



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΣΗ ΤΕ

Πτυχιακή Εργασία με τίτλο:

“ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ”

Των:

ΑΝΝΑΜΑΡΙΑ ΚΑΛΤΣΟΥΝΗ

ΙΩΑΝΝΑ ΚΑΛΤΣΑ

Επιβλέπων Καθηγήτρια: Κρέστου Αθηνά

Επίκουρη Καθηγήτρια ΠανΔΜ

Κοζάνη, Φεβρουάριος 2023

Copyright ©, 2023, Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
1.1. Ιστορική αναδρομή	7
1.2. Ορισμός.....	10
1.3. Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών.....	12
1.3.1. Μητρική φάση	12
1.3.2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών	14
1.3.2.1. Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού	19
1.3.2.2. Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα.....	20
1.3.2.3. Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου	22
1.3.3. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκων/σωματιδίων.....	23
1.4. Μέθοδοι μορφοποίησης συνθέτων υλικών ενισχυμένα με ίνες.....	25
1.4.1. Μέθοδοι επίστρωσης (Lay up techniques)	26
1.4.2. Τεχνικές μορφοποίησης με καλούπια (Moulding techniques)	27
1.4.3. Τεχνικές χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (Resin Transfer Moulding or RTM).....	28
1.4.4. Αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης.....	29
1.4.5. Μορφοποιήσεις με περιστροφή	30
1.4.6. Μορφοποιήσεις με διατάξεις συνεχούς παραγωγής	32
1.5.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	33
1.5.2. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	34
1.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	45
2.1. ΔΟΜΗ ΑΝΘΡΑΚΑ	45
2.2. ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΑ	47
2.3. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	48
2.4. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	53
2.5. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ - ΕΦΕΥΡΕΣΗ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ	55
2.6. ΙΔΙΟΤΗΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	57
2.6.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	58
2.6.2. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	59
2.7. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	59
2.8. ΠΡΟΔΡΟΜΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	62
2.8.1. ΠΟΛΥΑΚΡΙΛΟΝΙΤΡΙΛΙΟ (PAN).....	63
2.8.2. ΚΥΤΤΑΡΙΝΗ.....	64
2.8.3. ΠΙΣΣΑ.....	66
2.9. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	68

2.9.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗ.....	68
2.9.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΠΙΣΣΑ	69
2.9.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΠΟΛΥΑΚΡΙΛΟΝΙΤΡΙΛΙΟ	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	85
3.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	95
4. Τα κυριότερα σημεία της παγκόσμιας αγοράς ανθρακονημάτων 2022 – 2030:	95
4.1. Κύριοι μακροοικονομικοί δείκτες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της αγοράς.....	96
4.2. Περιφερειακή σύνοψη της παγκόσμιας αγοράς ινών άνθρακα	97
4.3. Κορυφαίες προβεβλημένες εταιρείες που κυριαρχούν στην αγορά:	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	99
5.1. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΙΝΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ :	99
5.2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ :	101
5.3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΛΑΤΙΝΙΚΗ ΑΜΕΡΙΚΗ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ :	103
5.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ ΙΣΡΑΗΛ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ:	104
5.5. Αξιολόγηση κύκλου ζωής των σύνθετων προϊόντων από ίνες άνθρακα: ...	106
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο θέμα της βιομηχανικής παραγωγής και χρήσης των ινών άνθρακα. Η βιβλιογραφία προς μελέτη προέκυψε μετά από συστηματική έρευνα σε αξιόπιστες και επικυρωμένες βάσεις δεδομένων, όπως οι παρακάτω: ScienceDirect, Google Scholar, DSpace@NTUA. Πληροφορίες, επίσης αντλήθηκαν από σχετικά επιστημονικά βιβλία, καθώς και από υλικό μαθημάτων του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και άλλων Πανεπιστημίων. Στο πλαίσιο της ανασκόπησης, θα γίνει ιστορική αναδρομή, παρουσίαση των κατηγοριών, των μεθόδων παραγωγής αλλά και των πλεονεκτημάτων/μειονεκτημάτων τόσο των σύνθετων υλικών όσο και των ανθρακονημάτων. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι κύριες εφαρμογές των αναθρακονημάτων. Τα τελευταία δύο κεφάλαια θα ασχοληθούν με την αγορά των ανθρακονημάτων σε παγκόσμια κλίμακα, παρέχοντας αξιολόγησή της και παρουσίαση των οικονομικών στοιχείων.

ABSTRACT

This paper consists of a bibliographic review on the subject of the industrial production and use of carbon fibers. The bibliography to be studied was obtained after a systematic search in reliable and validated databases, such as the following: ScienceDirect, Google Scholar, DSpace@NTUA. Information was also drawn from relevant scientific books, as well as course materials of the University of Western Macedonia and other Universities. In the context of the review, there will be a historical review, presentation of the categorization, the production methods and also the advantages/disadvantages of both composite materials and carbon fibers. Next, the main applications of carbon fibers will be presented. The last two chapters will concern the carbon fiber market, in a global scale, containing an assessment of it and a presentation of the financial data.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1. Ιστορική αναδρομή

Σε όλη την ιστορία, οι άνθρωποι αναζήτησαν υλικά για να βοηθήσουν στην επιβίωσή τους. Από νωρίς, οι άνθρωποι στράφηκαν στον φυσικό κόσμο για να βρουν υλικά όπως ξύλο, πέτρα και πηλό, τα οποία χρησιμοποίησαν για να δημιουργήσουν εργαλεία και δομές για να αντιμετωπίσουν τους φυσικούς τους περιορισμούς. Με το πέρασμα του χρόνου, επεκτάθηκαν οι ανάγκες των ανθρώπων και ανέπτυξαν διάφορες μεθόδους παραγωγής και επεξεργασίας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες.

Μερικά από τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο περιελάμβαναν υλικά όπως πηλό, πίσσα και συνθετικές ρητίνες. Στοιχεία για τη χρήση τέτοιων υλικών και ορισμένων τεχνικών κατασκευής μπορούν να ανιχνευθούν στην κεραμική από το 5000 π.Χ. Τα πρώτα ενισχυμένα πολυμερή υλικά φαίνεται να χρησιμοποιήθηκαν από τους Βαβυλώνιους μεταξύ 4000 και 2000 π.Χ. Γύρω στο 3000 π.Χ. στην Αίγυπτο και τη Μεσοποταμία, σχεδιάστηκαν για σκάφη που ήταν πρόδρομοι των σύγχρονων πλαστικών σκαφών, με ίνες γυαλιού που χρησιμοποιήθηκαν για ενίσχυση.

Γύρω στο 2500 π.Χ. στη Μεσοποταμία, βρέθηκε μια λύση για το πρόβλημα της κάλυψης τοίχων από τούβλα με την ενσωμάτωση πέτρινων ή πήλινων κώνων σε κρίσιμες περιοχές του τείχους. Αυτή η καινοτομία όχι μόνο παρείχε διακοσμητικό αποτέλεσμα αλλά και ενίσχυσε τη δομή του τοίχου.

Καθώς οι άνθρωποι άρχισαν να κατανοούν τη σχέση μεταξύ των δομικών στοιχείων των υλικών και των ιδιοτήτων τους, υπήρξε μια έκρηξη ανάπτυξης νέων υλικών τον περασμένο αιώνα. Με τις σύγχρονες τεχνικές κατασκευής και επεξεργασίας, μπορεί να παραχθεί ένα ευρύ φάσμα υλικών για να καλύψει τις απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας.[1]

Η ιστορία του χαρτιού είναι επίσης μια συναρπαστική ιστορία ανάπτυξης και εξέλιξης ενός φυσικού σύνθετου υλικού. Ο πάπυρος ήταν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό γραφής σε όλη την αρχαιότητα μέχρι το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Αυτό το υδρόβιο φυτό, φτάνοντας σε ύψος δύο έως τεσσάρων μέτρων, ήταν ιδιαίτερα άφθονο στις όχθες του Νείλου στην Αίγυπτο, καθώς και στη Σικελία, κοντά στις Συρακούσες. Η περγαμινή φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 197 π.Χ. από τον βασιλιά της Περγάμου, Ευμένη Β'. Το όνομα του νέου υλικού προήλθε από το όνομα αυτής της αρχαίας πόλης στη Μικρά Ασία.

Ωστόσο, η περγαμινή ήταν σπάνια και αρκετά ακριβή κατά τη διάρκεια του 8ου αιώνα μ.Χ. Ως αποτέλεσμα, η έρευνα άρχισε να βρίσκει ένα νέο υλικό γραφής. Χρειάστηκαν πολλοί αιώνες μέχρι την ανακάλυψη και τη χρήση του χαρτιού στην Ευρώπη, μιας μεθόδου κατασκευής γνωστής στους Κινέζους αιώνες νωρίτερα (220-210 π.Χ.). Η εφεύρεση του χαρτιού πέρασε από τους Ασιάτες στους Αββασίδες Άραβες και από τον 12ο αιώνα στους Ιταλούς. Μέχρι τα τέλη του 15ου αιώνα, όλες οι ευρωπαϊκές πόλεις ήταν εύκολα εφοδιασμένες με χαρτί, με αποκορύφωμα τη γέννηση της τυπογραφίας το 1440 χάρη στον Γουτεμβέργιο. [1].

Πίνακας 1.1: Η ιστορική εξέλιξη των πολυμερικών σύνθετων υλικών κατά αύξουσα χρονική σειρά.

Πίνακας 1.1. Ιστορική ανάπτυξη πολυμερικών σύνθετων υλικών [1].

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

Η εισαγωγή σύνθετων υλικών στη βιομηχανία σηματοδότησε ένα σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη σύγχρονων υλικών. Το πρώτο συνθετικό πολυμερές δημιουργήθηκε στις αρχές του 1900, γεγονός που οδήγησε σε ταχεία ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων στην αεροδιαστημική βιομηχανία για υλικά που θα μπορούσαν να αντέξουν σκληρά περιβάλλοντα όπως η εξερεύνηση του διαστήματος. Τα σύνθετα υλικά βρήκαν γρήγορα πολλές εφαρμογές στους τομείς της αεροναυπηγικής και της ναυπηγικής, ειδικά το 1939 κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Το πρώτο προϊόν ενισχυμένων πολυμερών ήταν ένα κάλυμμα κύτους σκάφους στη δεκαετία του 1930. Μετά από αυτή την ανακάλυψη, εμφανίστηκαν διάφορα προϊόντα βασισμένα σε ενισχυμένα πολυμερή, όπως αλεξίσφαιρα γιλέκα Kevlar, πλαστικοί εξοπλισμοί τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για το ερευνητικό πρόγραμμα του Μανχάταν στον Β' Παγκοσμίου Πολέμου και η επακόλουθη ανάπτυξη τεχνολογίας οδήγησε στη δημιουργία πυραυλικών κινητήρων και δεξαμενών στις δεκαετίες του 1960 και του 1970.

Παρόμοια πρόοδος σημειώθηκε στον κατασκευαστικό κλάδο, όπου ενισχυμένα πολυμερή αποτελούμενα από δέσμες ινών ενσωματωμένες σε μήτρα ρητίνης χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε έργα υποδομής τη δεκαετία του 1960, κυρίως ως ενίσχυση για υπάρχουσες γέφυρες και αργότερα ως κύριο υλικό ενίσχυσης για νέες κατασκευές. Σήμερα, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αιολική ενέργεια, ο αθλητικός εξοπλισμός και οι κατασκευές, για να αναφέρουμε μερικές. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, η αντοχή στη διάβρωση και η εξαιρετική απόδοση κόπωσης, τα καθιστούν μια ελκυστική επιλογή για διάφορες βιομηχανίες. [2]

1.2. Ορισμός

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διακριτά μέρη (φάσεις) που είναι διασυνδεδεμένα. Γενικά, ένα πολυφασικό υλικό μπορεί να οριστεί ως οποιοδήποτε υλικό που παρουσιάζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες των επιμέρους συστατικών του, επιτυγχάνοντας τον βέλτιστο συνδυασμό των ιδιοτήτων τους [3].

Για τα σύνθετα υλικά ισχύει η αρχή της συνδυασμένης δράσης, σύμφωνα με την οποία οι ιδιότητες του παραγόμενου σύνθετου υλικού είναι ένας συνδυασμός των ιδιοτήτων των μεμονωμένων φάσεων του. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρέπει να γίνουν συμβιβασμοί, με βάση την προαναφερθείσα αρχή, οι ιδιότητες του υλικού που κατασκευάζεται είναι το αποτέλεσμα του επιλεκτικού συνδυασμού δύο ή περισσότερων διακριτών υλικών.

Η δομή ενός υλικού μπορεί να μελετηθεί μακροσκοπικά (με γυμνό μάτι) ή με τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων όπως μικροσκόπια (μικροσκοπικά). Πολλές φορές στις ναυπηγικές εφαρμογές, ο μακροσκοπικός έλεγχος της δομής των υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντικός αφού ο μικροσκοπικός έλεγχος, λόγω των εξειδικευμένων οργάνων που απαιτούνται και του αυξημένου κόστους, δεν προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Οι ιδιότητες ενός υλικού είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της καταλληλότητάς του για μια δεδομένη εφαρμογή και δεν καθορίζονται αποκλειστικά από το σχήμα και το μέγεθός του. Αυτές οι ιδιότητες υπαγορεύουν τη διάρκεια ζωής, τη λειτουργικότητα και τη συνολική καταλληλότητα του υλικού για την προβλεπόμενη χρήση. Ενώ όλα τα υλικά διαθέτουν ορισμένα φυσικά χαρακτηριστικά ή γνωρίσματα, οι θεμελιώδεις ιδιότητες των στερεών υλικών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε θερμικές, μηχανικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες είναι απαραίτητες για την κατανόηση κατά την επιλογή υλικών για συγκεκριμένες εφαρμογές.

- **Σκληρότητα:** Η ιδιότητα που εκφράζει τη δυνατότητα ενός υλικού να χαράζει ή να χαράζεται. Η μέτρηση της σκληρότητας γίνεται με την εμπειρική σκληρομετρική κλίμακα Μος (Mohs). Το πιο σκληρό ορυκτό είναι το διαμάντι (10 στην κλίμακα Μος) ενώ το λιγότερο σκληρό ο τάλκης (1 στην κλίμακα Μος).
- **Ελαστικότητα:** Η ιδιότητα που έχουν τα υλικά να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα αφού σταματά να ενεργεί πάνω τους τάση που τους προκαλούσε παραμόρφωση. Συνήθως την προσδιορίζουμε μετρώντας το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus),
- **Ευθραυστότητα:** Η ιδιότητα που μας δείχνει πόσο εύκολα θραύεται (σπάει) ένα υλικό.
- **Πυκνότητα:** Η ιδιότητα που εκφράζει τη μάζα ενός υλικού που περιέχεται σε ορισμένο όγκο. Δίνεται από τον τύπο

$$\rho = \frac{m}{V}$$
 και η μονάδα μέτρησης είναι συνήθως gr/cm^3 .
- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα:** Η ιδιότητα που εκφράζει το κατά πόσο το υλικό επιτρέπει στο ηλεκτρικό ρεύμα να περνάει με ευκολία μέσα από αυτό.
- **Θερμική αγωγιμότητα:** Η ιδιότητα που εκφράζει το κατά πόσο το υλικό επιτρέπει στη θερμότητα να περνάει με ευκολία μέσα από αυτό.

Στη μηχανολογία, τα υλικά επιλέγονται με βάση την ικανότητά τους να αντέχουν τα αναμενόμενα φορτία κατά τη χρήση. Οι τύποι φορτίων περιλαμβάνουν τάση, συμπίεση, διάτμηση, κάμψη και στρέψη. Μόλις ολοκληρωθεί η μελέτη αυτών των φορτίων, επιλέγονται υλικά με κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες, τα οποία καθορίζουν τη συμπεριφορά των δομικών υλικών υπό φορτίο ή περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται ως κύρια χαρακτηριστικά αξιολόγησης είναι η ελαστικότητα, η ακαμψία και η αντοχή υπό στατικά (π.χ. στρέψη) ή δυναμικά (π.χ. έκρηξη) φορτία. Εκτός από τη δομή και τις ιδιότητες, δύο επιπλέον βασικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την

εξέταση ενός υλικού είναι η επεξεργασία που έχει υποστεί και η αποτελεσματικότητά του, με την τελευταία να είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων του.[3]

1.3. Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηριζόμενο ως συστατικό ενίσχυσης, προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, το οποίο καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του.

1.3.1. Μητρική φάση

Στα σύνθετα υλικά, η μήτρα αποτελεί έναν συνδετικό παράγοντα μεταξύ των ινών και συμβάλλει στη διανομή των εξωτερικά εφαρμοζόμενων τάσεων στις ινώδεις ενίσχυσεις. Παρά την πλαστικότητα της μητρικής φάσης, η αντοχή της σε φορτία είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή της ενίσχυσης, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να αντέχει μόνο σε μικρό ποσοστό του φορτίου που ασκείται στο σύνθετο.

Η μητρική φάση μπορεί να είναι μεταλλική, πολυμερής ή κεραμική, αλλά έχει συνήθως μεγαλύτερη πλαστικότητα από την ενισχυτική φάση και συμβάλλει σημαντικά στην μείωση της διάδοσης ρωγμών. Με τη βοήθεια της μητρικής φάσης, τα ινωδή σύνθετα υλικά μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμα και αν ένα ποσοστό των ινών έχει υποστεί θραύση.

Οι συγκολλητικές δυνάμεις ανάμεσα στη μητρική φάση και τις ινώδεις ενίσχυσεις είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της. Το φαινόμενο εξώθησης (pull-out) των ινών αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των ινωδών σύνθετων υλικών. Αυτό συμβαίνει όταν οι συγκολλητικές δυνάμεις μεταξύ της μήτρας και των ινών είναι ανεπαρκείς και επιτρέπουν στις ίνες να εξέλθουν από τη μήτρα, με αποτέλεσμα να περιοριστεί η

αντοχή του υλικού στην τάση. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η επίστρωση της επιφάνειας των ινών με υλικά που αυξάνουν την πρόσφυση με τη μήτρα ή με τη χρήση άλλων τεχνικών όπως η θέρμανση ή η επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων.

Επιπλέον, η μήτρα μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του υλικού στον κρότο. Ο κρότος αναφέρεται στην ικανότητα ενός υλικού να αντέχει σε πτώση του σφαιρικού βάρους σε συγκεκριμένο ύψος.

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διακριτά μακροσκοπικά συστατικά, ένα από τα οποία είναι γνωστό ως ενισχυτικό συστατικό και παρέχει στο σύνθετο υλικό βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, γνωστό ως μήτρα, είναι συνήθως χαμηλότερης πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη αξιοποίηση των ιδιοτήτων του.

Η μήτρα παίζει σημαντικό ρόλο στα σύνθετα υλικά καθώς λειτουργεί ως συνδετικός παράγοντας μεταξύ των ινών, μεταφέροντας και κατανέμοντας εξωτερικά εφαρμοζόμενες καταπονήσεις σε αυτές. Έχει μειωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με το ενισχυτικό στοιχείο, οπότε μπορεί να δεχτεί μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό του φορτίου που εφαρμόζεται στο σύνθετο. Η μήτρα προστατεύει επίσης τις ίνες από τις επιπτώσεις του περιβάλλοντος περιβάλλοντος, όπως η ζημιά στην επιφάνεια και η φθορά που προκαλείται από χημικές ουσίες.

Η μήτρα σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες μπορεί να είναι μεταλλική, πολυμερής ή κεραμική, αλλά σε κάθε περίπτωση έχει μεγαλύτερη πλαστικότητα από τη φάση ενίσχυσης. Η πλαστικότητα της μήτρας συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της διάδοσης των ρωγμών. Σε σημαντικό αριθμό περιπτώσεων αστοχίας, τα ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμη και αν ένα ποσοστό των ινών έχει σπάσει, χάρη στη μήτρα.

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της μήτρας είναι οι συγκολλητικές δυνάμεις μεταξύ αυτής και των ενισχυτικών ινών. Σε

περίπτωση που οι συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ του υλικού μήτρας και του οπλισμού αποδυναμωθούν, μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο έλξης των ινών.

Οι βασικές κατηγορίες υλικών μήτρας περιλαμβάνουν τα θερμοπλαστικά, τα οποία είναι πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες, όπως το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυστυρένιο (PS), τα οποία είναι χαμηλού κόστους και χρησιμοποιούνται ευρέως. και θερμοσκληρυνόμενα υλικά, τα οποία περιλαμβάνουν πολυεστερικές, εποξειδικές ή φαινολικές ρητίνες και χρησιμοποιούνται όταν τίθενται υψηλότερες απαιτήσεις σε μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή στη θερμότητα.

Το υλικό μήτρας καθορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του τελικού προϊόντος, καθώς είναι λιγότερο ανθεκτικό σε μεγάλες αλλαγές θερμοκρασίας, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στα αρχικά στάδια σχεδιασμού. Η αντοχή της μήτρας επηρεάζεται από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Η αποτυχία της μήτρας σχετίζεται άμεσα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της και ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ινών.

Ανάλογα με τη μορφή του ενισχυτικού συστατικού, τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: σύνθετα ενισχυμένα με ίνες, σύνθετα ενισχυμένα με σωματίδια και δομικά υλικά. Η καινοτομία των τελευταίων ετών είναι η εμπορική διάθεση πολυεστερικής ρητίνης αναμειγμένης με βινυλεστέρα, με αποτέλεσμα μήτρες με υψηλές μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες με εποξειδικές.

1.3.2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών αποτελούνται από πολυμερείς μήτρες και ινώδη ενίσχυση, όπως νήματα, ίνες, σύρματα και νανοράβδους, νανοκαλώδια και νανοσωλήνες. Οι ίνες είναι πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά με μικρή διάμετρο σε σχέση με το μήκος τους και αποτελούν την ινώδη φάση του συνθέτου υλικού. Η μικρή διάμετρος των ινών τους χαρίζει μεγάλη αντοχή και ανθεκτικότητα στην κατασκευή. Στην κατηγορία των ινώδους ενισχύσεων ταξινομούνται οι νήματα, οι

ίνες, τα σύρματα και οι νανοράβδοι, νανοκαλώδια και νανοσωλήνες. Η επιλογή της ιδανικής ινώδους ενίσχυσης εξαρτάται από την επιθυμητή χρήση και τις μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται για το τελικό προϊόν.

Οι ίνες ορίζονται ως υλικά με μικρή διάμετρο σε σύγκριση με το μήκος τους. Στα σύνθετα υλικά, οι ίνες λειτουργούν ως ενισχυτική φάση. Οι ίνες είναι πολύ πιο ανθεκτικές από το αντίστοιχο υλικό από το οποίο κατασκευάζονται λόγω της μικρής διαμέτρου τους. Οι ίνες ταξινομούνται σε έξι κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων των νημάτων, των ινών, των καλωδίων, των νανοσωλήνων, των νανοςύρματος και των νανοσωλήνων. Όταν η αναλογία μήκους προς διάμετρο μιας ίνας είναι μεγάλη (μεγαλύτερη από 100), ονομάζεται συνεχής ή μακρά ίνα, ενώ οι ίνες με μικρή αναλογία μήκους προς διάμετρο (μικρότερη από 100) ονομάζονται βραχείες ή ασυνεχείς ίνες. Το μειονέκτημα των ασυνεχών ινών είναι ότι ο προσανατολισμός τους δεν μπορεί να προσδιοριστεί με σαφήνεια, με αποτέλεσμα μια τυχαία τοποθέτηση σε κάθε επίπεδο στρώμα. Οι συγκρίσεις διαφορετικών ινών γίνονται συχνά χρησιμοποιώντας μέτρα αντοχής και ελαστικότητάς τους. Αυτές οι τιμές συχνά μειώνονται σε ειδική αντοχή και συγκεκριμένο μέτρο από την πυκνότητα.

