αναπαράσταση της μεταβαλλόμενης πρόωσης

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής των πλακών καθώς και της διαδικασίας διάτρησής τους και θα ακολουθήσει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους.

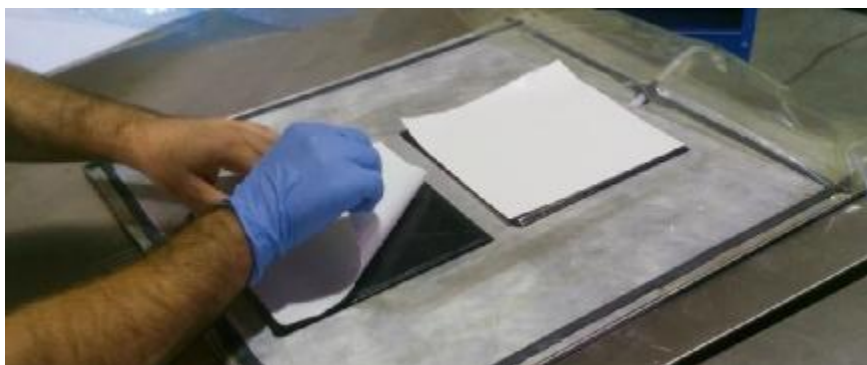
## Κεφάλαιο 4

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία κατασκευής των πλακών καθώς και τα αποτελέσματα από τη διαδικασία της διάτρησης.

### 4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

#### Κατασκευή πλακών

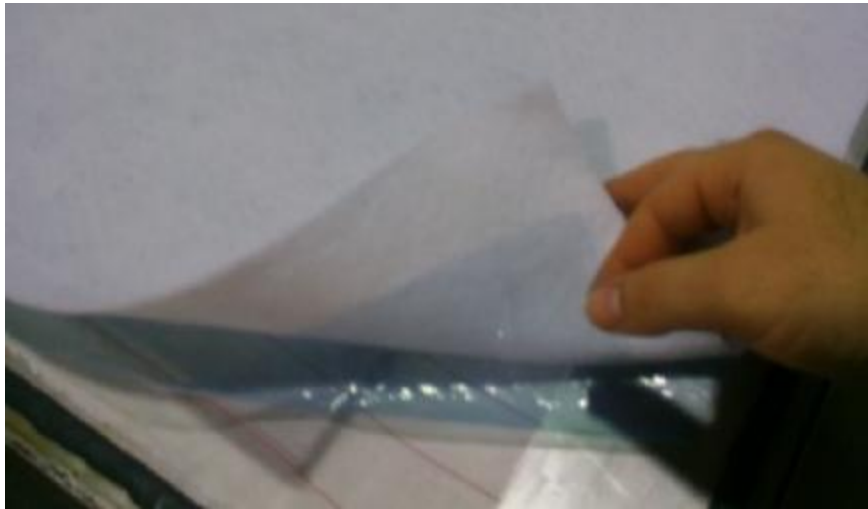
Για την κατασκευή των πλακών, χρησιμοποιήθηκαν τα κομμένα φύλλα ινών άνθρακα και τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο σε μορφή σάντουιτς προσέχοντας τον προσανατολισμό για την κάθε πλάκα.



Εικόνα 38: Στην εικόνα φαίνεται η διαδικασία στρώσης των φύλλων prepreg.

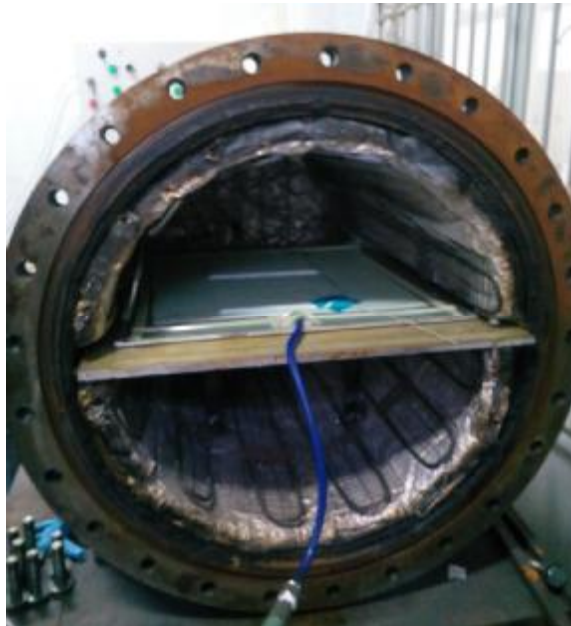
Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθούν οι 36 στρώσεις. Στη συνέχεια τοποθετούνται με τη σειρά: peelply film, ώστε να επιτευχθεί καλό φινίρισμα της επιφάνειας, perforated film, προκειμένου η περίσσεια ρητίνη μέσα από τις οπές του φύλλου να περάσει και να απορροφηθεί από bleeder/breather (κουβέρτα) και τέλος την σακούλα κενού, η οποία

τοποθετείται για να μπορέσουμε με την βοήθεια της αντλίας κενού να αναπτυχθεί το επιθυμητό κενό (980 mbar).



