



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

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΓΕΩΡΓΑΝΤΖΑΚΟΥ
Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

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

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



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

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΓΕΩΡΓΑΝΤΖΑΚΟΥ
Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

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

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Υλικά τα οποία έχουν ειδικές ιδιότητες και εξαιρετικές αντοχές είναι απαραίτητα για μια σειρά από εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας όπως αυτές που βρίσκουν χρήση στον τομέα της αεροναυπηγικής, αεροδιαστημικής, υποβρύχια, εμβιομηχανική και στις μεταφορές. Μια κατηγορία νέων σχετικά υλικών είναι αυτή των σύνθετων υβριδικών. Πέρα λοιπόν από το σύνθετο (μήτρα και ενίσχυση) συγκολλάται ένα τρίτο υλικό όπως π.χ το μέταλλο. Έτσι, το τελικό προϊόν συνδυάζει τις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα και των τριών υλικών από τα οποία αποτελείται. Τα υβριδικά σύνθετα υλικά σιγά σιγά καθίστανται αναγκαία, καθώς αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών με πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη βιομηχανία. Ο συνδυασμός των παραδοσιακών συνθέτων υλικών με μεταλλικά υλικά βρίσκει αρκετές εφαρμογές σε προϊόντα υψηλής ποιότητας και συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, δεδομένου ότι η θεωρητική και πειραματική τους μελέτη βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή δοκιμίων υβριδικών υλικών, αποτελούμενα από ινώδες σύνθετο και μεταλλικό αφρό αλουμινίου. Το ινώδες σύνθετο αποτελείται από πολυμερική μήτρα (εποξειδική ρητίνη) και ίνες άνθρακα. Ακολουθεί ο έλεγχος της συμπεριφοράς σε συνθήκες θλιπτικής στατικής φόρτισης και της συνολικότερης βελτιστοποίησης αυτής της οικογένειας υλικών καθώς και των συντιθέμενων από αυτά κατασκευών.

ABSTRACT

Materials that have special properties and excellent resistance are essential for a number of high-tech applications such as those used in aeronautics, aerospace, submarines, industrial engineering and transportation. A class of relatively new materials is that of composite hybrids. In addition to the composite (matrix and reinforcement) a third material is welded, such as metal. Thus, the final product combines the properties and advantages of all three materials of which it is composed. Hybrid composites are slowly becoming necessary, as they are a new class of materials with many applications in modern industry. The combination of traditional composites with metallic materials finds several applications in high quality products and attracts the interest of the academic community, as their theoretical and experimental study is still in its infancy.

The purpose of this work is to fabricate specimens of hybrid materials, consisting of fibrous composite and aluminum foam metal. The fibrous composite consists of a polymeric matrix (epoxy resin) and carbon fibers. The following is the control of the behavior in conditions of compressive static loading and of the overall optimization of this family of materials as well as of the constructions composed of them.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	5
Σύνθετα Υλικά.....	5
1.1.Γενικά.....	5
1.2.Ορισμός	5
1.3.Κατηγορίες.....	6
1.4.Ιδιότητες – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	8
1.5.Τρόποι παραγωγής.....	9
1.6.Χρήσεις και Εφαρμογές	17
1.7.Υβριδικά Σύνθετα Υλικά.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	23
Μεταλλικοί Αφροί.....	23
2.1.Γενικά.....	23
2.2.Ορισμός	23
2.3.Κατηγορίες.....	24
2.4.Τρόποι παραγωγής.....	25
2.5.Χρήσεις και εφαρμογές	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	41
Ίνες Άνθρακα	41
3.1.Γενικά.....	41
3.2.Ορισμός	42
3.3.Κατηγορίες.....	42
3.4.Τρόποι Παραγωγής	43
3.5.Χρήσεις και Εφαρμογές	45
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	48
Πειραματική Διαδικασία	48
4.1. Γενικά.....	48
4.2.Σκοπός πειραματικού μέρους.....	48
4.3.Κατασκευή σύνθετων υβριδικών υλικών.....	48
4.3.1.Κατασκευή μεταλλικών αφρών	48
5.3.2.Κατασκευή σύνθετου υβριδικού υλικού	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	56
Μηχανικές δοκιμές	56

5.1.Μηχανικές Δοκιμές - Όργανα και Διατάξεις.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	57
Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	57
6.1.Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών.....	57
6.1.1.Ανάλυση δεδομένων - Συγκριτικά διαγράμματα.....	58
6.2.Παρατηρήσεις - Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	60
Συμπεράσματα.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....	60
Προτάσεις.....	60
Βιβλιογραφία.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σύνθετα Υλικά

1.1.Γενικά

Η έλευση των σύνθετων υλικών στο επιστημονικό και τεχνολογικό προσκήνιο ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα με τη σκόπιμη κατασκευή σχεδιασμένων πολυφασικών σύνθετων υλικών όπως είναι τα ενισχυμένα πολυμερή με υαλονήματα (fiberglass) . Αν και πολυφασικά υλικά όπως το ξύλο, τα τούβλα, που αποτελούνται από πηλό ενισχυμένο με άχυρο, τα κοχύλια και τα κράματα όπως το ατσάλι, ήταν γνωστά για χιλιάδες χρόνια , η αναγνώριση αυτής της νέας έννοιας του συνδυασμού ανόμοιων υλικών κατά τη διάρκεια κατασκευής τους οδήγησε στην ταυτοποίηση των σύνθετων υλικών ως μια νέα τάξη διαφορετική από τις έως πρότεινος υπάρχουσες. (Τσελίκος, 2014)

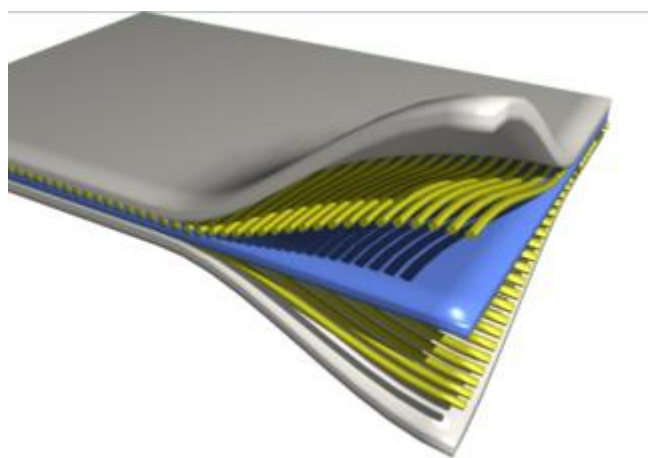
Αυτή η έννοια των πολυφασικών σύνθετων υλικών παρέχει συναρπαστικές ευκαιρίες στον σχεδιασμό μιας υπερβολικά μεγάλης ποικιλίας υλικών με συνδυασμούς ιδιοτήτων, οι οποίες δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από συμβατικά μονολιθικά κράματα μετάλλων, κεραμικών και πολυμερικών υλικών. (William D. Callister, 2015)

Υλικά τα οποία έχουν ειδικές ιδιότητες και εξαιρετικές αντοχές είναι απαραίτητα για μια σειρά από εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας όπως αυτές που βρίσκουν χρήση στον τομέα της αεροναυπηγικής, αεροδιαστημικής, υποβρύχια, εμβιομηχανική και στις μεταφορές.

1.2.Ορισμός

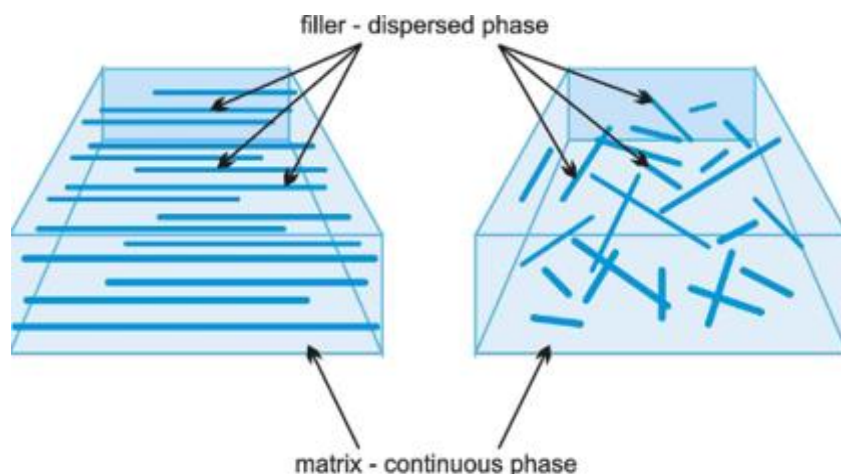
Σύνθετο υλικό θεωρείται κάθε πολυφασικό υλικό, το οποίο επιδεικνύει ένα μεγάλο ποσοστό από τις ιδιότητες και των δύο επιμέρους φάσεων ούτως ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερος συνδυασμός των ιδιοτήτων τους. Αυτή είναι η αρχή της συνδυασμένης δράσης, όπου καλύτεροι συνδυασμοί ιδιοτήτων διαμορφώνονται με τον επιλεκτικό συνδυασμό δύο ή και περισσότερων διακριτών υλικών . (William D. Callister, 2015)

Επίσης ένα σύνθετο υλικό είναι ένα πολυφασικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται τεχνητά εν αντιθέσει με εκείνα τα οποία συναντώνται στη φύση ή σχηματίζονται με φυσικό τρόπο. Ακόμη, οι συνιστώσες φάσεις πρέπει να είναι χημικά ανόμοιες και να διαχωρίζονται με μια διακριτή διεπιφάνεια. (Chaira, 2021)



Εικόνα 1.1. Πολυστρωματικό σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες.

Πολλά σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις . Η μία από αυτές ονομάζεται μήτρα, η οποία είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση η οποία ονομάζεται διασπαρμένη φάση. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των συνιστωσών φάσεων, των σχετικών ποσών και της γεωμετρίας της διασπαρμένης φάσης, δηλαδή το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων ή και την κατανομή και τον προσανατολισμό των ινών.



Εικόνα 1.2. Σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες, διασπαρμένη και συνεχής φάση

(Σύνθετα Υλικά: Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες εικόνα από διάλεξη, Ν. Μ. Μπάρκουλα, Επ. Καθηγήτρια, Δρ. Μηχ/γος Μηχανικός)

Για να καταταγεί ένα υλικό στα σύνθετα υλικά, θα πρέπει το υλικό να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10%) (Τσούβαλης, 1998)

1.3.Κατηγορίες

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες (Σχήμα 1.1):

- Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών.
- Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων/κόκκου.
- Δομικά / στρωματικά σύνθετα υλικά
- Νανοσύνθετα



Σχήμα 1.1. Ταξινόμηση σύνθετων υλικών ((William D. Callister, 2015)

Οι βασικές κατηγορίες σύνθετων υλικών απεικονίζονται παρακάτω.

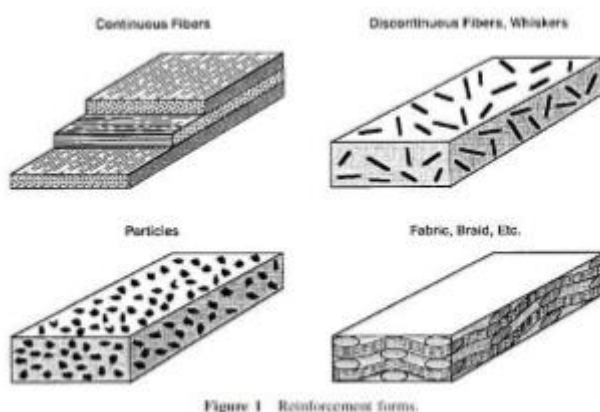


Figure 1 Reinforcement forms.

Εικόνα 1.3. Βασικές κατηγορίες σύνθετων υλικών (imeulia.blogspot.com)

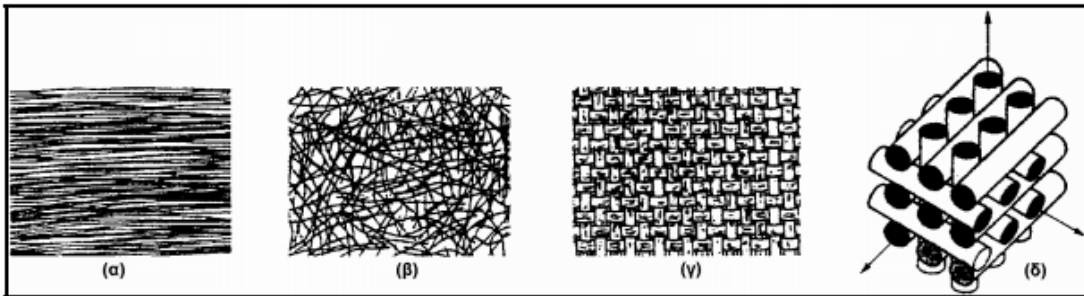
Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούν συνδυασμό ρητίνης ως μήτρα και ινών ως ενισχυτικό μέσο. Οι ίνες προσδίδουν στο σύνθετο υλικό υψηλές μηχανικές ιδιότητες σε εφελκυσμό κυρίως, ενώ η ρητίνη αποτελεί το συνδετικό υλικό των ινών, δηλαδή συνδέει τις ίνες και τις συγκρατεί μεταξύ τους. Οι ίνες μπορεί να βρίσκονται μέσα στο σύνθετο υλικό είτε με συγκεκριμένη πλέξη είτε άτακτα κατανεμημένες. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά (Τσούβαλης 1998).

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες,:

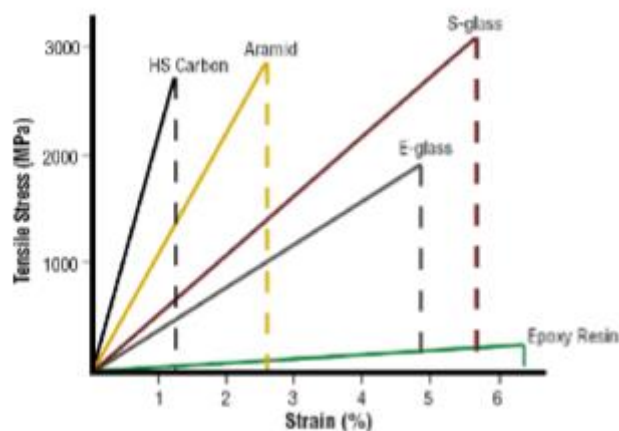
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.



Εικόνα 1.4. Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

1.4.Ιδιότητες – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών είναι συνήθως ίνες άνθρακα, ίνες γυαλιού και αραμιδικές ίνες. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τις ίνες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σύνθετων υλικών. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι είτε θερμοσκληρυνόμενες είτε θερμοπλαστικές και συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ρητίνες εποξικές, βινυλεστερικές, πολυεστερικές και φαινολικές. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο) (Τσούβαλης 1998).



Σχήμα 1.2. Σύγκριση διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης για τα διάφορα είδη ινών. (Τσούβαλης 1998)

Παρατηρώντας τις διαφορετικές ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιούνται ως μέσα ενίσχυσης και των διαφόρων ρητινών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα συγκράτησης, αλλά και τις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής των σύνθετων υλικών, καταλήγουμε στο ότι υπάρχει πολύ μεγάλη δυνατότητα να κατασκευάζονται σύνθετα υλικά τα οποία έχουν σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους, με την ικανότητα να μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στο υπό μελέτη σε κάθε περίπτωση σύστημα. (Τσούβαλης, 1998)

Μερικοί από τους παράγοντες που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών είναι :

- το μικρό βάρος,
- η υψηλή αντοχή,
- η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση,
- η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών,
- οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και
- το μικρό κόστος συντήρησης

Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, που όμως αντιμετωπίζονται βαθμιαία και όλο και πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής είναι :

- τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού,
- η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά,
- η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.)
- καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος

1.5. Τρόποι παραγωγής

Τα ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος των συνθέτων υλικών σε βιομηχανική παραγωγή. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των ερευνητών στα σύνθετα υλικά, αλλά και των σε βιομηχανικό επίπεδο κατασκευαστών, είναι η ίδια η κατασκευή των πολύτιμων αυτών υλικών από άποψη εφαρμογών και περιθωρίων κέρδους. Η βιομηχανία των συνθέτων υλικών δανείστηκε όπου αυτό ήταν δυνατόν, τις παραδοσιακές μεθόδους μορφοποίησης των μετάλλων και ανέπτυξε όπου έπρεπε νέες μεθόδους για την κατασκευή τους. (Κώστας Ε. Σαββάκης) Έτσι έχουμε για παράδειγμα τη μέθοδο μορφοποίησης εν θερμώ με πρέσσα (Compression Moulding) που ήταν γνωστή από τα μέταλλα, αλλά και την τεχνική της περιέλιξης των ινών (Filament winding). (Akshay C. Jadhav, 2019)

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη-διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

A. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

A1. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου

- i. Μορφοποίηση με απλή επαφή (contact moulding)
 - Επίστρωση με ψεκασμό (spray-up)
 - Επίστρωση με το χέρι (hand lay-up)
- ii. Μορφοποίηση με πίεση (compression moulding)
 - Μορφοποίηση με σάκο κενού (vacuum bag moulding)
 - Μορφοποίηση με σάκο πίεσης (pressure bag moulding)
 - Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave moulding)
 - Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)
 - Μέθοδος έγχυσης ρητίνης (resin transfer moulding, RTM)

Επίστρωση με ψεκασμό (spray-up)

Πλεξίδες νημάτων (rovings), κομμένες σε μήκος 25-50mm, ψεκάζονται ταυτόχρονα με ρητίνη, η οποία αναμιγνύεται με τον απαραίτητο σκληρυντή (hardener) και επιταχυντή (accelerator) στο πιστόλι ψεκασμού. Το μίγμα μορφοποιείται στην τελική του κατάσταση πιεζόμενο με ρολούς με το χέρι, δίνοντας ένα πολύστρωτο με περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες από 0,25 έως 0,3. Με την μέθοδο αυτή μειώνεται αρκετά η απαιτούμενη εργασία σε σχέση με την μέθοδο με το χέρι (αναλύεται παρακάτω), έχοντας σαν αποτέλεσμα μια ημι-αυτοματοποιημένη μέθοδο παραγωγής σε γραμμή, μεγάλου αριθμού μικρών και χαμηλών προδιαγραφών κατασκευών. Ο έλεγχος του πάχους είναι δύσκολος και η εν γένει ποιότητα κατασκευής είναι χαμηλότερη από την παρακάτω. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998)

Κατάλληλη επιλογή υλικών για τις ενισχυτικές ίνες : ίνες γυαλιού

Για τις ρητίνες : κυρίως πολυεστερικές

Επίστρωση με το χέρι (hand lay-up)

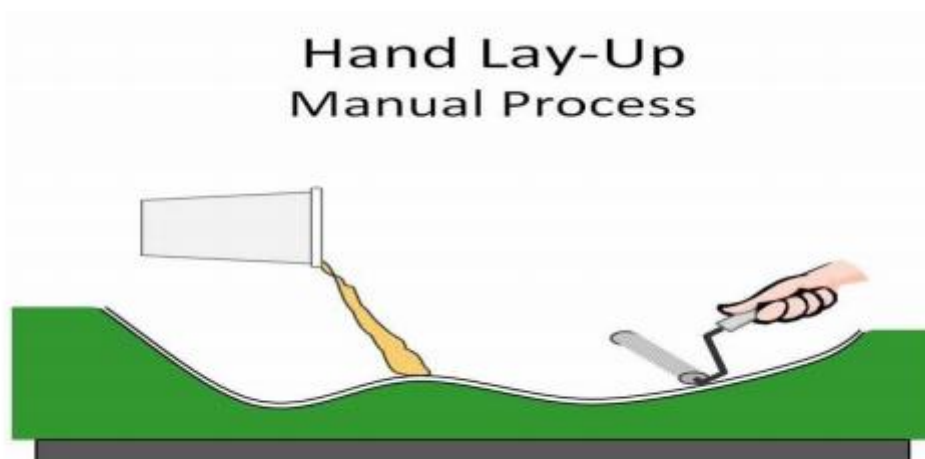
Αρχικά οι ίνες τοποθετούνται σε καλούπι, μετά αναμιγνύοντας την πολυμερική ρητίνη με τον κατάλληλο σκληρυντή και επιταχυντή, παρασκευάζεται το κατάλληλο μίγμα το οποίο αποτελεί και την μήτρα. Στην συνέχεια αυτό το μίγμα τοποθετείται επάνω στην ενίσχυση με επάλειψη, ψεκασμό ή απλή έγχυση. Αυτό συμβαίνει με τη βοήθεια ενός πινέλου ή πιστολιού ψεκασμού. Κάθε στρώση ενισχυτικών ινών, είτε σε μορφή κομμένης σε μικρά κομματάκια ίνας (chopped strand mat, CSM), είτε σε μορφή υφάσματος (woven roving, WR), ξετυλίγεται από ένα ρολό και απλώνεται επάνω στην υγρή ρητίνη, διαβρεχόμενο πλήρως από αυτήν με τη βοήθεια ενός ειδικού ρολού ή ενός πινέλου. Το τελικό πολύστρωτο έχει συνήθως περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες μεταξύ 0,25 και 0,35 στην περίπτωση του πιλήματος και μεταξύ 0,45 και 0,55 στην περίπτωση του υφάσματος. Στο τέλος πραγματοποιείται και ξήρανση. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998)

Είναι η πιο απλή και εύκολη μέθοδος παραγωγής σύνθετων αλλά συνάμα και αργή. Στα θετικά παρουσιάζονται το χαμηλό κόστος κατασκευής, ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι πολύ απλός, η παραγωγή πολύπλοκων αντικειμένων και σχεδιαστική ευελιξία αφού πραγματοποιείται σε καλούπια. Τα αρνητικά είναι κυρίως ότι, χρειάζεται πολύς χρόνος για

την παραγωγή αλλά και ότι η επαναληψιμότητα της κατασκευής είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί, εφόσον εμπλέκεται ο ανθρώπινος παράγοντας.