Τα σύνθετα υλικά είναι συνήθως ανισοτροπικά λόγω του προσανατολισμού των ενισχυτικών ινών τους, γεγονός που επηρεάζει έντονα τις μηχανικές τους ιδιότητες. Για να εξασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα των σύνθετων υλικών, το κλάσμα όγκου των ενισχυτικών ινών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 80% του τελικού προϊόντος. Τα υβριδικά σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούνται από συνδυασμό διαφορετικών τύπων ινών, χρησιμοποιούνται συχνά για την επίτευξη ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων.

Ωστόσο, η αστοχία ινών μπορεί να συμβεί σε σύνθετα υλικά ακόμη και όταν υποβάλλονται σε φορτία κάτω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη αντοχή τους. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί από τοπική ετερογένεια υλικού κατά μήκος των ινών, η οποία μπορεί να προκύψει από ελαττώματα που εισήχθησαν κατά τη διαδικασία κατασκευής. Για να αντιμετωπίσουν αυτό το ζήτημα, οι ερευνητές μπορούν να μελετήσουν την αποτυχία των ινών σε μεμονωμένες ίνες για να κατανοήσουν καλύτερα τους υποκείμενους μηχανισμούς.

Όταν οι ίνες αποτυγχάνουν, μπορεί να συμβεί συσσώρευση στρες, οδηγώντας ενδεχομένως σε αποτυχία των υπόλοιπων ινών και του υλικού μήτρας. Έτσι, η κατανόηση της αστοχίας των ινών είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των σύνθετων υλικών. [9].

Διάφορες μέθοδοι καταστρεπτικών και μη καταστρεπτικών δοκιμών έχουν αναπτυχθεί για την ανίχνευση μικροσυστοιχιών, οι οποίες συχνά συνδυάζονται για να αποκτήσουν πιο ακριβή αποτελέσματα. Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων του σχεδιασμού σύνθετων υλικών, χρησιμοποιούνται συχνά αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για την πρόβλεψη πιθανών αστοχιών στο σύνθετο υλικό μέσω στατικών μαθηματικών μοντέλων. Αν και υπάρχει αυξημένη υπολογιστική ισχύς διαθέσιμη σήμερα, δεν μπορεί να γίνει ακριβής πρόβλεψη λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών που εμπλέκονται σε κάθε πρόβλημα υπό πραγματικές συνθήκες.

Μήκος ίνας

Το μήκος της ίνας είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Καθορίζει τον τρόπο μεταφοράς του εφαρμοζόμενου φορτίου στο υλικό από τη μήτρα στις ενισχυτικές ίνες. Υπάρχει ένα συγκεκριμένο κρίσιμο μήκος ινών που πρέπει να επιτευχθεί για να αυξηθεί η αντοχή και η ακαμψία του σύνθετου υλικού [5,10]. Το κρίσιμο μήκος ινών μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο, ο οποίος σχετίζεται με την αντοχή του δεσμού ινών-μήτρας και τη διάμετρο της ίνας:

$$L_c = (\sigma_f \times d) / (2 \tau_c)$$

Οπού,

L_c : είναι το κρίσιμο μήκος της ίνας,

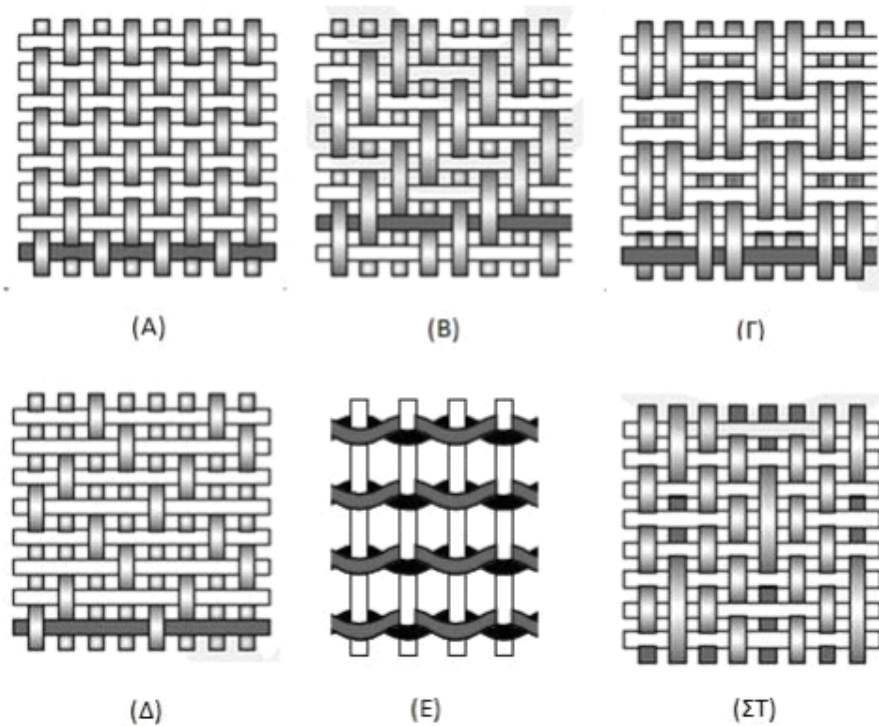
d : η διάμετρος της,

σ_f : η μέγιστη εφελκυστική τάση

τ_c : η διατμητική τάση ή η αντοχή δεσμού ίνας - μήτρας (χρησιμοποιείται το μικρότερο μέγεθος από τα δύο).

Οι ίνες για τις οποίες ισχύει ότι $L \gg L_c$ χαρακτηρίζονται ως συνεχείς διαφορετικά θεωρούνται ασυνεχείς ή κοντές ίνες.

Για τη χρήση ινών σε σύνθετα υλικά, έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία τύπων υφασμάτων. Ωστόσο, οι πέντε βασικοί τύποι ύφανσης που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι η απλή ύφανση, το twill, το σατέν, η πλέξη καλαθιού και το leno (Σχήμα 1.1) [5, 10, 11]. Η απλή ύφανση είναι η πιο κοινή και χαρακτηρίζεται από τη σταθερότητά της, με τις ίνες στημονιού και υφαδιού να διασταυρώνονται κάθετα και να τοποθετούνται εναλλάξ η μία πάνω στην άλλη (Σχήμα 1.1A). Η ύφανση Twill διακρίνεται από την εμφάνιση διαγώνιων γραμμών, οι οποίες δίνουν επίσης στην ύφανση το όνομά της. Σε σύγκριση με την απλή ύφανση, το twill έχει υψηλότερη πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας (Σχήμα 1.1B). Η σατέν ύφανση χρησιμοποιείται στην παραγωγή σύνθετων υλικών, με τις ίνες στημονιού να κυριαρχούν στην μπροστινή επιφάνεια (Σχήμα 1.1Γ). Η ύφανση καλαθιού είναι μια παραλλαγή της απλής ύφανσης, στην οποία δύο ή περισσότερες ίνες στημονιού διασταυρώνονται με τις αντίστοιχες ίνες υφαδιού (Σχήμα 1.1D). Η ύφανση Leno ελαχιστοποιεί τη μετατόπιση των ινών (Σχήμα 1.1E, F) [5, 10, 11]. Η επιλογή της ύφανσης επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού και πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά με βάση την προβλεπόμενη χρήση του.



Σχήμα 1.1. Απεικόνιση πέντε βασικών τύπων πλέξης που συναντώνται συχνά στα ενισχυτικά υφάσματα που παράγονται βιομηχανικά [10].

Προσανατολισμός ινών

Ο προσανατολισμός των ινών επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά ενός ινώδους σύνθετου υλικού. Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών, δημιουργούνται δύο βασικές κατηγορίες υλικών: Τα ινώδη σύνθετα στα οποία οι ίνες προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση και τα ινώδη σύνθετα στα οποία οι ίνες προσανατολίζονται σε διάφορες διευθύνσεις, όπως ίνες σε τυχαία διεύθυνση, πλέξη ύφανσης και ίνες με τρισσορθογωνική ύφανση. Η επιλογή του προσανατολισμού πρέπει να γίνεται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές απαιτήσεις που θέλουμε να έχει το τελικό προϊόν. Η προσανατολισμένη σε μία κατεύθυνση ίνα παρέχει μεγαλύτερη αντοχή και σκληρότητα, ενώ οι ίνες που προσανατολίζονται σε διάφορες διευθύνσεις παρέχουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάτμηση και εξασφαλίζουν ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στο σύνθετο υλικό. [5]

1.3.2.1. Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού

Τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού είναι ένας τύπος σύνθετου πολυμερούς υλικού που χρησιμοποιεί γυαλί ως υλικό ενίσχυσης. Οι ίνες μπορούν να είναι είτε σε συνεχή είτε σε ασυνεχή μορφή και συνήθως έχουν διάμετρο μεταξύ 3 και 20 μικρομέτρων. Το Fiberglass εισήχθη για πρώτη φορά το 1940 και συνεχίζει να είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά στον τομέα των σύνθετων υλικών.

Οι ίνες γυαλιού έχουν την ίδια μοριακή δομή με το γυαλί που βρίσκεται σε άλλα σχήματα όπως πλάκες και ράβδοι και θεωρούνται ισότροπα υλικά. Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιότητές τους παρουσιάζουν την ίδια αξία προς κάθε κατεύθυνση στο διάστημα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ενισχύσεων από ίνες γυαλιού είναι η ευκολία μετατροπής τους από φύλλα γυαλιού σε ίνες υψηλής αντοχής, το χαμηλό κόστος παραγωγής και η υψηλή αντοχή. Όταν συνδυάζεται με διαφορετικούς τύπους πλαστικών, μπορεί να επιτευχθεί μια σειρά ιδιοτήτων.

Όσον αφορά τις ίνες γυαλιού, οι πιο συνηθισμένοι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι οι E, C και S (επίσης γνωστοί ως R), ενώ άλλοι τύποι συνδέονται συχνά με συγκεκριμένους κατασκευαστές και θεωρούνται εξειδικευμένες περιπτώσεις. Αυτοί οι τύποι ονομάζονται με βάση τις μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες. Για παράδειγμα, ο τύπος E προέρχεται από τη λέξη "Ηλεκτρικό", ο τύπος S από "Ακαμψία" και ο τύπος C από "Χημικός" ή "Διάβρωση", γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε σωληνώσεις πλοίου λόγω της υψηλής αντοχής του σε χημικά.

Ο τύπος E χρησιμοποιείται συχνότερα λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του, όπως η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη, η εύκολη επεξεργασία, η αντοχή στην υγρασία και την κρούση, καθώς και η ικανοποιητική χημική αντοχή [5]. Από την άλλη, οι ίνες τύπου S δεν χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του υψηλού κόστους τους.

Για να επιτευχθούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες, οι ίνες γυαλιού έχουν συνήθως αυξημένη περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου. Ο τύπος S έχει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με τον τύπο E, αλλά μπορεί να έχει έως και 20% αυξημένη αντοχή σε διάτμηση.

Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των ινών γυαλιού μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ιδιότητές τους. Η επιφανειακή τριβή ή τριβή, καθώς και η έκθεση στην ατμόσφαιρα για μικρό χρονικό διάστημα, μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους.

Οι ίνες γυαλιού συνήθως περιβάλλονται από ένα λεπτό στρώμα υλικού που παρέχει προστασία στην επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια της σύνθετης παραγωγής, αυτό το στρώμα αφαιρείται και αντικαθίσταται με παράγοντα σύζευξης ή φινίρισμα.

Η χρήση υαλοϊνών είναι δυνατή μέχρι θερμοκρασίες περίπου 200 °C, ενώ στην περίπτωση ινών πυριτίου από τήξη διοξειδίου του πυριτίου υψηλής καθαρότητας, η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να φτάσει έως και τους 300 °C.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται τραβώντας μια γυάλινη παρτίδα μέσω κατάλληλης μήτρας με διάτρητο πυθμένα [11]. Πρώτον, η γυάλινη παρτίδα τοποθετείται σε δεξαμενή όπου τήκεται. Στη συνέχεια τοποθετείται σε δοχεία με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπής 1-2 mm), όπου, υπό την επίδραση της βαρύτητας και με τη βοήθεια ενός απορροφητήρα, παράγονται ίνες διαμέτρου 1-15 μm. Τέλος, τυλίγονται σε κατάλληλο κύλινδρο για αποθήκευση. Για να ρυθμίσετε τη διάμετρο των ινών, ρυθμίζεται το επίπεδο της αρχικής παρτίδας, η πυκνότητα ή η διάμετρος των οπών.

1.3.2.2. Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα

Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRPs) χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές υψηλής ζήτησης. Είναι γνωστά για τα χαρακτηριστικά τους, τα οποία περιλαμβάνουν:

1. Υψηλότερο ειδικό συντελεστή ελαστικότητας και αντοχής σε σύγκριση με άλλες κοινές ενισχύσεις ινών.
2. Ικανότητα διατήρησης των μηχανικών ιδιοτήτων τους ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες.
3. Αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες.
4. Χαμηλότερη αντοχή σε τοπικές κρούσεις.

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ινών άνθρακα περιλαμβάνουν ρεγιόν, πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) και πίσσα πετρελαίου. Η διάμετρος των ινών κυμαίνεται από 4 έως 10 μικρόμετρα. Συχνά, εφαρμόζεται μια προστατευτική επίστρωση εποξειδικής ρητίνης στο τέλος της διαδικασίας παραγωγής ινών για τη βελτίωση της πρόσφυσης στη μήτρα. Οι ίνες αποτελούνται από ανισοτροπικούς πολυκρυσταλλίτες γραφίτη, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία κατασκευής τους.

Υπάρχουν τρία κύρια στάδια στην παραγωγή ινών άνθρακα με κύρια πρώτη ύλη το PAN:

1. Οξείδωση ινών PAN υπό τάση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες σε θερμοκρασία 100-200 °C.
2. Ενανθράκωση οξειδωμένων ινών υπό τάση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία 1100-1500 °C.
3. Θερμική επεξεργασία ανθρακισμένων ινών σε υψηλή θερμοκρασία σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα σε θερμοκρασίες 2500-3000 °C.

Ο πίνακας 1.2 δείχνει τα χαρακτηριστικά των ινών άνθρακα υψηλής αντοχής που παράγονται από τα δύο πρώτα στάδια που αναφέρονται παραπάνω, καθώς και των ινών υψηλού συντελεστή που παράγονται με την εφαρμογή και των τριών σταδίων.

Πίνακας 1.2 Μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών άνθρακα [7].

	Ίνες υψηλής αντοχής	Ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180 - 230	350 - 420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500 - 3400	1900 - 2300
Περιεκτικότητα σε C (%wt)	95 - 98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.8	1.9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι 10 φορές υψηλότερο από αυτό των ινών γυαλιού, γεγονός που δικαιολογεί την περιορισμένη χρήση τους. Η ονομασία των ινών άνθρακα ορίζεται αρχικά από το σχεδιασμό του νήματος, στη συνέχεια από τον τύπο και τέλος από τον αριθμό των νημάτων στο πολυϊνόχαρτο (ρυμούλκηση), εκφρασμένος σε χιλιάδες (π.χ. HR-12k, που σημαίνει ότι οι ίνες αυτού του ονόματος είναι υψηλής αντοχής (HS), τύπου R, και ο αριθμός των νημάτων στη ρυμούλκηση είναι 12 χιλιάδες).

1.3.2.3. Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου

Οι ίνες ενισχυμένες με αραμιδικά υλικά είναι γνωστές για την υψηλή αντοχή και ελαστικότητά τους, καθώς και για την υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος σε σύγκριση με τα μέταλλα. Η χημική ονομασία για την κατασκευή πολυμερών αυτών των ινών είναι παρα-φαινυλενοτεραφαμίδιο. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων ινών αραμιδίου, αλλά οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι οι Kevlar και Nomex, οι οποίες έχουν επίσης παραλλαγές που τους δίνουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με ίνες αραμιδίου έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και υψηλότερη ελαστικότητα στη διαμήκη κατεύθυνση, αλλά έχουν χαμηλότερη αντίσταση στη συμπίεση σε σύγκριση με τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με άλλους τύπους ινών.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν εξαιρετική αντοχή σε θραύση, αντοχή σε κρούση, ανίχνευση και κόπωση. Οι θερμοκρασίες στις οποίες οι μηχανικές τους ιδιότητες παραμένουν οι ίδιες κυμαίνονται από -200°C έως 200°C. Οι ίνες αραμιδίου είναι πιο δύσκολο να εμποτιστούν με ρητίνη σε σύγκριση με άλλους τύπους ενισχυτικών ινών. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar δίνονται στον πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3 Μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών Kevlar [7].

	<i>Kevlar 29</i>	<i>Kevlar 49</i>
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200

Άλλα υλικά ινώδους ενίσχυσης

Εκτός από τις πιο κοινές ίνες γυαλιού, άνθρακα και αραμιδίου, υπάρχουν και άλλες ύλες που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικές ίνες, αν και λιγότερο συχνά. Παραδείγματα αυτών των υλικών είναι το βόριο, το καρβίδιο πυριτίου και το οξείδιο του αλουμινίου. Ωστόσο, η λιγότερο ευρεία χρήση τους οφείλεται κυρίως σε οικονομικούς περιορισμούς. Παρά ταύτα, επιχειρούνται προσπάθειες για την αναζήτηση νέων υλικών, όπως μαλλί ζώων [61], που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικές ίνες σε σύνθετα με καλές προοπτικές για μελλοντική ανάπτυξη.

1.3.3. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκων/σωματιδίων

Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: εκείνα στα οποία ο οπλισμός αποτελείται από μεγάλα σωματίδια και

εκείνα στα οποία έχουμε ενίσχυση διασποράς. Συνήθως, η φάση σωματιδίων είναι πιο δύσκολη και έχει μεγαλύτερη ακαμψία από το υλικό της μήτρας.

Στην περίπτωση σύνθετων υλικών με μεγάλη ενίσχυση σωματιδίων, τα σωματίδια έχουν διάμετρο μερικών μικρομέτρων και είναι παρόντα σε ποσοστό μεγαλύτερο από 25%, με τη συγκέντρωση όγκου να κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 60-90%. Από την άλλη, τα μέταλλα ενισχυμένα με διασπορά είναι σύνθετα στα οποία η ενισχυτική φάση, συνήθως οξειδία, είναι παρούσα σε συγκεντρώσεις μικρότερες από 15% κατ'όγκο, με διάμετρο σωματιδίων που κυμαίνεται από 0,01 έως 0,1 μm . Και στις δύο περιπτώσεις, η ενίσχυση της μήτρας επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση της κίνησης ελαττωμάτων λόγω της παρουσίας σωματιδίων οπλισμού.

Γενικά, τα σύνθετα ενισχυμένα με σωματίδια είναι λιγότερο ανθεκτικά από τα σύνθετα ενισχυμένα με ίνες, καθώς η συμβολή των σωματιδίων στην αντοχή του σύνθετου υλικού είναι χαμηλότερη από αυτή των ινών. Ωστόσο, είναι χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με τα σύνθετα υλικά ινών και έχουν καλύτερη αντοχή στη φθορά λόγω της παρουσίας σκληρών σωματιδίων. [2]

Σύνθετα υλικά με κόκκους μεγάλου μεγέθους

Οι μαθηματικές σχέσεις (1.1) και (1.2) δίνουν το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου σε σχέση με το κλάσμα όγκου και τα μέτρα ελαστικότητας των συνιστωσών φάσεων, στην περίπτωση διφασικού σύνθετου υλικού με ενίσχυση κόκκων [5]. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν από τον κανόνα των αναμείξεων και δίνουν τη μέγιστη (upper) και την ελάχιστη (lower) τιμή του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου:

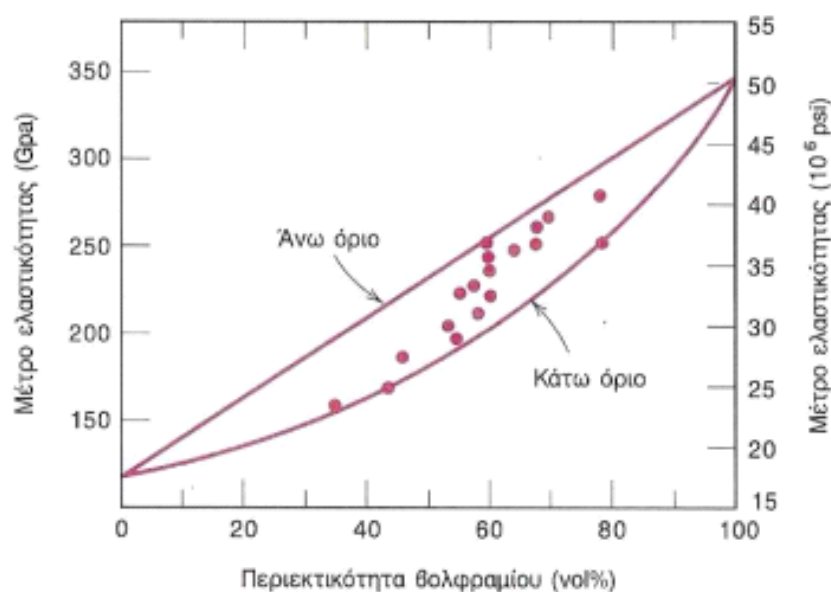
- Ανώτερο όριο μέτρου ελαστικότητας για ένα σύνθετο υλικό δύο φάσεων:

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (1.1)$$

- Κατώτερο όριο μέτρου ελαστικότητας για ένα σύνθετο υλικό δύο φάσεων:

$$E_c(l) = (E_m V_p) / (V_m E_p + V_p E_m) \quad (1.2)$$

Στις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις τα σύμβολα E και V δηλώνουν το μέτρο ελαστικότητάς και το κλάσμα όγκου αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες αναφέρονται στο σύνθετο υλικό (c), στη μήτρα (m) και στη κοκκώδη φάση (p). Το σχήμα 1.2 δείχνει το μέτρο ελαστικότητας σε δύο διαφορετικές μονάδες μέτρησης (GPa και psi), συναρτήσει της περιεκτικότητας βολφραμίου σε κατάλληλα δείγματα σύνθετου υλικού. Όπως φαίνεται, η αύξηση της περιεκτικότητας βολφραμίου επηρεάζει θετικά το μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 1.2 Το μέτρο ελαστικότητας συναρτήσκει του % ποσοστού κατ' όγκο σε βολφράμιο για ένα σύνθετο υλικό από σωματίδια βολφραμίου διεσπαρμένα σε μήτρα χαλκού. Τα άνω και κάτω όρια είναι σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.13) και (1.14). [3]

1.4. Μέθοδοι μορφοποίησης συνθέτων υλικών ενισχυμένα με ίνες

Η μέθοδος χύτευσης με συμπίεση περιλαμβάνει τη χρήση υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών για να ενώσει τη μήτρα και τις ίνες σε ένα συνθετικό υλικό. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την παραγωγή μικρού μεγέθους αντικειμένων με υψηλότερη αναλογία ίνας-μήτρας. Η περιέλιξη ινών είναι μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία. Αυτή η μέθοδος ενώνει τις ίνες σε έναν

κύλινδρο ή ένα φύλλο με μια περιτυλιγμένη μηχανή και έπειτα τοποθετεί το προϊόν σε ένα χώρο θερμού μήκους για να συγκολληθεί η μήτρα και οι ίνες. Η περιέλιξη ινών είναι κατάλληλη για την παραγωγή μεγαλύτερων αντικειμένων με χαμηλότερη αναλογία ίνας-μήτρας. Επιπλέον, οι μέθοδοι όπως η αποτύπωση, η αντιγραφή και η επίστρωση με ίνες είναι επίσης συχνές στη βιομηχανία σύνθετων υλικών.