Εικόνα 39: Στην εικόνα φαίνονται οι 3 στρώσεις φύλλων που χρησιμοποιούνται για το τελικό στάδιο παρασκευής. Ακριβώς πάνω από την πλάκα φαίνεται το peelply, μετά φαίνεται το perforated film και τέλος το bleeder/breather.

Έπειτα, η πλάκα τοποθετείται στον αυτόκλειστο φούρνο υψηλής πίεσης με αδιάκοπη εφαρμογή κενού 980 [mbar] ενώ η πίεση του αυτόκλειστου είναι στα 7 [bar]. Στη συνέχεια ανεβάζουμε τη θερμοκρασία με ρυθμό 2 [°C/min] μέχρι τους 180 [°C] όπου και παραμένει για χρόνο 120 [min]. Τέλος η πλάκα ψύχεται μέχρι τους 60 [°C] με ρυθμό 2 [°C/min].



Εικόνα 40: Οι πλάκες τοποθετημένες στον αυτόκλειστο φούρνο.

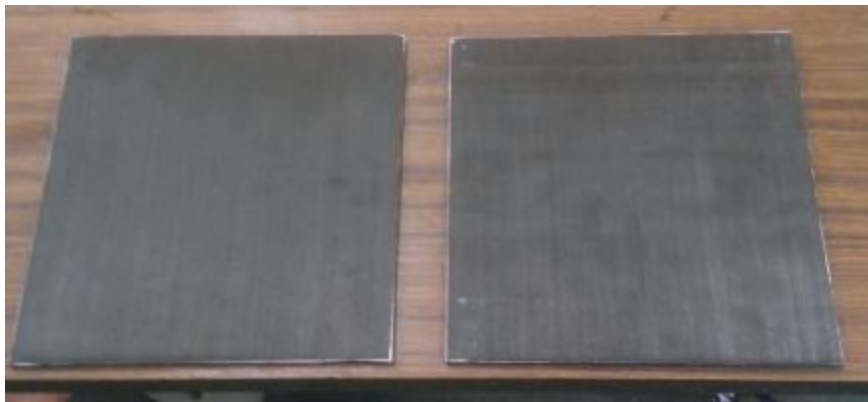
Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης στον αυτόκλειστο φούρνο, οι πλάκες πρέπει να ξακριστούν ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό φινίρισμα. Η

διαδικασία ολοκληρώνεται στην κορδέλα και τον λειαντικό-στιλβωτικό μηχανήμα (Laborol-1, Struers).



Εικόνα 41: Στην αριστερή εικόνα φαίνεται η διαδικασία φινιρίσματος στην κορδέλα, ενώ στην δεξιά εικόνα η διαδικασία λείανσης των ακμών των πλακών.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής οι πλάκες είναι έτοιμες για τη διαδικασία της διάτρησης. Στην εικόνα 42 φαίνονται στην τελική τους μορφή.



Εικόνα 42: Οι πλάκες στην τελική τους μορφή κατά την κατασκευή.



## Διάτρηση πλακών

Για τη διάτρηση χρησιμοποιήθηκε το τρυπάνι τιτανίου με επικάλυψη κοβαλτίου (HSS TiCo). Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε σαπουνόλαδο για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα της διάτρησης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 43: Στην πάνω εικόνα φαίνεται η φρέζα κατά τη διαδικασία της διάτρησης. Το άσπρο υγρό είναι το σαπουνόλαδο που χρησιμοποιήθηκε. Στην κάτω εικόνα φαίνονται οι πλάκες μετά τη διαδικασία διάτρησης

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας διάτρησης, ακολούθησε η λήψη φωτογραφιών από το οπτικό μικροσκόπιο για το χαρακτηρισμό των οπών που προέκυψαν. Τα αποτελέσματα για κάθε οπή παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες. Για λόγους ευκολίας στην παρουσίαση, αντιστοιχήθηκαν οι ταχύτητες κοπής σε έναν πίνακα για κάθε πρόωση.

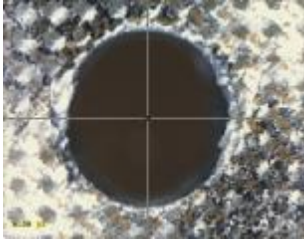
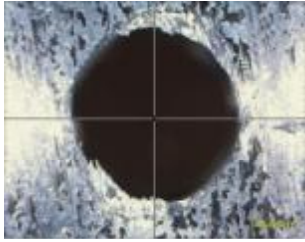
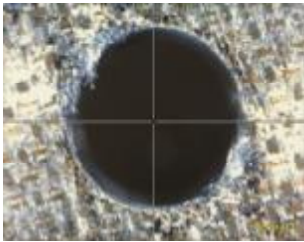

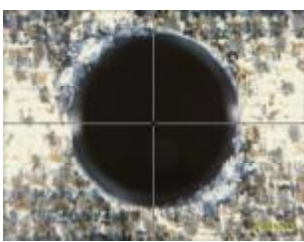
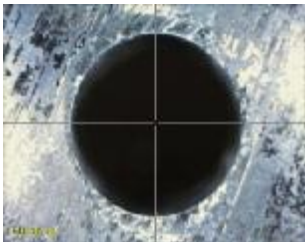