Οι κατάλληλες επιλογές υλικών όσον αφορά τις ενισχυτικές ίνες είναι κάθε είδους ίνες, αν και τα υφάσματα από αραμιδικές ίνες είναι δύσκολο να στεγνώσουν με το χέρι. Για τις ρητίνες, οι καταλληλότερες είναι οι πουεστερικές και οι βινυλεστερικές.

Τροχοπέδη στην τεχνική αυτή αποτέλεσαν οι κατασκευές μεγάλου βάρους και πάχους. Το πρόβλημα εντοπιζόταν στις ενισχύσεις οι οποίες διαβρέχονται και μορφοποιούνται δύσκολα με την ρητίνη. Η λύση επιτεύχθηκε με τη χρήση μιας αυτοποιημένης μεθόδου επίστρωσης με το χέρι, όπου οι ενισχύσεις προ-διαβρέχονται με την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης και επιστρώνονται σε συνεχείς λωρίδες επάνω στο καλούπι (pre-preg). Με τον τρόπο αυτόν επιτεύχθηκε αποτελεσματική διαβροχή ενισχύσεων με βάρος μέχρι και 4000g/m², με χαμηλό εργατικό κόστος. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998)



Εικόνα 1.5. Hand Lay-up way of production (Κώστας Ε. Σαββάκης)

Μορφοποίηση με πίεση (compression moulding)

Οι μέθοδοι μορφοποίησης με πίεση περιλαμβάνουν την άσκηση πίεσης, συνοδευόμενη και από θερμότητα, στην επιφάνεια του μη στερεοποιημένου ακόμη πολύστρωτου, με σκοπό την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες και τη μείωση των κενών αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την απομάκρυνση δια της πίεσης της περίσσειας ρητίνης και των κενών αέρα και στην περίπτωση που επιβάλλεται και θερμότητα, με την επιτάχυνση του πολυμερισμού και της σκλήρυνσης που οδηγεί στην ανάπτυξη της πλήρους αντοχής και δυσκαμψίας του υλικού. (Md Yusuf, 2018)

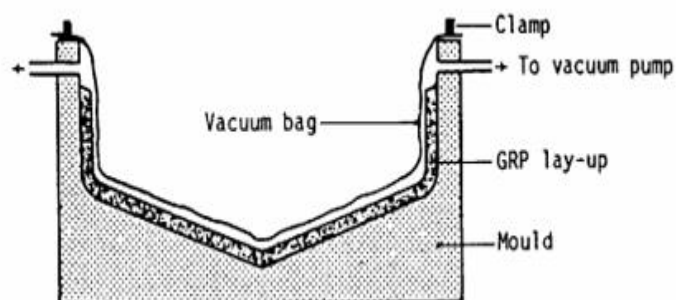
Μορφοποίηση με σάκο κενού (vacuum bag moulding)

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, τοποθετείται επάνω από το καλούπι και το μη στερεοποιημένο ακόμη πολύστρωτο ένα ελαστικό διάφραγμα (μεμβράνη, σάκος), στεγανοποιούνται αεροστεγώς τα άκρα και αναρροφάται ο αέρας από το χώρο κάτω από το διάφραγμα μέσω μιας αντλίας κενού. Η σκλήρυνση μπορεί να επιταχυνθεί τοποθετώντας το

καλούπι μαζί με το τυλιγμένο με το διάφραγμα τεμάχιο μέσα σε φούρνο ή με την χρήση θερμαινόμενου καλουπιού. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998)

Επιλογές υλικών για τις ίνες ενίσχυσης: οποιοσδήποτε.

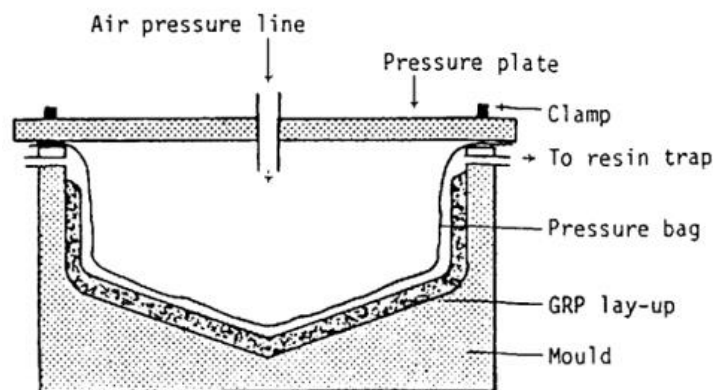
Για τις ρητίνες : κυρίως εποξικές ρητίνες, δεδομένου ότι οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές μπορεί να αντιμετωπίσουν πρόβλημα, λόγω της υπερβολικής εξαγωγής στυρενίου από την ρητίνη μέσω της αντλίας κενού.



Εικόνα 1.6. Μορφοποίηση με σάκο κενού

Μορφοποίηση με σάκο πίεσης (pressure bag moulding)

Η μέθοδος αυτή αποτελείται από την ίδια περίπου διάταξη με το vacuum bag moulding, εκτός από το ότι ο αέρας διοχετεύεται, δεν αναρροφάται, ανάμεσα στην μεμβράνη και την επίστρωση. Η πίεση του διοχετευόμενου αέρα κυμαίνεται μεταξύ 30 και 50 psi συνήθως. Η πίεση που ασκείται, σε συνδυασμό με την λεία επιφάνεια της μεμβράνης, οδηγεί σε πολύ καλή επιφάνεια επίστρωσης. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998)



Εικόνα 1.7. Μορφοποίηση με σάκο πίεσης.

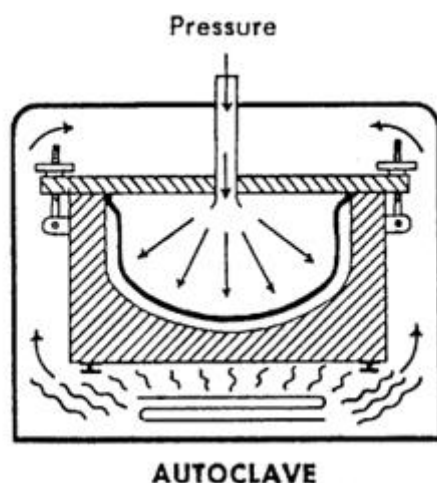
Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave moulding)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί παραλλαγή των μεθόδων μορφοποίησης με σάκο κενού και σάκο πίεσης. Με τη διαδικασία μορφοποίησης σε θερμαινόμενο θάλαμο παράγονται πυκνά, ελεύθερα κενών πολύστρωτα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων που ασκούνται. Οι θερμαινόμενοι θάλαμοι πίεσης (autoclaves) ουσιαστικά είναι θάλαμοι άσκησης πίεσης και θερμοκρασίας, οι οποίοι διαθέτουν συστήματα αερίων χαμηλής πίεσης. (Μαρκόπουλος

Άγγελος) Οι πιέσεις που ασκούνται κυμαίνονται από 50 έως 100 psi και ο χρόνος που απαιτείται για τη σκλήρυνση είναι αρκετές ώρες.

Η χύτευση σε θάλαμο πίεσης κλιβάνου χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Αρχικά, τοποθετείται το καλούπι μέσα στον κλίβανο και με την απαραίτητη θερμοκρασία και πίεση που αναπτύσσεται πραγματοποιείται η κατεργασία. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το μέγεθος των αντικειμένων κατεργασίας είναι μικρότερο αλλά ευέλικτο στον σχεδιασμό.

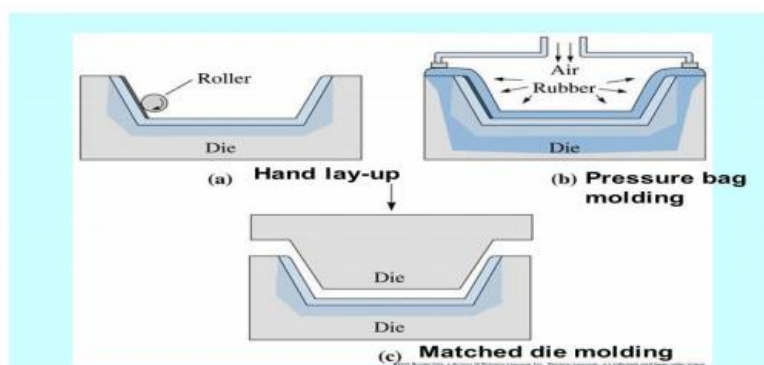
Επιλογές υλικών για ενισχυτικές ίνες : οποιεσδήποτε. Για ρητίνες : εποξικές ρητίνες



Εικόνα 1.8. Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης

Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

Σε περιπτώσεις που απαιτούνται κατασκευές με απόλυτα καθορισμένη γεωμετρία και λείες και ομαλές επιφάνειες παντού, ενδείκνυται η χρήση δύο καλουπιών, ενός αρσενικού και ενός θηλυκού. Κατά αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται ένα ζευγάρι καλουπιών (διμερές καλούπι), όπου το μη στερεοποιημένο σύνθετο υλικό συμπιέζεται μεταξύ τους με ταυτόχρονη επιβολή θερμότητας, εάν απαιτείται. Έτσι επιτυγχάνεται πολύ καλή ποιότητα, το κόστος όμως την κατασκευής των καλουπιών, που είναι συνήθως μεταλλικά, είναι πολύ υψηλό. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998) (Μαρκόπουλος Άγγελος)



Εικόνα 1.9. Χύτευση σε διαιρετό καλούπι

Μέθοδος έγχυσης ρητίνης (resin transfer moulding, RTM)

Σε αυτήν την μέθοδο αρχικά τοποθετούνται στο ανοιχτό καλούπι οι ενισχυτικές ίνες ξηρές. Αφού κλείσει το καλούπι, η ρητίνη εγχύεται από το κανάλι έκχυσης και ρέει ανάμεσα από τις ενισχυτικές ίνες προς το κανάλι διαφυγής. Καθώς οι ενισχυτικές ίνες ανθίστανται στη ροή αυτή, χρειάζεται μια δύναμη για την διατήρησή της. Η δύναμη αυτή είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης του ρευστού στο κανάλι έκχυσης και της πίεσης του αέρα μέσα στο καλούπι.

Για να προληφθεί η είσοδος αέρα μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, μεταξύ των δύο τμημάτων του καλουπιού διαμορφώνεται ένα περιφερειακό κανάλι, που ονομάζεται στεγανοποιητική στεφάνη (closing rim). Μέσα στο κανάλι αυτό διατηρείται πάντα πίεση αέρα μικρότερη από εκείνη της κοιλότητας του καλουπιού, εμποδίζοντας έτσι τη διαρροή αέρα προς το καλούπι. Επιπρόσθετα, το κενό αυτό μεταξύ των δύο τμημάτων του καλουπιού το πιέζει μεταξύ τους. (Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, 1998)

Επιλογές υλικών για ενισχυτικές ίνες : οποιεσδήποτε . Για ρητίνες : οποιεσδήποτε

A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου

- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εξόλκευση ή εμβάπτιση ή έλξη (pultrusion)

Περιέλιξη νήματος (filament winding)

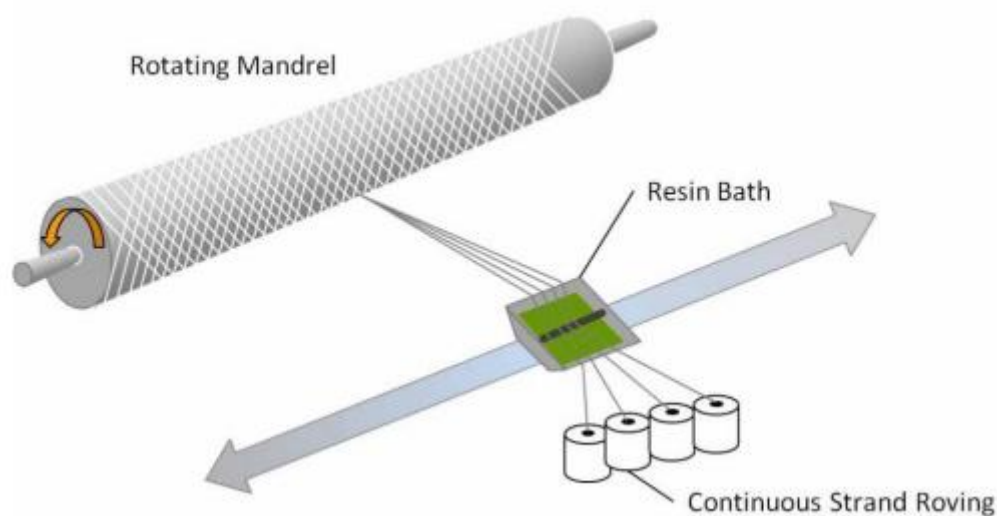
Με την μέθοδο αυτή δημιουργούνται κοίλες δομές με μεγάλη αντοχή. Με συνεχής πλεκτές υφάνσεις από πολλαπλές στρώσεις ινών γυαλιού οι οποίες στην συνέχεια εμβαπτίζονται σε μια μήτρα ρητίνης. Η διαδικασία αυτή, οδηγεί σε προϊόντα κατάλληλα για δοχεία πίεσης, στην αεροδιαστημική, μπαστούνια του γκολφ, στρατιωτικό εξοπλισμό και εκατοντάδες άλλες χρήσεις. Όταν η δύναμη είναι απαραίτητη σε χαμηλό βάρος, τότε η μέθοδος της περιέλιξης νήματος είναι η κατάλληλη.

Η κατασκευή πραγματοποιείται τυλίγοντας ενισχυτικές ίνες γύρω από ένα αξονικό καλούπι (madrel), το οποίο καθορίζει την εσωτερική γεωμετρία. Οι ίνες είναι σε μορφή συνεχών πλεξίδων νήματος (rovings), οι οποίες συχνά τυλίγονται πολλές μαζί δημιουργώντας μια ζώνη (λωρίδα) ινών και, είτε διαποτίζονται με ρητίνη αμέσως πριν τυλιχτούν στο καλούπι (wet-winding), είτε είναι προεμποτισμένες με μερικώς στερεοποιημένη ρητίνη (dry-winding). Η περιέλιξη μπορεί να είναι ελικοειδής, όπου το αξονικό καλούπι περιστρέφεται συνεχώς, ενώ ο βραχίονας τροφοδοσίας των ινών πηγαиноέρχεται εμπρός και πίσω με συγκεκριμένες ταχύτητες, συγχρονισμένες με την περιστροφή του καλουπιού, έτσι ώστε να έχουμε τις απαιτούμενες γωνίες περιέλιξης των ινών, ή μπορεί να είναι πολική, όπου ο βραχίονας τροφοδοσίας των ινών περιστρέφεται γύρω από ένα ακίνητο καλούπι. Η σκλήρυνση λαμβάνει χώρα επάνω στο καλούπι ή μέσα σε φούρνο εάν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Τα αξονικά καλούπια πρέπει να αντέχουν τα θλιπτικά φορτία από την τάση της περιέλιξης, καθώς και τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την

σκλήρυνση. Είναι συνήθως χαλύβδινα και για την εύκολη αποκόλλησή τους, έχουν μια μικρή κωνικότητα ή είναι διαιρετά. (Mohammad Sahami poor dehghan, 2020)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς παραγωγής και ότι οδηγεί σε προϊόντα πολύ υψηλής ποιότητας λόγω του ελέγχου τοποθέτησης των ινών. Η δυσκολία περιέλιξης επιφανειών με ανάποδη καμπυλότητα αποτελεί μειονέκτημα, όπως επίσης και η δυσκολία περιέλιξης σε μικρές γωνίες (παράλληλα με τον άξονα περιστροφής), και η όχι πολύ καλή ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας. (Filippo Valorosi, 2020)

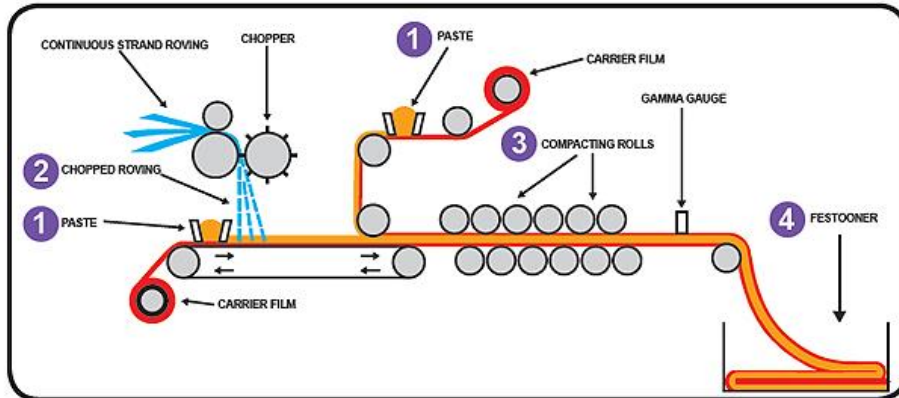
Επιλογές υλικών για ενισχυτικές ίνες : οποιεσδήποτε, για ρητίνες : οποιεσδήποτε



Εικόνα 1.10. Περιέλιξη νήματος. (Κώστας Ε. Σαββάκης)

Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)