1.4.1. Μέθοδοι επίστρωσης (Lay up techniques)

Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας επιλογής της μεθόδου κατασκευής με βάση τις επιθυμητές τελικές ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με το σχήμα, τη δύναμη, το μέγεθος και τον όγκο παραγωγής, επιλέγεται η μέθοδος συνδυασμού των βασικών δομικών στοιχείων τους και η τοποθέτησή τους σε καλούπι.

Μια σημαντική αντίθεση παρατηρείται εδώ με τα συμβατικά εξαρτήματα που κατασκευάζονται από υλικά όπως ο χάλυβας ή το ξύλο. Ενώ τα παραδοσιακά υλικά βάζονται μετά την παραγωγή για να παρέχουν ένα επιθυμητό φινίρισμα στην εξωτερική επιφάνεια, τα σύνθετα υλικά πρέπει να αποκτήσουν αυτό το φινίρισμα μέσω της εφαρμογής μιας ειδικής επίστρωσης εποξειδικής ρητίνης (gelcoat) κατά την τοποθέτηση των βασικών στοιχείων στο καλούπι.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι διαδικασιών: τοποθέτηση με το χέρι και ψεκασμός. Κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης με το χέρι, η θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη εφαρμόζεται συνήθως με έναν κύλινδρο σε ένα στρώμα ινών, που ονομάζεται στρώμα ινών ή στρώμα κλώνου, προκειμένου να γίνει το υλικό ομοιόμορφο και να αφαιρεθεί ο παγιδευμένος αέρας.

Όταν ψεκάζονται στο καλούπι, οι κοντές ίνες προωθούνται προς την επιφάνεια του καλουπιού είτε με τη ρητίνη είτε ξεχωριστά. Η τεχνική ψεκασμού ινών διαφέρει από την τεχνική lay-up χεριών στο ότι πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα ειδικό σπρέι και οι ίνες κόβονται σε μικρά κομμάτια αντί να υφαίνονται μαζί. Αν και η μέθοδος τοποθέτησης χεριών έχει κάποια βασικά μειονεκτήματα (χαμηλός όγκος

παραγωγής, ποιότητα ανάλογα με την ικανότητα του χειριστή κ.λπ.), εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευελιξίας της.

1.4.2. Τεχνικές μορφοποίησης με καλούπια (Moulding techniques)

Όλες οι μέθοδοι χύτευσης έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι ένα φύλλο ή φύλλα σύνθετου υλικού πιέζονται σε ένα καλούπι για να αποκτήσουν το επιθυμητό τελικό σχήμα. Πίεση, κενό ή και τα δύο μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτή τη διαδικασία. Η διαμόρφωση μπορεί επίσης να είναι ζεστή ή κρύα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή πίεσης (ή κενού) και θερμοκρασίας εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του υλικού καλουπιού.

Εάν το σύνθετο υλικό είναι θερμοπλαστικό, πρέπει να ψύχεται κάτω από το σημείο τήξης T_m ή τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g έτσι ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί από το καλούπι χωρίς να αλλάξει το σχηματισμένο σχήμα. Αυτό περιλαμβάνει μια διαδικασία χύτευσης με θέρμανση, χύτευση υπό πίεση και ψύξη υπό πίεση. Εάν το καλούπι είναι κατασκευασμένο από θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται για ορισμένο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χύτευσης για να δημιουργηθεί μια σταθερή δομή στο υλικό μετά τη σκλήρυνση. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία χύτευσης σε αυτήν την περίπτωση είναι θέρμανση, χύτευση υπό πίεση και σκλήρυνση υπό πίεση. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά θερμοσκληρυνόμενης μήτρας βγαίνουν από το καλούπι ζεστά, αλλά μπορεί να προβλεφθεί μια διαδικασία απόψυξης.

Υπάρχουν τρεις τύποι πίεσης που μπορούν να εφαρμοστούν σε σύνθετα υλικά κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να συμπιεστούν με άμεση επαφή με την κορυφή του καλουπιού, η οποία είναι κλειστή κατά τη διάρκεια της χύτευσης με συμπίεση. Ακόμη και αμέσως μετά το κλείσιμο του καλουπιού, το σύνθετο υλικό μπορεί να συμπιεστεί με αδρανές αέριο ή αέρα, οπότε πραγματοποιείται χύτευση υπό πίεση. Τέλος, είναι δυνατό να δημιουργηθεί κενό στο

καλούπι για να δημιουργηθεί αρνητική πίεση και να ωθηθεί το σύνθετο υλικό στο τελικό του σχήμα. Ως εκ τούτου, ορισμένες τεχνικές συμπίεσης αναφέρονται ως "ψυχρή συμπίεση" όταν το καλούπι βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου και "θερμή συμπίεση" όταν το καλούπι βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία.

1.4.3. Τεχνικές χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (Resin Transfer Moulding or RTM)

Η χύτευση μεταφοράς ρητίνης (RTM) είναι ένας τύπος τεχνολογίας χύτευσης που διαφέρει από την παραδοσιακή χύτευση στο ότι η ρητίνη δεν υπάρχει στην άνω κοιλότητα του κλειστού καλουπιού. Αντ' αυτού, η ρητίνη περιέχεται σε ξεχωριστό δοχείο και μεταφέρεται υπό πίεση μέσω σωλήνων στο κλειστό καλούπι.

Πριν μεταφερθεί η ρητίνη, το καλούπι παρασκευάζεται με την εφαρμογή σκληρυντικού και ενδεχομένως πηκτώματος. Η ενίσχυση μπορεί να αποτελείται από ίνες οποιουδήποτε τύπου και σχήματος, με διάφορους τύπους υφασμάτων συνεχών και κοντών ινών. Είναι επίσης δυνατό να ψεκάσετε τις κοντές ίνες στην εσωτερική επιφάνεια του καλουπιού, διατηρώντας έτσι τις ίνες μέσα στο καλούπι.

Η ρητίνη μπορεί να παρασκευαστεί με δύο τρόπους. Μπορεί να αναμιχθεί εκ των προτέρων με τον κατάλληλο καταλύτη, να τοποθετηθεί σε ένα δοχείο και στη συνέχεια να μεταφερθεί από εκεί στο καλούπι. Εναλλακτικά, η ρητίνη και ο καταλύτης μπορούν να τοποθετηθούν σε ξεχωριστά δοχεία, να αναμειχθούν εκ των προτέρων σε ειδική ζώνη ανάμιξης και στη συνέχεια να μεταφερθούν στο καλούπι.

Δημιουργώντας ένα κενό στο καλούπι, ο αέρας στο καλούπι εξαλείφεται, εξαλείφοντας έτσι τα ελαττώματα στο καλούπι. Η ρητίνη στη συνέχεια μεταφέρεται στο καλούπι, όπου διασκορπίζεται και εμποτίζεται στη μάζα των ινών, με αποτέλεσμα ένα ομοιογενές υλικό. Μετά την έγχυση της ρητίνης, το καλούπι ασφαρίζεται και ασκείται πίεση στο εσωτερικό του υλικού, το οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται και σκληρώνεται.

Παραλλαγές της μεθόδου RTM

Η μέθοδος SCRM στηρίζεται στη χρήση ενός διάτρητου σώματος, το οποίο τοποθετείται στο καλούπι. Η ρητίνη και οι ίνες τοποθετούνται στο διάτρητο σώμα και ρέουν στο καλούπι υπό πίεση. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε μεγάλα κομμάτια και η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την παραγωγή μικρών εξαρτημάτων.

Η μέθοδος VARTM χρησιμοποιεί τη βοήθεια του κενού για τη μεταφορά της ρητίνης στο καλούπι. Η ρητίνη και οι ίνες τοποθετούνται σε μια τσάντα από πολυαιθυλένιο και στη συνέχεια τοποθετείται επάνω στο καλούπι. Μια αντλία χρησιμοποιείται για να απομακρύνει τον αέρα από το κενό που δημιουργείται κάτω από την τσάντα. Η ρητίνη εισέρχεται στο καλούπι υπό πίεση και εμποτίζει τις ίνες, δημιουργώντας το τελικό προϊόν. Αυτή η μέθοδος είναι ιδανική για την παραγωγή μεγάλων κομματιών με σύνθετες γεωμετρίες.

1.4.4. Αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης

Ο όρος "αεροστεγανότητα" χρησιμοποιείται ως ελεύθερη μετάφραση των "Τεχνικών Χύτευσης Τσαντών" για να περιγράψει τις τεχνικές διαμόρφωσης που εξετάζονται στην αγγλική βιβλιογραφία. Αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν την τοποθέτηση σύνθετου υλικού μεταξύ ενός αεροστεγούς καλύμματος και ενός καλουπιού κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Αυτό απομονώνει το συστατικό που πρόκειται να κατασκευαστεί από τα αέρια υπό πίεση και τα κενά που δημιουργούνται κατά τη χύτευση. Το κάλυμμα μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα πολυμερή ή υπερπλαστικά κράματα μετάλλων.

Οι μέθοδοι χύτευσης σακούλας αυτόκλειστου προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία και ποιότητα κατασκευής. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου ο όγκος παραγωγής δεν είναι μεγάλος, αλλά δεν υπάρχει ανάγκη αύξησης των ποσοτήτων. Η τεχνολογία περιλαμβάνει τη διαμόρφωση σύνθετων υλικών με την εφαρμογή πίεσης ή κενού και θερμοκρασίας σε ένα θηλυκό καλούπι (το οποίο απαιτεί ειδική προετοιμασία) σε

αεροστεγές θάλαμο με βάση μια καμπύλη διαμόρφωσης σύμφωνα με τις ιδιότητες του υλικού.

Η διαμόρφωση υπό πίεση ή κενό πραγματοποιείται χωρίς αυτόκαυστο, χρησιμοποιώντας μόνο πίεση ή μόνο κενό, με καπάκι στεγανοποίησης. Αυτές οι δύο μέθοδοι μειώνουν σημαντικά το κόστος και τις απαιτήσεις εξοπλισμού. Επομένως, εάν δεν απαιτείται αξιοπιστία αυτόκλειστου, αυτές οι δύο μέθοδοι μπορούν να παράγουν πολύ καλά αποτελέσματα.

Από τις δύο μεθόδους, η διαμόρφωση υπό κενό έχει τους λιγότερους περιορισμούς όσον αφορά το μέγεθος των συστατικών που πρόκειται να παραχθούν.

Η τεχνολογία υπερπλαστικού σχηματισμού δεν χρησιμοποιεί κενό ή καπάκι για τη διαμόρφωση πίεσης σε σύνθετο υλικό. Η τεχνολογία δανείστηκε από υπερπλαστικά κράματα Al και Ti και αναπτύχθηκε κυρίως για θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά. Τα υπερπλαστικά υλικά είναι υλικά που μπορούν και δίνουν παραμορφώσεις πάνω από 200% με θερμοδιαμόρφωση μετάλλων με χαμηλή επιμήκυνση σε θερμοκρασία θραύσης σε θερμοκρασία δωματίου (μικρότερη από 20%) σε διπλή επιμήκυνση στο σημείο θραύσης από αυτή που απαιτείται στις κανονικές δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό.

1.4.5. Μορφοποιήσεις με περιστροφή

Στις περισσότερες διαδικασίες κατασκευής, το καλούπι παραμένει γενικά ακίνητο ενώ λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες επικάλυψης και διαμόρφωσης σύνθετων υλικών. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες διαδικασίες κατασκευής υψηλής τεχνολογίας όπου το καλούπι δεν παραμένει ακίνητο, αλλά αντίθετα περιστρέφεται γύρω από έναν ή περισσότερους άξονες. Είναι επίσης δυνατό τμήματα του εξοπλισμού διαμόρφωσης να περιστρέφονται γύρω από το καλούπι. Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι τα κλειστά αξονικά σχήματα όπως κώνοι, κυλινδρικές δεξαμενές και σωλήνες μπορούν να κατασκευαστούν με χαμηλό κόστος και υψηλή ακρίβεια.

Φυγοκεντρικός σχηματισμός

Ο φυγοκεντρικός σχηματισμός είναι η απλούστερη από όλες τις μεθόδους διαμόρφωσης. Απαιτεί φθινό εξοπλισμό, μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί και είναι μια σχετικά γρήγορη μέθοδος διαμόρφωσης. Η κινητήρια δύναμη για τη χύτευση είναι η φυγόκεντρος δύναμη που ασκείται στη ρητίνη καθώς το καλούπι περιστρέφεται. Η φυγόκεντρος δύναμη εξασφαλίζει τον ομοιόμορφο εμποτισμό της ρητίνης στο στρώμα ινών του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ομοιόμορφη κατανομή του πάχους του υλικού. Τέλος, με τη βοήθεια της φυγόκεντρης δύναμης, το ύφασμα των ινών στερεοποιείται. Το υφαντό ύφασμα μπορεί να έχει οποιαδήποτε από τις ήδη γνωστές μορφές, όπως υφασμένα μακριές ίνες, στρώματα κοντών ινών, υβρίδια κ.λπ. Η ρητίνη μπορεί να είναι θερμοπλαστική ή θερμοσκληρυνόμενη.

Περιστροφική Χύτευση

Η μέθοδος περιστροφικής χύτευσης είναι πιο σύνθετη από τη μέθοδο της φυγοκεντρικής χύτευσης, καθώς το καλούπι ψύχεται, αλλά βασίζεται επίσης στη χρήση φυγοκεντρικής δύναμης. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη θερμοσκληρυνόμενη χύτευση προϊόντων, αλλά τώρα είναι διαθέσιμη για μια ποικιλία θερμοπλαστικών μητρών (π.χ. PET, νάιλον). Οι εφαρμογές του είναι γενικά πιο σύνθετες από την απλή μέθοδο φυγοκεντρικής χύτευσης.

Μέθοδος περιέλιξης νήματος

Η κύρια διαφορά μεταξύ της μεθόδου περιέλιξης νήματος και άλλων μεθόδων είναι ότι εδώ το καλούπι και η συσκευή διαμόρφωσης περιστρέφονται, σε ορισμένες περιπτώσεις, γύρω από αυτό. Έτσι, η κατασκευή εξαρτημάτων επιτυγχάνεται με την περιέλιξη ινών ή προ-εμποτισμένων σύνθετων ινών σε ένα τύμπανο, το οποίο είναι επίσης το καλούπι της συσκευής διαμόρφωσης. Είναι κατάλληλο για την κατασκευή

αξονομετρικών σχημάτων, όπως δεξαμενές καυσίμου πυραύλων, δοχεία πίεσης και δεξαμενές αποθήκευσης αερίου. Οι ίνες μπορούν να είναι οποιουδήποτε τύπου αρκεί να έχουν συνεχή σχήματα και η μήτρα μπορεί να είναι κατασκευασμένη από θερμοσκληρυνόμενες ή θερμοπλαστικές οργανικές ίνες. Η διαδικασία περιέλιξης ινών μπορεί να χωριστεί σε δύο τύπους, ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για τον εμποτισμό των ινών με ρητίνη. Έτσι, εάν οι ίνες εμποτιστούν πριν τυλιχτούν σε ένα τύμπανο, ονομάζεται ξηρή περιέλιξη. Εάν διαβρέχονται με ρητίνη μετά την περιέλιξη σε ένα τύμπανο, ονομάζεται υγρή περιέλιξη. Ανάλογα με τη μέθοδο περιέλιξης του νήματος ινών, χαρακτηριστικές μορφές είναι η σπειροειδής περιέλιξη, η πολική περιέλιξη και οι συνδυασμένες κατηγορίες τους.

1.4.6. Μορφοποιήσεις με διατάξεις συνεχούς παραγωγής

Οι τεχνολογίες συνεχούς παραγωγής χρησιμοποιούνται στην παραγωγή πολυμερών και πλαστικών προϊόντων, καθώς και στην παραγωγή σύνθετων υλικών με τις απαραίτητες αλλαγές και προσαρμογές. Αυτές οι τεχνολογίες είναι αυτόνομες συσκευές για συνεχή παραγωγή που απαιτούν ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση, εκτός από την εισαγωγή πρώτων υλών και τον τελικό ποιοτικό έλεγχο. Αυτές οι μέθοδοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ευελιξία στην ποικιλία σχημάτων που μπορούν να παραχθούν, υψηλή ταχύτητα και μεγάλο όγκο παραγωγής. Η ευελιξία στην παραγωγή οφείλεται στο γεγονός ότι το καλούπι είναι το βασικό εργαλείο χύτευσης, το οποίο μπορεί να αλλάξει και να προσαρμοστεί σε άλλο καλούπι.

Η εξώθηση είναι μια κρίσιμη διαδικασία χύτευσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για πολλές άλλες τεχνικές χύτευσης σύνθετων υλικών. Στην εξώθηση, το πολυμερές εξωθείται σε ένα καλούπι που σχηματίζει το τελικό σχήμα. Η διαδικασία ομογενοποιεί το υλικό σε ελικοειδές σχήμα και το διαμορφώνει σε ειδικό καλούπι.

Η χύτευση με έγχυση είναι η πιο κοινή μέθοδος χύτευσης για καταναλωτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Αυτή η τεχνολογία

χρησιμοποιείται για την κατασκευή τηλεοπτικών ντουλαπιών, χτενών, συρίγγων, τηλεφώνων, καθρεφτών, κρανών και γραναζιών. Η τεχνική είναι εμπνευσμένη από την κλασική μεταλλουργία, όπου το λιωμένο μέταλλο χύνεται σε ένα καλούπι υπό πίεση.

Η συνεχής παραγωγή εξαρτημάτων είναι μια μέθοδος για την παραγωγή μακρών, ευθύγραμμων εξαρτημάτων σταθερής διατομής, όπως ράβδοι και δοκοί, σε μια συνεχή διαδικασία. Τα σύνθετα υλικά που παράγονται με αυτή τη μέθοδο χαρακτηρίζονται από τη στρωματοποιημένη δομή τους. Στην πραγματικότητα, ο τύπος του στρώματος ινών που χρησιμοποιείται μπορεί να ποικίλει σε σχήμα. Έτσι, στον πυρήνα, υπάρχει μια συνεχής δέσμη μακρών μη αλληλοσυνδεόμενων ινών (strand roving), ενώ τα στρώματα ινών με τη μορφή υφασμάτων τοποθετούνται πάνω ή κοντά στην εξωτερική επιφάνεια. Οι ίνες είναι στριμμένες και υφασμένα μαζί (υφασμένα roving) ή αποτελούνται από μη στριμμένες ίνες υφασμένα κατά μήκος (μονοκατευθυντική περιστροφή). Αυτά τα υλικά ινών αυξάνουν την εγκάρσια αντοχή του κομματιού. Τέλος, οι μηχανικές ιδιότητες ενός συστατικού εξαρτώνται από την αναλογία συνεχών μη στριμμένων και στριμμένων ή υφασμένων ινών [1].

1.5.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στην κατασκευή. Ένα από τα κύρια οφέλη είναι ότι είναι σε θέση να βελτιστοποιήσουν τις δομές. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή πυκνότητα, την υψηλή αντοχή και το μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ισχυρών κατασκευών με χαμηλό βάρος.

Οι ίνες σε σύνθετα υλικά μπορούν να προσανατολιστούν προς την κατεύθυνση του κύριου φορτίου, καθιστώντας την κατασκευή πιο αποτελεσματική. Τα σύνθετα υλικά είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στη διάβρωση και γενικά αποδίδουν καλά σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα σύνθετα υλικά έχουν επίσης βελτιωμένες ιδιότητες απόσβεσης και συντονισμού, επιτρέποντας την κατασκευή πιο σύνθετων σχημάτων. Παρουσιάζουν πολύ χαμηλή θερμική διαστολή και έχουν εξαιρετική αντοχή στην κόπωση. Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές κρίσιμες για την ασφάλεια.

Επιπλέον, οι κατεστραμμένες κατασκευές μπορούν να επισκευαστούν πιο εύκολα όταν κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά. Όλα αυτά τα οφέλη καθιστούν τα σύνθετα υλικά μια ελκυστική επιλογή για πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές.

1.5.2. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα κύρια μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι ότι είναι ακριβά στην κατασκευή και δεν υπάρχει επαρκής τεχνολογία για τη μαζική παραγωγή σύνθετων υλικών υψηλής απόδοσης. Η ανακύκλωση σύνθετων υλικών με θερμοσκληρυνόμενες και θερμοπλαστικές μήτρες με ίνες γυαλιού είναι δύσκολη. Ο σχεδιασμός δομών που χρησιμοποιούν ανισοτροπικά υλικά απαιτεί ειδικές γνώσεις. Υπάρχει επίσης αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς και των μηχανισμών αστοχίας των σύνθετων υλικών. Τέλος, τα σύνθετα υλικά έχουν περιορισμένο βιομηχανικό δυναμικό, με την παγκόσμια παραγωγή ανθρακονημάτων να φτάνει μόνο τους 30.000 τόνους.

1.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα σύνθετα υλικά έχουν βρει αμέτρητες εφαρμογές στην καθημερινή ζωή σε βαθμό που ο μέσος άνθρωπος μπορεί να μην έχει συνειδητοποιήσει. Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν συμβάλει περαιτέρω στην αντικατάσταση των κοινών υλικών με

σύνθετα υλικά με ταχείς ρυθμούς, με αποτέλεσμα πολυάριθμες εφαρμογές, μερικές από τις οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Ένας τομέας όπου τα σύνθετα υλικά είναι πρωτοπόροι είναι ο μηχανοκίνητος αθλητισμός. Στη Formula 1, όπου τα οχήματα λειτουργούν στο όριο και η ενεργητική και παθητική ασφάλεια είναι εξίσου σημαντικές, τα σύνθετα υλικά έχουν το πάνω χέρι. Το πλαίσιο και τα αεροδυναμικά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από υφάσματα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP), καθιστώντας τα εξαιρετικά ελαφριά, ενώ μπορούν επίσης να αντέξουν τα υψηλά φορτία που δημιουργούνται κατά το φρενάρισμα ή τις στροφές υψηλής ταχύτητας. Τα συνθετικά ελαστομερή, που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κεραμικά σύνθετα δισκόφρενα, δίνουν στο αγωνιστικό αυτοκίνητο τη δυνατότητα να φρενάρει ακόμα και όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή. Οι οδηγοί της Formula 1 φορούν κράνη και στολές ενισχυμένες με ίνες Kevlar, παρέχοντάς τους προστασία από πιθανές κρούσεις και πυρκαγιά, αντίστοιχα.