Κατά τον οπτικό χαρακτηρισμό, παρατηρούμε ότι όλες οι οπές οι οποίες διανοίχθηκαν με σταθερή ταχύτητα πρόωσης ήταν μη αποδεκτές ποιοτικά στην πλειοψηφία τους τόσο για την


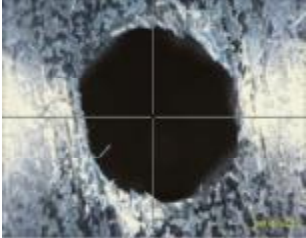

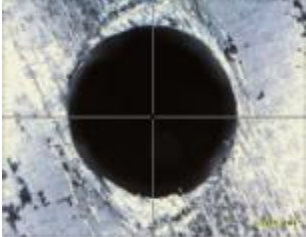
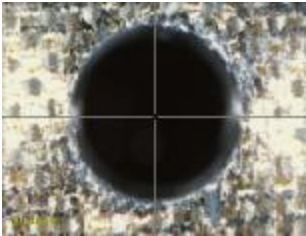
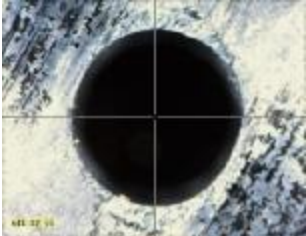
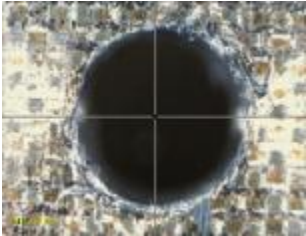
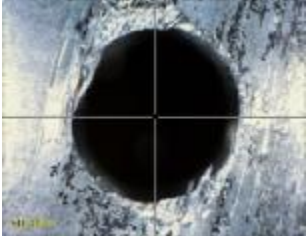
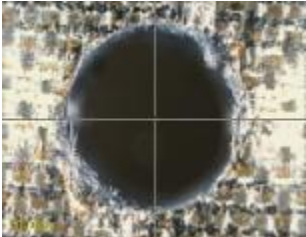

πλάκα  $0^\circ$  όσο και για την πλάκα  $0/90^\circ$ . Αντίθετα, στη μεταβαλλόμενη πρόωση, η πλειοψηφία των οπών είναι αποδεκτές ποιοτικά και για τις δύο πλάκες. Ακολουθεί η παρουσίαση των οπών και οι παρατηρήσεις για την κάθε μια αναλυτικά. Χρησιμοποιήθηκε το οπτικό μικροσκόπιο KONIG ELECTRONIC USB MICROSCOPE.

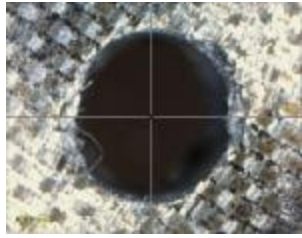
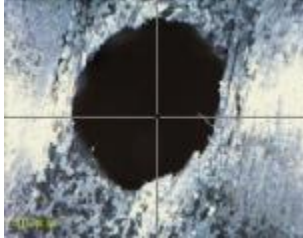



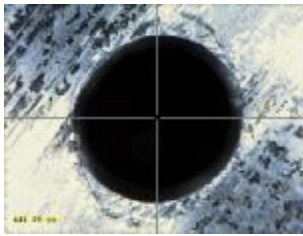
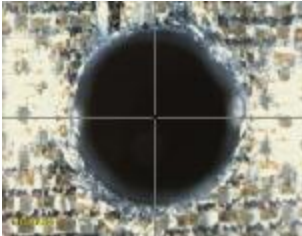
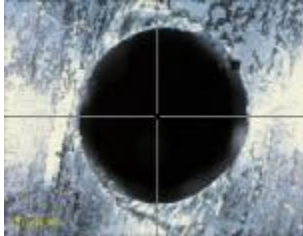

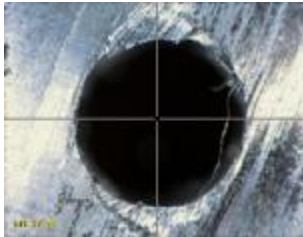


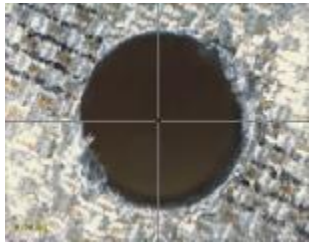
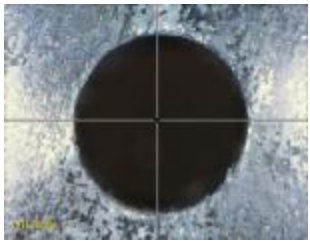

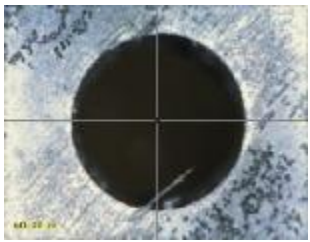



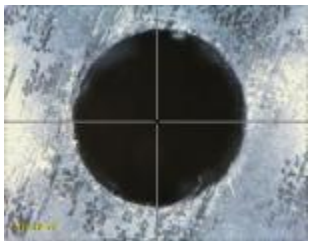


Εικόνα 41: Οπτικό μικροσκόπιο KONIG ELECTRONIC USB MICROSCOPE.