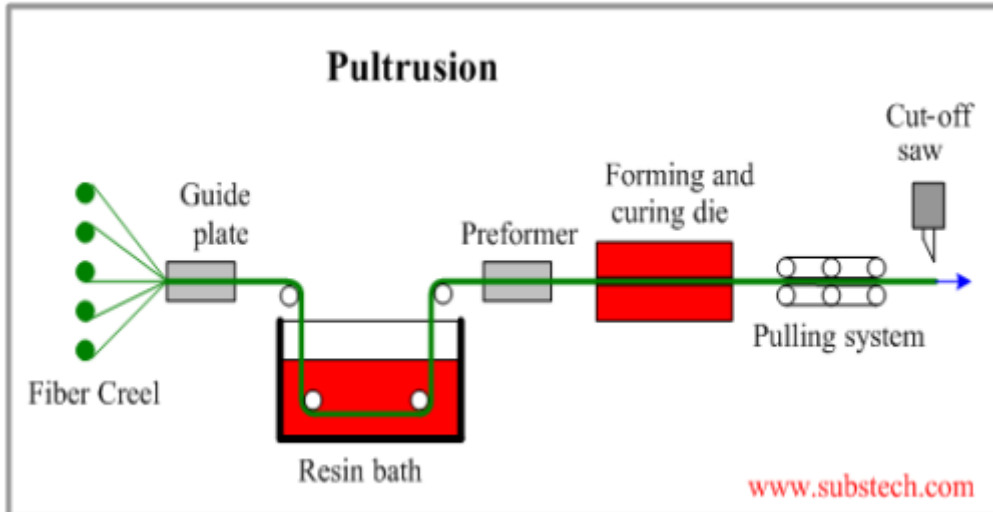
Πιο νέα τεχνική με μεγάλη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Παράγονται μεγάλα αντικείμενα με υψηλή ομοιογένεια στις μηχανικές ιδιότητες. Ίνες γυαλιού τεμαχίζονται (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε ρητίνη πάνω σε υμένιο πολυαιθυλενίου. Δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται πάνω από το πρώτο και έτσι έχουμε ένα σύνθετο με ίνες γυαλιού. Μετά το πέρας της περιόδου ωρίμανσης, το έλασμα κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό καλούπι. Με εφαρμογή υδραυλικής πίεσης, μορφοποιείται στο τελικό προϊόν. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται με συμπίεση ή με έγχυση σε καλούπι για την παραγωγή αμαξωμάτων (σασί) ή δομικών εξαρτημάτων αυτοκινήτων, καθώς και για περιβλήματα μηχανής. Βέβαια πραγματοποιείται και για άλλες εφαρμογές όπως σε είδη υγιεινής, καθίσματα, στάδια. (Χρήστος, Σύρος 2012)



Εικόνα 1.11. SMC Manufacturing process. (Κώστας Ε. Σαββάκης)

Μορφοποίηση με εμφύπτιση (pultrusion)

Αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους κατασκευής μορφοδοκών σταθερής διατομής από σύνθετα υλικά. Με την χρήση καταλλήλων καλουπιών μπορούν να παραχθούν μορφοδοκοί πολλών διατομών ή ακόμη και σωλήνες. Αυτές οι μορφοδοκοί έχουν συνήθως πολύ υψηλή αντοχή και ακαμψία στη διεύθυνση του μήκους τους και περιεκτικότητα κατ' όγκο σε ίνες από 60 έως 65%. Η δυναμική τους για όλο και περισσότερες χρήσεις είναι εμφανής αφού μπορούν να συνδυάσουν τα τυποποιημένα μεγέθη των χαλύβδινων μορφοδοκών με όλα τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών. (Nickels, 2019)



Εικόνα 1.12. Μορφοποίηση με εμφύπτιση. (Κώστας Ε. Σαββάκης)

Β. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας

- Συνδιέλαση (co-extrusion)
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
- Συμπύεση σε στερεή κατάσταση

- Απόθεση υλικού μήτρας (Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση.)

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

1.6.Χρήσεις και Εφαρμογές

Τα σύνθετα υλικά και ειδικότερα τα ινώδη σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας, βρίσκουν συνεχώς όλο και περισσότερες εφαρμογές , καθώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας καθίστανται όλο και πιο ελκυστική εναλλακτική λύση σε πολλές εφαρμογές, λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους. Αυτοκινητοβιομηχανία, αεροσκάφη, ποδήλατα, διαστημόπλοια, σκάφη αναψυχής, παραγωγή αντιδιαβρωτικών, ιατρική, κατασκευή τεχνικών έργων, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αθλητικά είδη είναι μερικά από τα πεδία εφαρμογών των σύνθετων υλικών.

Επίσης, τα σύνθετα υλικά παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία σε πολλούς τομείς όπως στον σχεδιασμό, και στην μείωση του βάρους της κατασκευής. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό μεμονωμένων εξαρτημάτων μπορεί να εξοικονομηθεί περίπου 20-30% το βάρος κατασκευής σε σχέση με κάποιο άλλο συμβατικό υλικό. (Filippo Valorosi, 2020)

Αυτοκινητοβιομηχανία

Τα σύνθετα υλικά είναι μελετημένα ώστε να κάνουν τα οχήματα, ελαφρύτερα και πιο ασφαλή και αποδοτικά. Η οικονομία καυσίμων στα αυτοκίνητα θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 60% λόγω της μείωσης του βάρους του, σύμφωνα με το εθνικό εργαστήριο του Oak Ridge.

Συγκεκριμένα, χρήση των σύνθετων υλικών γίνεται σε προφυλακτήρες, κατασκευή καμπινών σε φορτηγά, αεροτομές κ.α. Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε την κατασκευή σκελετού αυτοκινήτου (σασί) από σύνθετο με ίνες άνθρακα (CFRP). Τα αποτελέσματα είναι εκπληκτικά σε σχέση με το βάρος του οχήματος, καθώς το σασί αυτού του τύπου οχήματος ζυγίζει κανονικά 1195 kg. Εφόσον, οι ίνες άνθρακα μπορεί να ζυγίζουν 40% λιγότερο από το αλουμίνιο και έως 60% λιγότερο από το ατσάλι, η μείωση του βάρους είναι πολύ υψηλή.



Εικόνα 1.13. Σκελετός αυτοκινήτου τύπου BMW i3 με ίνες άνθρακα.

Τέλος, πρωτοπόρος τομέας στη χρήση σύνθετων υλικών είναι ο μηχανοκίνητος Αθλητισμός (Formula 1). Το αμάξωμα και οι αεροτομές, κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα (CFRP), για την ελάφρυνση του οχήματος αλλά και για την αντοχή στις υψηλές φορτίσεις που δέχονται την ώρα του φρεναρίσματος ή την ώρα που παίρνει μια στροφή με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό είναι λογικό, αφού τα σύνθετα υλικά απορροφούν περισσότερη ενέργεια/kg κατά την κρούση από ότι τα μέταλλα. Οι οδηγοί φορούν κράνη και στολές που είναι ενισχυμένα με ίνες Kevlar και τους προστατεύουν από πιθανή σύγκρουση καθώς και από φωτιά.

Ναυπηγική

Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου τα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics) έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά. Πλέον, τα παραδοσιακά υλικά όπως το ξύλο, έχουν αντικατασταθεί με ινώδη σύνθετα υλικά καθώς έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στην διάβρωση. Η χαμηλή πυκνότητα, η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια, είναι οι παράμετροι που οδήγησαν στην ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών κατασκευής σκαφών αναψυχής. Επίσης, η μείωση του κόστους των επισκευών οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον ευρύτερο τομέα της ναυπηγικής. Ακόμη σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά επιθέματα για ενισχύσεις τμημάτων χαλύβδινων ναυπηγικών κατασκευών.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον στρέφεται στο κατά πόσο όλο και μεγαλύτερα μέρη πλοίων θα αντικαθίστανται από σύνθετα, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να εξετασθούν, όπως η αντίσταση στη διάβρωση από την επίδραση του θαλασσινού νερού, η συμπεριφορά σε σύνθετες καταπονήσεις και κρουστικά φορτία, αλλά και γενικότερα η σταθερότητα των ιδιοτήτων των κατασκευών σε βάθος χρόνου, καθώς παράγοντες όπως η υγροθερμική κόπωση, υποβαθμίζουν τις ιδιότητες των συνθέτων.



Εικόνα 1.14. Χύτευση σε καλούπι για κατασκευή σκάφους.

Αεροναυπηγική

Η χρήση ελαφρών κατασκευαστικών υλικών στην αεροδιαστημική σημαίνει, είτε αύξηση του ωφέλιμου φορτίου, είτε μείωση του κόστους λειτουργίας για την μεταφορά του ίδιου ωφέλιμου φορτίου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα οικονομικού οφέλους από την χρήση των ελαφρών συνθέτων υλικών είναι η περίπτωση χρήσης των υλικών αυτών στην τεχνολογία κατασκευής των διαστημοπλοίων όπου το κόστος της εκτόξευσης μπορεί πολλές φορές να ξεπερνά το κόστος του σχεδιασμού και της κατασκευής του διαστημοπλοίου. Έτσι, πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και Kevlar συχνά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βασικών τμημάτων διαστημοπλοίων.

Στην πολεμική αεροπορία, τα σύνθετα υλικά εξασφαλίζουν καλύτερη απόδοση των αεροσκαφών και ένας αριθμός προγραμμάτων σχεδιασμού και κατασκευής αεροσκαφών από σύνθετα βρίσκεται σε εξέλιξη. Για παράδειγμα, περίπου το 35% του συνολικού βάρους του μαχητικού αεροσκάφους European Fighter Aircraft (EFA) είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά.



Εικόνα 1.15. European Fighter Aircraft (EFA) φτιαγμένο με CFRP

Στα εμπορικά αεροσκάφη τα σύνθετα υλικά έχουν από πολύ καιρό χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τμημάτων του εσωτερικού χώρου, όπως δάπεδα χώρων αποθήκευσης, εμπορευμάτων, είδη επίπλων, ντουλάπια αποσκευών, κλπ.

Σε μικρότερη κλίμακα ένας αριθμός ελαφρών αεροσκαφών και ανεμόπτερων (gliders) είναι κατασκευασμένα από GFRP ενώ εδώ και πολλά χρόνια γίνεται προσπάθεια να κατασκευαστούν ελαφρά αεροσκάφη της κατηγορίας jet εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά.

Στα ελικόπτερα, η κατασκευή των φτερών τους από σύνθετα υλικά, τους αυξάνει κατά πολύ τον χρόνο ζωής και την ταχύτητα πτήσης του ελικοπτερου. Απόδειξη αυτού είναι το παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας που πέτυχε το ελικόπτερο Westland Lynx του οποίου τα φτερά είναι κατασκευασμένα εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά.



Εικόνα 1.16. Ελικόπτερο Westland Lynx με φτερά από σύνθετο υλικό.

Οι σύνθετες κατασκευές επίσης οδηγούν σε λείες επιφάνειες με μειωμένες τριβές, λόγος που βοηθάει και για καλύτερη αεροδυναμική.

Γενικά, τα αναβαθμισμένα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε μαχητικά αεροσκάφη για κατασκευή οριζόντιων και κάθετων σταθεροποιητών, πτερύγια αεροπλάνων, προστατευτικά φτερών, και ποικιλία επιφανειών ελέγχου. Οι απώλειες βάρους είναι της τάξης του 20% , άρα και η εξοικονόμηση καυσίμων μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 33%. Έτσι, τα μαχητικά αεροσκάφη φτάνουν στα επιθυμητά όρια ταχύτητας.

Αεροδιαστημική

Λόγω του τεράστιου κόστους ανά μονάδα βάρους για την τοποθέτηση ενός αντικειμένου στο διάστημα, η αξία της εξοικονόμησης βάρους έχει μεγαλύτερη αξία στην αεροδιαστημική. Έτσι, τα σύνθετα υλικά είναι άκρως ελκυστικά για διαστημικές εφαρμογές.

Τέλος, χρήση σύνθετων υλικών γίνεται ακόμα και για παραγωγή πυραύλων, βλημάτων, κινητήρες αεροσκαφών, δορυφορικές εφαρμογές. (Smits, 2016)

Ιατρική

Ο τομέας της ιατρικής είναι ίσως και ο σημαντικότερος τομέας εφαρμογής των σύνθετων υλικών. Η κατασκευή υλικών που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον άνθρωπο αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους επιστήμονες. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε η επιστήμη των βιοϋλικών.

Με την ανάπτυξη των πολυμερών καθώς και την ανάπτυξη των σύνθετων υλικών έχουμε και την ανάπτυξη των βιοϋλικών. Έτσι έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται τεχνητοί σύνδεσμοι,

αρθρώσεις, βηματοδότες, καρδιακές βαλβίδες, ακόμα και τεχνητές καρδιές αλλά και τεχνητό δέρμα. Στην οδοντιατρική, νέες κονίες, όπως οι υαλοιονομερείς αποτελούνται από σύνθετα κοκκώδη υλικά.

Επίσης, τα σύνθετα υλικά είναι κατάλληλα για ιατρικό εξοπλισμό, λόγω του ότι μπορούν με την διαδικασία της χύτευσης στα κατάλληλα καλούπια, να πάρουν ό,τι σχήμα χρειαστεί είτε για λόγους αισθητικής, είτε για λόγους χρησιμότητας.



Εικόνα 1.14. Τεχνητό μέλος προσθετικής (πόδι) από διάφορα σύνθετα υλικά.

Αθλητικά είδη

Οι εμπειρίες και οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από την εφαρμογή των συνθέτων υλικών στην αεροδιαστημική μεταφέρθηκαν στην βιομηχανία αθλητικών ειδών. Έτσι, σύνθετα υλικά τύπου sandwich χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή σκαφών αναψυχής, με αποτέλεσμα την μείωση του βάρους τους και την ταυτόχρονη βελτίωση της συμπεριφοράς τους και αύξηση της ταχύτητάς τους.

Για τους ίδιους λόγους, σύνθετα υλικά CFRP σε συνδυασμό με κατασκευές τύπου sandwich χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή αγωνιστικών αυτοκινήτων, επίσης τα CFRP χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δισκοφρένων έτσι ώστε να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το φρενάρισμα.

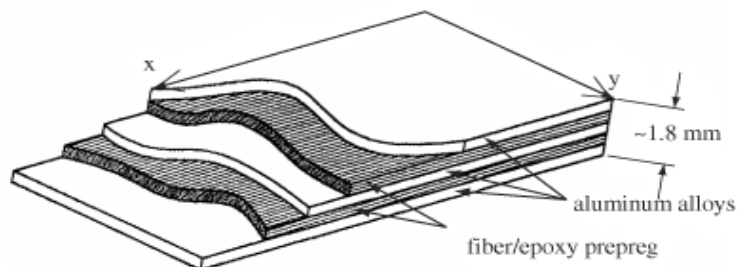
Στη συνέχεια, η χρήση των σύνθετων υλικών επεκτάθηκε στην κατασκευή αθλητικών ειδών όπως είναι τα πέδιλα σκι, τα μπαστούνια του golf, οι ρακέτες του τένις, τα καλάμια ψαρέματος, τα πλαίσια των ποδηλάτων και άλλα. (Filippo Valorosi, 2020)



Εικόνα 1.17. Διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές των σύνθετων υλικών.

1.7.Υβριδικά Σύνθετα Υλικά

Μια κατηγορία νέων σχετικά υλικών είναι αυτή των σύνθετων υβριδικών. Η ονομασία δικαιολογείται, καθώς έχουμε τη συνένωση δύο ή και παραπάνω διαφορετικών υλικών. Πέρα λοιπόν από το σύνθετο (μήτρα και ενίσχυση) συγκολλάται ένα τρίτο υλικό όπως π.χ το μέταλλο. Έτσι, το τελικό προϊόν συνδυάζει τις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα και των τριών υλικών από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 1.18. Υβριδικό σύνθετο υλικό εποξειδικής ρητίνης – ίνας άνθρακα - αλουμινίου

Τα υβριδικά σύνθετα υλικά σιγά σιγά καθίστανται αναγκαία. Κλάδοι όπως αυτοί της αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου τα κριτήρια στα υλικά σχεδίασης νέων προϊόντων είναι ιδιαίτερα υψηλά για λόγους ασφαλείας, αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες έρευνας και ανάπτυξης σε νέα κατασκευαστικά υλικά. Κύρια, λοιπόν, τάση σήμερα, αποτελεί η χρήση των ήδη ανεπτυγμένων υλικών σε διαφορετικούς συνδυασμούς μεταξύ τους, για την εκμετάλλευση των ειδικών ιδιοτήτων τους χωρίς να υπάρχει οποιοσδήποτε συμβιβασμός ως προς τη δομική ακεραιότητα της τελικής κατασκευής. (Mahdi Damghani, 2019)

Ελαττώματα σε δομικό επίπεδο ενός σύνθετου υλικού, όπως η ύπαρξη χαμηλών επιδόσεων σε διατμητικές τάσεις, στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων, καθώς και η χαμηλή δυσθραυστότητα, βελτιώνονται από την ενίσχυση κατά την διεύθυνση του πάχους του συνθέτου, με υλικά στη νάνο κλίμακα. Η μορφή αυτή ενίσχυσης ουσιαστικά ενεργοποιεί ένα μηχανισμό γεφύρωσης των μικρορωγμών, αυξάνοντας με αυτό το τρόπο την δυσθραυστότητα του τελικού προϊόντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μεταλλικοί Αφροί

2.1.Γενικά

Από την κατηγορία των μεταλλικών υλικών, ύστερα από συγκεκριμένες μεθόδους παραγωγής που θα διευκρινιστούν παρακάτω, είναι δυνατή η παραγωγή μεταλλικών αφρών.

Οι μεταλλικοί αφροί είναι ελαφρύτεροι από τα απλά μέταλλα, με μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια (άρα και πορώδες) και έχουν εξαιρετικές απορροφητικές ιδιότητες ενέργειας και ήχου. Με τον όρο «μεταλλικός αφρός» νοείται ένας στερεός αφρός από μέταλλο, ο οποίος είναι υποκατηγορία της ευρύτερης οικογένειας των πορωδών υλικών. Οι μεταλλικοί αφροί είναι κυψελοειδή σύνθετα υλικά που αποτελούνται από αέρα και ένα μέταλλο, με το μέταλλο να αποτελεί την μήτρα του συνθέτου. Διακρίνονται σε αφρούς με ανοιχτό και με κλειστό πορώδες. Γενικά οι μεταλλικοί αφροί είναι εμπνευσμένοι από τη φύση, αφού το ξύλο, τα κόκκαλα και τα σφουγγάρια της θάλασσας έχουν παρόμοια δομή. (García-Moreno, 2016)

Οι στερεοί μεταλλικοί αφροί συνδυάζουν μηχανικές και φυσικές ιδιότητες οι οποίες τους καθιστούν περιζήτητους. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιούνται ως πυρήνας σε πολυστρωματικά υλικά (sandwich), προσδίδουν μεγάλη σκληρότητα και ακαμψία σε συνδυασμό με ελαφρύ βάρος. Επίσης, μπορούν να υποστούν μεγάλες καταπονήσεις και παραμορφώσεις με σχεδόν σταθερή πίεση και γι' αυτό γίνεται χρήση τους σε συσκευές απορρόφησης ενέργειας. (Banhart, 2005)

2.2.Ορισμός

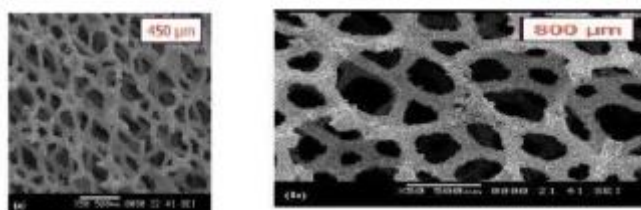
Μια υποκατηγορία των αφρωδών υλικών αποτελούν οι μεταλλικοί αφροί. Η διάκρισή τους γίνεται ανάλογα με το υλικό που αποτελούνται. Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία γίνεται λόγος κυρίως για αφρούς αλουμινίου.

Κύρια χαρακτηριστικά τους όπως αναφέρθηκαν παραπάνω είναι η πολύ μικρή πυκνότητα άρα και βάρος τους, που οφείλεται στο πορώδες. Επίσης, είναι άφλεκτοι και έχουν υψηλές ικανότητες απορρόφησης ενέργειας και ήχου (ΜΑΡΝΑΣ, 2016).