Φυσικά, η τεχνολογία και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στη Formula 1 δεν σταματούν εκεί. Οι μεγάλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων επενδύουν σε μεγάλο βαθμό στον μηχανοκίνητο αθλητισμό για να χρησιμοποιήσουν αυτήν την τεχνολογία και να την αξιοποιήσουν σε αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής. Η Porsche 911 GT2 ήταν το πρώτο επαγγελματικό αυτοκίνητο που χρησιμοποίησε κεραμικά δισκόφρενα ενισχυμένα με άνθρακα για βέλτιστη απόδοση πέδησης. Τέτοια δισκόφρενα απεικονίζονται στο σχήμα 1.1. Η Mercedes-Benz-Daimler κατασκευάζει επίσης εξαρτήματα του αμαξώματος του αυτοκινήτου, όπως το Smart (Σχήμα 1.2), από σύνθετα υλικά για να μειώσει σημαντικά το βάρος τους.



Εικόνα 1.1: Κεραμικό δισκόφρενο με ενίσχυση άνθρακα



Εικόνα 1.2: Αμάξωμα αυτοκινήτου Smart από σύνθετα υλικά

Υφάσματα από νήματα από ίνες γυαλιού

Τα σύνθετα υλικά έχουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή, και η χρήση τους επεκτείνεται συνεχώς. Ένας από τους πρωτοποριακούς τομείς στη χρήση σύνθετων υλικών είναι τα μηχανοκίνητα αθλήματα, ιδιαίτερα η Φόρμουλα 1. Πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP) χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αμαξώματος και των πετυγών του αυτοκινήτου, καθιστώντας το ελαφρύ αλλά αρκετά ισχυρό για να αντέξει τις υψηλές πιέσεις του φρένου και της στροφής. Τα συνθετικά ελαστομερή, σε συνδυασμό με τους σύνθετους δίσκους πέδης από κεραμική ύλη, επιτρέπουν στα αυτοκίνητα να φρενάρουν ακόμα και όταν η θερμοκρασία τους είναι αυξημένη. Οι οδηγοί αγωνιστικών αυτοκινήτων φορούν κράνος ενισχυμένα με Kevlar και στολές για να τα προστατεύσουν σε περίπτωση σύγκρουσης ή πυρκαγιάς.

Εκτός από τον μηχανοκίνητο αθλητισμό, σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική βιομηχανία. Τα παραδοσιακά ξύλινα αλιευτικά σκάφη αντικαταστάθηκαν από υφάσματα πολλαπλών στρώσεων από ίνες γυαλιού και πολυεστέρα. Τα εμπορικά πλοία και τα σκάφη αναψυχής κατασκευάζονται επίσης με σύνθετα υλικά για να μειώσουν το βάρος τους και να αυξήσουν την ταχύτητα μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωση καυσίμων. Ωστόσο, πολλοί παράγοντες, όπως η αντοχή στη διάβρωση του θαλασσινού νερού, η σύνθετη συμπεριφορά κόπωσης και η μη αλλοίωση των υλικών με την πάροδο του χρόνου, πρέπει να εξεταστούν για να διασφαλιστεί ότι τα σύνθετα υλικά μπορούν να αντικαταστήσουν μεγαλύτερα μέρη της δομής του πλοίου.

Γενικά, τα σύνθετα υλικά έχουν φέρει επανάσταση σε αρκετές βιομηχανίες, και η χρήση τους συνεχίζει να αυξάνεται.



Εικόνα 1.3: Κορβέτα τύπου Visby – Σουηδία –εξ ολοκλήρου από ίνες άνθρακα

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική βιομηχανία, ιδιαίτερα στην κατασκευή εμπορικών πλοίων και σκαφών αναψυχής, όπου μπορούν να μειώσουν το βάρος και την κατανάλωση καυσίμων παρέχοντας παράλληλα βελτιωμένη απόδοση. Ωστόσο, η έρευνα συνεχίζεται για να προσδιοριστεί εάν μεγαλύτερα τμήματα πλοίων μπορούν να κατασκευαστούν από σύνθετα υλικά χωρίς να διακυβεύεται η δομική ακεραιότητα με την πάροδο του χρόνου λόγω παραγόντων όπως η διάβρωση, η πρόσκρουση και η θερμική κόπωση.

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, τα ελαφριά υλικά ήταν πάντα ένας κρίσιμος παράγοντας σχεδιασμού για τα αεροσκάφη, με το ξύλο και το αλουμίνιο να χρησιμοποιούνται στα πρώτα αεροπλάνα πριν αντικατασταθούν από σύνθετα υλικά. Σήμερα, το Boeing 787 Dreamliner αντιπροσωπεύει το αποκορύφωμα της τεχνολογικής προόδου στο σχεδιασμό και την κατασκευή αεροσκαφών, με μια δομή που αποτελείται εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά. Το Dreamliner σχεδιάστηκε από

το μηδέν για να μειώσει το κόστος ανά πτήση και η κατασκευή του έθεσε σημαντικές προκλήσεις για τους μηχανικούς που έπρεπε να ξεπεράσουν διάφορα εμπόδια που σχετίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη μακροπρόθεσμη δομική ακεραιότητα. Η πρώτη επιβατική πτήση πραγματοποιήθηκε στα τέλη του 2010.



Εικόνα 1.4: Boeing 787 Dreamliner, έχει κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου από σύνθετα υλικά

Οι εφαρμογές σύνθετων υλικών σε διάφορες βιομηχανίες έχουν οδηγήσει σε πολύτιμη εμπειρία και γνώση, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί και από τη βιομηχανία αθλητικών ειδών. Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται τώρα στην κατασκευή μπότων σκι, μαστούνια γκολφ, ρακέτες τένις, καλάμια ψαρέματος και πλαίσια ποδηλάτων, με κύρια εστίαση στη μείωση του βάρους, τη βελτίωση της απόδοσης, την αύξηση της ταχύτητας και την παροχή ανθεκτικότητας σε συγκεκριμένες συνθήκες.



Εικόνα 1.5: Ποδήλατο κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά.



Εικόνα 1.6: Ρακέτα κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά

Ίσως ο πιο σημαντικός τομέας στον οποίο χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά είναι η ιατρική βιομηχανία. Η δημιουργία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στο ανθρώπινο σώμα είναι μια σημαντική πρόκληση για τους επιστήμονες και γι' αυτό αναπτύχθηκε η βιοτεχνολογία, η οποία περιλαμβάνει την επιστήμη των βιοϋλικών. Τα βιοϋλικά μπορούν να οριστούν ως οποιοδήποτε φυσικό ή τεχνητό υλικό που αποτελεί μέρος μιας «ζωντανής» δομής ή μιας βιοϊατρικής συσκευής που εκτελεί, ενισχύει ή αντικαθιστά μια φυσική ανθρώπινη λειτουργία.

Τα βιοϋλικά βρίσκουν εφαρμογή σε:

- Αποκατάσταση αρμών, κλειδαριών κ.λπ.
- Οστά όπου χρησιμοποιούνται λεπίδες και πολυμερές σκυρόδεμα
- Τεχνητοί σύνδεσμοι και τένοντες
- Προσθετική
- Οδοντικά εμφυτεύματα
- Τεχνητά αιμοφόρα αγγεία
- Καρδιακές βαλβίδες
- Αποκατάσταση δέρματος
- Φακοί επαφής

Ένα παράδειγμα χρήσης βιοϋλικών είναι η τεχνική αποκατάστασης του δέρματος με τεχνητό δέρμα. Το δέρμα, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των φυσικών σύνθετων υλικών, είναι ένα πολύπλοκο όργανο με ιστούς που θα ήταν δύσκολο να αναπαραχθούν τεχνητά. Παρόλα αυτά, έχουν γίνει σημαντικά βήματα στον τομέα της «μηχανικής ιστών». Μια τέτοια περίπτωση συνέβη όταν μια περιοχή του δέρματος έπρεπε να αντικατασταθεί επειδή είχε ένα έλκος που προκάλεσε έντονο κνησμό. Σε αυτό το περιστατικό, ο I. Mensik χρησιμοποίησε ένα συμπολυμερές τεραφθαλικής πολυαιθυλενογλυκόλης (PEGT) και τεραφθαλικού πολυβουτυλενίου (PBT) σε αναλογία βάρους 55% και 45%, αντίστοιχα. Το συμπολυμερές είναι βιοδιασπώμενο και λειτουργεί ως ικρίωμα πάνω στο οποίο αναγεννάται το φυσιολογικό δέρμα.



Εικόνα 1.7: Τεχνητό δέρμα από βιοϋλικά

Φυσικά, στην περίπτωση του δέρματος, όπως και σε άλλα μέρη του ανθρώπινου σώματος όπου χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά, μπορεί να εμφανιστούν αλλεργίες, φλεγμονές ή ακόμα και ασυμβατότητες. Αυτά τα προβλήματα έχουν λυθεί σε κάποιο βαθμό, αλλά αυτό που παραμένει άλυτο είναι η επίτευξη της δημιουργίας ενός ιστού που συνδυάζει τις μηχανικές ιδιότητες του φυσικού ιστού με το πλήρες φάσμα των φυσικών λειτουργιών του.

Τα παραπάνω είναι μερικές από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών, οι οποίες είναι πρακτικά αμέτρητες, καθώς η ποικιλία των σύνθετων υλικών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι σχεδόν τα πάντα μπορούν να κατασκευαστούν από αυτά είναι επίσης τεράστια. Ένα πράγμα είναι σίγουρο, τα σύνθετα υλικά καταλαμβάνουν και θα συνεχίσουν να καταλαμβάνουν τη βιομηχανία και την επιστημονική κοινότητα, των οποίων η σωστή συνεργασία μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη για τον άνθρωπο και τον αγωνιζόμενο πλανήτη Γη.



Εικόνα 1.8: Τεχνητά μέλη από σύνθετα υλικά



Εικόνα 1.9: Οδοντιατρικά εμφυτεύματα από σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά έχουν επίσης μεγάλη εφαρμογή στη μεταφορά και αποθήκευση του υδρογόνου, το οποίο είναι ένα αέριο καύσιμο που ενέχει πολλούς κινδύνους κατά την παραγωγή, την αποθήκευση, τη μεταφορά και την κατανάλωση. Μια συνήθης μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι οι δεξαμενές υψηλής πίεσης, οι οποίες

μπορούν να αντέξουν πίεση άνω των 200 bar. Οι δεξαμενές αυτές, ανάλογα με την κατασκευή τους, μπορούν να αντέξουν ακόμη και 700 bar. Η πιο συνηθισμένη πίεση είναι 200 bar, την οποία μπορείτε εύκολα να προμηθευτείτε από εμπορικές εταιρείες εμπορίας φυσικού αερίου. Οι δεξαμενές με 500 bar ή ακόμη και 700 bar κατασκευάζονται από ειδικά μεταλλικά κράματα και καλύπτονται με περίβλημα από ανθρακονήματα. Αυτές οι δεξαμενές είναι πολύ ελαφριές, μικρές σε όγκο και απολύτως ασφαλείς. Ωστόσο, το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος παραγωγής τους, καθώς η κατασκευή τους δεν είναι μαζική.

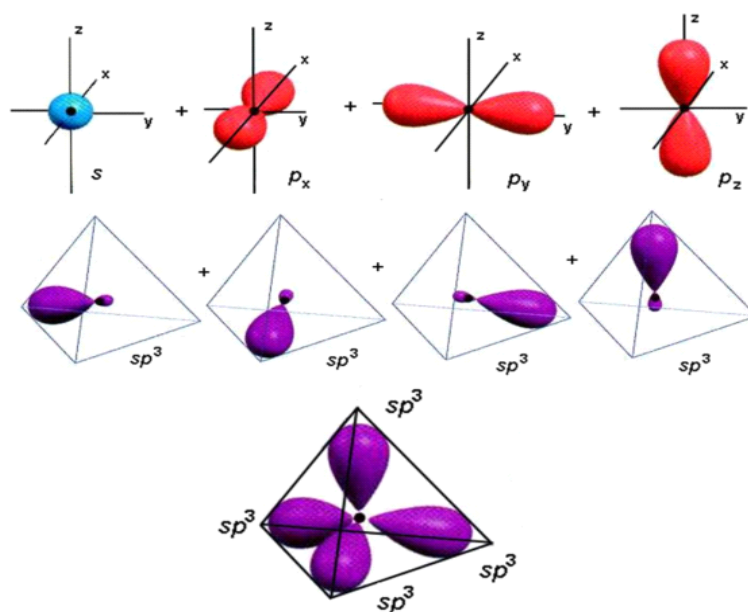


Εικόνα 1.10: Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1. ΔΟΜΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ο άνθρακας υπάρχει σε δύο φυσικές μορφές: κρυσταλλικό (διαμάντι) και άμορφο (άνθρακας). Κάθε άτομο άνθρακα έχει έξι ηλεκτρόνια που καταλαμβάνουν τα ατομικά τροχιακά $1s^2$, $2s^2$ και $2p^2$. Στην κρυσταλλική μορφή, τα ηλεκτρόνια σθένους καταλαμβάνουν τα τροχιακά $2s$, $2p_x$, $2p_y$ και $2p_z$, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό ομοιοπολικών δεσμών. Αυτά τα τροχιακά μπορούν να αναμειχθούν με διαφορετικούς τρόπους, με αποτέλεσμα τρεις πιθανούς υβριδισμούς: sp , sp^2 και sp^3 . Αυτό το φαινόμενο υβριδισμού είναι μοναδικό για τον άνθρακα και μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη δομή και τις ιδιότητες του μορίου.



Εικόνα 1: Πιθανά τροχιακά και υβριδισμοί

Εικόνα 2.1: Πιθανά τροχιακά και υβριδισμοί

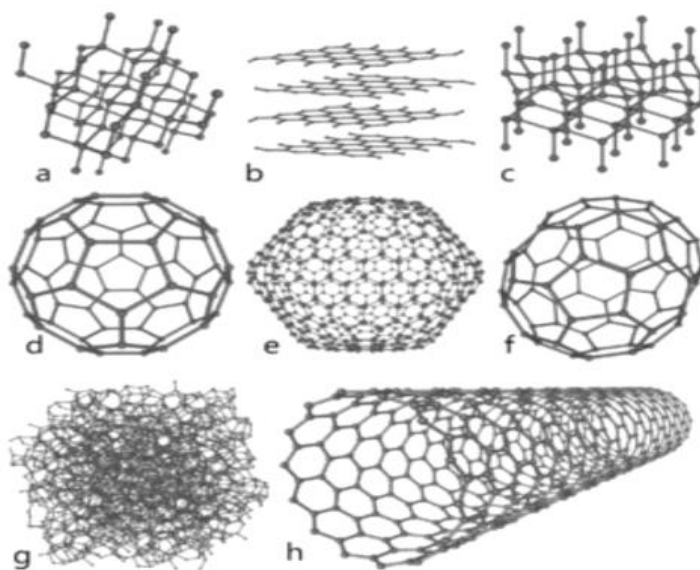
Ο άνθρακας είναι γνωστός για την ικανότητά του να σχηματίζει δεσμούς με άλλα άτομα άνθρακα καθώς και με άλλα στοιχεία, οδηγώντας στο σχηματισμό μορίων μακράς αλυσίδας. Αυτό καθιστά τον άνθρακα το πιο σημαντικό στοιχείο στις οργανικές ενώσεις. Ο γραφίτης και το διαμάντι είναι οι φυσικές κρυσταλλικές μορφές

καθαρού άνθρακα, αλλά διαφέρουν στον τύπο των 13 δεσμών που σχηματίζουν μεταξύ των ατόμων τους, με αποτέλεσμα διαφορετικές μοριακές ή κρυσταλλικές δομές και ιδιότητες. Κάθε μία από τις αναφερόμενες δομές μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα φάσμα Raman, μια χρήσιμη τεχνική φασματοσκοπίας για τη μελέτη δομών που βασίζονται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα υλικά. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της σκέδασης Raman είναι η αλλαγή στη συχνότητα του διάσπαρτου φωτός, η οποία διαφέρει από εκείνη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η μοναδική ικανότητα του άνθρακα να σχηματίζει διαφορετικές αλλοτροπικές μορφές είναι ένα αποκλειστικό χαρακτηριστικό αυτού του στοιχείου. Άλλα στοιχεία στην τέταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα, όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, έχουν επίσης αυτή την ιδιότητα, αλλά ο άνθρακας είναι εξαιρετικός όσον αφορά τον αριθμό και την ποικιλία των αλλοτροπικών μορφών του. Για παράδειγμα, είναι ένα από τα πιο σκληρά φυσικά υλικά στη γη, με κλίμακα σκληρότητας Mohs 10, και το διαμάντι είναι 145 φορές πιο σκληρό από τα ζαφείρια και τα ρουμπίνια, τους δεύτερους σκληρότερους πολύτιμους λίθους στην κλίμακα. Αντίθετα, ο γραφίτης είναι ένα από τα πιο μαλακά υλικά.

Ανάλογα με το πρωτογενές υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υλικών γραφίτη και τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο επεξεργασίας, μπορούν να ληφθούν διαφορετικοί τύποι γραφίτη, συμπεριλαμβανομένου του πυρολυτικού γραφίτη, του υαλώδους άνθρακα, των ινών άνθρακα και του πολυκρυσταλλικού γραφίτη. Αυτές οι μορφές άνθρακα έχουν όλες υβριδισμό SP². Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν τις διαφορετικές δομές του άνθρακα σε σχέση με τη δομή, τις ιδιότητες και τις μεθόδους παρασκευής τους.

2.2. ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΑ

Υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, πολλά στοιχεία και ενώσεις μπορούν να παρουσιάσουν περισσότερες από μία κρυσταλλικές δομές, ένα φαινόμενο γνωστό ως πολυμορφισμός ή αλλοτροπία. Ένα χημικό στοιχείο λέγεται ότι παρουσιάζει αλλοτροπία όταν εμφανίζεται σε δύο ή περισσότερες πανομοιότυπες μορφές με διαφορετικές φυσικές καταστάσεις. Αυτά τα αλλοτροπικά γενικά διαφέρουν στις φυσικές ιδιότητες όπως το χρώμα και η σκληρότητα, αλλά μπορούν επίσης να διαφέρουν στη μοριακή δομή ή τη χημική δραστηριότητα, αν και είναι συνήθως παρόμοια στις περισσότερες χημικές ιδιότητες. Μέχρι το 1985, ήταν γνωστές έξι κρυσταλλικές αλλοτροπές άνθρακα: άλφα και βήτα γραφίτης, διαμάντι, μια σπάνια εξαγωνική δομή διαμαντιών (lonsdaleite), χαοϊτός και άνθρακας IV. Αργότερα, ανακαλύφθηκαν νέες μοριακές δομές άνθρακα, όπως τα φουλερένια και οι νανοσωλήνες άνθρακα, οι οποίες ταξινομούνται ως νανοϋλικά. Οι δομές που αναφέρθηκαν προηγουμένως έχουν άνθρακα ως κοινό στοιχείο, αλλά η διαφορετική κρυσταλλική δομή τους δίνει σε κάθε μία ξεχωριστές ιδιότητες. Έτσι, το διαμάντι παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα και διαφάνεια ενώ ο γραφίτης είναι μαλακός και αδιαφανής.



Εικόνα 2: Διαφορετικές μορφές άνθρακα

Σχήμα 2.1: Στο σχήμα αυτό φαίνονται 8 αλλότροπες μορφές του άνθρακα. Το a) αναπαριστά το διαμάντι το b) τον γραφίτη το c) το εξαγωνικό διαμάντι τα d,e,f) είναι φουλερένια, το g) είναι άμορφος άνθρακας και τέλος το h) είναι νανοσωλήνας άνθρακα.

Ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υλικών γραφίτη και τη μέθοδο επεξεργασίας, μπορούν να ληφθούν τέσσερις διαφορετικές μορφές γραφίτη: α) πυρολυτικός γραφίτης, β) υαλώδης άνθρακας, γ) ίνες άνθρακα και δ) πολυκρυσταλλικός γραφίτης. Κάθε μορφή έχει διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες λόγω της ξεχωριστής κρυσταλλικής δομής. Εκτός από αυτές τις μορφές, υπάρχουν και άλλες μοριακές δομές άνθρακα, όπως τα φουλερένια και οι νανοσωλήνες άνθρακα, οι οποίες ταξινομούνται ως νανοϋλικά. Το διαμάντι και ο γραφίτης είναι επίσης παραδείγματα διαφορετικών μορφών άνθρακα, με το διαμάντι να είναι σκληρό και διαφανές, ενώ ο γραφίτης είναι μαλακός και αδιαφανής.

2.3. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

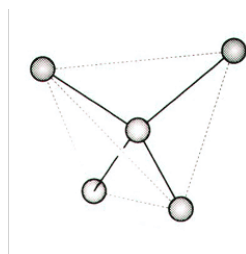
Ο όρος "άνθρακας" προέρχεται από τη λατινική λέξη "carbo" που σημαίνει κάρβουνο. Ο άνθρακας παράγεται από ξύλο ή άλλο φυτικό υλικό που έχει θερμανθεί χωρίς την παρουσία σημαντικών ποσοτήτων αέρα, προκειμένου να αποφευχθεί η καύση του και να μετατραπεί σε άνθρακα. Άλλες ουσίες που περιέχουν άνθρακα είναι το πετρέλαιο και τα ορυκτά καύσιμα. Ο άνθρακας είναι επίσης παρών στα πετρώματα και σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπινου σώματος, όπου αποτελεί το 18% της μάζας του. Από χημική άποψη, ο άνθρακας είναι τετρασθενής, γεγονός που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς του επιτρέπει να προσελκύει έντονα άλλα άτομα και να σχηματίζει χημικούς δεσμούς μαζί τους. Επιπλέον, μπορεί να σχηματίσει διπλούς ή τριπλούς δεσμούς μέσω υβριδισμού sp^2 και sp , εκτός από τους συνηθισμένους τέσσερις μονούς δεσμούς. Ο άνθρακας εμφανίζεται σε διάφορα αλλοτροπικά, τα οποία μπορούν να έχουν είτε κρυσταλλικές

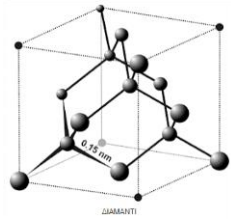
είτε άμορφες δομές. Όταν η δομή του είναι κρυσταλλική, ανάλογα με τους δεσμούς που σχηματίζει και τη διάταξη των ατόμων στον κρύσταλλο, ο άνθρακας μπορεί να πάρει τη μορφή διαμαντιού, γραφίτη, γραφενίου, φουλλερενίου ή νανοσωλήνων άνθρακα.

Αδάμαντας (διαμάντι) :

Το διαμάντι είναι μια μορφή άνθρακα με εξαιρετικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, καθιστώντας το πέντε φορές καλύτερο από τον χαλκό σε θερμοκρασία δωματίου. Είναι επίσης ένα ιδανικό οπτικό υλικό ικανό να μεταδίδει φως από υπέρυθρο σε υπεριώδες, με ασυνήθιστα μεγάλο δείκτη διάθλασης. Επιπλέον, είναι το πιο σκληρό γνωστό υλικό, με κάθε άτομο άνθρακα να σχηματίζει ένα κανονικό τετράεδρο με ίσες γωνίες 109 μοιρών μέσω υβριδικών δεσμών sp με τους γείτονές του. Το μήκος δεσμού μεταξύ των ατόμων άνθρακα είναι 0,154 nm και η ενέργεια που απαιτείται για τη διάσπασή του είναι 711 kJ/mol.