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του οπτικού χαρακτηρισμού για την πλάκα με στρώσεις 0°.

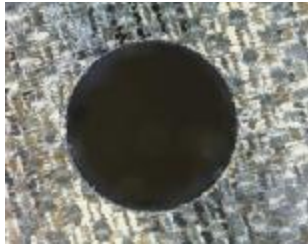
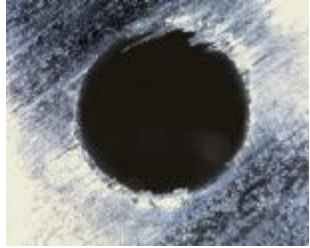
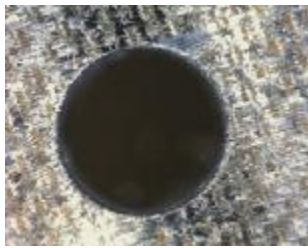
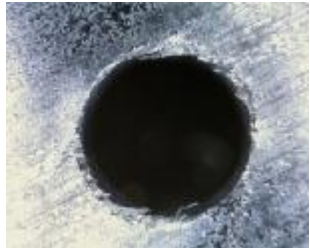
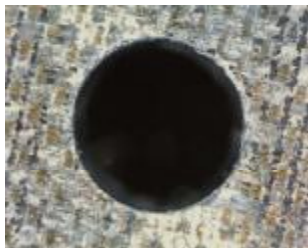
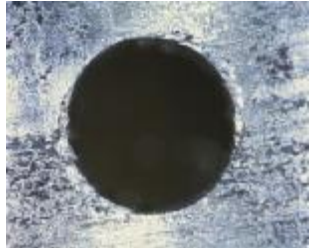

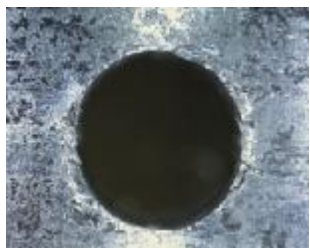

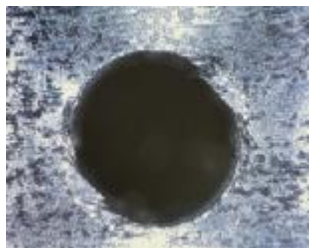
Πρόωση: 0,05 [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη.	OXI
30			Είσοδος: Άκοπες ίνες, αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη.  Έξοδος: Αποκολλήσεις.	OXI
40			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.  Έξοδος: Αποκολλήσεις.	OXI
50			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, καμένη ρητίνη.	OXI
60			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI


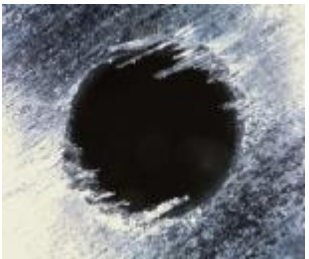
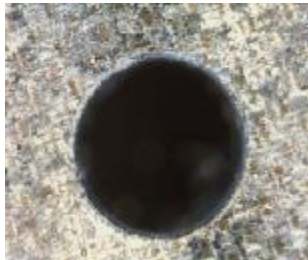
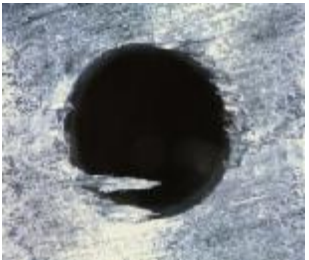


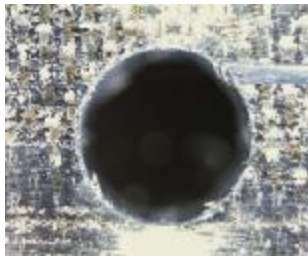
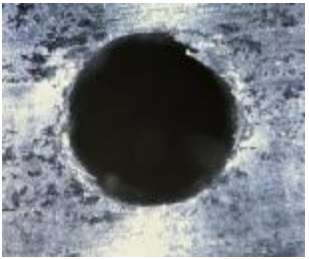
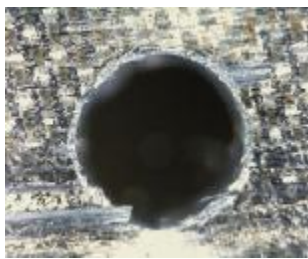
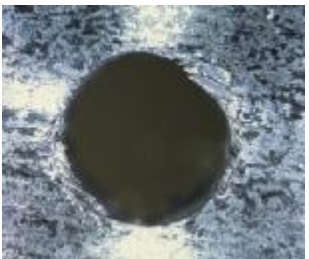
Πρόωση: 0,1 [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.	OXI
30			Είσοδος: Αποκολλήσεις, καμένη ρητίνη, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη.	OXI
40			Είσοδος: Καμένη ρητίνη, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις.	OXI
50			Είσοδος: Καμένη ρητίνη, άκοπες ίνες, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.	OXI
60			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI

Πρόωση: 0,15 [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.	OXI
30			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI
40			Είσοδος: Καμένη ρητίνη, άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI
50			Είσοδος: Άκοπες ίνες αποκολλήσεις, καμένη ρητίνη.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI
60			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, καμένη ρητίνη.  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI

Πρόωση: Μεταβαλλόμενη				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Καμένη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	NAI
30			Είσοδος: Καμένη ρητίνη, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Άκοπες ίνες.	NAI
40			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.	OXI
50			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.  Έξοδος: Άκοπες ίνες.	OXI
60			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, καμένη ρητίνη, άκοπες ίνες.  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	NAI

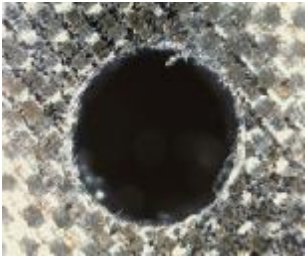
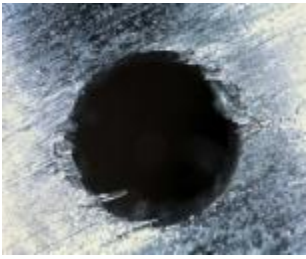

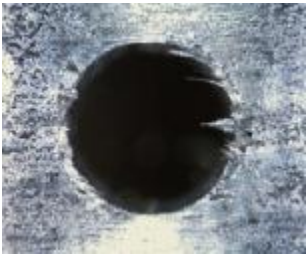
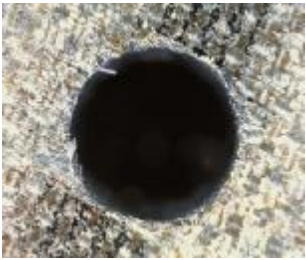
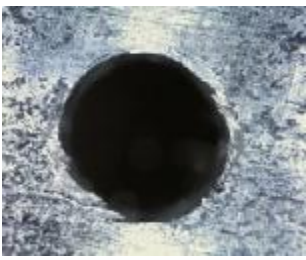
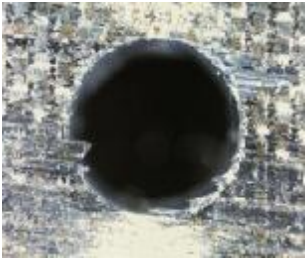
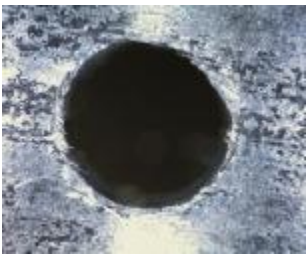
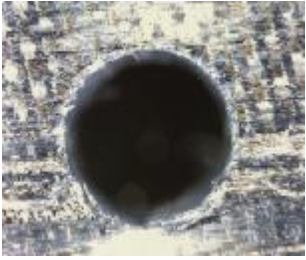
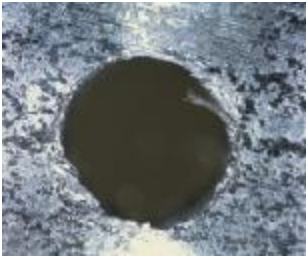
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του οπτικού χαρακτηρισμού για την πλάκα με στρώσεις 0/90°.

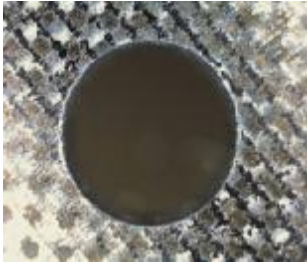


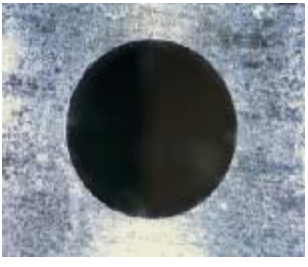



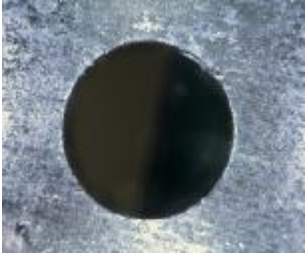


Πρόωση: 0,05 [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Καλή ποιότητα κοπής.  Έξοδος: Άκοπες ίνες, αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη	NAI
30			Είσοδος: Αποκολλήσεις  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη	NAI
40			Είσοδος: Αποκολλήσεις. Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες	NAI
50			Είσοδος: Άκοπες ίνες, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες.	NAI
60			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη, καμένη ρητίνη  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη.	OXI

Πρόωση: 0,1 [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Άκοπες ίνες.  Έξοδος: Άκοπες ίνες, αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη	OXI
30			Είσοδος: Καλή ποιότητα κοπής.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.	OXI
40			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις.  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες.	OXI
50			Είσοδος: Άκοπες ίνες, αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες.	OXI
60			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη.  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες.	OXI





Πρόωση: 0,15 [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη, καμένη ρητίνη  Έξοδος: Άκοπες ίνες, αποκολλήσεις, άκοπη ρητίνη	OXI
30			Είσοδος: Άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες, καμένη ρητίνη	OXI
40			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, καμένη ρητίνη  Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, καμένη ρητίνη	OXI
50			Είσοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, καμένη ρητίνη	OXI
60			Είσοδος: Άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη  Έξοδος: Αποκολλήσεις, άκοπες ίνες, άκοπη ρητίνη	OXI