2.3.Κατηγορίες

Μεταλλικοί αφροί ανοιχτού πορώδους

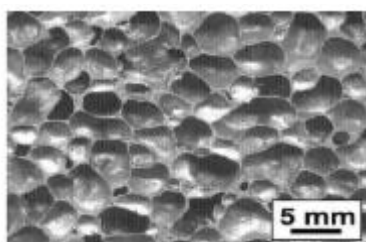
Ο αφρός ανοιχτού πορώδους αποτελείται από ακμές δίχως έδρες κι έτσι δημιουργείται ένα πορώδες σαν του σφουγγαριού. Επομένως ένα ρευστό που έχει το απαιτούμενο χαμηλό ιξώδες μπορεί να το διαπεράσει όπως το νερό στο σφουγγάρι. Τέτοιοι αφροί χρησιμοποιούνται στο φιλτράρισμα αέρα ή ρευστών, στην ηχομόνωση ή ακόμη και ως εναλλάκτες για απαγωγή θερμικών φορτίων.



Εικόνα 2.1. Μεταλλικός αφρός ανοιχτού πορώδους με μέγεθος 450 μm (αριστερά) και 800 μm (δεξιά) (Λουρίδας 2019)

Μεταλλικοί αφροί κλειστού πορώδους

Τα κελιά των πόρων διαχωρίζονται και με ακμές αλλά και με κλειστές έδρες κι έτσι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτοί η αφροί βρίσκουν χρήση στην ηχομόνωση, απορρόφηση ενέργειας κραδασμού-σύγκρουσης και απορρόφηση θερμικής ενέργειας.



Εικόνα 2.2. Μεταλλικός αφρός κλειστού πορώδους 5 μm (τομή) (Λουρίδας 2019)

Μεταλλικοί δισδιάστατοι αφροί (honey combs)

Σε αυτήν την περίπτωση οι αφροί έχουν τη μορφή κυψελίδας, δηλαδή αποτελούνται από πολλές δισδιάστατες κυψελίδες που έχουν εξωθηθεί ως προς την τρίτη διάσταση. Ένας τρόπος κατασκευής του είναι η επικόλληση πολλών επίπεδων φύλλων ενός πρεσαρισμένου υλικού ώστε να αποκτήσει σχήμα κυψέλης.



Εικόνα 2.3. Honey combs (Λουρίδας 2019)

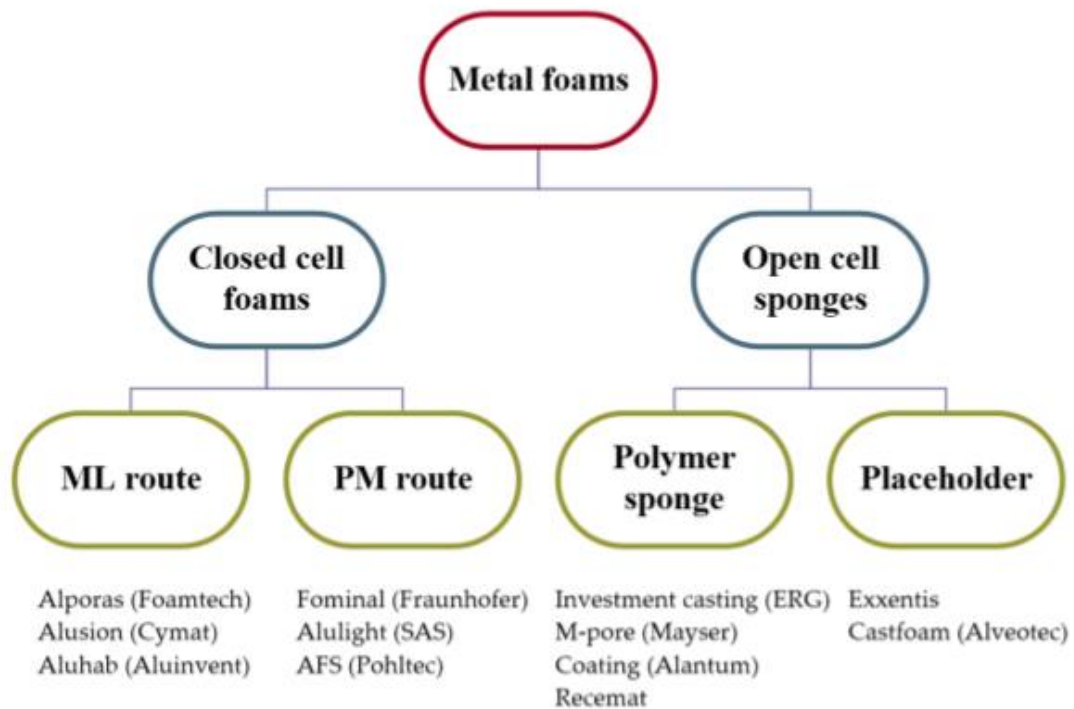
2.4. Τρόποι παραγωγής

Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής μεταλλικών αφρών και πορώδων υλικών. Εδώ αναφέρονται οι πιο σχετικοί με το εμπόριο και βιομηχανικοί τρόποι παραγωγής.

Για τους αφρούς κλειστού πορώδους, χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες τον άμεσο τρόπο ή αλλιώς (ML) melt route και τον έμμεσο (PM) powder route.

Όσον αφορά τους αφρούς ανοιχτού πορώδους, προφανώς δεν μπορούν να αφροποιηθούν αφού θα υπάρξει διαρροή αερίου. (Kim & Lee, 2014) Υπάρχουν λοιπόν μερικοί τρόποι παραγωγής τους που διαχωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες : της δομής των πολυμερικών σφουγγαριών (polymer sponge) και του υποκαταστάτη (placeholder) που μπορεί να αφαιρεθεί.

Παρακάτω ακολουθεί σχεδιάγραμμα που περιέχει και τις βιομηχανικές ονομασίες των διάφορων αφρών.



Εικόνα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση των πιο εμπορικών μεθόδων παραγωγής αφρού και κάποια ενδεικτικά ονόματα από εταιρίες. SAS : Slovak Academy of Sciences, AFS : aluminum foam sandwich, ML : melt, PM : powder metallurgical.

Melt Metallurgical Route

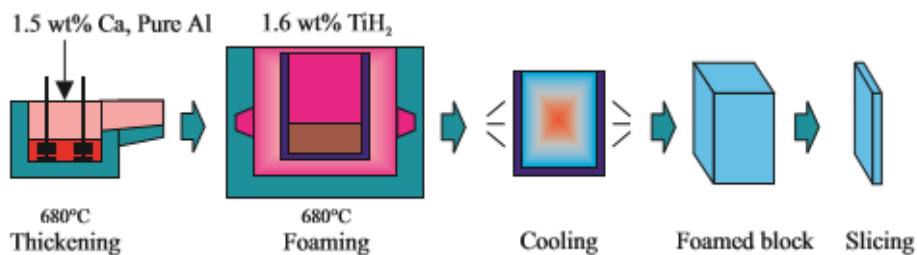
Στις αρχές του 1980 ο Shinko Wire, από το Amagasaki στην Ιαπωνία πέτυχαν την πρώτη εμπορική παραγωγή μεταλλικών αφρών.

Σε αυτήν τη διαδικασία, αρχικά προστίθεται ασβέστιο (Ca) σε λιωμένο αλουμίνιο. Πραγματοποιείται ανάδευσή τους, σε υψηλή θερμοκρασία (600°C), ώστε να παραχθούν οξειδία και να αποκτήσει υψηλό ιξώδες. Έπειτα προστίθεται σκόνη αφροποιητικού παράγοντα (blowing agent), δηλαδή υδρίδιο του τιτανίου (TiH₂). Με ταυτόχρονη ανάδευση το TiH₂ διασπάται σε αέριο υδρογόνο και τιτάνιο, με σκοπό να δημιουργηθούν φυσαλίδες. Το τήγμα αρχίζει να αφροποιείται μέσα στο καλούπι ή στο χωνευτήριο. Εν τέλει, όταν κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου τεμαχίζεται σε δοκίμια επιθυμητού πάχους. (Banhart J., 2018)

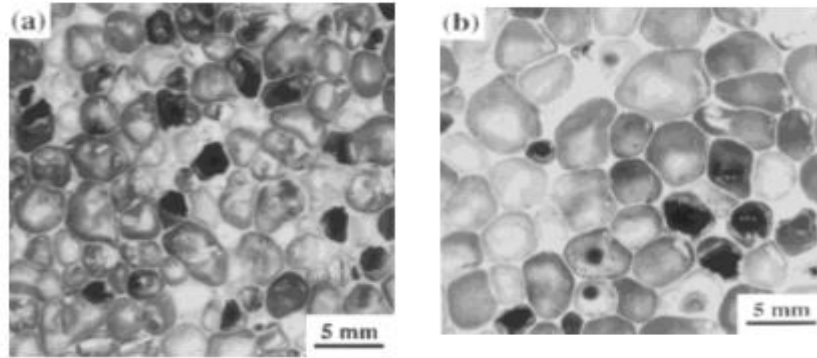
Αυτός ο τύπος μεταλλικών αφρών και η διαδικασία παραγωγής τους ονομάζεται Alporas, η οποία κατοχυρώθηκε ως πατέντα το 1987 στις Η.Π.Α (Akiyama, και συν., 1987). Η πατέντα αυτή έληξε και η μέθοδος χρησιμοποιείται με επιτυχία από άλλες εταιρίες και ερευνητικά κέντρα π.χ από την Foamtech (Daegu, Korea) (Foamtech) και τη Shanxi Putai Aluminum Foam Manufacturing (Linfen, China) (Putai.)

Μία άλλη προσέγγιση για άμεσο τρόπο παραγωγής αφρού αλουμινίου είναι αυτή του Alcan International Limited στο Montreal (QC, Canada) στις αρχές του 1990 από τον and Norsk Hydro (Oslo, Norway). Κατά αυτήν τη διαδικασία το τήγμα προετοιμάζεται και αναμιγνύεται με κεραμικά σωματίδια π.χ καρβίδια του πυριτίου (SiC) ή οξειδία του αλουμινίου (Al₂O₃). Αυτά αυξάνουν το ιξώδες και σταθεροποιούν τα τοιχώματα του υγρού τήγματος. Στη συνέχεια εγχύονται φυσαλίδες αέρα που διασκορπίζονται στο τήγμα με συνεχόμενη ανάδευση. Οι φυσαλίδες ανεβαίνουν προς τα πάνω, όπου σχηματίζουν έναν υγρό αφρό, ο οποίος εν τέλει στερεοποιείται όταν βγεί το τήγμα από τον κλίβανο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σήμερα από τη by Cymat (Mississauga, ON, Canada).

Η Aluivent (Miskolc, Hungary), ανέπτυξε πρόσφατα μια τεχνική για να μειώσει το μέγεθος των πόρων και να βελτιώσει την κατανομή των πόρων, χρησιμοποιώντας ταλαντώσεις υπερήχων κατά τη διάρκεια της αφροποίησης. (Babcsan, Beke, & Makk, 2010)



Εικόνα 2.5. Τρόπος παραγωγής Alporas – process



Εικόνα 2.6. Δομή πορώδους Alporas (a) μικρότερου μεγέθους (b) τυπικού μεγέθους (ByTetsuji Miyoshi, 2017)

Powder Metallurgical Route

Για τον έμμεσο τρόπο παραγωγής αφρού, το 1950, ο Allen και οι συνεργάτες του πατένταραν μια μέθοδο παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα. (Allen, Mote, & Sabroff, 1963.) Αυτή η μέθοδος αποτελείται από έμμεση αφροποίηση των στερεών πρόδρομων ουσιών με θέρμανση. Η πρόδρομη ουσία παράγεται αναμιγνύοντας σκόνη αλουμινίου με τα ανάλογα στοιχεία κράματος και έναν αφροποιητικό παράγοντα (TiH_2), 0,5 έως 1.0 wt%. Αφού είναι έτοιμο το μείγμα σκόνης, σταθεροποιείται και συντήκεται με εξώθηση, μονοαξονική συμπύκνωση ή κύλιση για να αποδώσει μία αφροποιημένη πρόδρομη ένωση. Με τη θέρμανση η μήτρα αρχίζει να λιώνει και ξεκινά η πυρήνωση του αερίου από τον αφροποιητικό παράγοντα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται και η παραγωγή υδρογόνου. Έτσι το αέριο διαχέεται στους πυρήνες των πόρων και αυτοί μεγαλώνουν σαν μεγάλες φυσαλίδες διογκώνοντας τον αφρό. Τα υπολειπόμενα οξειδία στον μεταλλικό αφρό (0,5 -1%), παρέχουν τη σταθερότητα του αφρού κατά την υγρή κατάσταση. (Asavanisithchai & Kennedy, 2006) Μετά από κάποια λεπτά τελειοποιείται η ανάπτυξη του αφρού και μπορεί να διατηρηθεί με τη μείωση της θερμοκρασίας οδηγώντας το στη στερεοποίηση.

Το 1991 ο Baumeister ανέπτυξε βελτιστοποιημένη μέθοδο στο Fraunhofer-Institute (Bremen, Germany). (Baumeister, 1991.) Το 2000 ο Seeliger ίδρυσε μια καινούργια εταιρία ALM (Saarbrücken, Germany) η οποία έγινε μέρος της Alulight (Ranshofen, Austria) που τώρα είναι γνωστή ως Pohltec Metalfoam (Collogne, Germany). Παράγουν αφρούς αλουμινίου σε sandwich (aluminum foam sandwich) (AFS), που είναι ένα βελτιστοποιημένο ελαφρύ πάνελ αρκετών τετραγωνικών μέτρων και πάχους 8 – 80 mm με αφρό για πυρήνα και δύο ογκοδη φύλλα από κράματα αλουμινίου. Με αυτή τη διαδικασία οι μεταλλικές σκόνες και ο αφροποιητικός παράγοντας αναμιγνύονται και εισάγονται σε ένα συγκολλημένο δοχείο – κοντέινερ. Το κοντέινερ στη συνέχεια σφραγίζεται και θερμαίνεται σε ένα συμπαγές πρόδρομο τριών στρωμάτων, όπου τα τοιχώματα του δοχείου είναι τα εξωτερικά φύλλα του sandwich. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μεταλλουργική συγκόλληση μεταξύ των εξωτερικών φύλλων και του πυρήνα – αφρού, επιτυγχάνοντας ένα πολύ άκαμπτο προϊόν με αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία, που μπορεί να ανακυκλωθεί πλήρως. (Banhart & Seeliger, Recent trends in aluminum foam sandwich technology. Adv. Eng. Mater., 2012)

Polymer sponge structure

Τα μεταλλικά σφουγγάρια μπορούν να κατασκευασθούν με την αναπαραγωγή μιας ανοικτού πορώδους πολυμερικής δομής. Η μορφολογία τους βασίζεται προφανώς στη δομή πολυμερούς αφρού π.χ αφρού πολυουρεθάνης. Λόγω αυτού έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, καθώς η ποιότητά τους όσον αφορά την ομοιογένεια και την κατανομή των πόρων είναι ανώτερη, καθώς η τεχνολογία πολυμερούς αφρού είναι αρκετά προηγμένη και καθιερωμένη από τη μεταλλική αφρώδη. Ωστόσο, έχει κάποια σοβαρά μειονεκτήματα όσον αφορά τον αριθμό των σταδίων παραγωγής, τις διαστάσεις, το κόστος κλπ.

Ένα παράδειγμα δίνεται από την ERG (Oakland, CA, USA) που παράγει σφουγγάρια διαφόρων μετάλλων, αλουμινίου, σιδήρου γνωστά με την εμπορική ονομασία Duocel®. Σε αυτήν την περίπτωση το πολυμερικό σφουγγάρι γεμίζεται με ένα κονίαμα – πολτό ανθεκτικού στη θερμότητα υλικού π.χ ένα μείγμα μουλίτη, φαινολικής ρητίνης και ανθρακικού ασβεστίου. (Duocel) Ύστερα από τη ξήρανση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, το πολυμερές αποσυντίθεται και η μορφή είναι αρκετά σταθερή για χύτευση με το αντίστοιχο μέταλλο.

Μία παρόμοια μέθοδος, αλλά με επιπρόσθετη επικάλυψη από κερί στον πολυμερικό αφρό, για να αυξήσει τη σκληρότητα, χρησιμοποιήθηκε από την Mayser GmbH παλαιότερα γνωστή ως M-pore (Dresden, Germany) (M-pore). Το στάδιο της ξήρανσης με θερμοκρασία να κυμαίνεται μέχρι και 350°C επιτρέπει να αφαιρεθεί το κερί και το πολυμερές και να παραχθούν μεταλλικοί αφροί με μεγάλους πόρους μέχρι και 10 mm διάμετρο.

Σε μία άλλη μέθοδο γίνεται μεταλλική επικάλυψη του πολυμερικού σφουγγαριού με επακόλουθη πυροσσωμάτωση και απομάκρυνση του πολυμερούς. Ένα παράδειγμα είναι η εναπόθεση σε αφρό πολυουρεθάνης π.χ χημική εναπόθεση ατμού (CVD) του τετρακάρβονυλίου του νικελίου ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) το οποίο αποσυντίθεται σε στοιχειακό νικέλιο και μονοξείδιο του άνθρακα σε θερμοκρασία θέρμανσης από 150 μέχρι 200°C. (Paserin, Marcuson, Shu, & Wilkinson, 2004). Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε και εμπορευματοποιήθηκε από την Inco (Mississauga, ON, Canada). Τώρα αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται από την Alantum (Seongnam-City, Korea), με μεγάλο πλάνο παραγωγής στην Κίνα. (Kim & Lee, 2014), όπου εκεί παράγουν επίσης αφρούς σιδήρου και χαλκού. Η Recemat (Dodewaard, the Netherlands) παράγει σφουγγάρια από νικέλιο, ανοξείδωτο χάλυβα, τιτάνιο κλπ, καθώς μεταλλοποιείται με την επακόλουθη απομάκρυνση του σφουγγαριού πολυουρεθάνης με πυρόλυση.

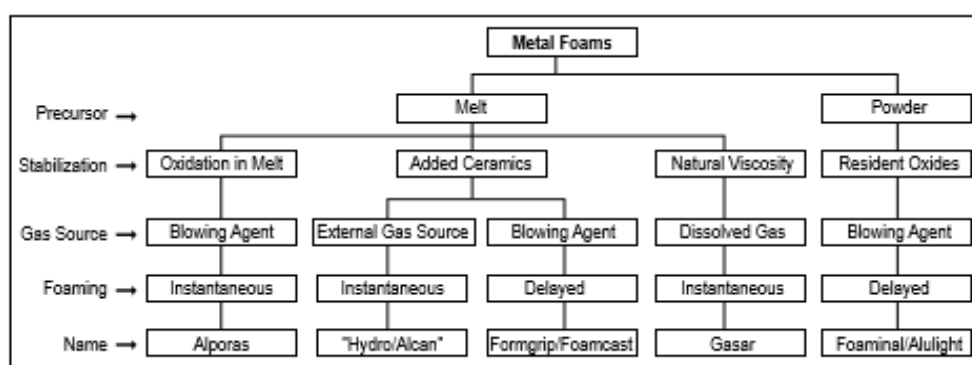
Placeholder

Τα μεταλλικά σφουγγάρια μπορούν επίσης να παραχθούν με διήθηση ή χύτευση καλουπιών γεμισμένων με κόκκους. Οι κόκκοι πρέπει να είναι ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες του αντίστοιχου τηγμένου μετάλλου και να μπορούν να απομακρύνονται με έκπλυση ή πλύση όπως π.χ η άμμος, το αλάτι. Οι κόκκοι και τα σημεία επαφής τους αντιστοιχούν αργότερα στους πόρους και τις διασυνδέσεις πόρων, αντίστοιχα, οδηγώντας σε δομή ανοικτού πορώδους. Η δομή του πορώδους εξαρτάται έντονα από τη μορφολογία των κόκκων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην απομάκρυνση των θέσεων, στη βελτίωση του πορώδους και στην πρόληψη της διάβρωσης.