Το διαμάντι έχει κρυσταλλική δομή που μπορεί να αναπαρασταθεί χρησιμοποιώντας το πλέγμα Bravais με δύο παρόμοια άτομα σε θέσεις (0,0,0) και (1/4,1/4,1/4,1/4). Κάθε μονάδα κυττάρου διαμαντιού έχει οκτώ άτομα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2(β). Μια τέτοια δομή είναι κοινή στους ημιαγωγούς, όπως το γερμάνιο και το πυρίτιο. Επιπλέον, η πυκνότητά του, η οποία είναι 3,515 g/cm³, είναι μεγαλύτερη από αυτή του γραφίτη, η οποία είναι 2,26 g/cm³.





b.

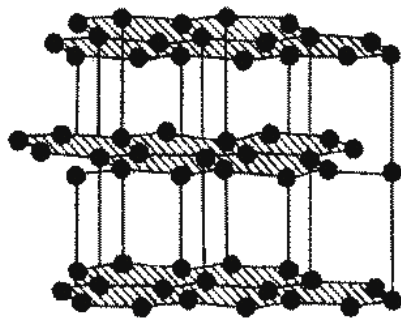
Σχήμα 2.2: (α) Κανονικό τετράεδρο, από άνθρακες, διαμαντιού με μεταξύ τους γωνίες 109 μοίρες. (β) Αναπαράσταση κυψελίδας διαμαντιού με τη βοήθεια του εδροκεντρωμένου πλέγματος Bravais.

Γραφίτης :

Ο γραφίτης είναι μια τρισδιάστατη δομή που αποτελείται από άτομα άνθρακα διατεταγμένα σε εξαγωνικό πλέγμα παράλληλο μεταξύ τους. Τα άτομα συγκρατούνται στο πλέγμα με υβριδοποιημένους δεσμούς sp^2 . Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών στρωμάτων είναι ασθενέστερες σε σύγκριση με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατόμων στο ίδιο στρώμα. Αυτό συμβαίνει επειδή η απόσταση μεταξύ δύο ατόμων στο ίδιο στρώμα είναι 1,42 Å, ενώ η απόσταση μεταξύ δύο στρωμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη (3,35 Å).

Η ειδική απόσταση μεταξύ των στρωμάτων οφείλεται στο εύρος των δεσμών π , όπου οι λοβοί είναι κάθετοι στο επίπεδο κάθε στρώματος. Οι ιδιότητες των ιδανικών κρυστάλλων γραφίτη εξαρτώνται από τη μελέτη της συμπεριφοράς των στρωμάτων

γραφίτη στο επίπεδο ή κάθετα στα στρώματα, η οποία παρουσιάζει σημαντική



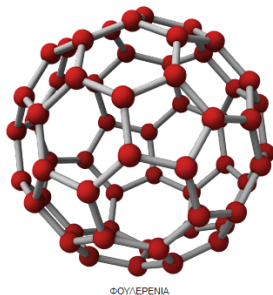
ανισοτροπία.

Γραφίτης

Σχήμα 2.3: Αναπαράσταση της μικροδομής του γραφίτη

Φουλλερένια

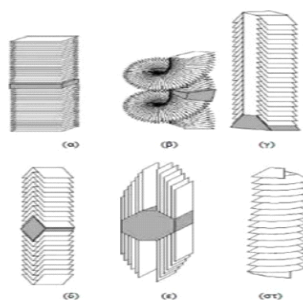
Τα φουλλερένια αποτελούνται από άτομα άνθρακα με ισχυρούς ομοπολικούς δεσμούς (δεσμούς s) που προκύπτουν από υβριδισμό sp^2 . Τα άτομα άνθρακα είναι διατεταγμένα σε πεντάγωνα ή εξάγωνα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα σφαιρικό μόριο με κοίλο εσωτερικό. Μεταξύ των πιο γνωστών φουλλερενίου είναι εκείνα που αποτελούνται από 60 ή 70 άτομα άνθρακα (C_{60} , C_{70}).



Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση μικροδομής των φουλλερενίων

Νανοϊνες Άνθρακα (Carbon Nanofibers, CNFs):

Οι νανοϊνες άνθρακα αποτελούνται από στρώματα γραφίτη διατεταγμένα με συγκεκριμένο προσανατολισμό κατά μήκος του άξονα του σωλήνα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι νανοσωλήνων άνθρακα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4: Διάφοροι τύποι νανοϊνών. **α,β.** Αιμοπετάλιο, **γ,δ.** Ψαροκόκκαλο, **ε.** Κορδέλα, **στ.** Στοιβαγμένοι κώνοι [2].

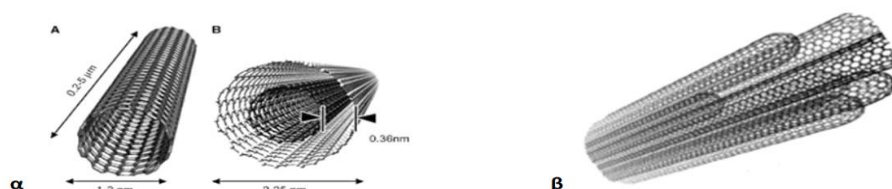
Σχήμα 2.5: Διάφοροι τύποι νανοϊνών. (α),(β) Αιμοπετάλιο. (γ),(δ) Ψαροκόκκαλο. (ε) Κορδέλα. (στ) Στοιβαγμένοι κώνοι.

Νανοςωλήνες Άνθρακα (Carbon Nanotubes, CNTs) :

Οι νανοςωλήνες άνθρακα (CNTs) είναι υποπροϊόν του φουλλερενίου και αποτελούνται από φύλλα γραφενίου διατεταγμένα σε κυλινδρικό σχήμα (σχήμα 2.5α). Το μοτίβο αναδίπλωσης των CNTs επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητές τους και τα άκρα των νανοςωλήνων καλύπτονται με ημισφαιρικές δομές φουλλερενίου (Σχήμα 2.5β). Υπάρχουν δύο τύποι CNTs: πολυφθοριωμένα και μονοφθοριωμένα. Τα πολυφθοριωμένα CNTs έχουν έναν νανοςωλήνα στο κέντρο, που περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα φύλλα γραφενίου με αυξανόμενες διαμέτρους. Τα μονοφθοριωμένα CNTs αποτελούνται από έναν μόνο νανοςωλήνα χωρίς πρόσθετα φύλλα γραφενίου γύρω του.

Η μοναδική δομική διάταξη των CNTs τους δίνει εξαιρετικές μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες. Ο υψηλός λόγος διαστάσεων, η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και η χαμηλή πυκνότητα τα καθιστούν ιδανικά για ενίσχυση σε σύνθετα υλικά. Επιπλέον, τα CNTs έχουν εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της μετεγκατάστασης των ηλεκτρονίων π κατά μήκος των φύλλων γραφενίου, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση σε ηλεκτρονικές συσκευές.

Τα CNTs παρουσιάζουν επίσης εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα, η οποία αποδίδεται στην αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας κατά μήκος των φύλλων γραφενίου. Αυτή η ιδιότητα τα καθιστά χρήσιμα σε εφαρμογές θερμικής διαχείρισης. Επιπλέον, τα CNTs έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, καθιστώντας τα χρήσιμα για εφαρμογές αποθήκευσης και φιλτραρίσματος αερίου.



Σχήμα 2.5: α. Κυλινδρικό σχήμα νανοσωλήνων, β. Τερματισμός νανοσωλήνων με ημισφαιρικές δομές φουλλερενίων [2].

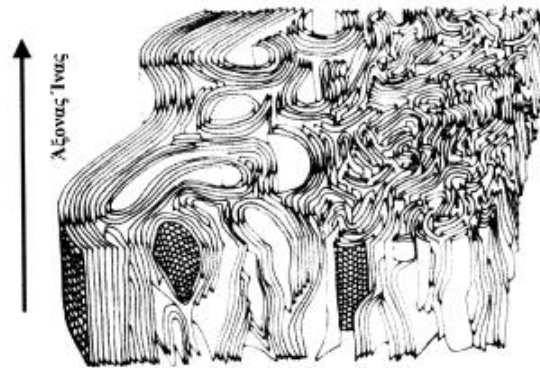
Σχήμα 2.6: (α) Κυλινδρικό σχήμα νανοσωλήνων. (β) Τερματισμός νανοσωλήνων με ημισφαιρικές δομές φουλλερενίων.

2.4. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα είναι ένα υλικό που παρουσιάζει τη δομή του γραφίτη. Τα άτομα άνθρακα είναι διατεταγμένα με τη μορφή φύλλων, που αποτελούνται από εξαγωνικούς αρωματικούς δακτυλίους. Πολλά φύλλα μαζί σχηματίζουν μια κορδέλα και πολλές κορδέλες μαζί συνθέτουν το ανθρακόνημα. Οι ίνες άνθρακα έχουν μεγάλο μήκος και μικρή διάμετρο (0,005-0,010 mm) και η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα είναι περίπου 99%. Η δομική μονάδα αυτού του υλικού είναι το μονόκλωνο νήμα, το οποίο είναι προσανατολισμένο παράλληλα με τον άξονα της ίνας. Κάθε μονόκλωνο νήμα έχει μια δομή που μοιάζει με στοίβα που μοιάζει με επίπεδα γραφίτη, τα οποία συγκρατούνται από τις δυνάμεις Van der Waals.

Όσον αφορά τις ιδιότητες των ινών άνθρακα, φαίνεται να παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως ακαμψία και αντοχή ανά μονάδα βάρους πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αλουμινίου ή του χάλυβα, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά σε πολλές απαιτητικές σύγχρονες εφαρμογές, όπως στα αγωνιστικά αυτοκίνητα.

Επιπλέον, οι ιδιότητες των ινών άνθρακα ποικίλλουν ευρέως και εξαρτώνται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται και τη διαδικασία παραγωγής.



Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση της δομής των ινών άνθρακα, έτσι όπως προκύπτει από την μέθοδο X-ray diffraction και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.
[Πηγή: S.C. Bennett, PhD Thesis, University of Leeds, 1976.]

Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση της δομής ινών άνθρακα, όπως προκύπτει από την μέθοδο X-ray diffraction και το ηλεκτρικό μικροσκόπιο.

2.5. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ - ΕΦΕΥΡΕΣΗ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ

Ο Thomas Edison ανέπτυξε το πρώτο ανθρακόνημα για να δημιουργήσει ένα λεπτό σύρμα για έναν νέο τύπο ηλεκτρικού λαμπτήρα. Χρησιμοποίησε κυτταρίνη, λεπτές ίνες από μπαμπού, ως πρόδρομο υλικό για να δημιουργήσει ένα σπειροειδές πηνίο που στη συνέχεια πυρολύθηκε, με αποτέλεσμα μια αντίσταση άνθρακα. Αυτή η αντίσταση θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως μοντέλο για τον νέο ηλεκτρικό λαμπτήρα όταν θερμαίνεται. Το 1958, ο Δρ Roger Bacon δημιούργησε ίνες άνθρακα υψηλής απόδοσης στο Τεχνικό Κέντρο Καρβιδίου της Ένωσης στο Οχάιο. Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις ίνες ήταν το ρεγιόν, μια συνεχής συνθετική ίνα. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία ήταν ανεπιτυχής λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και των ασθενών μηχανικών ιδιοτήτων. Αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, η διαδικασία βελτιώθηκε χρησιμοποιώντας πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) ως πρόδρομο υλικό. Αυτή η τεχνική είχε ως αποτέλεσμα ένα ανθρακόνημα με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα (περίπου 55%). Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνική έγινε η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη για την παραγωγή ινών άνθρακα.

Ξεκινώντας το 1960, οι ίνες άνθρακα άρχισαν να διατίθενται στο εμπόριο, κυρίως λόγω των απαιτήσεων της αεροδιαστημικής και της αμυντικής βιομηχανίας για υλικά με υψηλή ακαμψία και αντοχή, σε συνδυασμό με χαμηλό βάρος. Ως αποτέλεσμα, ο αμερικανικός στρατός και η NASA αξιοποίησαν την τεχνολογία για την παραγωγή σύνθετων υλικών άνθρακα. Νέα σύνθετα υλικά αντικατέστησαν βαρύτερες μεταλλικές κατασκευές, επιτρέποντας στα αεροσκάφη να γίνουν πιο ευέλικτα και στα διαστημικά λεωφορεία να μην αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες στις επιφάνειές τους κατά την είσοδο στην ατμόσφαιρα. Για πολλά χρόνια, η βιομηχανία ινών άνθρακα βίωσε κύκλους στους οποίους η ζήτηση ήταν είτε επαρκής είτε περιορισμένη. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, οι ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας απαιτούν όλο και περισσότερη χρήση αυτού του υλικού, με αποτέλεσμα την αύξηση

της ζήτησης. Σύμφωνα με την τελευταία έρευνα της Douglas Insights που δημοσιεύθηκε τον Νοέμβριο του 2022, η αγορά ιών άνθρακα αναμένεται να αναπτυχθεί με CAGR 8,6% έως το 2031. Η Douglas Insights ανέλυσε διάφορες πτυχές της αγοράς ιών άνθρακα και αποκάλυψε αλλαγές στις τάσεις της αγοράς λόγω της αυξανόμενης ζήτησης από αιολική ενέργεια, αεροδιαστημική και άλλες παρόμοιες βιομηχανίες. Ο μηχανισμός σύγκρισης έχει δημιουργήσει πολλά ερευνητικά άρθρα και αναφορές, επιτρέποντας σε πολλούς ειδικούς, αναλυτές και ερευνητές να αποκτήσουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τους βασικούς παράγοντες ανάπτυξης της αγοράς και τους περιορισμούς της αγοράς, να κάνουν προβλέψεις και να παρέχουν αναφορές που προσφέρουν πολλές πληροφορίες για την παγκόσμια αγορά ανακύκλωσης. Το ψηφιακό εργαλείο συγκρίνει αποτελεσματικά όλες τις υπάρχουσες αξιολογήσεις έρευνας, τους εκδότες, τον πίνακα περιεχομένων και τις ημερομηνίες δημοσίευσης.

Υπήρξε σημαντική αύξηση της ζήτησης για ανθρακονήματα λόγω νέων εφαρμογών και έλλειψης της κύριας πρώτης ύλης, του πολυακρυλονιτριλίου, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές. Οι ίνες άνθρακα είναι ισχυρές, άκαμπτες ίνες ικανές να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες με ελάχιστη θερμική διαστολή και είναι επίσης ελαφριές και χημικά ανθεκτικές. Ως αποτέλεσμα αυτών των ιδιοτήτων, οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται στη στρατιωτική, αεροδιαστημική βιομηχανία, πολιτική μηχανική και αυτοκινητοβιομηχανία.

Η πανδημία Covid-19 είχε αρνητικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη της αγοράς ιών άνθρακα, διαταράσσοντας τις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού και περιορίζοντας τα ταξίδια, οδηγώντας σε μείωση της ζήτησης. Αυτό είχε σοβαρό αντίκτυπο στις βιομηχανίες που βασίζονταν στην παραγωγή ιών άνθρακα. Ωστόσο, καθώς τελείωσε η πανδημία, η αγορά ιών άνθρακα μπόρεσε να ανακάμψει και τώρα βλέπει μια ανοδική τάση. Ο στόχος των παραγωγών ιών άνθρακα είναι να προβλέψουν τις μελλοντικές απαιτήσεις της αγοράς διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία παραγωγής και διερευνώντας πρόσθετες γραμμές παραγωγής.

2.6. ΙΔΙΟΤΗΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα των ενισχυμένων συνθετικών ρητινών. Όταν χρησιμοποιούμε ίνες άνθρακα, μας ενδιαφέρουν οι μηχανικές τους ιδιότητες, η χρήση κατάλληλης πλαστικής μήτρας και η συνοχή μεταξύ των ινών άνθρακα και της μήτρας, προκειμένου να επωφεληθούμε από τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Κατά τη διάρκεια της ενανθράκωσης των οξειδωμένων ινών πολυακρυλονιτριλίου, μετατρέπονται σε πολυμερικό άνθρακα, του οποίου η δομή μοιάζει με αυτή του γραφίτη. Ως αποτέλεσμα του τεντώματος κατά την οξείδωση και την επακόλουθη ενανθράκωση, οι στοίβες άνθρακα αποκτούν κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα των ινών. Η προκύπτουσα μικροδομή χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή και ακαμψία. Επιπλέον, η επιμήκυνση αυτών των ινών είναι εντελώς ελαστική και η αντοχή τους στην κόπωση και τη διάβρωση είναι εξαιρετική.

Είναι χημικά αδρανή υλικά με υψηλή αντοχή στα περισσότερα οξέα, άλατα και διαλύτες, εκτός από ισχυρούς οξειδωτικούς παράγοντες και δεν απορροφούν σχεδόν καθόλου νερό. Η θερμική τους σταθερότητα είναι αξιοσημείωτη απουσία οξυγόνου, έως 3000°C, καθώς είναι άκαυστα και άφλεκτα. Αντίθετα, με την παρουσία οξυγόνου, καίγονται γύρω στους 400°C.

Λόγω της χημικής τους αδράνειας, δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία, εκτός από ελαφρύ ερεθισμό στο δέρμα που μπορεί να προκληθεί από το μέγεθος των ινών. Μια άλλη ιδιότητα των ινών άνθρακα είναι η αντοχή τους στους κραδασμούς. Οι δυναμικές ιδιότητες των στοιβών γραφίτη είναι πολύ καλύτερες από αυτές άλλων

υλικών όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Για το λόγο αυτό, οι ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων υλικών για την κατασκευή διαφόρων αντικειμένων.

Τέλος, οι ίνες άνθρακα δεν έχουν μαγνητικές ιδιότητες, ενώ παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα παράλληλα με τα επίπεδα γραφίτη, η οποία οφείλεται σε μη εντοπισμένα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ αυτών των επιπέδων. Λόγω της καλής αγωγιμότητας αυτών των ινών, θα πρέπει να αποφεύγονται οι παρεμβολές τους σε ηλεκτρικά κυκλώματα (π.χ. σε περίπτωση πυρκαγιάς).

2.6.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων υλικών, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής πυκνότητας και του ειδικού βάρους τους, το οποίο είναι περίπου το ένα τέταρτο αυτού του χάλυβα. Έχουν επίσης υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και ειδική ακαμψία, η οποία είναι η αναλογία αντοχής σε εφελκυσμό προς πυκνότητα ή ακαμψίας προς βάρος, αντίστοιχα. Επιπλέον, έχουν χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, που σημαίνει ότι δεν διαστέλλονται ή συστέλλονται πολύ με τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Οι ίνες άνθρακα έχουν επίσης αξιοσημείωτη θερμική σταθερότητα σε περιβάλλοντα χωρίς οξυγόνο, αντέχουν σε θερμοκρασίες έως 3000 ° C. Είναι ανθεκτικά στην ερπυσμό, η οποία είναι η σταδιακή παραμόρφωση ενός υλικού υπό πίεση με την πάροδο του χρόνου και έχουν εξαιρετική χημική σταθερότητα, ιδιαίτερα έναντι ισχυρών οξέων. Επιπλέον, παρουσιάζουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα αλλά χαμηλή

ηλεκτρική αντίσταση, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές όπου η απαγωγή θερμότητας είναι σημαντική.

2.6.2. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, οι ίνες άνθρακα έχουν επίσης κάποια μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι ιδιότητές τους ποικίλλουν ανάλογα με την κατεύθυνση των ινών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανισοτροπία. Οι ίνες άνθρακα έχουν επίσης χαμηλότερη αναλογία παραμόρφωσης προς αστοχία και η αντοχή τους σε θλίψη είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με την αντοχή τους σε εφελκυσμό. Επιπλέον, οι ίνες άνθρακα είναι ευαίσθητες στην οξείδωση και μπορούν να μετατραπούν σε αέριο όταν εκτίθενται στον αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 400 ° C.

2.7. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι εμπορικές ίνες άνθρακα ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες με βάση το συντελεστή ελαστικότητας και την αντοχή τους σε εφελκυσμό. Η πρώτη κατηγορία είναι οι ίνες Ultra High Modulus, οι οποίες έχουν ελαστικό συντελεστή άνω των 500 GPa. Αυτές οι ίνες παράγονται με πυρόλυση σε θερμοκρασίες άνω των 2000 ° C με ταυτόχρονη τέντωμα. Είναι κατασκευασμένα από ίνες με βάση το PAN ή ίνες με βάση το βήμα.

Η δεύτερη κατηγορία είναι οι ίνες Υψηλού Συντελεστή, οι οποίες έχουν ελαστικό συντελεστή μεταξύ 350-500 GPa. Αυτές οι ίνες παράγονται από ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN) ή ίνες με βάση το βήμα. Η τρίτη κατηγορία είναι οι ίνες Intermediate Modulus, οι οποίες έχουν ελαστικό συντελεστή μεταξύ 200-350 GPa. Η

τέταρτη κατηγορία είναι οι ίνες υψηλής εφελκυσμού, οι οποίες έχουν χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας (<100 GPa) αλλά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (>3 GPa).

Τέλος, υπάρχουν οι ίνες Super High Tensile, οι οποίες έχουν αντοχή σε εφελκυσμό άνω των 4500 MPa. Αυτές οι ίνες είναι κατασκευασμένες από ίνες με βάση το PAN, συνήθως από ίνες υψηλής εφελκυσμού αλλά με μικρότερη διάμετρο 4-6 μm σε σύγκριση με 8-10 μm. Η κατηγοριοποίηση των ινών άνθρακα επιτρέπει την επιλογή ενός τύπου ινών που ταιριάζει καλύτερα στις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες για μια δεδομένη εφαρμογή.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	HT -ΙΝΕΣ	HM-ΙΝΕΣ
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3500	2000-2300
% περιεκτικότητα σε άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Η ταξινόμηση των ινών άνθρακα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Ένας από αυτούς τους παράγοντες είναι η τελική θερμοκρασία της θερμικής επεξεργασίας κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους, η οποία χωρίζει τις ίνες άνθρακα σε δύο κατηγορίες: ίνες άνθρακα και ίνες γραφίτη. Οι ίνες άνθρακα είναι εκείνες με περιεκτικότητα σε άνθρακα 80-98% και παράγονται από ανθρακούχα υλικά που υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία έως περίπου 1600 °C. Οι ίνες γραφίτη, από

την άλλη πλευρά, έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα υψηλότερη από 98% και παράγονται με θερμική επεξεργασία ινών άνθρακα σε θερμοκρασίες άνω των 2400 °C.

Η διεθνώς αποδεκτή γενική ταξινόμηση των ινών περιλαμβάνει τέσσερις κατηγορίες: ίνες άνθρακα, ίνες γραφίτη, ασυνεχείς ίνες άνθρακα και υφάσματα από ανθρακονήματα. Η διάκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών ινών άνθρακα δεν γίνεται πάντα, και οι δύο αναφέρονται μερικές φορές ως ίνες άνθρακα. Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα στρώματα των ατόμων. Ο γραφίτης είναι ένα κρυσταλλικό υλικό με τρισδιάστατο προσανατολισμό των στρωμάτων του, όπου τα άτομα συνδέονται με αδύναμες δυνάμεις Van der Waals, δίνοντάς του μια απαλή και ευαίσθητη υφή. Οι ίνες άνθρακα αντιστοιχούν σε δισδιάστατο προσανατολισμό των στρωμάτων τους, με υψηλές μηχανικές ιδιότητες και καλή θερμική αγωγιμότητα.