Πρόωση: Μεταβαλλόμενη [mm/rev]				
$V_k$ [m/min]	Είσοδος	Έξοδος	Παρατηρήσεις	Αποδοχή
20			Είσοδος: Καλή ποιότητα κοπής. Έξοδος: Καλή ποιότητα κοπής.	NAI
30			Είσοδος: Καλή ποιότητα κοπής. Έξοδος: Καλή ποιότητα κοπής.	NAI
40			Είσοδος: Καλή ποιότητα κοπής. Έξοδος: Καλή ποιότητα κοπής.	NAI
50			Είσοδος: Άκοπες ίνες, καμένη ρητίνη. Έξοδος: Άκοπες ίνες.	NAI
60			Είσοδος: Άκοπη ρητίνη Έξοδος: Άκοπη ρητίνη, άκοπες ίνες.	NAI

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Θα ακολουθήσει η συζήτηση των αποτελεσμάτων.

## 4.2 Συζήτηση

Από την πειραματική διαδικασία γίνεται φανερό ότι η πλειοψηφία των οπών δεν είναι αποδεκτές τόσο για την πλάκα  $\theta=0^\circ$  όσο και για την πλάκα  $\theta=0/90^\circ$ . Οι μη αποδεκτές οπές σχετίζονται με την παρατήρηση άκοπων ινών και τις αποκολλήσεις στρώσεων που παρατηρούνται στην είσοδο και την έξοδο του κοπτικού. Επίσης, σε μερικές περιπτώσεις παρατηρείται άκοπη ρητίνη και θρυμματισμός των ινών. Τέλος, παρατηρήθηκαν ρωγμές και στις δύο πλάκες.

Τα προβλήματα που συναντήθηκαν οφείλονται κυρίως στην επιλογή της γεωμετρίας του τρυπανιού και της φρέζας και περιορίζεται από τις δυνατότητες της CNC φρέζας. Πιο συγκεκριμένα, η αποφλοίωση κατά της είσοδο θα μπορούσε να αποφευχθεί με τη χρήση διαφορετικού κοπτικού το οποίο θα είχε μικρότερη γωνία κοπής ενώ η αποφλοίωση κατά την έξοδο θα μπορούσε να αποφευχθεί με τη μείωση της πρόωσης. Όσον αφορά τα προβλήματα θρυμματισμού, άκοπων ινών και άκοπης ρητίνης που παρατηρήθηκαν, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κοπτικό με μεγαλύτερη γωνία κοπής και μείωση της πρόωσης.

Οι ρωγμές που παρατηρήθηκαν στην πλάκα  $0^\circ$ , οφείλονται στον όμοιο προσανατολισμό των ινών άνθρακα μέσα στα φύλλα που απαρτίζουν την πλάκα. Οι ρωγμές διαδίδονται κατά μήκος των ινών λόγω του προσανατολισμού τους με αποτέλεσμα να εκτείνονται πολύ μακρύτερα από την διανοιγμένη οπή. Αντίθετα, στην πλάκα των  $\theta=0/90^\circ$  υπάρχει διαφοροποίηση στο μηχανισμό διάδοσης των ρωγμών, η οποία οφείλεται στον προσανατολισμό των ινών. Η ανάπτυξη των ρωγμών αποτρέπεται από το γεγονός ότι οι ίνες είναι μεταξύ τους κάθετες, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η διάδοση της ρωγμής κατά μήκος των ινών.

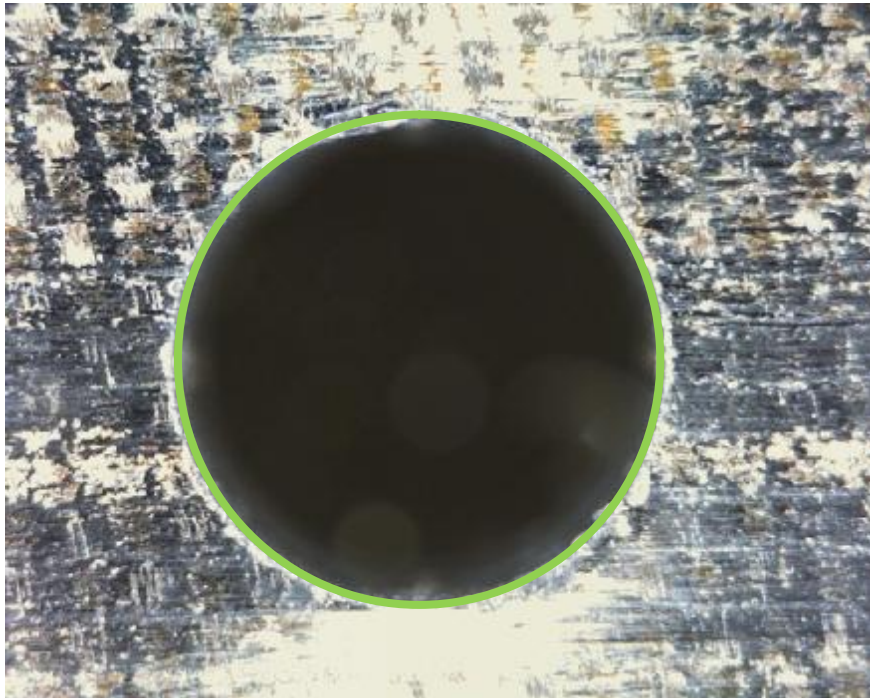
Ένα άλλο πρόβλημα που παρατηρήθηκε σε όλες σχεδόν τις οπές, είναι η χαμηλή ποιότητα οπής, ακόμη και στις περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται αποδεκτές. Ο λόγος είναι η χαμηλή επίστρωση του κοπτικού (TiCo) και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του. Συγκεκριμένα, το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε είχε συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda = 80 \text{ [W/m}\cdot^\circ\text{C]}$  ενώ ιδανικά θα έπρεπε να έχει τιμή  $\geq 500 \text{ [W/m}\cdot^\circ\text{C]}$ .