Τέτοιοι τύποι σφουγγαριών κράματος αλουμινίου παράγονται σε διάφορες μορφές, π.χ. από την Exxentis (Wettingen, Ελβετία) με πόρους με διάμετρο από 0,14 έως 3 mm (Exxentis). Επίσης, η Alveotec (Venissieux, Γαλλία) παράγει μεταλλικά σφουγγάρια, αλλά συνήθως με

διαταγμένες δομές (Alveotec). Καταρχάς παράγουν μια διατεταγμένη δομή πυρήνα με ένα μείγμα διοξειδίου του πυριτίου και ρητίνης, έπειτα ένα πρόπλασμα μαζί με τον πυρήνα και τα τοποθετούν σε ένα καλούπι. Εν τέλει, ρίχνουν το μέταλλο στο πλέγμα και αντικαθιστούν το πρόπλασμα, μετά τη στερεοποίηση.

Αντί να ρίχνουν γύρω από τον αντικαταστάτη (placeholder) , μπορούν να αναμιχθούν με μεταλλικές σκόνες, να συμπιεστούν και να γίνει πυροσυσσωμάτωση. Σε αυτή την περίπτωση, δεν επιτυγχάνονται αναγκαία δομές ανοιχτού πορώδους, με διαφορετικούς λόγους πορώδους, ανάλογα με τον ονομαστικό λόγο όγκου μεταξύ των σκονών και του αντικαταστάτη. Με το χαμηλό ποσό του placeholder, αυτά μπορούν να παραμείνουν απομονωμένα μεταξύ τους, καθιστώντας την μετέπειτα απομάκρυνσή τους σχεδόν αδύνατη. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ ενδιαφέρουσα για την παραγωγή κραμάτων με υψηλή τήξη, όπως κράματα τιτανίου. Τότε, καρβαμίδιο (ουρία) ή όξινο ανθρακικό αμμώνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντικαταστάτες (Bram, Stiller, Buchkremer, Stöver, & Bauer, 1999) (Wazen, Lefebvre, Baril, & Nanci, 2010) , αλλά και χλωριούχο νάτριο (Torres, και συν., 2012).



Εικόνα 2.7. Αναλυτικός πίνακας οικογενειακού δέντρου μεταλλικών αφρών

2.5.Χρήσεις και εφαρμογές

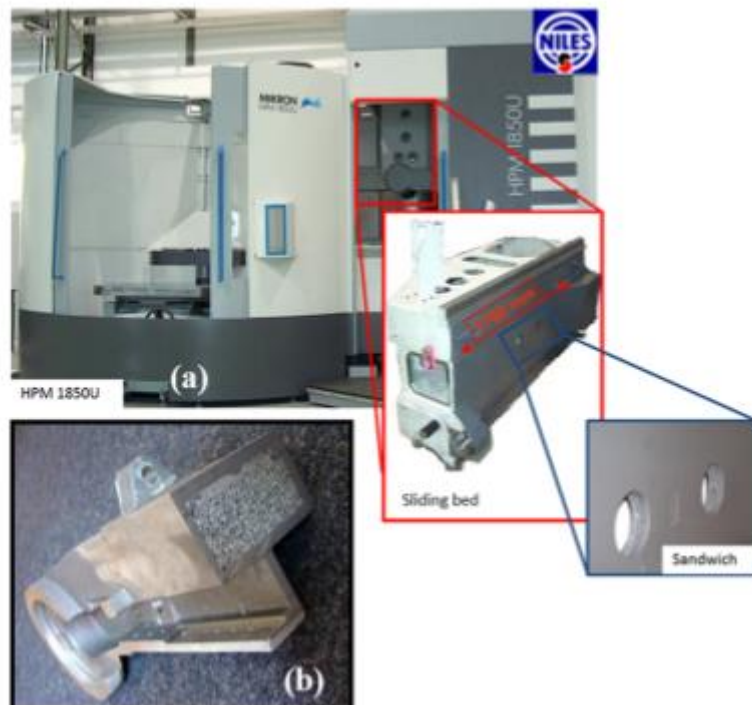
Οι μεταλλικοί αφροί έχουν κάποιες μηχανικές κι φυσικές ιδιότητες που τους καθιστούν ελκυστικούς για εφαρμογές σε διάφορους τομείς τόσο επιστημονικούς όσο και βιομηχανικούς – εμπορικούς. Η απορρόφηση ενέργειας, το πολύ χαμηλό βάρος και η ακουστική και θερμική απορρόφηση είναι τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για τις παρακάτω εφαρμογές. Η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, οι μεταφορές, η ναυπηγική καθώς και οι κατασκευές, η αρχιτεκτονική και η διακοσμητική , είναι ορισμένοι απ΄τους τομείς που οι μεταλλικοί αφροί βρίσκουν εφαρμογή.

Κατασκευαστικός τομέας

Αρχικά οι εξαιρετικά ελαφριοί μεταλλικοί αφροί, προτιμούνται στον κατασκευαστικό τομέα. Οι αφροί αλουμινίου σε σάντουιτς ειδικά σε μορφή πάνελ είναι αρκετά υποσχόμενα προϊόντα και βρίσκονται ήδη στην αγορά. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως πλαίσια στήριξης π.χ

για ηλιακούς συλλέκτες, καθρέπτες κλπ (Banhart & Seeliger, Recent trends in aluminum foam sandwich technology., 2012)

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα για βιομηχανικά μηχανήματα με κολώνες και δοκούς γεμισμένους με αφρό αλουμινίου, έτσι ώστε να είναι άκαμπτοι και ελαφριοί ταυτόχρονα.

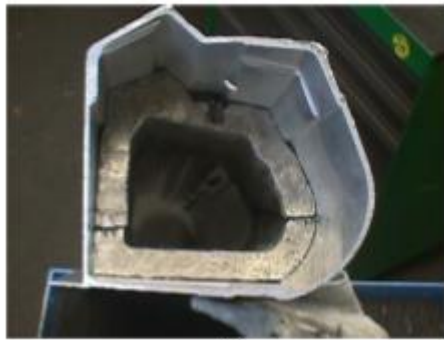


Εικόνα 2.8. (α) συρόμενη κλίνη φρέζας κατασκευασμένη από σάντουιτς συγκολλημένο αφρό αλουμινίου (Thomas Hirke, IWU, Chemnitz, Germany) (β) μία δοκός από ένα μηχάνημα γεμισμένο με αφρό Alporas

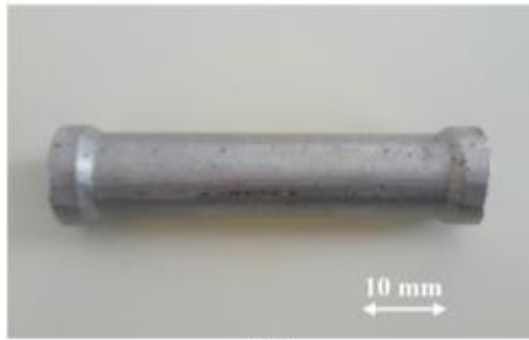
Μια παρόμοια φιλοσοφία υβριδικού υλικού εφαρμόστηκε σε ένα πρωτότυπο στήλης εργαλείου του Technical University Prague για μια μηχανή κοπής (Model Prisma S) από την TOS Varnsdorf s.a. (Varnsdorf, Czech Republic) στην οποία ενσωματώνεται ένας πυρήνας αφρού Alporas.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, επίσης είναι μεγάλο πλεονέκτημα το ελαφρύ βάρος και η απορρόφηση ενέργειας, καθώς τα αυτοκίνητα καταναλώνουν λιγότερο καύσιμο, φθάνουν μεγαλύτερες ταχύτητες, ενώ οι εκπομπές CO₂ μειώνονται. Ακόμη οι τυχόν κραδασμοί από σύγκρουση απορροφούνται.

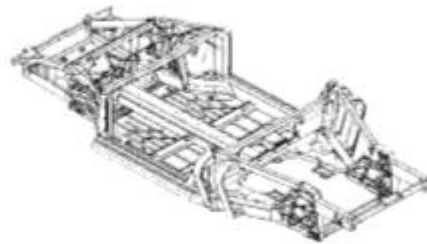
Για παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα η πόρτα είναι γεμισμένη με αφρό αλουμινίου, για να ενισχύσει το πλαίσιο και να αυξάνει τη δυσκαμψία, καθώς και να απορροφήσει την ενέργεια σε περίπτωση πλευρικής σύγκρουσης.



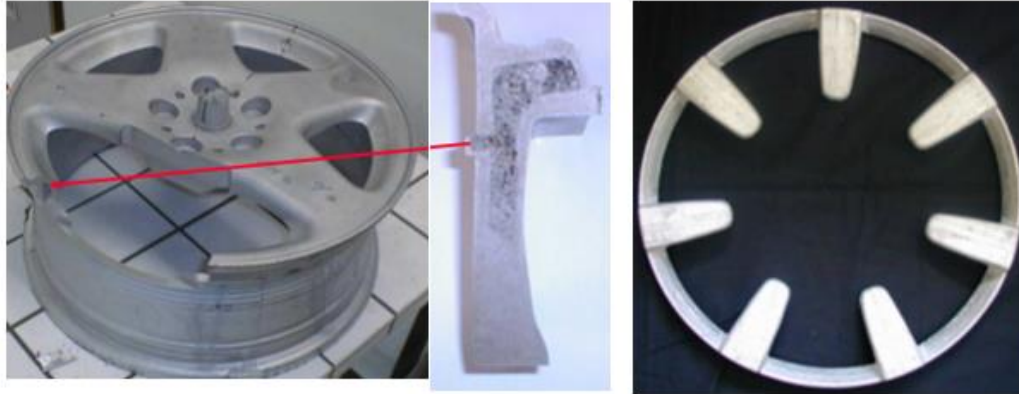
(a)



(b)

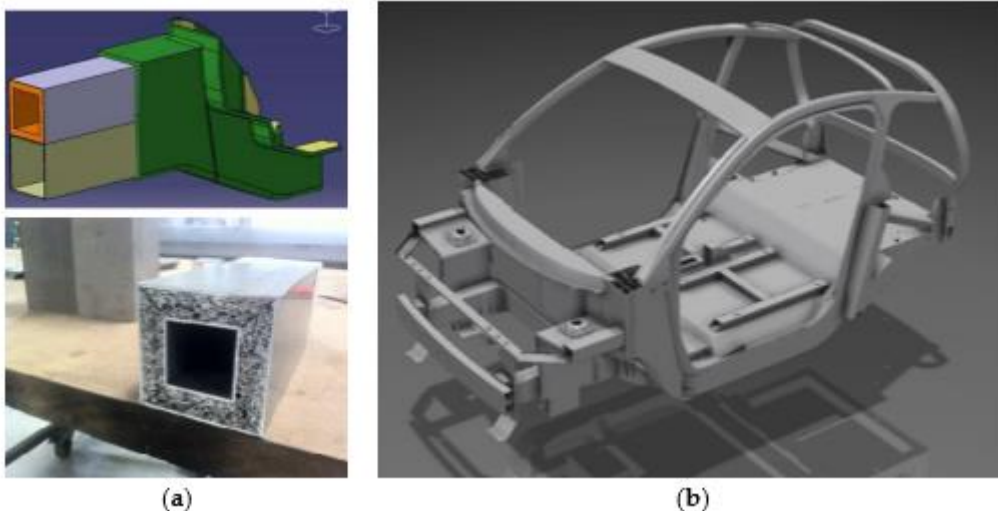


Εικόνα 2.9. (a) Πόρτα ενισχυμένη από αφρό αλουμινίου για τη Ferrari 360 και 430 spider (b) μικρό εξάρτημα απορρόφησης κραδασμών για το Audi Q7 (Alulight)



Εικόνα 2.10. Ρόδες οχημάτων, γεμισμένες με αφρό αλουμινίου (*Alulight*)

Ακόμη οι μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, όπου τα ελαφριά υλικά είναι αναγκαία συνθήκη. Επιπλέον η ασφάλεια είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, όπου απαιτείται ένα πολύ αποτελεσματικό σύστημα προστασίας από συγκρούσεις. Το Technical University Berlin και η Pohltec Metalfoam κατασκεύασαν ένα πρωτότυπο ultra-light ηλεκτρικό όχημα στα πλαίσια του European project Evolution (<http://evolutionproject.eu/>)



Εικόνα 2.11. (a) Αλουμινένιο κιβώτιο απορρόφησης του πρωτότυπου ηλεκτρικού αυτοκινήτου στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου *Evolution* κατασκευασμένο με ορθογώνια προφίλ αλουμινίου, γεμισμένα με αφρό αλουμινίου. (b) σχεδιασμός CAD του λευκού σώματος (ευγενική προσφορά *Cidaut*, *Valladolid*, Ισπανία, *Pinningfarina*, *Cambiano*, Ιταλία και *Pohltec metal foam*, *Collogne*, Γερμανία).

Στο πλαίσιο των μεταφορών, πρέπει να αναφερθεί και η σιδηροδρομική κατασκευή. Αφρώδη πάνελ αλουμινίου χρησιμοποιούνται στο πάτωμα των βαγονιών του μετρό το Πεκίνο εδώ και αρκετά χρόνια. Ένα πιο πρόσφατο παράδειγμα είναι το εξάρτημα κεφαλής ισχύος της αμαξοστοιχίας *Intercity – Express – Train (ICE)* που κατασκευάστηκε από τη *Voith Engineering* (*Ludwigsfelde*, Γερμανία) και την *IWU* (*Chemnitz*, Γερμανία). Έχει κατασκευαστεί

από πάνελ αφρού αλουμινίου και ίνες άνθρακα. Επιτεύχθηκε μείωση του βάρους κατά 18% με την ίδια σκληρότητα και ακαμψία, βελτιώνοντας την απόσβεση κραδασμών και μειώνοντας τα βήματα της κατασκευής του σε σχέση με τον παραδοσιακό τρόπο κατασκευής.



Εικόνα 2.12. (α)Προτότυπο του Γερμανικού τρένου ICE υψηλής ταχύτητας (β) άποψη από το εσωτερικό

Στον τομέα της ναυπηγικής οι μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται για τη μείωση και τη σωστή κατανομή του βάρους .π.χ. οι ανώτερες κατασκευές πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερες , για να αυξάνεται η σταθερότητα των πλοίων και ως εκ τούτου να αυξάνεται η χωρητικότητα του πλοίου. Το 2009 ξεκίνησε ένα πρότζεκτ σχετικά με την ανάπτυξη νέου τύπου φορτηγών πλοίων εσωτερικής ναυσιπλοΐας, για μείωση βάρους στα πλοία. (Martesera)



Εικόνα 2.13. Πλοίο κατασκευασμένο από αφρό αλουμινίου.

Η αεροναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιεί μεταλλικούς αφρούς για την προστασία του σκάφους από τις επιθέσεις των πτηνών (Hanssen, Girard, Olovsson, Berstad, & Langseth, 2006). Η προστασία κατά των μικρο-μετεωριτών στους δορυφόρους ή στον διαστημικό σταθμό έχει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον, κυρίως λόγω των ισότροπων ιδιοτήτων τους (Thoma, Wicklein, Schneider, & Danesy)



Εικόνα 2.14. Μεταλλικός αφρός μειώνει τον ήχο της τουρμπίνας αεροσκάφους

Όσον αφορά τον αθλητικό εξοπλισμό, οι μοναδικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών γίνονται περισσότερο συναφείς. Για παράδειγμα, ορισμένοι παίκτες γκολφ χρησιμοποιούν τις ιδιότητες απόσβεσης της μεταλλικής δομής αφρού για να βελτιώσουν τον έλεγχο του χτυπήματος. Ακόμη, τα προστατευτικά των ακουστικών για ποδοσφαιριστές (αμερικάνικο ποδόσφαιρο) ή τα κράνη, θα μπορούσαν επίσης να αξιοποιήσουν τις ιδιότητες των μεταλλικών αφρών. Για παράδειγμα, η Alcarbon (Bremen, Γερμανία) συνδυάζει τις ιδιότητες των αφρών αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα για τα αθλητικά είδη. (Alcarbon)



Εικόνα 2.15. Αθλητικά παπούτσια γκολφ με μεταλλικό αφρό ώστε να είναι ελαφρύτερα

Λειτουργικές εφαρμογές

Σε αμφιθέατρα ή μεγάλα δωμάτια το ταβάνι είναι πολύ συχνά σκεπασμένο με διάτρητα μεταλλικά φύλλα για τον έλεγχο ήχου. Συνδυάζεται το πλεονέκτημα της ελαφριάς, αυτοσυντηρούμενης δυνατότητας μεγάλων μεταλλικών αφρωδών πάνελ από ανοιχτό κελί.



Εικόνα 2.16. Το ηχοαπορροφητικό ταβάνι μιας αίθουσας ακροατηρίων και ενός εστιατορίου που καλύπτεται από αφρό Alusion από την Cymat (Mississauga, ON, Canada).

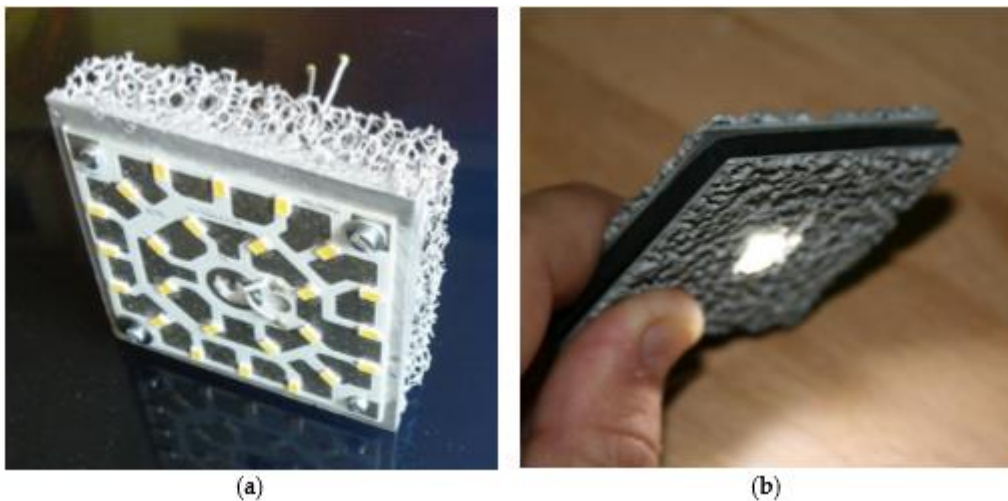
Μια ακόμη ισχυρή αγορά μεταλλικών σφουγγαριών, με μεγάλο αριθμό διαφορετικών προϊόντων, αντιπροσωπεύεται από εναλλάκτες θερμότητας. Η πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων και η μεγάλη επιφάνεια των μεταλλικών σφουγγαριών παρέχουν πολύ αποτελεσματική παθητική ψύξη (Evans, Hutchinson, & Ashby, 1998) (Lu, Stone, & Ashby, 1998)



Εικόνα 2.17. Σειρά από φίλτρα για λειτουργικές εφαρμογές (Alantum)

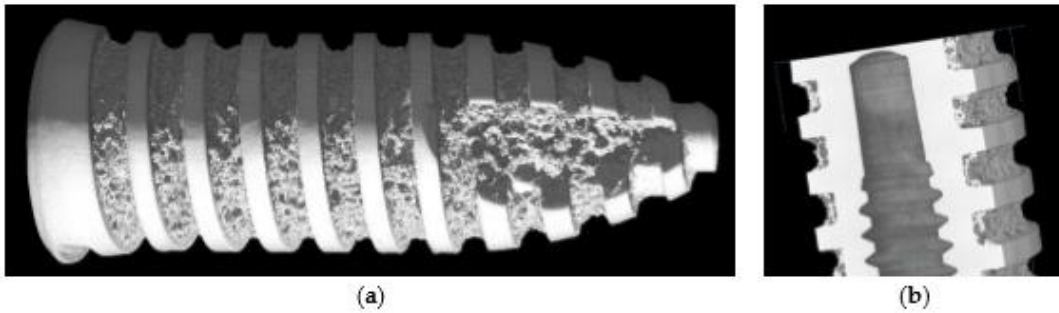


Εικόνα 2.18. Διάφοροι τύποι ενναλακτών θερμότητας με βάση αφρούς Αλουμινίου και σιδήρου (M-pore & Mayser GmbH)



Εικόνα 2.19. Παθητική θερμική ψύξη λαμπτήρων LED: (α) Al αφρού ανοικτού πορώδους από και (β) AFS από το Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου

Οι βιο-ιατρικές εφαρμογές είναι μια άλλη κατηγορία ενδιαφέροντος. Εδώ, προϊόντα υψηλής ποιότητας που βασίζονται σε αφρούς Τι, παρέχουν εξαιρετικές ιδιότητες βιοσυμβατότητας. Η τάση πηγαίνει στην κατεύθυνση των πορωδών δομών για τη βελτίωση της οστεοενσωμάτωσης, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα, όπου μια τομογραφία ενός οδοντικού εμφυτεύματος με βάση Τι δείχνει την πορώδη δομή του. Αν και το Τι είναι αρκετά δύσκολο να αφρίσει, μπορούν να δημιουργηθούν αφρώδεις δομές μέσω διαφορετικών μεθόδων παραγωγής. Ο τομέας αυτός θα πρέπει να αξιοποιηθεί περισσότερο στο μέλλον.