Οι ίνες άνθρακα ταξινομούνται επίσης με βάση τα πρόδρομα υλικά τους, τα οποία περιλαμβάνουν: ίνες άνθρακα με βάση το PAN, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πολυακρυλονιτρίλιο. ίνες άνθρακα με βάση το βήμα, οι οποίες κατασκευάζονται από κατάλληλες μορφές πίσσας. ίνες άνθρακα με βάση το βήμα της μεσοφασικής φάσης, οι οποίες κατασκευάζονται από βήμα μεσοφάσης μετά τη διαδικασία σπιν και την ενανθράκωση. ισότροπες ίνες άνθρακα με βάση το βήμα, οι οποίες κατασκευάζονται με ανθρακοποίηση ισότροπικών ινών με βάση το βήμα. ίνες άνθρακα με βάση την κυτταρίνη (ρεγιόν). και ίνες άνθρακα που καλλιεργούνται με αέρια φάση, οι οποίες παράγονται σε ατμόσφαιρα υδρογονανθράκων παρουσία καταλυτών όπως ο σίδηρος.

2.8. ΠΡΟΔΡΟΜΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Διάφορα υλικά όπως το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), το βήμα, η κυτταρίνη, η λιγνίνη, το μετάξι, η χιτοζάνη, ο ευκάλυπτος και άλλα πολυμερή όπως το πολυστυρένιο, το πολυαμίδιο και η πολυβινυλική αλκοόλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόδρομα υλικά για την παραγωγή ινών άνθρακα. Τα βασικά στάδια για την παραγωγή ινών άνθρακα είναι τα εξής:

1. Περιστροφή / οξειδωση: σε αυτό το στάδιο, η πρόδρομη ίνα οξειδώνεται σε θερμοκρασία μεταξύ 200-400 ° C.
2. Σταθεροποίηση: αυτή η διαδικασία προστατεύει την ίνα από τη συρρίκνωση λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στο σύστημα.
3. Ενανθράκωση: αυτή η διαδικασία διεξάγεται σε θερμοκρασία κάτω από 1600 ° C για την απομάκρυνση των H₂, O₂, N₂ και άλλων στοιχείων που δεν περιέχουν άνθρακα.
4. Γραφίτιοποίηση: κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η οποία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία άνω των 3000 ° C, η ίνα αποκτά υψηλή ελαστικότητα και αντοχή.

Όταν χρησιμοποιούνται φυσικές ίνες όπως μετάξι, χιτοζάνη ή ευκάλυπτος για την παραγωγή ινών άνθρακα, έχει παρατηρηθεί ότι αν και μειώνουν το κόστος παραγωγής, οδηγούν σε ίνες άνθρακα με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Επομένως, δεν προτιμάται η παραγωγή τέτοιων ινών άνθρακα. Οι ίνες που προέρχονται από πολυμερή με υψηλή περιεκτικότητα σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες απαιτούν περαιτέρω έρευνα, καθώς είναι ίνες άνθρακα υψηλής απόδοσης αλλά έχουν υψηλό κόστος επεξεργασίας.

2.8.1. ΠΟΛΥΑΚΡΥΛΟΝΙΤΡΙΛΙΟ (PAN)

Διάφορα υλικά όπως το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), το βήμα της μεσοφασικής φάσης, η κυτταρίνη, η λιγνίνη, το μετάξι, η χιτοζάνη, ο ευκάλυπτος και άλλα πολυμερή όπως το πολυστυρένιο, το πολυαμίδιο και η πολυβινυλική αλκοόλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόδρομες ουσίες για ίνες άνθρακα. Τα βασικά στάδια παραγωγής ινών άνθρακα είναι η οξείδωση, η σταθεροποίηση, η ενανθράκωση και η γραφίτιοποίηση.

Το PAN είναι ένας τύπος οργανικού πολυμερούς με τον τύπο $(C_3H_3N)_n$ και είναι το πιο κατάλληλο πρόδρομο υλικό για την παραγωγή ινών άνθρακα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, της απόδοσης άνθρακα, της δομής, των ιδιοτήτων και του κόστους. Σήμερα, οι ίνες άνθρακα με βάση το PAN αντιπροσωπεύουν περίπου το 70% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ινών άνθρακα.

Το πολυακρυλονιτρίλιο μπορεί να πολυμεριστεί από τοξικό ακρυλονιτρίλιο με περιεκτικότητα σε μονομερές 5% κατά βάρος. Τα συμπολυμερή με βάση το αιθυλένιο-οκτένιο ή το βουτένιο και οι ακρυλικοί μεθυλεστέρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της δυνατότητας επεξεργασίας των ινών και όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των ακρυλικών εστέρων, τόσο πιο ομαλός είναι ο σχηματισμός ινών κατά το στάδιο πήξης. Η ενσωμάτωση συμπολυμερών μπορεί επίσης να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών άνθρακα λόγω του αυξημένου μοριακού προσανατολισμού τόσο στο πρόδρομο υλικό όσο και στις ίνες άνθρακα. Τα όξινα comonomers όπως το ακρυλικό οξύ διευκολύνουν την αντίδραση κυκλοποίησης κατά τη σταθεροποίηση. Συνήθως, τα συμπολυμερή με βάση το PAN που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση υλικού άνθρακα έχουν μοριακά βάρη που κυμαίνονται από 70.000 έως 260.000 g/mol.

Ο διαλύτης που χρησιμοποιείται για την κλώση ινών PAN μπορεί να είναι νερό, DMF, Zn ή NaSCN, ανάλογα με τη μέθοδο κλώσης. Τα συμπολυμερή με βάση το PAN περιέχουν πολικές ομάδες νιτριλίου, επομένως υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των αλυσίδων. Τα μονομερή PAN υφίστανται θερμικά επαγόμενη κυκλοποίηση κάτω από το σημείο τήξης, γεγονός που καθιστά δύσκολη την κλώση ινών από σκόνη PAN, εκτός εάν προστεθούν μεγάλες ποσότητες προσθέτων διαλυτών. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να εκτελέσετε την περιστροφή σε περιβάλλον καθαρού δωματίου και να παράγετε ίνες PAN μικρής διαμέτρου (0,7-1,2 denier) για να αποκτήσετε ίνες άνθρακα με καλές μηχανικές ιδιότητες. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η μορφολογία των πρόδρομων ινών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες κλώσης, πράγμα που σημαίνει ότι οι ίνες με διαφορετική μορφολογία απαιτούν διαφορετικές συνθήκες σταθεροποίησης και ενανθράκωσης για την παραγωγή ινών άνθρακα με αποδεκτές μηχανικές ιδιότητες για την προβλεπόμενη χρήση τους (π.χ. αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες).

Η επεξεργασία μετά την κλώση των πρόδρομων ακρυλικών υλικών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παραγωγή ινών άνθρακα. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία με υπερμαγγανικό κάλιο (KMnO₄) οδηγεί σε πλήρη γραφίτιοποίηση σε χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 200 βαθμούς Κελσίου. Η επεξεργασία των τροποποιημένων ινών σε θερμοκρασίες άνω των 2000 βαθμών Κελσίου έχει ως αποτέλεσμα ίνες με υψηλότερη πυκνότητα, καλύτερο προτιμώμενο προσανατολισμό, χαμηλότερο βαθμό τυχαιοποίησης, μεγαλύτερο μέγεθος στοίβαξης και μεγαλύτερη ελαστικότητα, αλλά με χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό.

2.8.2. ΚΥΤΤΑΡΙΝΗ

Η κυτταρίνη είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές και ανήκει στην οικογένεια των πολυσακχαριτών. Αποτελείται από πάνω από 10.000 μόρια γλυκόζης που

σχηματίζουν ευθείες αλυσίδες. Αυτές οι μακριές αλυσίδες συνδέονται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου, με αποτέλεσμα ισχυρά δίκτυα. Οι πρώτες ίνες που παρήχθησαν εμπορικά κατασκευάστηκαν από αναγεννημένη κυτταρίνη (ρεγιόν), αλλά η χρήση της άρχισε να μειώνεται σημαντικά στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Η διαδικασία μετατροπής της κυτταρίνης σε ίνες άνθρακα περιλαμβάνει διάφορα στάδια, συμπεριλαμβανομένης της περιστροφής, της οξειδωσης, της σταθεροποίησης σε περιβάλλον αέρα ή οξυγόνου, της ενανθράκωσης και της γραφίτοποίησης. Κατά τη διάρκεια της σταθεροποίησης, οι αλυσίδες υφίστανται είτε διασύνδεση είτε αποπολυμερισμό. Ως αποτέλεσμα, η σταθεροποίηση της πίεσης δεν είναι κατάλληλη για την παραγωγή ινών από PAN. Η σταθεροποίηση είναι μια οξειδωτική διαδικασία που περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια: απομάκρυνση της φυσικής υγρασίας της ίνας σε θερμοκρασίες μεταξύ 25-150 ° C, αφυδάτωση ινών κυτταρίνης σε θερμοκρασίες μεταξύ 150-240 ° C, διάσπαση της δομής κυτταρίνης με ταυτόχρονη απελευθέρωση νερού, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου σε θερμοκρασίες μεταξύ 240-400 ° C και σχηματισμό αρωματικών δακτυλίων. Η ενανθράκωση συμβαίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 400-700 °C, όπου κυριαρχεί ο σχηματισμός στοιβών που μοιάζουν με γραφίτη. Η γραφίτοποίηση γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 700-2700°C και απαιτεί την εφαρμογή τάσης. Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της δομής γραφίτη, ο προσανατολισμός της ίνας κυτταρίνης καταστρέφεται και η προκύπτουσα γραφίτική ίνα δεν παρουσιάζει προσανατολισμό.

Η εφαρμογή πίεσης σε κατάλληλη θερμοκρασία για γραφίτοποίηση έχει ως αποτέλεσμα τον προσανατολισμό των στρωμάτων γραφίτη λόγω της πλαστικότητάς τους που αποκτάται μέσω πολλαπλών λειτουργιών ολίσθησης και του φαινομένου διάχυσης. Επί του παρόντος, οι ίνες άνθρακα δεν παράγονται με βάση την κυτταρίνη. Ένας λόγος για αυτό είναι η χαμηλή απόδοση παραγωγής ινών άνθρακα από κυτταρίνη (20-30% σε σύγκριση με 55% από PAN). Ένα άλλο μειονέκτημα της παραγωγής ινών άνθρακα με βάση την κυτταρίνη είναι ότι ο προσανατολισμός των στοιβών γραφίτη συμβαίνει κατά τη διάρκεια της γραφίτοποίησης, η οποία πραγματοποιείται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τις ίνες που

κατασκευάζονται από πολυακρυλονιτρίλιο όπου ο προσανατολισμός με τέντωμα συμβαίνει κατά το στάδιο σταθεροποίησης σε θερμοκρασίες 200-300 ° C.

2.8.3. ΠΙΣΣΑ

Οι ίνες άνθρακα μπορούν να παραχθούν από μια ποικιλία πρόδρομων υλικών, συμπεριλαμβανομένου του πολυακρυλονιτρίλιου (PAN) και του βήματος. Ωστόσο, η παραγωγή ινών άνθρακα από πίσσα, το οποίο είναι ένα ιξώδες υλικό που κατασκευάζεται από διάφορες πηγές, όπως η άσφαλτος πετρελαίου ή το πίσσα άνθρακα, παρουσιάζει μια σειρά τεχνικών προκλήσεων.

Η διαδικασία παραγωγής ξεκινά με θερμική επεξεργασία του πρόδρομου υλικού σε θερμοκρασίες άνω των 350 °C, η οποία το μετατρέπει σε βήμα μεσοφάσης. Αυτό το βήμα είναι ανισοτροπικό και περιέχει τμήματα υγρών κρυστάλλων, γεγονός που καθιστά δύσκολη την περιστροφή σε ίνες. Η διαδικασία περιστροφής είναι απαραίτητη για τον προσανατολισμό των τμημάτων υγρών κρυστάλλων και την

ευθυγράμμιση των προκύπτοντων στρωμάτων που μοιάζουν με γραφίτη κατά μήκος του άξονα ινών.

Μετά την περιστροφή, οι ίνες πίσσας πρέπει να σταθεροποιηθούν μέσω θερμικής επεξεργασίας σε θερμοκρασίες έως 2000 ° C. Αυτή η υψηλή θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα ίνες άνθρακα με υψηλό βαθμό ελαστικότητας, αλλά δεν είναι ακόμα συγκρίσιμες με αυτές που παράγονται από PAN. Αυτές οι ίνες επεξεργάζονται περαιτέρω σε θερμοκρασίες έως 3000 ° C, γεγονός που προκαλεί αναδιάταξη των στρωμάτων γραφίτη και ενισχύει την ευθυγράμμιση των ινών.

Η διάμετρος της ίνας μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας τις παραμέτρους περιστροφής, όπως το μέγεθος της κλώσης που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία περιπλέκεται από το υψηλό σημείο τήξης του βήματος και την ανάγκη για ακριβή ρεολογικό έλεγχο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας περιστροφής. Επιπλέον, η χρήση μιγμάτων ισοτροπικών και ανισοτροπικών γηπέδων μπορεί να οδηγήσει σε διαχωρισμό φάσης κατά τη διάρκεια του σχηματισμού ινών.

Υπάρχουν δύο κοινές μορφολογίες που μπορούν να παραχθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κλώσης. Η πρώτη είναι μια επίπεδη ακτινική μορφολογία που προτιμάται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και για παχύτερες ίνες. Η δεύτερη είναι μια επίπεδη πολική μορφολογία που προωθείται από τις υψηλές θερμοκρασίες και τις λεπτότερες ίνες. Η μορφολογία καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων περιστροφής και των ρεολογικών ιδιοτήτων του βήματος.

Συνοπτικά, ενώ το πίσσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόδρομο υλικό για ίνες άνθρακα, η διαδικασία παραγωγής είναι πολύπλοκη και παρουσιάζει πολλές τεχνικές προκλήσεις. Ωστόσο, η κατανόηση των ιδιοτήτων του βήματος και της συμπεριφοράς

του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας περιστροφής μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή υψηλής ποιότητας ινών άνθρακα με μοναδικές μορφολογίες και ιδιότητες.

2.9 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

2.9.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗ

Η παραγωγή ινών άνθρακα από κυτταρίνη περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Η κυτταρίνη είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές που υφίσταται μια διαδικασία μετασχηματισμού για να γίνει ίνες άνθρακα. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: οξείδωση, σταθεροποίηση σε περιβάλλον με αέρα ή οξυγόνο, ενανθράκωση και γραφίτιοποίηση. Κατά τη διάρκεια της σταθεροποίησης, η αλυσίδα κυτταρίνης υφίσταται κατακερματισμό ή αποπολυμερισμό, γεγονός που καθιστά τη σταθεροποίηση της πίεσης ακατάλληλη για την παραγωγή ινών με βάση το PAN.

Η σταθεροποίηση είναι μια οξειδωτική διαδικασία που περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια: απομάκρυνση της φυσικής υγρασίας των ινών σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 25-150 °C, αφυδάτωση των ινών κυτταρίνης σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 150-240 °C, διάσπαση της δομής της κυτταρίνης ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνει νερό, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 240-400 °C και σχηματισμό αρωματικών δακτυλίων. Η

ενανθράκωση συμβαίνει σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 400-700 ° C, ευνοώντας το σχηματισμό στοιβών που μοιάζουν με γραφίτη. Η γραφίτοποίηση γίνεται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 700-2700°C, με την εφαρμογή τάσης. Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της γραφιτικής δομής, ο προσανατολισμός της ίνας κυτταρίνης καταστρέφεται, με αποτέλεσμα μια μη προσανατολισμένη γραφιτική ίνα.

Η εφαρμογή πίεσης κατά τη διάρκεια της γραφίτοποίησης σε θερμοκρασίες άνω των 3000 °C μπορεί να προσανατολίσει τα γραφιτικά στρώματα λόγω πλαστικότητας και ταυτόχρονης ολίσθησης των στρωμάτων και διάχυσης. Ωστόσο, επί του παρόντος, οι ίνες άνθρακα δεν παράγονται χρησιμοποιώντας κυτταρίνη ως βασικό υλικό λόγω της χαμηλής απόδοσης (20-30% σε σύγκριση με την παραγωγή ινών με βάση το PAN με απόδοση 55%) και του γεγονότος ότι ο προσανατολισμός των γραφιτικών στοιβών συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες (>2000 ° C) κατά τη διάρκεια της γραφίτοποίησης. Αντίθετα, ο προσανατολισμός των ινών με βάση το PAN συμβαίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (200-300 °C) κατά τη διάρκεια του σταδίου σταθεροποίησης, απαιτώντας λιγότερη ενέργεια.

2.9.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΠΙΣΣΑ

Οι ίνες άνθρακα παράγονται από διάφορες μορφές πίσσας, όπως ασφαλτος πετρελαίου, πίσσα άνθρακα, PVC κ.λπ. Τα υλικά υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία άνω των 350°C, η οποία τα μετατρέπει σε μεσοφασικό βήμα, ένα ανισοτροπικό υλικό που περιέχει τμήματα υγρών κρυστάλλων. Το βήμα στη συνέχεια περιστρέφεται σε ίνες, οι οποίες αποκτούν υψηλό βαθμό αξονικής ευθυγράμμισης λόγω υδροδυναμικών φαινομένων. Η ευθυγράμμιση των ινών βελτιώνεται περαιτέρω με σταθεροποίηση και ανόπτηση σε θερμοκρασίες έως 2000°C, γεγονός που ενισχύει τα γραφιτικά στρώματα. Αυτές οι ίνες έχουν υψηλή ελαστικότητα, μέχρι 7×105 MPa,

αλλά είναι ασθενέστερες από τις ίνες πολυακρυλονιτριλίου. Η θερμική επεξεργασία σε θερμοκρασίες έως 3000 °C προκαλεί την αναδιάταξη των γραφιτικών στρωμάτων, η οποία ενισχύεται περαιτέρω με ταυτόχρονη τέντωση των ινών. Οι ίνες άνθρακα που παράγονται από πίσσα, ειδικά το βήμα μεσοφασικής φάσης, είναι κατάλληλες για σκοπούς ενίσχυσης. Σχεδόν το 100% των ινών άνθρακα της Ιαπωνίας παράγονται από πίσσα. Το ισότροπο βήμα, που παράγεται από υλικά όπως το χλωριούχο βινύλιο, οδηγεί στην παραγωγή θερμοπλαστικών ινών που οξειδώνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες (<100°C) με αυξημένους ρυθμούς ψύξης. Αυτές οι ίνες υφίστανται οξείδωση και διασύνδεση, ακολουθούμενη από ενανθράκωση χωρίς σημαντικό προσανατολισμό. Είναι χαμηλού κόστους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μόνωση κτιρίων.

2.9.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΠΟΛΥΑΚΡΥΛΟΝΙΤΡΙΛΙΟ

Η παραγωγή ινών άνθρακα με βάση τις ίνες PAN πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια:

1. Νηματοποίηση ή σχηματισμός ινών
2. Σταθεροποίηση
3. Ανθράκωση
4. Γραφίτοποίηση

Υπάρχουν δύο τύποι συνθετικών ινών: ημισυνθετικές ή κυτταρινικές ίνες και 100% συνθετικές ίνες. Οι συνθετικές ίνες παράγονται με δύο διαφορετικούς τρόπους: μέσω κλώσης τήγματος και κλώσης διαλύματος.

Η περιστροφή τήγματος χρησιμοποιεί θερμότητα για να λιώσει το πολυμερές και να επιτύχει το κατάλληλο ιξώδες στο υγρό για να επιτρέψει τη δημιουργία ινών μέσω περιστροφής.

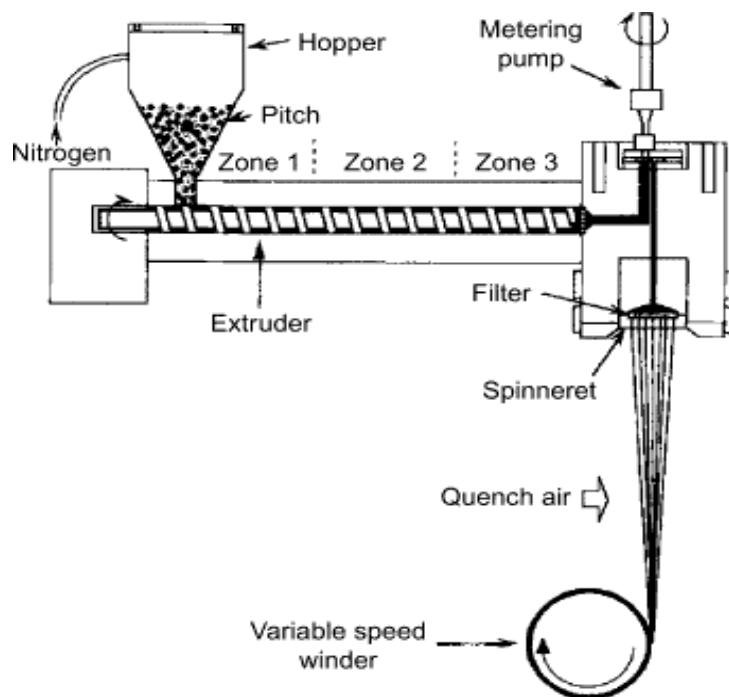
Η περιστροφή διαλύματος χρησιμοποιεί ένα διάλυμα του πολυμερούς που περιστρέφεται μέσω ενός στομίου μήτρας για τη δημιουργία της ίνας.

Στην περίπτωση των ινών άνθρακα με βάση το PAN, η διαδικασία ξεκινά με την περιστροφή της πρόδρομης ίνας χρησιμοποιώντας είτε κλώση τήγματος είτε κλώση διαλύματος. Η πρόδρομη ίνα στη συνέχεια πλένεται, ξηραίνεται και τυλίγεται σε καρούλι.

Το επόμενο στάδιο είναι η σταθεροποίηση, όπου η ίνα θερμαίνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών παρουσία οξυγόνου για να αποφευχθεί η τήξη των ινών κατά τα επόμενα στάδια θέρμανσης.

Ακολουθεί το στάδιο ενανθράκωσης, όπου η ίνα θερμαίνεται σε θερμοκρασίες έως 3000 ° C σε αδρανή ατμόσφαιρα για να αφαιρέσει όλα τα μη ανθρακούχα στοιχεία και να δημιουργήσει ανθρακονήματα.

Τέλος, το στάδιο γραφίτιοποίησης περιλαμβάνει τη θέρμανση της ίνας σε ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες, έως 3000°C, σε αδρανή ατμόσφαιρα για την επίτευξη υψηλότερου βαθμού προσανατολισμού και αύξησης της κρυσταλλικότητας, με αποτέλεσμα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.



Σχήμα 2.8: Αναπαράσταση μηχανήματος που χρησιμοποιείται για την ινοποίηση πολυμερούς. Στο σχήμα φαίνεται και μία όψη της φιλιέρας.

Η παραγωγή ινών άνθρακα από ίνες PAN πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια: περιστροφή, σταθεροποίηση, ενανθράκωση και γραφίτιοποίηση. Υπάρχουν δύο τύποι συνθετικών ινών: ημισυνθετικές ίνες ή ίνες με βάση την κυτταρίνη και 100% συνθετικές ίνες. Οι συνθετικές ίνες παράγονται με δύο διαφορετικούς τρόπους: περιστροφή μέσω τήγματος και περιστροφή μέσω διαλύματος. Η περιστροφή μέσω διαλύματος συνήθως απαιτεί μεγάλες ποσότητες οργανικών διαλυτών, οι οποίοι διαλύουν το πολυμερές και σχηματίζουν ένα κατάλληλο διάλυμα για το επόμενο στάδιο εξώθησης.