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η ποιότητα των οπών εξαρτάται τόσο από τον προσανατολισμό των ινών αλλά και από τις ιδιότητες του κοπτικού. Παρατηρήθηκε ότι στην πλάκα  $0/90^\circ$  οι οπές ήταν ποιοτικά ανώτερες και σε μεγαλύτερο βαθμό αποδεκτές σε σχέση με τις οπές της πλάκας με προσανατολισμό ινών  $0^\circ$ .

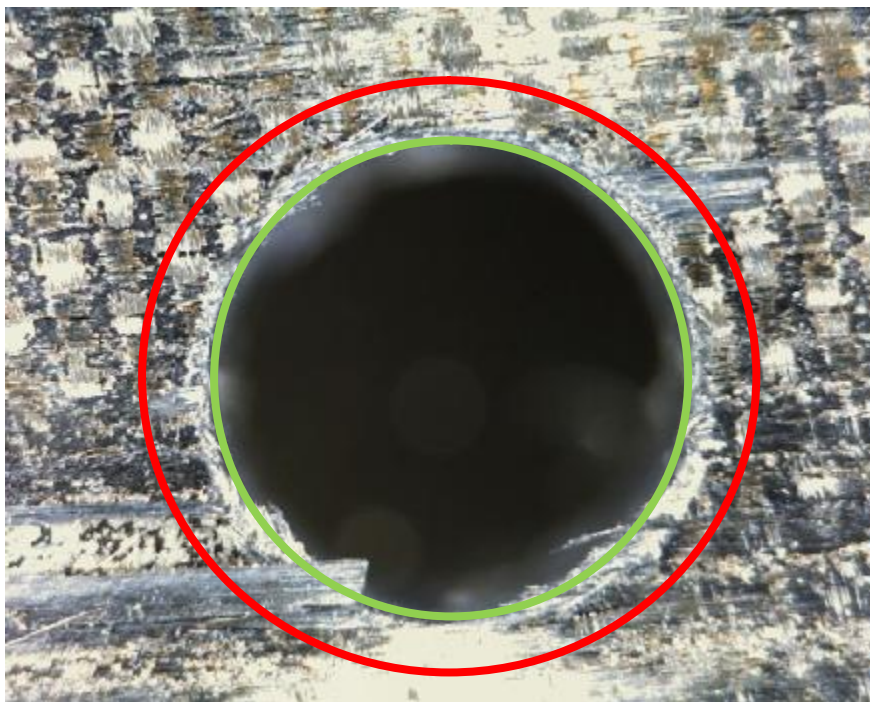
Επιπρόσθετα, οι οπές είχαν πολύ καλύτερη ποιότητα όταν η ταχύτητα πρόωσης ήταν μεταβαλλόμενη σε σχέση με τις οπές που διανοίχθηκαν διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα πρόωσης.

Τέλος, η ποιότητα εξαρτάται και από τις ονομαστικές δυνατότητες της εργαλειομηχανής CNC. Οι προτεινόμενες ταχύτητες κοπής για υλικά με ίνες άνθρακα βάση προδιαγραφών μεγάλων εταιριών που ειδικεύονται σε κατεργασίες σύνθετων υλικών όπως η SANDVIK Coromant και η Kennameta ξεκινούν από τη χαμηλή τιμή των 60 [m/min] έως 120 [m/min]. Στην παρούσα ερευνητική εργασία η ταχύτητα των 60 [m/min] αποτέλεσε το άνω όριο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, έχοντας ως αποτέλεσμα την διάνοιξη οπών οι οποίες ήταν στην πλειοψηφία τους μη αποδεκτές. Το κριτήριο της επιλογής είναι οι παραμορφώσεις και οι ατέλειες που θα δημιουργηθούν να μην εκτείνονται πέρα από έναν δακτύλιο πάχους 1 [mm] από τα όρια της οπής. Οι μετρήσεις έγιναν με ηλεκτρονικό παχύμετρο. Εικονική αναπαράσταση ακολουθεί πιο κάτω.