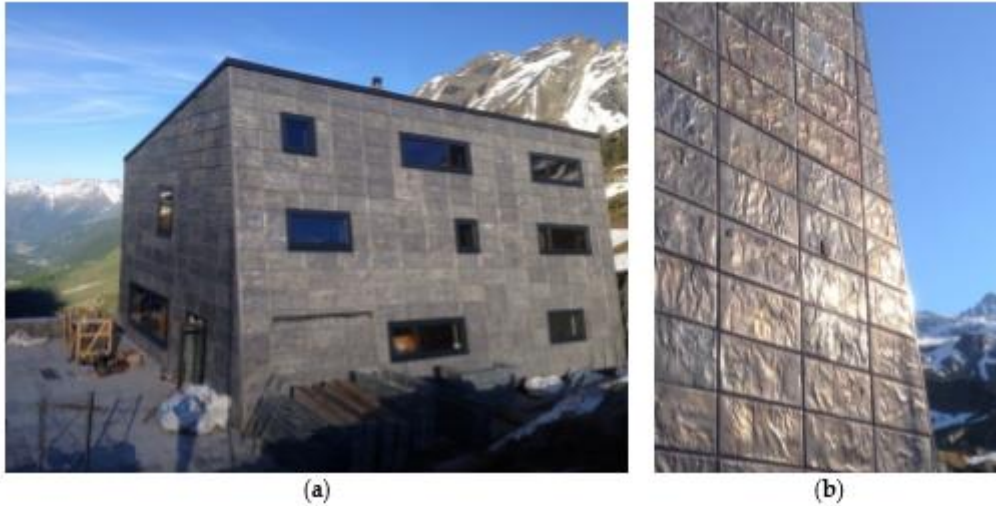


Εικόνα 2.20. (α) Τομογραφία από αφρό με βάση το Τι για οδοντικό εμφύτευμα με σκοπό τη βελτίωση της οστεοενσωμάτωσης (b) λεπτομέρειες από την εσωτερική δομή και την πορώδη επιφάνεια (Louis- Philippe Lefebvre)

Εφαρμογές στην αρχιτεκτονική



Εικόνα 2.21. Προτεσταντική εκκλησία στην Terrasa, Ισπανία φτιαγμένη από μεταλλικό αφρό Alusion (john Banhart)

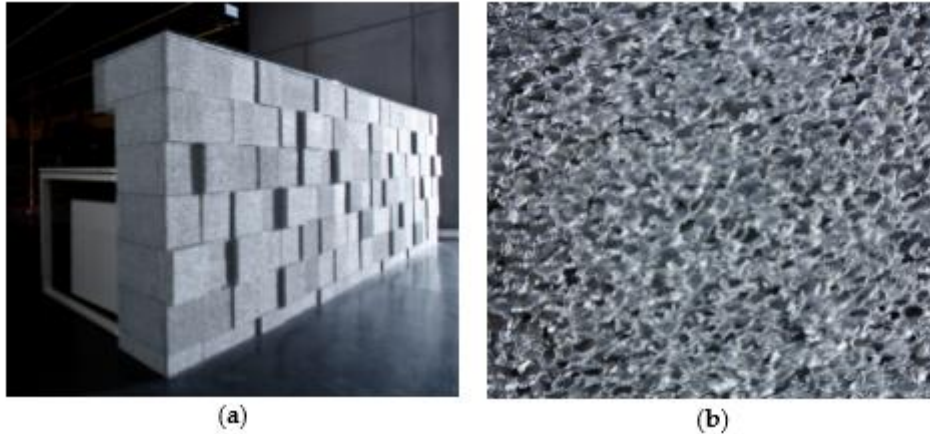


Εικόνα 2.22. Εξοχική κατοικία "Anenhütte" (Lötschental, Ελβετία) με επένδυση AFS. και (β) λεπτομέρεια των πλακιδίων πρόσοψης (Pohltec Metalfoam)

Το 2003, οι Kauffmann, Theilig & Partner και η Markgraph δημιούργησαν για τον Daimler Chrysler ένα θάλαμο – booth στη διεθνή παρουσίαση αυτοκινήτων στη Γενέβη της Ελβετίας, από αφρό Alporas, για να αντιπροσωπεύσει τις νέες τεχνολογίες τους. Οι Ferrari, Audi και άλλοι παρουσίασαν επίσης θαλάμους με μεταλλικά στοιχεία αφρού (Εικόνα 23). Η εταιρεία Aluivent έχει κατασκευάσει μια ρεσεψιόν για την Market Zrt. (Βουδαπέστη, Ουγγαρία) (Σχήμα 24).



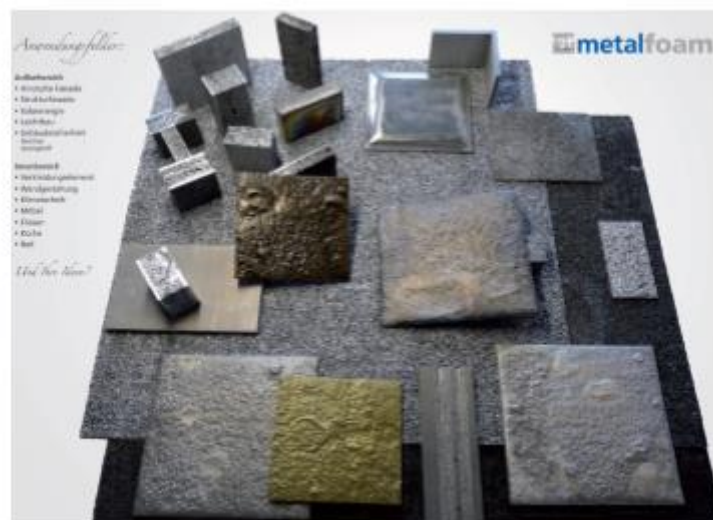
Εικόνα 2.23. Θάλαμος για την παρουσίαση αυτοκινήτων φτιαγμένος από Alusion αφρό



Εικόνα 2.24. (a) Γραφείο ρεσεψιόν από την Aluivent φτιαγμένο από Alunab αφρό με διάμετρο πόρων 3 mm για την Market Zrt. (Βουδαπέστη, Ουγγαρία) (b) λεπτομέρειες από την επιφάνεια του αφρού (Aluivent)

Σχεδιασμός, Τέχνη και Διακόσμηση

Όσον αφορά την τέχνη και τη διακόσμηση διαφοροποιούνται με ελάχιστες διαφορές από την αρχιτεκτονική. Η Pohltec Metalfoam έχει σχεδιάσει κεραμίδια κατασκευασμένα από τηγμένη επιφάνεια AFS στο portfolio τους, για εσωτερική αρχιτεκτονική (Εικόνα 25).



Εικόνα 2.25. Διαφορετικά AFS, κομμένα AFS και κεραμίδια από AFS για εσωτερικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές (Pohltec Metalfoam)

Αρκετοί καλλιτέχνες και σχεδιαστές χρησιμοποιούν μεταλλικούς αφρούς για διακοσμήσεις και καλλιτεχνικές συνθέσεις. Ο σχεδιαστής Gerd Kaden παρήγαγε αρκετές συνθέσεις από ξύλο και μεταλλικό αφρό για να δείξει την αντίθεση μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών πορωδών υλικών (Εικόνα 2.26) .



Εικόνα 2.26. Καλλιτεχνικές συνθέσεις από τον Gerd Kaden φτιαγμένα από ξύλο και μεταλλικό αφρό.

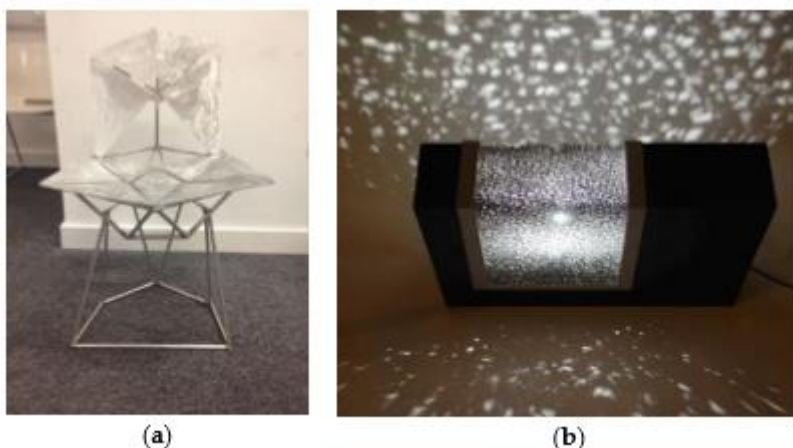


(a)



(b)

Εικόνα 2.27. (a) Υποστήριγμα αγάλματος φτιαγμένο από μεταλλικό αφρό Alusion (b) προσωπείο του πυθαγόρα φτιαγμένο από Alulight από το Slovak Academy of Sciences.



Εικόνα 2.28. (α) Καρέκλα από μεταλλικό αφρό Aluhab από τον Andor Ivan στο Imperial College London (β) καλλιτεχνική διακοσμητική σύνθεση με μεταλλικό αφρό και σκεδασμένο εφέ φωτός από M-πόρους (Mayser)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ίνες Άνθρακα

3.1. Γενικά

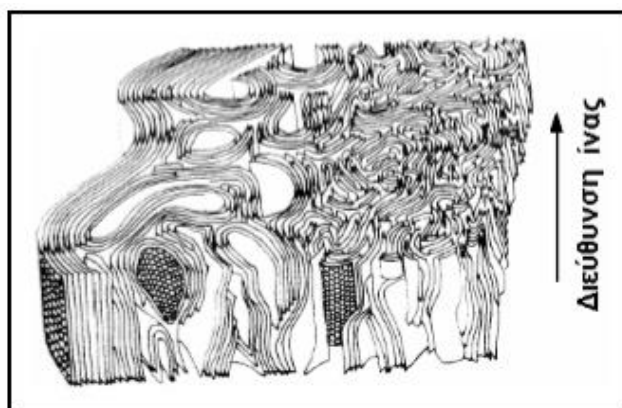
Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ).

Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. (Junshan Lu, 2020)

Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε

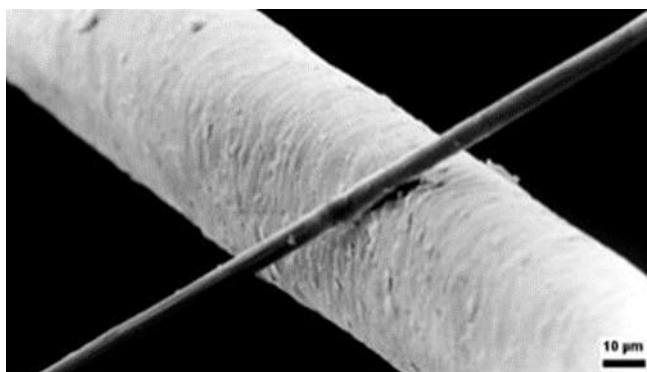
αυτή τη διεύθυνση. Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται παρακάτω. (Shengnan Yang, 2020)



Εικόνα 3.1. Δομή ανθρακονήματος από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

3.2.Ορισμός

Ως ίνες άνθρακα ορίζεται μία ίνα (ή ένα νήμα) η οποία περιέχει τουλάχιστον 90% άνθρακα και παράγεται από ελεγχόμενη πυρόλυση κατάλληλων πρόδρομων ιών. Οι πρόδρομες ΙΑ παράγονται από τις πρώτες ύλες και καταλήγουν έπειτα από οξειδωτική σταθεροποίηση και πυρόλυση σε ΙΑ. (Junshan Lu, 2020)



Εικόνα 3.2. Ίνα άνθρακα και κοινή τρίχα μαλλιών, σύγκριση μεγέθους.

Οι ΙΑ από πολυακρυλονιτριλίο (polyacrylonitrile – PAN) έχουν μακροσκοπικά ινώδη δομή, παρόμοια με αυτή της πρόδρομης ίνας, αλλά αποτελούμενη από στρώματα άνθρακα, ενώ από την κρυσταλλική δομή των ΙΑ απουσιάζει τρισδιάστατη περιοδικότητα.

3.3.Κατηγορίες

Οι ίνες άνθρακα αναλόγως το πρόδρομο υλικό από το οποίο φτιάχνονται διαχωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες.

- Ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN)

- Ίνες από πίσσα
- Ίνες από κυτταρίνη
- Ίνες από άλλα υλικά (π.χ πολυβινυλικής αλκοόλης, βουταδιένιο, φαινολικές ρητίνες, πολυαμίδια κλπ)

Επίσης, οι ίνες άνθρακα μπορούν να παραχθούν από καταλυτική χημική εναπόθεση ατμών (Vapor Grown Carbon Fibers - VGCF)

Ακόμη οι ίνες άνθρακα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις μηχανικές τους ιδιότητες.

- Εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας (UHM)
 - Μέτρο ελαστικότητας > 600 GPa
 - Αντοχή εφελκυσμού > 2.500 MPa
- Υψηλό μέτρο ελαστικότητας (HM)
 - Μέτρο ελαστικότητας > 350 – 600 GPa
 - Αντοχή εφελκυσμού > 2.500 MPa
- Ενδιάμεσος μέτρο ελαστικότητας (IM)
 - Μέτρο ελαστικότητας > 280-350 GPa
 - Αντοχή εφελκυσμού > 3.500 MPa ή μεγαλύτερη
- Πρότυπο μέτρο ελαστικότητας (HT)
 - Μέτρο ελαστικότητας: 200-280 GPa
 - Αντοχή εφελκυσμού: περίπου 2.500 MPa ή μεγαλύτερη
- Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (LM)
 - Μέτρο ελαστικότητας: 200 GPa ή χαμηλότερο
 - Αντοχή εφελκυσμού: 3.500 MPa ή χαμηλότερη

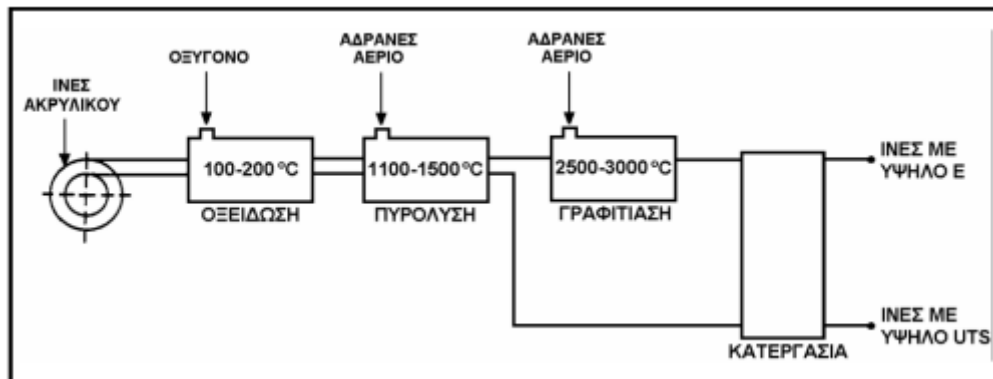
3.4. Τρόποι Παραγωγής

Οι πρώτες ΙΑ κατασκευάστηκαν από τον Τ. Edison το 1879, στην προσπάθεια που κατέβαλε να βρει υλικό κατάλληλο για αντιστάσεις στους ηλεκτρικούς λαμπτήρες.

Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια.

- Οξειδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 οC), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.

- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100- 1500οC. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000οC), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm. (Hamid Khayyam, 2020)



Σχήμα 3.1. Στάδια παραγωγής ινών άνθρακα.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής σημαντικά σημεία παρατήρησης είναι τα εξής :

- Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 οC και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.
- Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διεύθεσης των ινών αυτών καθορίζει και το

βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία.

- Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιτιάσης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιτιάσης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.
- Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού. (Association)

3.5.Χρήσεις και Εφαρμογές

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις μοναδικές ιδιότητές τους, οι ΙΑ θεωρούνται ως οι κυρίαρχες ίνες ενίσχυσης για ελαφριά, υψηλής αντοχής και στιβαρότητας σύνθετα υλικά.

Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ΙΑ χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, καθώς έχουν υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, ακαμψία, χαμηλή πυκνότητα, εξαιρετικές ιδιότητες διαβροχής, υψηλές αντιστάσεις στη διάβρωση, καθώς και ελεγχόμενη θερμική διαστολή. Γενικά, έχουν πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, ίση περίπου με 7 GPa. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (CFRPs) έχουν υψηλή χημική αδράνεια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαβρωτικό περιβάλλον. Αν και μερικές φορές μπορεί να παρατηρηθεί αστοχία υπό επαναλαμβανόμενη καταπόνηση, τα CFRPs γενικά έχουν καλύτερη συμπεριφορά κόπωσης από τα μέταλλα.

Οι ίνες αποτελούν μέσο ενίσχυσης συνθέτων υλικών, προσδίδοντας εξαιρετικό συνδυασμό αντοχής, μείωσης βάρους και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ωστόσο, το υψηλό κόστος αυτών των υλικών που οφείλεται κατά 50% στο κόστος της πρόδρομης ύλης, λειτουργεί απαγορευτικά για την εφαρμογή τους σε ευρύτερους τομείς εκτός της αεροδιαστημικής (π.χ. σε αεροσκάφη υψηλών προδιαγραφών, όπως το Airbus 320). (Association)

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΥΝ
Αεροδιαστημική, οδικές, σιδηροδρομικές και ναυτικές μεταφορές, αθλητικά είδη	Υψηλή αντοχή και ειδική αντοχή, χαμηλή πυκνότητα
Πύραυλοι, φρένα αεροπλάνων και αεροδιαστημικές κεραίες	Μεγάλη διαστατική σταθερότητα, μικρός συντελεστής θερμικής διαστολής, μεγάλη αντίσταση στην φθορά
Ηχητικές εγκαταστάσεις, ηχεία υψηλής πιστότητας, ρομποτικοί βραχίονες	Καλή αντικραδασμική συμπεριφορά, αντοχή, ανθεκτικότητα
Κουκούλες αυτοκινήτων, καλούπια και βάσεις για ηλεκτρονικό εξοπλισμό, βελόνες για πικαπ	Ηλεκτρική αγωγιμότητα
Χειρουργικά εργαλεία και εξοπλισμός για ακτινογραφικά μηχανήματα X, εμφυτεύματα, εφαρμογές προσθετικής χειρουργικής	Βιολογική αδράνεια και υψηλή διαπερατότητα ακτίνων X
Μηχανές υφαντουργίας, γενική μηχανική	Αντοχή στην κόπωση, αυτο - λίπανση, καλή αντικραδασμική συμπεριφορά
Χημική βιομηχανία, πυρηνικές εφαρμογές, βαλβίδες, στρόφιγγες	Χημική αδράνεια, υψηλή αντίσταση στην διάβρωση
Κρυογενικές εφαρμογές	Διατήρηση μηχανικών ιδιοτήτων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
Δακτύλιοι συγκράτησης μεγάλων γεννητριών, ραδιολογικός εξοπλισμός	Ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες

Πίνακας 3.2. Εφαρμογές ινών άνθρακα και εκάστοτε χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 3.3. Ποδήλατο ενισχυμένο με ανθρακόνημα. (<https://www.thoughtco.com/uses-of-carbon-fiber-820394>)



Εικόνα 3.4. Αεροπλάνο Boeing από ίνες άνθρακα. (<https://www.thoughtco.com/uses-of-carbon-fiber-820394>)



Εικόνα 3.5. Κράνος μηχανής από ίνες άνθρακα. (<https://www.thoughtco.com/uses-of-carbon-fiber-820394>)



Εικόνα 3.6. Αθλητικός εξοπλισμός, ρακέτες τένις από ανθρακόνημα.