Ένας άλλος τρόπος παραγωγής ινών, ο οποίος είναι λιγότερο συνηθισμένος, είναι η περιστροφή αντίδρασης. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, ο σχηματισμός ινών πραγματοποιείται από προπολυμερή και μονομερή, τα οποία στη συνέχεια πολυμερίζονται και διασταυρώνονται, ενώ οι ίνες έχουν ήδη σχηματιστεί. Ο όρος προ-πολυμερές αναφέρεται σε ένα μονομερές ή ένα μονομερές σύστημα που έχει αντιδράσει σε μια κατάσταση ενδιάμεσου μοριακού βάρους. Αυτό το υλικό είναι

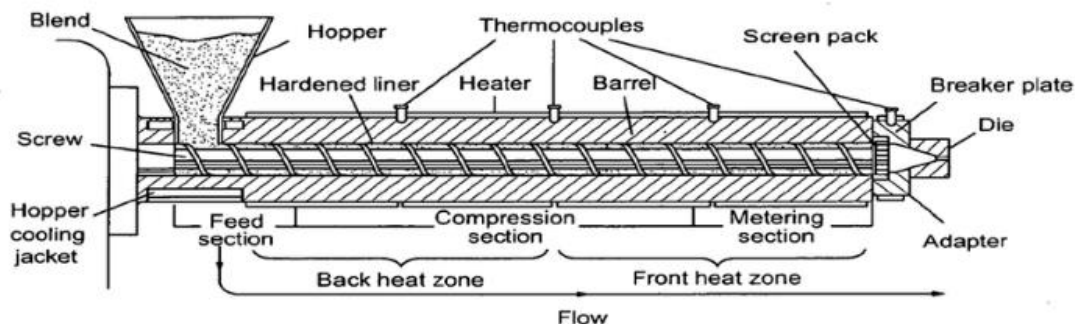
ικανό για περαιτέρω πολυμερισμό από κατάλληλες αντιδραστικές ομάδες σε μια πιο σταθερή κατάσταση υψηλού μοριακού βάρους. Οι ημισυνθετικές ίνες παράγονται από φυσικά πολυμερή, όπως η κυτταρίνη. Ωστόσο, οι εξ ολοκλήρου συνθετικές ίνες είναι προϊόντα πολυμερισμού μικρότερων χημικών δομικών μονάδων. Οι ίνες παράγονται αναγκάζοντας ένα υγρό κατάλληλου ιξώδους μέσω των οπών ενός spinneret. Στη συνέχεια, οι ίνες σχηματισμού παίρνουν μια σταθερή μορφή.

1η φάση : Ινοποίηση

Η πρώτη φάση είναι ο σχηματισμός ινών, επίσης γνωστός ως περιστροφή. Σε αυτή τη μέθοδο, το πολυμερές φέρεται σε κατάλληλο ιξώδες μέσω θέρμανσης έτσι ώστε να μπορεί να εξωθηθεί από το spinneret. Χρησιμοποιείται για πολυμερή που δεν αποσυντίθενται στις θερμοκρασίες που απαιτούνται για την περιστροφή. Η τήξη μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, αλλά η κυρίαρχη τάση είναι η άμεση εξώθηση του τήγματος χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά θερμαινόμενες μηχανές κλώσης. Εναλλακτικά, το τηγμένο πολυμερές υποβάλλεται σε επεξεργασία σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου, συνήθως άζωτο, και μετράται με ακρίβεια από μια αντλία γραναζιών. Το τηγμένο πολυμερές εξωθείται με σταθερό ρυθμό και υψηλή πίεση μέσω της σβούρας σε ένα ψυχρότερο ρεύμα αέρα, το οποίο στερεοποιεί τις ίνες. Τα λιπαντικά και τα λάδια φινιρίσματος χρησιμοποιούνται επίσης στις ίνες κατά τη διάρκεια της περιέλιξής τους. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας περιέλιξης, υπάρχει ένας οδηγός που μετατρέπει τις μεμονωμένες ίνες σε ένα μόνο νήμα που αποτελείται από 15 έως 100 ίνες.

Δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούνται διαλύτες στη διαδικασία παραγωγής ινών, οι εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων είναι σχετικά περιορισμένες σε σύγκριση με άλλες τεχνικές. Τυχόν ανεπιθύμητες εκπομπές οφείλονται σε λάδια και λιπαντικά που προστίθενται για να προσδώσουν τις απαραίτητες ιδιότητες, όπως η λίπανση. Αυτές

οι ουσίες εξατμίζονται, συμπυκνώνονται και συγκεντρώνονται στην τελική τους μορφή ως πτητικά υπολείμματα.



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση της μεθόδου την ινοποίησης μέσω τήγματος.

2) Ξηρή ινοποίηση:

Η ξηρή κλώση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνθετικών ινών, όπου το πολυμερές διαλύεται σε διαλύτη και το προκύπτον διάλυμα εξωθείται σε θάλαμο θερμού αέρα, ο οποίος εξατμίζει τον διαλύτη, αφήνοντας στερεές ίνες. Η τεχνική χρησιμοποιείται για πολυμερή που δεν μπορούν να αντέξουν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως το πολυακρυλονιτρίλιο.

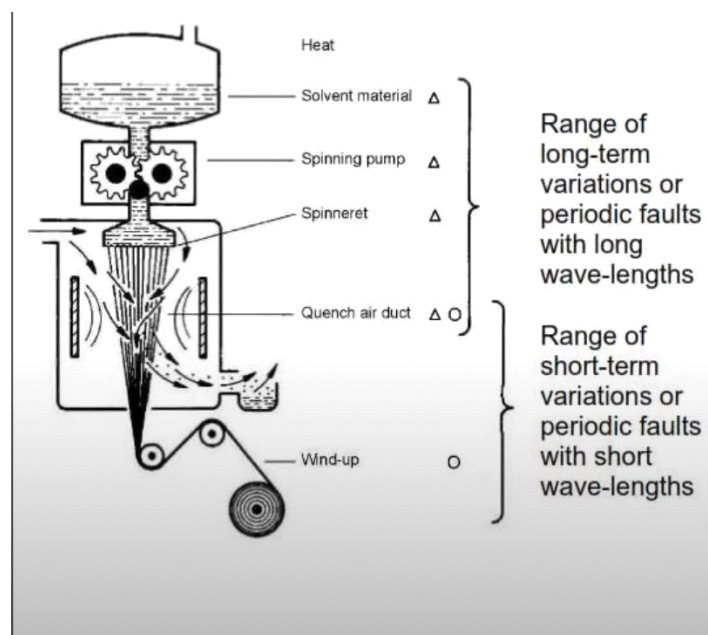
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξηρής περιστροφής, το πολυμερές διαλύεται σε διαλύτη, ο οποίος δημιουργεί ένα ιξώδες υγρό που μπορεί εύκολα να εξωθηθεί μέσω ενός spinneret (μια συσκευή με μικρές οπές) σε ένα θάλαμο όπου ο θερμός αέρας εξατμίζει τον διαλύτη. Οι εξωθημένες ίνες στερεοποιούνται καθώς ψύχονται και μπορούν να συλλεχθούν σε καρούλι.

Ο διαλύτης που χρησιμοποιείται στη διεργασία είναι συνήθως μια πτητική οργανική ένωση, η οποία μπορεί να έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία εάν δεν αντιμετωπιστεί σωστά. Για να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι

επιπτώσεις, πολλές εγκαταστάσεις ξηρής κλώσης χρησιμοποιούν συστήματα κλειστού βρόχου που δεσμεύουν και ανακυκλώνουν τον διαλύτη.

Η ξηρή κλώση έχει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές κλώσης, όπως η ικανότητα παραγωγής ινών με υψηλό βαθμό ομοιομορφίας και ελέγχου της διαμέτρου των ινών. Ωστόσο, έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το κόστος των διαλυτών που χρησιμοποιούνται και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας.

Επιπλέον, η ξηρή κλώση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σύνθετων ινών συνδυάζοντας δύο ή περισσότερα διαφορετικά πολυμερή, όπως νάιλον και πολυεστέρα, για τη δημιουργία ινών με μοναδικές ιδιότητες. Οι ίνες που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, όπως υφάσματα, ιατρικές συσκευές και εξαρτήματα αυτοκινήτων.



Σχήμα 2.10: Αναπαράσταση της ξηρής ινοποίησης.

3) Υγρή ινοποίηση:

Η ξηρή κλώση είναι μια τεχνική που περιλαμβάνει τη διάλυση ενός πολυμερούς σε έναν οργανικό διαλύτη. Τα πρόσθετα αναμειγνύονται και το προκύπτον διάλυμα διηθείται για να παραχθεί ένα υγρό διάλυμα, το οποίο στη συνέχεια περιστρέφεται σε ίνες σε μια περιοχή που παρέχεται με θερμαινόμενο αέριο. Αυτή η διαδικασία εξατμίζει τον διαλύτη, με αποτέλεσμα τη στερεοποίηση των ινών άνθρακα. Αυτή η τεχνική προτιμάται για εύκολα διαλυτά πολυμερή, όπως οξική κυτταρίνη και ακρυλικά. Ωστόσο, εκπέμπει μεγάλες ποσότητες πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) ανά παραγόμενη ίνα, προκαλώντας ρύπανση στο περιβάλλον. Οι εκπομπές περιλαμβάνουν υπολείμματα ΠΟΕ μονομερών, οργανικών διαλυτών, προσθέτων και άλλων ενώσεων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία.

Η υγρή περιστροφή, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί διαλύτες για να υγροποιήσει το πολυμερές και στη συνέχεια να το περιστρέψει σε ίνες. Οι διαλύτες που χρησιμοποιούνται είναι το διμεθυλοφορμαμίδιο (DMF), το διμεθυλακεταμίδιο (DMAc) ή η ακετόνη, μαζί με ένα ασθενές ανόργανο οξύ, όπως το χλωριούχο χαλκό και το ενυδατωμένο θειοθειικό νάτριο. Τα βιομηχανικά ακροφύσια κλώσης έχουν 10.000 έως 60.000 οπές με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,05-0,4 mm.

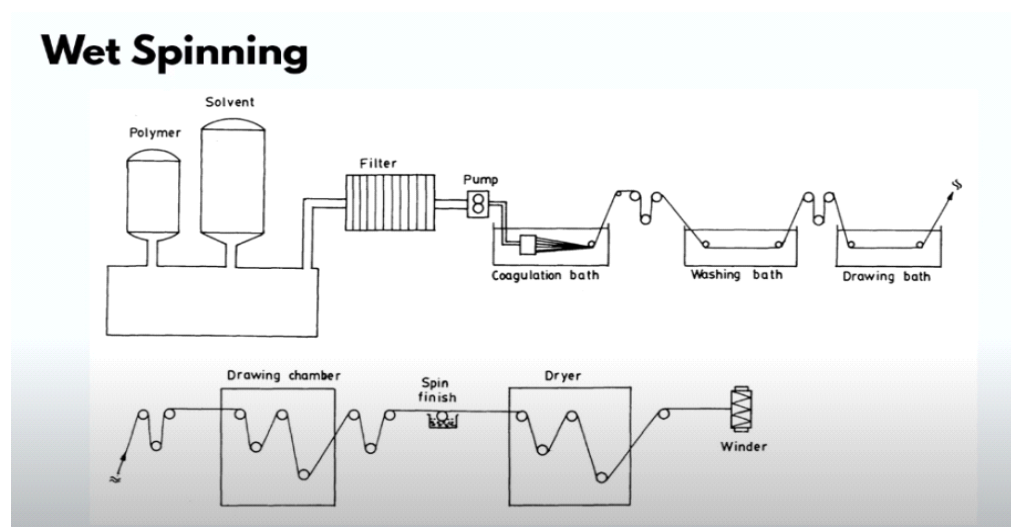
Στην υγρή περιστροφή, το πολυμερές εξωθείται σε λουτρό πήξης που περιέχει ένα μείγμα διαλύτη και μη διαλυμένου, που ονομάζεται επίσης μέσο πήξης. Η μαζική μεταφορά πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

1. Με τη διάχυση του διαλύτη από την εξωθημένη μάζα πολυμερούς στο λουτρό πήξης
2. Με τη διάχυση του παράγοντα πήξης από το λουτρό πήξης στις πρωτοπλασματικές ίνες. Οι πρωτοπλασματικές ίνες αναφέρονται στις ίνες που σχηματίζονται σε διάφορα στάδια επεξεργασίας υλικού, συμπεριλαμβανομένου πριν από το σχηματισμό του τελικού προϊόντος. Το υλικό παράγει ίνες κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, αλλά αυτές δεν έχουν

τα επιθυμητά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, οπότε η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ληφθεί το επιθυμητό τελικό προϊόν.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την ικανότητα περιστροφής μιας ακρυλικής ίνας συμπολυμερούς, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης της δεξαμενής πήξης, της θερμοκρασίας πήξης, του ρυθμού εξάτμισης και του ρυθμού συλλογής ινών. Η μικροδομή της ίνας σχηματίζεται στη δεξαμενή πήξης, καθιστώντας τις συνθήκες πήξης κρίσιμες. Το κρίσιμο σημείο της διαδικασίας είναι η μετάβαση της πρωτεΐνης από την υγρή στη στερεά φάση. Υπάρχουν δύο πιθανές μεταβάσεις φάσης στη δεξαμενή πήξης από υγρό σε στερεό. Το πρώτο είναι η βύθιση του πολυμερούς για να σχηματίσει ένα στερεό, το οποίο είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο αφού οι προκύπτουσες ίνες έχουν χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Η επιθυμητή μετάβαση είναι σε ένα πήγμα που χαρακτηρίζεται από δεσμούς υδρογόνου και διπόλου μεταξύ του πολυμερούς και των μορίων διαλύτη. Η συγκέντρωση στη δεξαμενή πήξης ρυθμίζεται για να παράγει την επιθυμητή μικροδομή. Η χαμηλή συγκέντρωση συμβάλλει θετικά στην ταχεία απομάκρυνση του διαλύτη, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλων πόρων ή συσσωματωμάτων σωματιδίων μεγαλύτερων από το επιθυμητό. Η υψηλή συγκέντρωση, από την άλλη πλευρά, οδηγεί σε πυκνότερη μικροδομή, αλλά επιβραδύνει τον ρυθμό απομάκρυνσης του διαλύτη, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα να κολλήσουν οι ίνες. Ο λόγος έλξης, ο οποίος είναι ο λόγος της ταχύτητας περιέλιξης προς την συμπιεσμένη ταχύτητα ροής στο φιλίερο, είναι χαμηλότερος από ένα. Όταν λαμβάνεται επίσης υπόψη ο ελεύθερος ρυθμός εξάτμισης, ο λόγος έλξης γίνεται μεγαλύτερος από ένα. Επιπλέον, η επιμήκυνση ή η χαλάρωση των ινών συμβαίνει στη δεξαμενή πήξης καθώς ο λόγος έλξης αλλάζει από την ταχύτητα με την οποία αφαιρούνται οι ίνες από το λουτρό στην ταχύτητα με την οποία το περιστρεφόμενο διάλυμα εξέρχεται από το φιλίερο. Συνήθως, οι τιμές είναι χαμηλότερες από μία, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι οι ίνες δεν επιμηκύνονται στο λουτρό. Αμέσως μετά την έξοδο από το φιλίερο, οι ίνες διογκώνονται και η ταχύτητά τους μειώνεται. Η διόγκωση προκύπτει από την

ελαστικότητα του διαλύματος κλώσης, το οποίο αποθηκεύει ενέργεια από τις διατμητικές τάσεις που δρουν κατά την είσοδο και τη διέλευση από την κλώση.



Σχήμα 2.11: Αναπαράσταση υγρής ινοποίησης σε κατάλληλο μηχανήμα.

2η φάση : Σταθεροποίηση / οξείδωση

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης της διαδικασίας, συμβαίνει σταθεροποίηση και οξείδωση. Για τη θερμική σταθεροποίηση των πρόδρομων ιών πολυακρυλονιτριλίου, χρησιμοποιούνται θερμοκρασίες μεταξύ 200-300 °C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση πολλών δεσμών υδρογόνου και την οξείδωση του υλικού, δημιουργώντας συνθήκες για το σχηματισμό μιας εξαγωνικής δομής. Η διαδικασία περιλαμβάνει αφυδάτωση, οξείδωση και κυκλοποίηση των ομάδων κυανίου, σχηματίζοντας δακτυλίους πυριδίνης που παρουσιάζουν δομή που μοιάζει με ανεμόμυλο και μπορούν να ανθρακωθούν περαιτέρω. Η συγκέντρωση των ομάδων νιτριλίου αρχίζει περίπου στους 180°C και ολοκληρώνεται στους 300°C παρουσία οξυγόνου. Το οξυγόνο παίζει σημαντικό ρόλο και προκαλεί κυκλοποίηση της ομάδας κυανίου, μετατρέποντας τον τριπλό δεσμό C-N σε διπλό δεσμό. Η κυκλοποίηση είναι

η κύρια αντίδραση σταθεροποίησης και πρέπει να ελέγχεται για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των ινών, καθώς μπορεί να εμφανιστούν ισχυρές εξώθερμες αντιδράσεις. Για να σταθεροποιηθούν οι ίνες και να αποκτήσουν το χαρακτηριστικό μαύρο χρώμα και την υψηλή αντοχή τους, πρέπει να αποθηκεύονται γύρω στους 200°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εμφανίζεται μια ισχυρή εξώθερμη αντίδραση και το βάρος των ινών μειώνεται σημαντικά.

Στη συνέχεια, η αφυδάτωση εμφανίζεται στους 300-400 °C, όπου τα άτομα υδρογόνου διαχωρίζονται από κάθε δακτύλιο για να σχηματίσουν την τελική ακόρεστη δομή της σταθεροποιημένης ίνας. Οι ίνες στη συνέχεια σταθεροποιούνται και θερμαίνονται σε θερμοκρασία περίπου 1500-2500°C σε αδρανή ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο για ορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως λίγα λεπτά. Αυτό εμποδίζει την ανάφλεξη των ινών, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει απώλεια βάρους λόγω της εξάτμισης των ομάδων νιτριλίου και αμμωνίας που συνδέονται με τις ομάδες αμινομεθυλενίου που βρίσκονται στα άκρα των κυκλικών πολυμερών.

Κατά τη φάση σταθεροποίησης/οξειδωσης, η θερμική σταθεροποίηση των πρόδρομων ινών πολυακρυλονιτριλίου συμβαίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 200-300°C. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, πολλοί από τους υπάρχοντες δεσμούς υδρογόνου σπάνε και το υλικό οξειδώνεται, δημιουργώντας τις συνθήκες για το σχηματισμό μιας εξαγωνικής δομής.

Κατά τη διάρκεια της σταθεροποίησης, λαμβάνουν χώρα αφυδάτωση, οξείδωση και κυκλοποίηση των κυανοομάδων, σχηματίζοντας δακτυλίους τύπου πυριδίνης που παρουσιάζουν δομή ανεμόμυλου και μπορούν να ενανθρακωθούν περαιτέρω. Η συγκέντρωση των ομάδων νιτριλίου αρχίζει περίπου στους 180°C και ολοκληρώνεται στους 300°C παρουσία οξυγόνου.

Το οξυγόνο παίζει σημαντικό ρόλο και προκαλεί κυκλοποίηση της κυανοομάδας, μετατρέποντας τον τριπλό δεσμό C-N σε διπλό δεσμό C-N. Η κυκλοποίηση είναι η κύρια αντίδραση σταθεροποίησης και πρέπει να ελέγχεται για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των ινών, καθώς παρατηρούνται ισχυρές εξώθερμες αντιδράσεις. Για να σταθεροποιηθούν οι ίνες και να αποκτήσουν το χαρακτηριστικό μαύρο χρώμα και την υψηλή αντοχή, πρέπει να φυλάσσονται σε θερμοκρασία περίπου 200°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εμφανίζεται μια ισχυρή εξώθερμη αντίδραση και το βάρος των ινών μειώνεται σημαντικά.

Η αφυδρογόνωση στη συνέχεια συμβαίνει σε θερμοκρασία 300-400 °C, όπου τα άτομα υδρογόνου διαχωρίζονται από κάθε δακτύλιο για να σχηματίσουν την τελική ακόρεστη δομή της σταθεροποιημένης ίνας.

Στη συνέχεια, οι ίνες σταθεροποιούνται και θερμαίνονται σε θερμοκρασία περίπου 1500-2500°C σε αδρανή ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο για ορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως λίγα λεπτά. Αυτό εμποδίζει την ανάφλεξη των ινών και ταυτόχρονα υπάρχει απώλεια βάρους των ινών λόγω της εξάτμισης των ομάδων νιτριλίου και αμμωνίας που συνδέονται με την εξάτμιση των αμινομάδων στα άκρα των κυκλικών πολυμερών.

3η φάση: Ανθρακοποίηση

Η ενανθράκωση (πυρόλυση) σταθεροποιημένων ινών λαμβάνει χώρα σε αδρανή ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο, συνήθως σε άζωτο ή αέριο αργό. Οι συνθήκες ενανθράκωσης, ιδιαίτερα η θερμοκρασία, παίζουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία ινών σε αυτό το στάδιο κυμαίνονται από 1000

° C έως 1100 ° C για την παραγωγή ινών υψηλής αντοχής. Σε θερμοκρασίες γύρω στους 1000°C, παράγονται ίνες άνθρακα με σχετικά χαμηλό συντελεστή και αντοχή. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες παράγονται έως 1400°C, ίνες HT (High Tensile) με συντελεστή ελαστικότητας (230 GPa), υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (4GPa) και μέτρια ελαστικότητα. Η ενανθράκωση (γραφιτοποίηση) σε υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 2500 °C και 2800 ° C παράγει ίνες HM (High Modulus) με μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό αλλά υψηλό συντελεστή ελαστικότητας (400 GPa).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενανθράκωσης, αφαιρούνται ενώσεις εκτός από τον άνθρακα και αρχίζουν να αναπτύσσονται δομές που μοιάζουν με γραφίτη. Τα κύρια προϊόντα κατάγματος κατά τη διάρκεια της ενανθράκωσης είναι τα HCN, NH₃ και N₂, κυρίως στην περιοχή των 1000 ° C. Γενικά, μόνο το 50% του αρχικού βάρους της πρόδρομης ίνας καταλήγει ως ανθρακόνημα. (Για τις ίνες με βάση το PAN, το ποσοστό άνθρακα είναι περίπου 70%). Ένα βασικό χαρακτηριστικό της ενανθράκωσης είναι ότι δεν διαρκεί πολύ. Τα κύρια προϊόντα της αντίδρασης κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης είναι 15-18% HCN και 7-12% CO₂. Κατά τη διάρκεια της ενανθράκωσης, οι ίνες συρρικνώνονται έως και 10%. Η τάση εφαρμόζεται για να αποφευχθεί η συρρίκνωση ενώ βελτιώνονται σημαντικά οι μηχανικές ιδιότητες των ινών. Οι ίνες που λαμβάνονται σε αυτό το στάδιο πυρόλυσης χαρακτηρίζονται ως ίνες υψηλής αντοχής, με συντελεστή ελαστικότητας περίπου 200 GPa.