Οπή 5 [mm] Αποδεκτή, χωρίς ατέλειες κατά την κοπή



Οπή 5 [mm] Μη αποδεκτή με πολλές ατέλειες κατά την κοπή



1[mm]

## Επίλογος

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν δύο πλάκες με φύλλα ινών άνθρακα εμποτισμένα σε εποξική ρητίνη, με σκοπό να προσδιοριστούν πειραματικά οι βέλτιστες συνθήκες διάτρησης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πλάκες, η πρώτη με παράλληλο προσανατολισμό ινών 0° κατά την κατασκευή και η δεύτερη με προσανατολισμό κάθετο εναλλάξ μεταξύ των ινών 0/90°.

Μελετήθηκαν οι οπές που διανοίχθηκαν με διαφορετικές παραμέτρους και στη συνέχεια αξιολογήθηκε η ποιότητα της οπής με χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μεταβαλλόμενη πρόωση για τις ταχύτητες που μελετήθηκαν και το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι πιο κατάλληλη για τη διάτρηση των συγκεκριμένων πλακών.

## Βιβλιογραφία

- [1] R. S. o. Chemistry. [Online]. Available: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.3.1.pdf>.
- [2] G. D. Shaffer, "An Archaeomagnetic Study of a Wattle and Daub Building Collapse," *Journal of Field Archaeology*, vol. 20, pp. 59-75, 1993.
- [3] C. H. Foundation. [Online]. Available: <http://www.chemheritage.org/discover/online-resources/chemistry-in-history/themes/petrochemistry-and-synthetic-polymers/synthetic-polymers/baekeland.aspx>.
- [4] Δ. Μανωλάκος, «Σημειώσεις μαθήματος 'Εφαρμογές προηγμένων υλικών',» Αθήνα.
- [5] Ε. Δρακόπουλος, «Κατασκευή, μοντελοποίηση και μελέτη της φυσική και μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένης με νανοσωλήνες άνθρακα,» Πάτρα, 2010.
- [6] J. Ahmad, *Machining of Polymer Composites*, Abu Dhabi: Springer, 2009.
- [7] "waterjets.org," [Online]. Available: <http://www.webcitation.org/5nWaNTDGA>. [Accessed Σεπτέμβριος 2015].
- [8] C. A. Fournes and C. M. Pearson, "Paper Metering, Cutting, and Reeling". United States of America Patent US2006499 A, 22 Μαΐος 1933.
- [9] O. J. Carl, "Method for cutting up plastic and semi-plastic masses". United States of America Patent US2881503 A, 13 Μάρτιος 1956.
- [10] S. B. G, "Liquid cutting of hard materials". United States of America Patent US2985050 A, 13 Οκτώβριος 1958.
- [11] M. J. K. Y.-H. P. Mohamed A. Hashish, "Method and apparatus for forming a high velocity liquid abrasive jet". United States of America Patent US4648215 A, 7 Οκτώβριος 1985.
- [12] J. Lorincz, *Waterjets: Evolving from Macro to Micro*, Society of Manufacturing Engineers, 2009.
- [13] E. Oberg, F. D. Jones, H. L. Horton and H. H. Ryffel, *Machinery's Handbook*, New York: Industrial Press Inc., 2004.



- [14] J. Bromberg, *The Laser in America, 1950-1970*, Boston: MIT press, 1991.
- [15] P. K. Cheo, «CO2 Lasers,» UC Berkeley, 2015, p. UC Berkeley.
- [16] R. H. Todd, D. K. Allen και L. Alting, *Manufacturing Processes Reference Guide*, Industrial Press Inc., 1994.
- [17] "laserline.de," [Online]. Available: [http://www.laserline.de/tl\\_files/Laserline/downloads/broschueren/en/Laserline\\_Image\\_high\\_power\\_diode\\_laser.pdf](http://www.laserline.de/tl_files/Laserline/downloads/broschueren/en/Laserline_Image_high_power_diode_laser.pdf). [Accessed Αύγουστος 2015].
- [18] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, SME, 2001.
- [19] N. Mohri, Y. Fukuzawa, T. Tani, N. Saito and K. Furutani, "Assisting Electrode Method for Machining Insulating Ceramics," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 45, p. 201, 1996.
- [20] G. Kucukturk and C. Cogun, "A New Method for Machining of Electrically Nonconductive Workpieces Using Electric Discharge Machining Technique," *Machining Science and Technology*, vol. 14, no. 2, p. 189, 2010.
- [21] Σημειώσεις Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [22] ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΟΜΗΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗ ΘΛΙΨΗ*, Πειραιάς: ΤΕΙ Πειραιά, 2010.
- [23] Σημειώσεις Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών, *Σκληρότητα*, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [24] L. C. Douglas, *Nondestructive testing for aircraft*, Jeppese: Sanderson Training Products.
- [25] «Non-destructive testing,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.winzurf.com.nz/ndta>. [Πρόσβαση 27 Αυγούστος 2015].
- [26] T. Kaneeda, "CFRP cutting mechanism," *Transaction of North American Manufacturing Research Institute of SME*, vol. 19, 1991.
- [27] D. H. Wang, M. Ramulu and D. Arola, "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: Multi-directional laminate," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, 1995.