(<https://www.ipitaka.com/blogs/news/top-10-everyday-uses-for-carbon-fiber>)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πειραματική Διαδικασία

4.1. Γενικά

Τα υβριδικά σύνθετα υλικά αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών με πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη βιομηχανία. Ο συνδυασμός των παραδοσιακών συνθέτων υλικών με μεταλλικά υλικά βρίσκει αρκετές εφαρμογές σε προϊόντα υψηλής ποιότητας και συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, δεδομένου ότι η θεωρητική και πειραματική τους μελέτη βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο.

4.2. Σκοπός πειραματικού μέρους

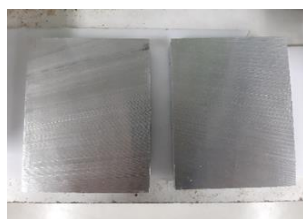
Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η κατασκευή δοκιμίων υβριδικών υλικών, αποτελούμενα από ινώδες σύνθετο και μεταλλικό αφρό αλουμινίου. Το ινώδες σύνθετο αποτελείται από πολυμερική μήτρα (εποξειδική ρητίνη) και ίνες άνθρακα. Ακολουθεί ο έλεγχος της συμπεριφοράς στην κρούση και της συνολικότερης βελτιστοποίησης αυτής της οικογένειας υλικών καθώς και των συντιθέμενων από αυτά κατασκευών.

4.3. Κατασκευή σύνθετων υβριδικών υλικών

4.3.1. Κατασκευή μεταλλικών αφρών

Για την κατασκευή των δοκιμίων μεταλλικού αφρού, χρησιμοποιήθηκε ο άμεσος τρόπος παραγωγής, ML melting route. Συγκεκριμένα, οι αφροί κατασκευάστηκαν με χρήση της μεθόδου ALPORAS (βιομηχανική ονομασία από τη Foamtech) (Kitahara, 2000) με κάποιες παραλλαγές, ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες.

Το βασικό υλικό που επιλέχθηκε είναι το αλουμίνιο Al 5052, κομμένο σε πλάκες, το οποίο τήκεται στους 720°C, μέσα σε προθερμασμένο κλίβανο χύτευσης και το αφήνουμε περίπου για 1 ημέρα.

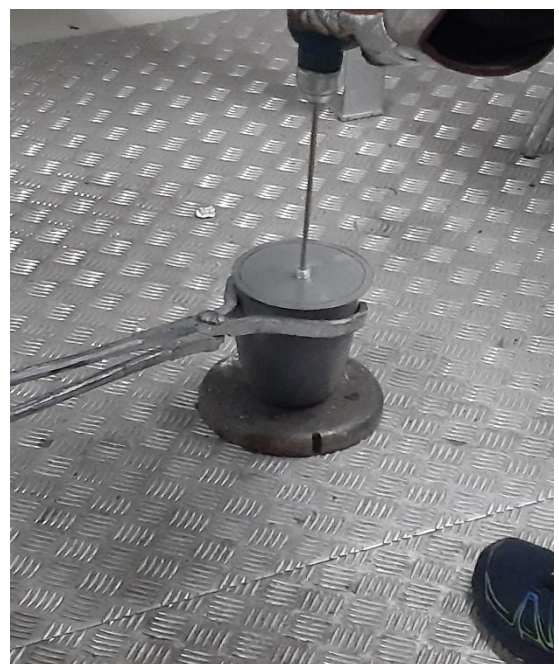


Εικόνα 4.1. Πλάκες αλουμινίου 5052.



Εικόνα 4.2. Κλίβανος χύτευσης με καλούπι.

Με προσοχή προσθέτουμε τον αφροποιητικό παράγοντα, που στην περίπτωσή μας, μετά από διάφορες δοκιμές, είναι το ανθρακικό ασβέστιο (3%w/w) σε σκόνη CaCO_3 . Η συνεχόμενη ανάδευση κατά την προσθήκη του αφροποιητικού παράγοντα είναι απαραίτητη για να αναμειχθεί καλά το υλικό και να επιτευχθεί ομοιόμορφη αφροποίηση. Το ασβέστιο ταυτοχρόνως παράγει οξείδια και αυξάνει το ιξώδες του υλικού (thickening agent).



Εικόνα 4.3. Τεχνίτης βγάζει το καλούπι από τον κλίβανο **Εικόνα 4.4.** Απαραίτητη ανάδευση

Τα δοκίμια παρέμειναν στον επαγωγικό φούρνο για ένα χρονικό πλαίσιο 10 λεπτών. Κατά το στάδιο αυτό ο αφροποιητικός παράγοντας διασπάται και παράγει φυσαλίδες. Το τελικό υλικό έχει τη μορφή που φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Ύστερα από περίπου 3 ώρες βγάζουμε τον αφρό αλουμινίου από το καλούπι. Τοποθετούμε το καλούπι πάνω σε ένα μέταλλο για να ψυχθεί γρηγορότερα.



Εικόνα 4.5. Καλούπια χύτευσης με αφρό αλουμινίου.



Εικόνα 4.6. Αφρός αλουμινίου.

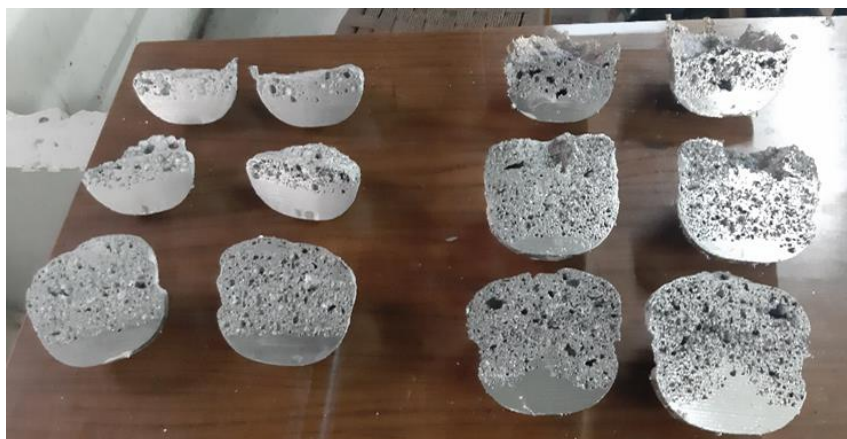
Αρχικά κόβουμε στην εργαλειομηχανή κοπής κάθετα τα δοκίμια για να δούμε το ποσοστό αφροποίησης και την εσωτερική μορφή του.



Εικόνα 4.7. Εργαλειομηχανή κοπής.



Εικόνα 4.8. Κοπή δοκιμίου.



Εικόνα 4.9. Κάθεται τεμαχισμένοι αφροί αλουμινίου.

Αφού έχουν βρεθεί οι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής αφρού αλουμινίου, κόβουμε το δοκίμιο σε φέτες, πάχους 1,5cm, ώστε να χρησιμοποιηθεί στο υβριδικό σύνθετο υλικό. Ύστερα λειαίνεται στον τροχό λείανσης για λεία και στιλπνή επιφάνεια.



Εικόνα 4.10. Τεμαχισμένη φέτα αφρού αλουμινίου, στον τροχό λείανσης.

Τελικά οι βέλτιστες συνθήκες αφροποίησης ήταν, Al τύπου 5052 σε πλάκα βάρους 656g προσθήκη CaCO_3 20,30g (3%w/w) σε σκόνη, ανάδευση για περίπου 1 λεπτό και τέλος θερμοκρασία 760°C στον κλίβανο για 10 λεπτά.

Περιπτώσεις αστοχίας

Προτού βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες, έγιναν βέβαια πολλές δοκιμές με διάφορες παραλλαγές πάνω στη μεθοδολογία παραγωγής αφρών ALPORAS.

Αρχικά, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μελετήθηκε η εφαρμογή υδρίδιο του τιτανίου TiH_2 ως αφροποιητικός παράγοντας και καρβίδιο του πυριτίου SiC , αντί για ανθρακικό ασβέστιο CaCO_3 , σε ποσοστό 1,5wt% και 20vol%. Για τις 3 πλάκες αλουμινίου δοκιμάστηκε φάση ενίσχυσης 10%, 15% και 20%.

Παρά την ομοιότητα με τη μέθοδο της βιβλιογραφίας, στη δική μας περίπτωση δεν πραγματοποιήθηκε ικανοποιητική ανάδευση με αποτέλεσμα ο τελικός αφρός να

παρουσιάζει χαμηλή αφροποίηση. Έτσι δεν μπόρεσαν να σχηματιστούν πόροι για τον αφρό αλουμινίου.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η χρήση κεραμικού ZrO (yttria stabilized zirconia) , για την αύξηση του ιξώδους και αφροποιητικός παράγοντας CaCO₃. Όμως και πάλι τα τελικά επίπεδα αφροποίησης ήταν χαμηλά, αφού δεν είχαν σχηματιστεί πόροι ενιαία στο δοκίμιο και τα υλικά δεν είχαν ανακατευτεί καλά.

Ύστερα από τις παραπάνω δοκιμές, μελετήθηκε η ιδέα δημιουργίας αφροποιήσιμων δισκίων μέσω τεχνικών κονιομεταλλουργίας. Στην περίπτωση αυτή ο αφροποιητικός παράγοντας CaCO₃ βρίσκεται μέσα σε δισκία, μαζί με λίγο Al σε σκόνη. Μέσα στα δισκία προστέθηκαν και κάποια κομματάκια χάλυβα, ώστε να βυθίζονται και να γίνεται καλύτερη ανάδευση του μείγματος. Τα δισκία κατασκευάστηκαν με παρόμοια μέθοδο της κονιομεταλλουργίας, στην πρέσσα INSTRON , μηχανικών δοκιμών. Εν τέλει, ούτε και αυτή η προσπάθεια είχε τα επιθυμητά επίπεδα αφροποίησης.



Εικόνα 4.11. Δισκία αφροποιητικού παράγοντα.



Εικόνα 4.12. Αφροί αλουμινίου με μη ομοιόμορφα κατανομημένο πορώδες.



Εικόνα 4.13. Αφροί αλουμινίου σε καλούπι.

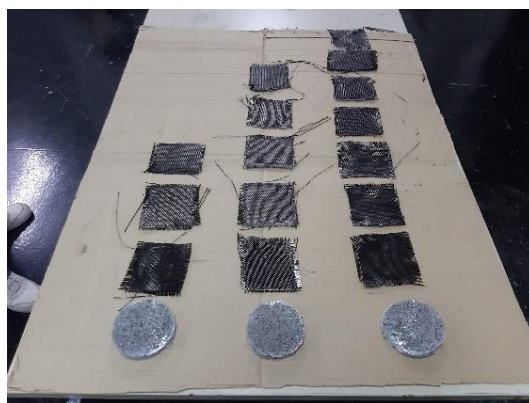
Εικόνα 4.14. Δοκίμια που απορρίφθηκαν.

5.3.2. Κατασκευή σύνθετου υβριδικού υλικού

Για την κατασκευή των σύνθετων υλικών χρησιμοποιήθηκε ως μέσο ενίσχυσης ύφασμα ινών άνθρακα, σε κομμάτια κατάλληλης γεωμετρίας. Επίσης, έγινε επάλειψη των ανθρακούφασμάτων με εποξειδική ρητίνη.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για την κατασκευή των συνθέτων ήταν η μέθοδος χειροποίητης στρώσης hand lay-up, δηλαδή τοποθέτηση πλεγμάτων ινών κατά στρώσεις. Αυτή η μέθοδος βοηθάει στον πλήρη έλεγχο της ποσότητας ρητίνης καθώς και στον προσανατολισμό και χειρισμό των ινών άνθρακα.

Κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια με διαφορετικό αριθμό στρώσεων 3, 5 και 7 έτσι ώστε να μελετηθεί και να συγκριθεί η συμπεριφορά τους σε συνθήκες θλιπτικής στατικής φόρτισης. Ο προσανατολισμός των ινών είναι ομοδιευθυντικός και η πλέξη των υφασμάτων κάθετη.

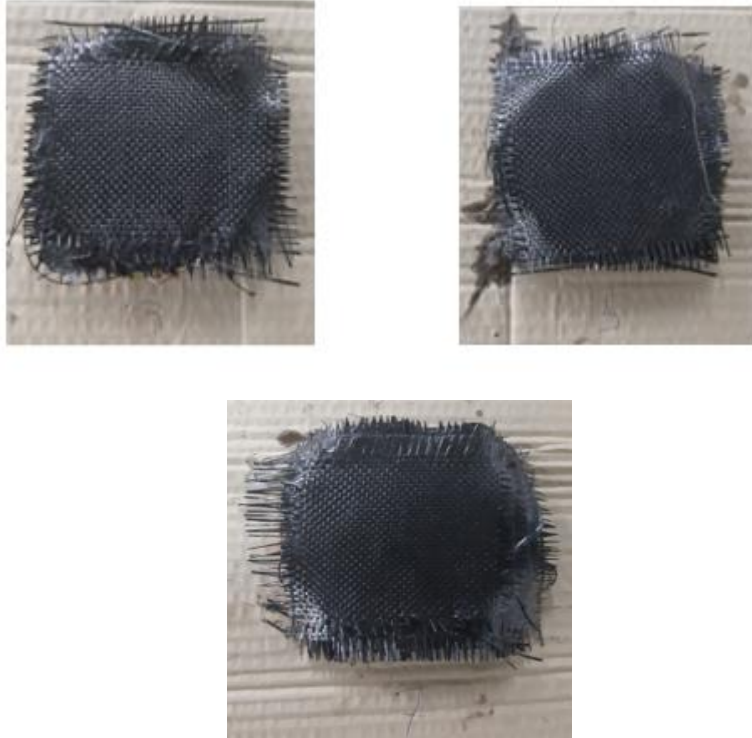


Εικόνα 4.15. Προεργασία υβριδικών δοκιμών.

Αφού τα υφάσματα ινών άνθρακα κόπηκαν στο κατάλληλο σχήμα και γεωμετρία, τοποθετήθηκαν πάνω από τους αφρούς αλουμινίου όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

Με σκοπό να μην υπάρχουν απώλειες ρητίνης από τυχόν διάκενα των αφρών, αυτοί καλύφθηκαν με σακούλα κενού από την μια πλευρά. Η σακούλα αφαιρέθηκε σε τελικό στάδιο.

Η τελική μορφή των υβριδικών δοκιμών έτοιμα προς δοκιμή των μηχανικών αντοχών τους φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 4.16. Τελική μορφή υβριδικών δοκιμίων μεταλλικού αγρού – ινών άνθρακα.

Εποξειδική ρητίνη

Ως εποξειδική ρητίνη ορίζεται κάθε ένωση χαμηλού μοριακού βάρους που περιέχει oligομερή, τα οποία μπορούν να μετατραπούν με περαιτέρω αντίδραση σε δικτυωμένο πολυμερές (συστατικό Α). Ο όρος εποξειδική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το αντίστοιχο δικτυωμένο πολυμερές. Η διεργασία μετατροπής του χαμηλού μοριακού βάρους oligομερούς σε ένα υψηλώς δικτυωμένο πολυμερές καλείται σκλήρυνση και επιτελείται με την χρησιμοποίηση μιας χαρακτηριστικής ένωσης που καλείται σκληρυντής (συστατικό Β). Η συνηθέστερη εμπορική τους μορφή είναι σε δύο δοχεία (βάση και σκληρυντής). Όταν τα δύο συστατικά αναμειχθούν εκτείνεται η αντίδραση σκλήρυνσης. Οι εποξειδικές κόλλες μπορούν να κολλήσουν ένα μεγάλο πλήθος υλικών όπως ξύλο, γυαλί, κεραμικά, τα περισσότερα πλαστικά και μέταλλα. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά τους είναι η μηδενική αλλαγή όγκου κατά την αντίδραση σκλήρυνσης και η ανάπτυξη μεγάλων τελικών μηχανικών αντοχών. Ακόμα, παρουσιάζουν μεγάλη τελική σκληρότητα χωρίς να είναι εύθραυστες.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη SUPERFIX 50 της εταιρίας BAUER. Επιλέχθηκε η λεπτόρρευστη έκδοση αυτής λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε στον εμποτισμό ανθρακοϋφασμάτων, εφαρμογή που απαιτεί μέγιστη διεισδυτικότητα προς επίτευξη πληρέστερου εμποτισμού. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 4.1) παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά της εν λόγω ρητίνης όπως αυτά προκύπτουν από το εγχειρίδιο που προσφέρει ο κατασκευαστής.

Οι σημαντικότερες παράμετροι στην επιτυχή χρήση εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών είναι κατά κύριο λόγο δύο. Η πλήρης ανάμιξη των συστατικών και η αυστηρή τήρηση των

αναλογιών που προβλέπει ο κατασκευαστής μεταξύ Α και Β συστατικού. Η τρίτη σε σειρά σημαντικότητας παράμετρος αλλά με μεγάλη σημασία για τις τελικές μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης είναι η θερμοκρασία. Η πλήρης και μεθοδική ανάμιξη των δύο συστατικών, εξασφαλίζει τον κατά το δυνατό ομόρρυθμο πολυμερισμό της ρητίνης κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης, που έχει σαν αποτέλεσμα την τελική μηχανική ομοιογενή συμπεριφορά του υλικού. Ακόμα, αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας περιοχών διαβαθμισμένης σκληρότητας στην μάζα της σκληρυμένης ρητίνης. Η αυστηρή τήρηση των περιεκτικοτήτων σε Α και Β συστατικό είναι κρίσιμης σημασίας, λόγω του ότι έτσι διαμορφώνεται ο χρόνος σκλήρυνσης (είναι σε συνάρτηση επίσης της θερμοκρασίας) και οι τελικές μηχανικές αντοχές.

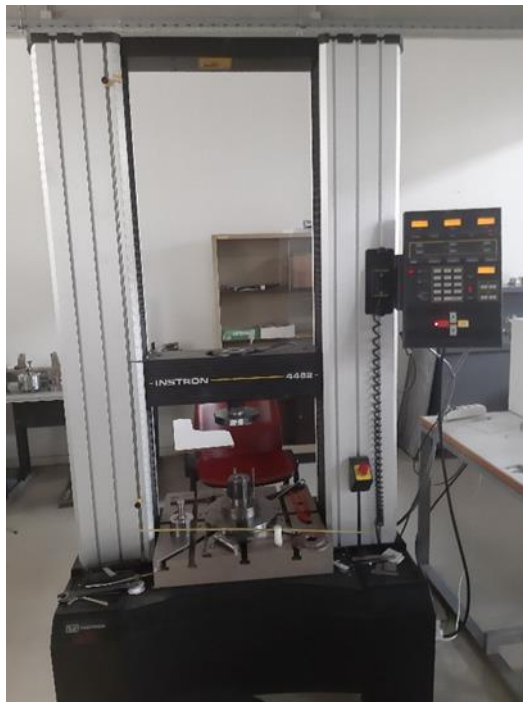
Χημική βάση: εποξειδική ρητίνη 2 συστατικών
Πυκνότητα (A + B) : 1,10 kg/lit
Συνιστώμενη θερμοκρασία εφαρμογής: > 10 °C
Συρρίκνωση: μηδενική
Ιξώδες:
10 °C → 1150 MPa.S
20 °C → 420 MPa.S
30 °C → 200 MPa.S
Χρόνος ερυσσιμότητας:
5 °C → 130 min
10 °C → 85 min
30 °C → 15 min
Αντοχή σε θλίψη: 72 N/mm ² μετά από 7 ημέρες στους 23 °C σύμφωνα με DIN EN 196-1
Αντοχή σε κάμψη: 64 N/mm ² μετά από 7 ημέρες στους 23 °C σύμφωνα με DIN EN 196-1
Αντοχή σε εφελκυσμό: 35 N/mm ² μετά από 7 ημέρες στους 23°C σύμφωνα με ISO 527
Πρόσφυση σε σκυρόδεμα: ≥ 4 N/mm ² (100% θραύση του σκυροδέματος)
Μέτρο ελαστικότητας , καμπτική αντοχή: 1600 N/mm ² μετά από 7 ημέρες, 23°C σύμφωνα με DIN 53452

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης BAUER SUPERFIX 50.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μηχανικές δοκιμές

5.1. Μηχανικές Δοκιμές - Όργανα και Διατάξεις



Εικόνα 5.1 Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482.

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 του εργαστηρίου (Εικ. 5.1). Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού, κοχλία περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 100 KN.

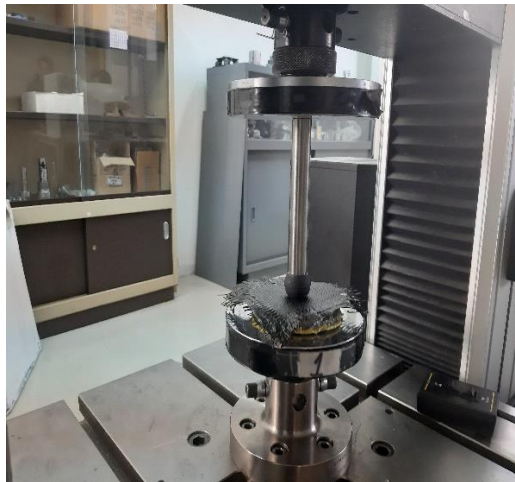
Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο (περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης)

- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- Ονομαστική δύναμη: 100 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm/ min
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm /min.
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm/ min.
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV/ V



Εικόνα 5.2. Δοκίμιο στην πρέσα με σφαιρικό έμβολο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αποτελέσματα και Συζήτηση

6.1. Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών

Η δοκιμή που πραγματοποιήθηκε με την πρέσα έδωσε αποτελέσματα για μια προσομοίωση στατικής κρούσης με μικρές ταχύτητες. Το υλικό βρίσκει εφαρμογές σε αντιβαλιστικά και σε υλικά για απορρόφηση ενέργειας σε κρούση.

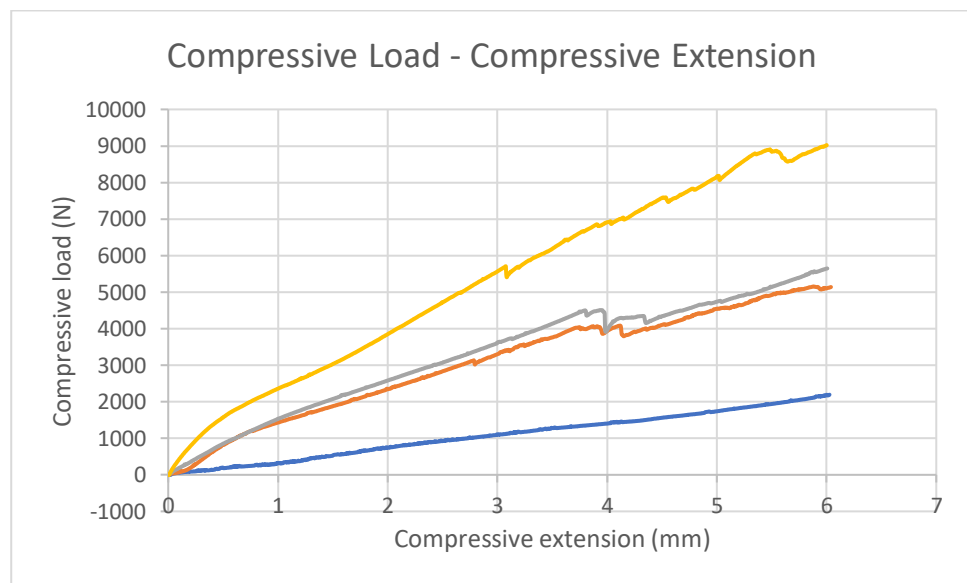
Όπως παρατηρείται σε παραπάνω εικόνα, το έμβολο που χρησιμοποιήθηκε είναι σφαιρικό, άρα η επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με το υβριδικό δοκίμιο κάθε χρονική στιγμή είναι μεταβαλλόμενη. Συνεπώς δεν έχει νόημα το διάγραμμα τάση – παραμόρφωση, γιατί η τάση είναι φορτίο/επιφάνεια και η επιφάνεια είναι κάθε χρονική στιγμή μεταβαλλόμενη.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad A \neq \text{σταθ.}$$

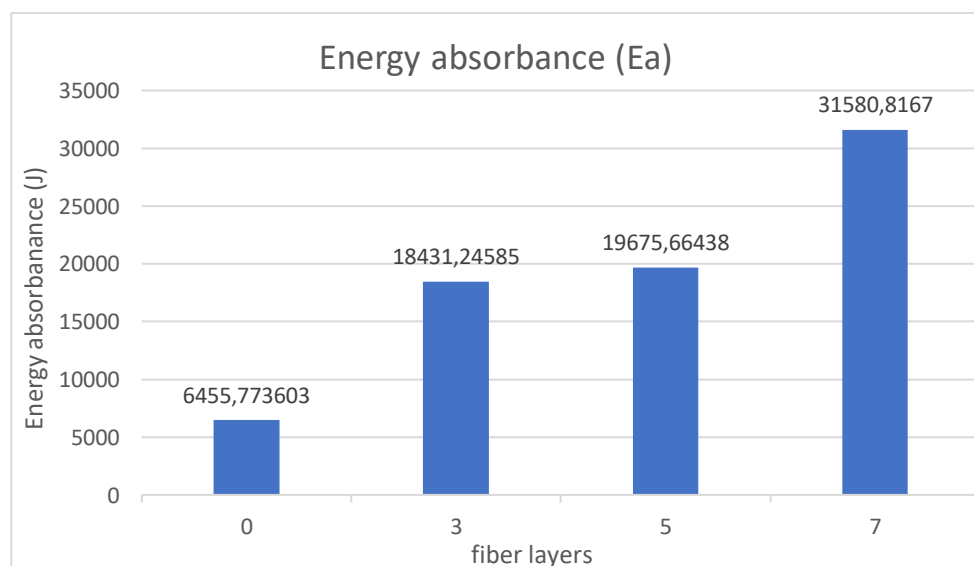
6.1.1. Ανάλυση δεδομένων - Συγκριτικά διαγράμματα

Τα διαγράμματα που παίρνουμε από τη δοκιμή είναι αυτά του φορτίου (N) – μετακίνησης του εμβόλου (mm). Για κάθε ένα δοκίμιο με διαφορετικό αριθμό στρώσεων ινών άνθρακα η καμπύλη αλλάζει.

Βρίσκοντας το εμβαδόν κάτω από τις καμπύλες βρίσκουμε την ενέργεια απορρόφησης σε $J=N*m$.

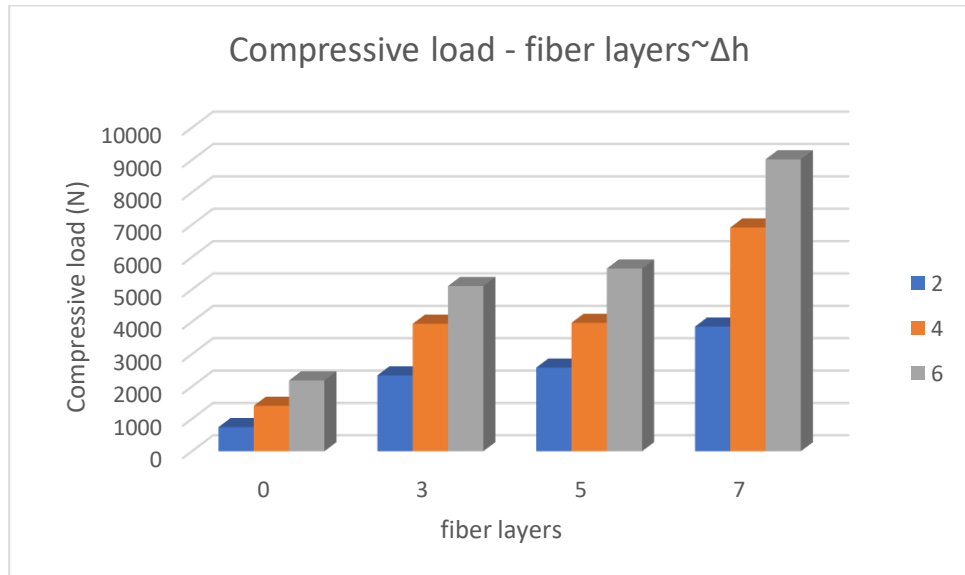


Διάγραμμα 6.1. Φορτίο (N) – μετακίνηση του εμβόλου (mm).



Διάγραμμα 6.2. Ενέργεια απορρόφησης (J) για 6 mm διείσδυση του εμβόλου – αριθμός στρώσεων ινών.

Παρακάτω φαίνεται το ραβδόγραμμα του φορτίου ανάλογα με τον αριθμό στρώσεων των ινών και της μετακίνησης του εμβόλου, στα 2 4 και 6 mm.



Διάγραμμα 6.3. Φορτίο – αριθμός στρώσεων ινών σχετικά με τη μετακίνηση του εμβόλου.

6.2. Παρατηρήσεις - Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Από το διάγραμμα 6.1 παρατηρούμε τη συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες φόρτισης με χρήση διεισδυτή σφαιρικής γεωμετρίας.

Με 0 αριθμό στρώσεων ινών, δηλαδή στον καθαρό μεταλλικό αφρό η καμπύλη είναι σχεδόν μια ευθεία γραμμή, αφού δεν έχουμε θραύση ινών. Το φορτίο που δέχεται το υλικό για μετακίνηση του εμβόλου 6 mm είναι μόλις 2 kN. Αυτό είναι λογικό διότι το δοκίμιο δεν είναι ενισχυμένο και δεν έχει μεγάλες αντοχές σε φορτίο.

Με 3 και 5 αριθμό στρώσεων ινών, το υλικό παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά. Το φορτίο φτάνει μέχρι τα 5 kN περίπου. Στα σημεία που βλέπουμε κάποιες διακυμάνσεις και μεταβολές της καμπύλης υπάρχει πιθανόν κάποια αστοχία της ρητίνης ή κάποια θραύση ίνας ή ρητίνης. Η πρώτη μικρή αστοχία για το δοκίμιο με τις 3 στρώσεις παρατηρείται περίπου στα 3 kN. Οι σημαντικότερες όμως αστοχίες για τα δοκίμια με τις 3 και 5 στρώσεις ινών άνθρακα συμβαίνουν στα 4 kN όταν το έμβολο έχει μετακινηθεί κατά 4 mm μέσα στο δοκίμιο.

Στις 7 στρώσεις ινών άνθρακα, πλέον το δοκίμιο έχει ενισχυθεί κατά πολύ. Το μέγιστο φορτίο που δέχεται φτάνει τα 9 kN. Η πρώτη αστοχία εντοπίζεται στα 5,5 kN όταν το έμβολο έχει μετακινηθεί κατά 3 mm. Οι επόμενες αστοχίες συμβαίνουν στα 7,5 8 και 9 kN.

Στο διάγραμμα 6.2 φαίνεται η ενέργεια απορρόφησης του υλικού για 6 mm διείσδυση του εμβόλου. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός στρώσεων των ινών, δηλαδή η ενίσχυση του υλικού,

αυξάνεται και η ενέργεια απορρόφησης. Από τα 6500 J για τις 0 στρώσεις φτάνουμε τα 32000 J για τις 7 στρώσεις. Η συμπεριφορά για 3 και 5 στρώσεις είναι και πάλι παρόμοια. Επομένως όσο ενισχύεται το υλικό τόσο αυξάνεται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, ιδιότητα πολύ σημαντική για τις κρούσεις.

Το διάγραμμα 6.3 είναι ένα συγκεντρωτικό συγκριτικό ραβδόγραμμα που δείχνει ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός στρώσεων των ινών τόσο αυξάνεται και η αντίσταση του υβριδικού υλικού στη φόρτιση. Παράλληλα όσο το έμβολο διεισδύει στο δοκίμιο τόσο αυξάνεται το φορτίο. Αυτά αποδεικνύουν την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

- Όσο πιο ενισχυμένο είναι το δοκίμιο, δηλαδή όσες περισσότερες στρώσεις ινών άνθρακα έχει, τόση μεγαλύτερη η αντοχή του σε φορτίο.
- Τα πιο ενισχυμένα δοκίμια έχουν καλύτερη συμπεριφορά στη στατική παραμόρφωση.
- Η ενέργεια απορρόφησης αυξάνεται στα πιο ενισχυμένα δοκίμια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Προτάσεις

- Να γίνουν πειράματα δυναμικής κρούσης και να υπάρξει συσχετισμός με αυτά της στατικής.
- Να μελετηθεί η συμπεριφορά των υβριδικών σύνθετων υλικών σε καμπτικά φορτία.
- Να μελετηθεί η κατεργασιμότητα των υβριδικών σύνθετων δοκιμίων.

Βιβλιογραφία

- Akiyama, S., Ueno, H., Imagawa, K., Kitahara, A., Nagata, S., Morimoto, K., . . . Itoh. (1987, December 15). Foamed Metal and Method of Producing Same. σσ. U.S. Patent 4,713,277.
- Akshay C. Jadhav, P. P. (2019). Production of Green Composites from Various Sustainable Raw Materials. *Green Composites*.
- Alcarbon. <http://www.alcarbon.de/>.
- Allen, B., Mote, M., & Sabroff, A. (1963., 4 30). Method of Making Foamed Metal. σσ. U.S.Patent3,087,807.
- Alveotec. <http://www.alveotec.fr/en/>.
- Asavavisithchai, S., & Kennedy, A. (2006). Effect of powder oxide content on the expansion and stability of PM-route Al foams. *J. Colloid Interface Sci.* . σσ. 297, 715–723.
- Association, T. J. <https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/type.html>.
- Babcsan, N., Beke, S., & Makk, P. (2010, 6 10). Method of Producing a Metal Foam by Oscillations and thus Obtained Metal Foam Product. . σ. WO Patent 2010/064059 A2.
- Banhart, J. (2018). Manufacturing Routes for Metallic Foams. *Solidification Science*.
- Banhart, J., & Seeliger, H.-W. (2012). Recent trends in aluminum foam sandwich technology. *Adv. Eng. Mater.*, σσ. 1082–1087.
- Banhart, J., & Seeliger, H.-W. (2012). Recent trends in aluminum foam sandwich technology. *Adv. Eng. Mater.* σσ. 1082–1087 .
- Baumeister, J. (1991. , 5 29). Method for Producing Porous Metal Bodies. σσ. German Patent 4,018,360.
- Bram, M., Stiller, C., Buchkremer, H., Stöver, D., & Bauer, H. . (1999, 6). Preparation and Characterization of High-Porosity Titanium, Stainless Steel, and Superalloy Parts. In *Proceedings of the Metal Foams and PorousMetalStructures*. σσ. 197-202.
- ByTetsuji Miyoshi, *. I. (2017). ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications .
- Chaira, D. (2021). Powder Metallurgy Routes for Composite Materials Production . *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.
- Duocel. <http://www.ergaerospace.com/index.html> .
- Evans, A., Hutchinson, J., & Ashby. (1998). Multifunctionality of cellular metal systems. . *M.F. Prog. Mater. Sci.* , σσ. 171 - 221.
- Exxentis. <http://www.exxentis.co.uk/>.

- Filippo Valorosi, E. D.-V. (2020, 1 5). Graphene and related materials in hierarchical fiber composites: Production techniques and key industrial benefits. *Composites Science and Technology*.
- Foamtech. <http://www.foamtech.co.kr/eng02/>. Ανάκτηση από <http://www.foamtech.co.kr/eng02/>.
- Hamid Khayyam, R. N. (2020). PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling. *Progress in Materials Science*.
- Hanssen, A., Girard, Y., Olovsson, L., Berstad, T., & Langseth, M. I. (2006). A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels. *Impact Eng.* , σσ. 1127–1144. .
- <http://evolutionproject.eu/>.
- Junshan Lu, W. L. (2020). Microstructure and properties of polyacrylonitrile based carbon fibers. *Polymer Testing*.
- Kim, S., & Lee, C.-W. (2014, 4). A review on manufacturing and application of open-cell metal foam. *Proc. Mater. Sci.* , σσ. 305–309.
- Lu, T., Stone, H., & Ashby, M. (1998). . Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Mater.* , σσ. 3619–3635. .
- Mahdi Damghani, N. E. (2019, 12 15). Experimental evaluation of residual tensile strength of hybrid composite aerospace materials after low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*.
- Martec-era. <https://www.martec-era.net/> .
- Md Yusuf, M. Y. (2018). Investigation On The Effect Of Multi Filler Loading In Graphite-Polypropylene Composite As Bipolar Plate.
- Mohammad Sahami poor dehghan, H. H. (2020, 2 15). Parametric study on drilling of GFRP composite pipe produced by filament winding process in different backup condition. *Composite Structures*.
- M-pore. <http://www.m-pore.de/>.
- Nickels, L. (2019, 6). The future of pultrusion. *Reinforced Plastics*.
- Paserin, V., Marcuson, S., Shu, J., & Wilkinson, D. (2004, 6). CVD technique for inco nickel foam production. *Adv. Eng. Mater.* , σσ. 454–459.
- Putai., S. <http://2014.cnputai.com/?en/>. Ανάκτηση από <http://2014.cnputai.com/?en/>.
- Shengnan Yang, Y. C. (2020). Development and application of carbon fiber in batteries. *Chemical Engineering Journal*.
- Smits, J. (2016, 12). Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering Volume 2, Issue 4* , , σσ. 518-527.

- Thoma, K., Wicklein, M., Schneider, E. D.-2., & Danesy, D. (χ.χ.). New Protection Concepts for Meteoroid/Debris Shields. In Proceedings of the European Conference on Space Debris,. σσ. 445–452.
- Torres, Y., Rodríguez, J., Arias, S., Echeverry, M., Robledo, S., Amigo, V., & Pavón, J. (2012). Processing, characterization and biological testing of porous titanium obtained by space-holder technique. σσ. 47, 6565–6576.
- Wazen, R., Lefebvre, L.-P., Baril, E., & Nanci, A. J. (2010). Initial evaluation of bone ingrowth into a novel porous titanium coating. σσ. 94B, 64–71.
- William D. Callister, J. ., (2015). *Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών*. Τζιόλα.
- Κώστας Ε. Σαββάκης. Διαλέξεις μαθήματος, Τεχνολογία Υλικών.
- Μανωλάκος Δημήτριος (2017) Εκπαιδευτικό Υλικό για το μάθημα "Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών" http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf. Αθήνα. Ανάκτηση από Εκπαιδευτικό Υλικό για το μάθημα "Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών",.
- Νικόλαος Γ. Τσούβαλης. (1998). *Τεχνολογία και Μηχανική Σύνθετων Υλικών*. Αθήνα .
- Σιμιτζής Ι., Ζουμπουλάκης Λ. (2015) *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΛΙΚΩΝ*. Αθήνα .
- Τσελίκος, Γ. (2014, 7 4). Hybrid composites consisting of a thermosetting matrix, nano-particles and macro-fibres .
- Τσούβαλης, Ν. (1998). *Τεχνολογία και μηχανική σύνθετων υλικών – Σημειώσεις*’.
- Χρήστος, Τ. (Σύρος 2012). Μελέτη, ανάλυση και προσομοίωση επιθεμάτων σε αεροκατασκευές από σύνθετα υλικά.