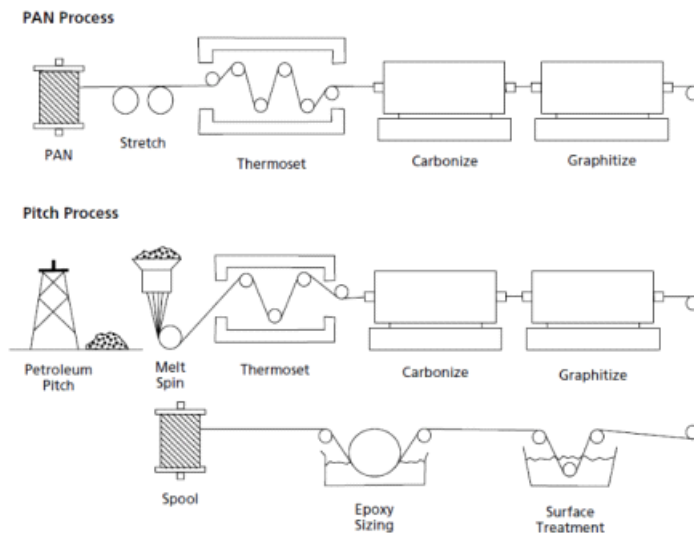
4η φάση :Γραφιτοποίηση

Το τέταρτο και τελευταίο στάδιο στη διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα είναι γνωστό ως γραφιτοποίηση. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο όταν απαιτούνται ίνες με εξαιρετικά υψηλή ελαστικότητα. Για να επιτευχθεί αυτό, η θερμική επεξεργασία των ινών πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες έως 3000 °C. Στη διαδικασία γραφιτοποίησης, το άζωτο χρησιμοποιείται συνήθως ως αδρανές αέριο για την προστασία των ινών από την οξείδωση.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας γραφίτισης, οι ίνες εκτίθενται σε θερμοκρασίες άνω των 2500 ° C, γεγονός που προκαλεί το σχηματισμό της ένωσης κυανίου. Αυτή η ένωση υφίσταται αποσύνθεση για να απελευθερώσει άτομα άνθρακα, τα οποία στη συνέχεια αναδιατάσσονται για να σχηματίσουν την κρυσταλλική δομή του γραφίτη. Οι συνθήκες κενού είναι επίσης κοινές κατά τη διάρκεια της γραφίτισης για την πρόληψη της οξείδωσης και τη διασφάλιση της καθαρότητας του τελικού προϊόντος.

Μόλις οι ίνες υποβληθούν σε γραφίτιση, το μέτρο ελαστικότητάς τους μπορεί να υπερβεί τα 400 GPa και η διάμετρος τους είναι περίπου 10μm. Η αντοχή σε εφελκυσμό των ινών μπορεί να κυμαίνεται γύρω στα 2000 MPa και η περιεκτικότητα σε άνθρακα των ινών που έχουν υποστεί γραφίτιση υπερβαίνει το 99%, με πυκνότητα 1,9 g/cm³.

Η γραφίτιση είναι μια κρίσιμη διαδικασία για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων των ινών άνθρακα. Οι ακραίες θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται σε αυτό το βήμα προκαλούν σημαντικές δομικές αλλαγές στις ίνες που οδηγούν στην εξαιρετική αντοχή και ελαστικότητά τους. Οι ίνες που προκύπτουν είναι από τα πιο ανθεκτικά και υψηλής απόδοσης υλικά που διατίθενται, καθιστώντας τα μια δημοφιλή επιλογή σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των αθλητικών ειδών.



Σχήμα 2.12: Αναπαράσταση των βημάτων για την παραγωγή ινών άνθρακα από PAN (πάνω) και πίσσα (κάτω).

Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη βιομηχανία ινών άνθρακα, καθώς επιτρέπει την πιο βιώσιμη χρήση των πόρων και μειώνει τα απόβλητα. Η τρέχουσα μέθοδος για την πλήρη ανακύκλωση των ινών άνθρακα είναι μια διαδικασία γνωστή ως θερμικός αποπολυμερισμός. Σε αυτή τη διαδικασία, το προϊόν από ανθρακονήματα θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες σε ένα θάλαμο χωρίς οξυγόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση του άνθρακα και στη συνέχεια μπορεί να δεσμευθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Οποιοδήποτε υλικό συγκόλλησης ή ενισχυμένο υλικό που χρησιμοποιείται, όπως εποξειδικό ή βινύλιο, καίγεται κατά τη διαδικασία.

Ενώ είναι δυνατό να διαχωριστούν οι ίνες άνθρακα με το χέρι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, το προκύπτον υλικό θα είναι ασθενέστερο λόγω του μικρότερου μήκους ινών. Αυτό μπορεί να το καταστήσει ακατάλληλο για χρήση σε ορισμένες εφαρμογές όπου η αντοχή και οι ιδιότητες των ινών άνθρακα είναι κρίσιμες. Ως εκ

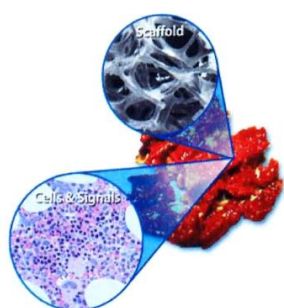
τούτου, ο θερμικός αποπολυμερισμός παραμένει η πιο αποτελεσματική μέθοδος ανακύκλωσης ινών άνθρακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

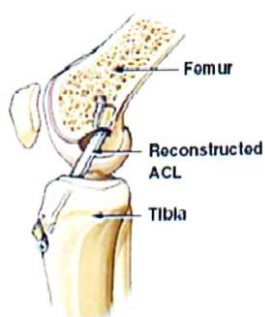
3.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ

Στην ιατρική

Τα ανθρακονήματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, για την εφεύρεση ιδιαίτερων λειτουργικών υλικών. Τα βιοϋλικά είναι αυτά τα υλικά που έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κυρίως εκείνα που πρόκειται να έρθουν σε επαφή με τα οστά, όπως τεχνητά μέλη, ορθοπλαστική, λαμαρίνες ή βίδες για την σταθεροποίηση του κατάγματος, συστήματα για την χορήγηση φαρμάκων, καθώς και κριώματα στην οστική αναγέννηση. Επομένως ένας σημαντικός παράγοντας είναι η συμβατότητα των ανθρακονημάτων στους οστικούς ιστούς και η αντίκτυπο των ανθρακονημάτων στον σχηματισμό του οστού. Η εφαρμογή των ανθρακονημάτων είναι σημαντική στα βιοϋλικά που εφαρμόζονται στα οστά, μπορούν να ενισχύσουν τις μηχανικές ιδιότητές τους και αναμένεται να λειτουργούν ως κριώματα για την προώθηση και καθοδήγηση της αναγέννησης των οστικών ιστών.



Εικ.3.1. Ικρίωμα οστού



Εικ.3.2. Μηχανική υποστήριξη οστών

Εικόνα 3.1: Ικρίωμα οστού **Εικόνα 3.2:** Μηχανική υποστήριξη οστών

Σε εφαρμογές αεροδιαστημικής

Είναι η ευρέως χρησιμοποιούμενη [σύνθετη ίνα](#) . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με άνθρακα παρουσιάζουν χαμηλότερο βάρος με βελτιωμένη αναλογία αντοχής προς βάρος, συνέπειες σε μικρότερες χρήσεις καυσίμου και εκπομπές . Επιπλέον, σύνθετα υλικά με λιγότερες αρθρώσεις, βελτιωμένη [αεροδυναμική απόδοση](#) και μείωση του κόστους κατασκευής, προσέλκυσαν τους ερευνητές να τα εφαρμόσουν στην κατασκευή στρατιωτικών αεροσκαφών για να βελτιώσουν την κινητικότητα και την ταχύτητα των προϊόντων τους. Επιπλέον, όταν πρόκειται για μηχανήματα βαρύτερα από τον αέρα, η μείωση του βάρους είναι απαραίτητη.

Τα σύνθετα υλικά συνέβαλαν πολύ στη μείωση του βάρους και επί του παρόντος υπάρχουν τρεις κύριες μορφές: ανθρακονήματα, γυαλί και εποξειδικό ενισχυμένο με αραμίδιο. Άλλα περιλαμβάνουν ενισχυμένο με βόριο (το οποίο είναι ένα σύνθετο υλικό με πυρήνα [βολφραμίου](#)). Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πολλούς τύπους αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών, από γόνδολες θερμού αέρα και [ανεμόπτερα](#) έως επιβατικά αεριωθούμενα και στρατιωτικά αεροπλάνα, τόσο για δομικούς σκοπούς όσο και για κατασκευαστικούς σκοπούς.

Χρησιμοποιούνται τα μονοκατευθυντικά ενισχυμένα σύνθετα άνθρακα-άνθρακα με διάφορους προσανατολισμούς ινών για αεροδιαστημικές εφαρμογές, όπως ασπίδες θερμότητας σε οχήματα επανεισόδου, ακροφύσια κινητήρα πυραύλων και εξαρτήματα υψηλής τριβής σε αεροσκάφη. Κατά τη διάρκεια του γερμανικού εκπαιδευτικού προγράμματος Studentische Experimental-Raketen (Stern), οι μαθητές του Technische Universität Braunschweig σχεδίασαν έναν υπερηχητικό πυραύλο με υβριδικό κινητήρα. Για την κατασκευή του χρησιμοποίησαν ένα ελαφρού πλαστικού ενισχυμένου με ίνες άνθρακα (CFRP) στην υβριδική μάζα κινητήρα. Προκύπτει ότι το όφελος ενός τέτοιου ελαφρού υλικού περιβλήματος στη μάζα του κινητήρα είναι ότι μειώνει την αυξανόμενη ολική ώθηση. Ακόμη , παρουσιάζεται ένα υψηλότερο κέρδος στο υψόμετρο, ειδικά για μεγαλύτερους πυραύλους με συγκρίσιμη υψηλή συνολική ώθηση.

Carbon Fiber-Reinforced Zirconium Carbide



Ultramet carbon fiber-reinforced zirconium carbide combustion chamber during 4350°F (2400°C) hot-fire testing at NASA Glenn

Εικόνα 3.3: Φωτογραφίες από δοκιμές της NASA σε θάλαμο καύσης, ενισχυμένου με ίνες άνθρακα.



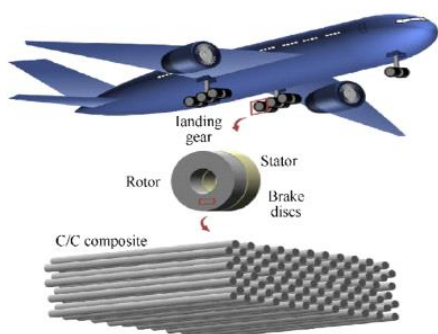
Εικόνα 3.4: Χρήση σύνθετων υλικών σε αεροπλάνα, διαστημόπλοια και δορυφόρους.

Σε πλαίσια αεροσκαφών

Χρησιμοποιούνται κοντοί νανοσωλήνες άνθρακα για εμπορικά αεροσκάφη (CNTs). Η εξασθένηση του πλάτους των κραδασμών και των φυσικών συχνοτήτων των ελασματοποιημένων σύνθετων πλακών ενισχυμένων ίνες άνθρακα FFRC (fuzzy fiber reinforced composite) ενισχύεται σημαντικά όταν το επίπεδο των ακτινικά αναπτυγμένων κυματιστών CNTs στην επιφάνεια των ινών άνθρακα είναι ομοεπίπεδο με το επίπεδο του άξονα των ανθρακονημάτων.

Υλικά με υψηλό βαθμό σκληρότητας και αδράνειας, όπως υλικά άνθρακα-άνθρακα, χρησιμοποιούνται ευρέως στις αεροδιαστημικές εφαρμογές λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών τους, που περιλαμβάνουν τη διατήρηση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων τους σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και το υψηλό βαθμό σκληρότητας και αδράνειας. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα στα υλικά

άνθρακα-άνθρακα, συμπεριλαμβανομένου του υψηλού κόστους και της περιορισμένης αποτελεσματικότητας των διαδικασιών κατασκευής, η οποία επιδεινώνεται από την υψηλή ευαισθησία τους στην οξείδωση σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση της χρήσης υλικών άνθρακα-άνθρακα στο πλαίσιο ενός αεροπλάνου.

Η χρήση σύνθετων υλικών με βάση τον άνθρακα σε ναυτιλιακά – ναυτικά πλοία και υποβρύχια

Τα σύνθετα υλικά σήμερα χρησιμοποιούνται περισσότερο από ποτέ σε ένα ευρύ φάσμα ναυτιλιακών εφαρμογών. Εκτός από τα πολεμικά πλοία, υλικά υψηλής απόδοσης εφαρμόζονται πλέον και σε πολιτικούς τομείς. Τα GRP χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την παραγωγή σκαφών αλιευτικών σκαφών, μικρών σκαφών, hovercraft και καταμαράν. Η Ιαπωνία είναι μακράν η πρώτη χώρα όσον αφορά τον αριθμό των ενεργών σκαφών GRP.

Οι Obrecht και Knez [3] μελέτησαν την εξοικονόμηση άνθρακα και πόρων διαφορετικών σχεδίων εμπορευματοκιβωτίων. Ανέφεραν ότι μια πιθανή λύση για πιο βιώσιμες εμπορευματικές μεταφορές είναι η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον εμπορευματοκιβωτίων που κατασκευάζονται σύμφωνα με αρχές οικολογικού

σχεδιασμού. Είναι ελαφρύτερα, κατασκευασμένα από λιγότερα υλικά και έχουν μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον σε όλο το διάστημα της ζωής τους [3]. Ο Goh [4] μελέτησε τον αντίκτυπο των αναδιπλούμενων θαλάσσιων εμπορευματοκιβωτίων στους μεταφορείς εμπορευμάτων και στις εκπομπές άνθρακα. Η μελέτη τους εξέτασε τα αναδιπλούμενα κοντέινερ αποστολής του αποστολέα και τις προοπτικές βιωσιμότητας. Διερευνήθηκε επίσης η βιωσιμότητα των πτυσσόμενων εμπορευματοκιβωτίων ως εργαλείο αντιστάθμισης άνθρακα για τη ναυτιλιακή βιομηχανία [4]. Αυτή η έρευνα παρουσιάζει το νέο σχέδιο ενός δοχείου μήκους 40 ποδιών κατασκευασμένο από ελάσματα από ανθρακονήματα.

Τα σκάφη εκτίθενται σε σκληρές συνθήκες στη θάλασσα που δοκιμάζουν τα υλικά. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά (πολυεστέρας/γυαλί ή μέταλλα), τα Torayca® Carbon Fibers προσφέρουν:

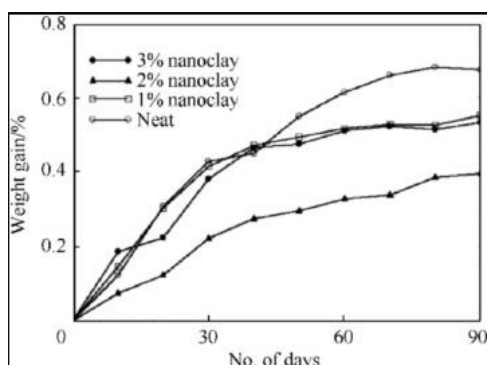
Ανώτερη μηχανική αντοχή. Υψηλή αντοχή στη μηχανική κόπωση. Χαμηλή πυκνότητα – Δύο φορές μικρότερη από ό,τι σαν πάνελ γυαλιού/πολυεστέρα. Καλύτερη αντοχή στη γήρανση και τη διάβρωση.

Οι ίνες άνθρακα επιτρέπουν στα πλοία να έχουν κέρδη σε ταχύτητα και σταθερότητα. Η αντοχή στη γήρανση, την κρούση, τη διάβρωση και τη μηχανική κόπωση βελτιώνει σημαντικά την ασφάλεια και την αντοχή του σκάφους.

Η υπάρχουσα και μελλοντική χρήση των σύνθετων υλικών σε υπερκατασκευές, δάπεδα, τοίχους, προηγμένα συστήματα ιστών, έλικες, άξονες πρόωσης, τροχούς, αγωγούς, αντλίες, στρόφιγγες, εξοπλισμό και άλλα μηχανήματα σε μεγάλα πολεμικά σκάφη όπως φρεγάτες, καταστροφείς και αεροπλανοφόρα είναι ζήτημα που συζητείται από επιστήμονες απγκοσμίως. Παρατηρείται ότι τα σύνθετα υλικά έχουν υψηλή μηχανική αντοχή σε πιέσεις κατάρρευσης που πλησιάζουν τα 600 επίπεδα (ένταση 6000 m), δηλαδή πιέσεις που συναντούνται σε μεγάλα ωκεάνια βάθη.

Στη βιομηχανία κατασκευής σκαφών και πλοίων, σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται για πλοία και [υποβρύχια](#) για την παραγωγή εξαρτημάτων όπως ιστοί, [έλικες](#), και

εσωτερικά στοιχεία πλοίων και υποβρυχίων. Επειδή, απορροφούν μικρότερα ποσοστά υγρασίας από τις εναλλακτικές τους, όπως φαίνεται στην εικόνα.



Γράφημα 3.1: Συμπεριφορά απορρόφησης υγρασίας καθαρών και νανοφασικών σύνθετων υλικών άνθρακα/εποξυ .

Εφαρμογή Σύνθετων Υλικών στη Βιομηχανία Πετρελαίου και Αερίου

Το fiberglass είναι το πιο διαδεδομένο υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή σύνθετων σωλήνων , για τη μεταφορά πετρελαίου ή φυσικού αερίου από τον παράκτιο σταθμό γεώτρησης στις χερσαίες εγκαταστάσεις [21]. Η χρήση σωλήνων GRP δεν είναι τόσο συνηθισμένη, ωστόσο, όταν το μεταφερόμενο ρευστό είναι φυσικό αέριο υψηλής πίεσης.

Πτερύγια ανεμογεννητριών

Στην πλειοψηφία των πτερυγίων ανεμογεννητριών κάνουν χρήση υαλοβάμβακα, σε μεγάλα πτερύγια (συχνά μήκους άνω των 150 ποδίων) υπάρχει ένα εφεδρικό, στο οποίο διατρέχει το μήκος του πτερυγίου και είναι ένα άκαμπτο νεύρο. Αυτά τα εξαρτήματα είναι συχνά 100% άνθρακας και πάχος όσο μερικές ίντσες στη ρίζα της λεπίδας.

Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κυρίως γιατί είναι ένα ελαφρύ υλικό και όσο πιο ελαφρύ είναι ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας, τόσο πιο αποτελεσματικό είναι στη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας , αλλά και γιατί παρέχουν την απαραίτητη ακαμψία που χρειάζεται .

Αυτοκίνητο

Τα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής δεν υιοθετούν ακόμη τις ίνες άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο αυξημένο κόστος των πρώτων υλών και στις απαραίτητες αλλαγές στα εργαλεία, εξακολουθεί να υπερτερεί των οφελών. Ωστόσο, η Formula 1, η NASCAR και τα high-end αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ανθρακονήματα. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν είναι λόγω των πλεονεκτημάτων των ιδιοτήτων ή του βάρους, αλλά λόγω της εμφάνισης.

Υπάρχουν πολλά ανταλλακτικά αυτοκινήτων μετά την αγορά που κατασκευάζονται από ανθρακονήματα και αντί να είναι βαμμένα, έχουν διαφανή επίστρωση. Η ξεχωριστή ύφανση από ανθρακονήματα έχει γίνει σύμβολο υψηλής τεχνολογίας και υψηλής απόδοσης. Στην πραγματικότητα, είναι σύνηθες να βλέπουμε ένα εξάρτημα αυτοκινήτου μετά την αγορά που είναι ένα μόνο στρώμα από ανθρακονήματα αλλά έχει πολλαπλά στρώματα από υαλοβάμβακα κάτω για χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους, οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κυρίως στις Ferrari, BMW και άλλα πολυτελή μοντέλα. Καθώς αναπτύσσεται η βιομηχανία ανακύκλωσης ανθρακονημάτων, το κόστος θα μειωθεί, επιτρέποντας την εφαρμογή τους στην Toyota, τη Ford και άλλα μοντέλα μεσαίας κατηγορίας.



Εικόνα 3.5: Φωτογραφίες και αναπαράσταση μελών αυτοκινήτων φτιαγμένων από ανθρακονήματα.

Σύνθετα υλικά άνθρακα σε θωράκιση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) για στρατιωτικούς σκοπούς

Λόγω του χαμηλού κόστους, της ισχυρής [αντοχής στη διάβρωση](#), της ελαφριάς, απλής και εξαιρετικής [δυνατότητας επεξεργασίας](#) και των δυνατοτήτων ευρείας απορρόφησης και εύρους ζώνης, τα [αγώγιμα πολυμερή](#) σύνθετα υλικά (CPC) πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά θωράκισης EMI σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά που είχαν ως βάση το μέταλλο. Οι δυνατότητες χρήσης τους στη χημική μηχανική, τις πηγές ενέργειας και, το πιο σημαντικό, τα ηλεκτρονικά συστήματα είναι πολλές, λόγω της ευκολίας επεξεργασίας τους και του ευρέος φάσματος ηλεκτρικής αγωγιμότητας που έχουν. Η απόδοση του CPC επηρεάζεται από το είδος, τη συγκέντρωση, το σχήμα και τη διασπορά του [αγώγιμου πληρωτικού](#). Έτσι, στον στρατιωτικό και τον πολιτικό τομέα, η θωράκιση του EMI είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για τη διατήρηση του περιβάλλοντος και της υγείας των έμβιων όντων από τις καταστροφικές επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Οι κοντές CF έχουν υψηλές ιδιότητες θωράκισης EMI, ειδικά στη ζώνη X, στην οποία υπάρχει ασυνεπής διακύμανση στην απώλεια ανάκλασης λόγω της ύπαρξης κενών στο αγώγιμο πλέγμα. Για την παροχή εξαιρετικής θωράκισης EMI, τα σύνθετα υλικά μαύρου άνθρακα/γυαλιού/εποξειδικά έχουν βελτιστοποιημένη αρχιτεκτονική πολλαπλών στρωμάτων απορροφητικής δομής ραντάρ (RAS) που μπορεί να αντέξει τις καταπονήσεις ενώ επίσης απορροφά ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Εφαρμογή ανθρακούχου υλικού σε σύνθετο υλικό για αμυντικές κατασκευές :

Οι κατασκευές αντιμετωπίζουν τις πιθανές ζημιές που προκαλούνται από ακραίες συνθήκες φόρτωσης που προκαλούνται είτε από ανθρωπογενή ατυχήματα είτε από φυσικές καταστροφές. Οι ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου αποτελούν από καιρό αντικείμενο μελέτης για τη χρήση ινών για τη βελτίωση της αντοχής των κατασκευών που σχεδιάζονται για να μπορούν υποστούν έκρηξη και κρούση. Οι ίνες άνθρακα,

από την άλλη πλευρά, παρέχουν μια σειρά από πιθανά οφέλη σε σχέση με τις συμβατικές ίνες, ιδίως αυξημένη αντοχή, ακαμψία και ανθεκτικότητα. Οι ίνες άνθρακα είναι επίσης οικονομικές επειδή είναι ευρέως διαθέσιμες για την αεροδιαστημική βιομηχανία. Τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ανθρακονήματα (CFRPs) είναι βιώσιμες λύσεις για την ενίσχυση της προστασίας από εκρήξεις και την ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών σε ευάλωτα δημόσια κτίρια . Γενικά, το CFRP έχει συσχετιστεί με την πολιτική υποδομή για εργασίες μετασκευής και ενίσχυσης.

Άλλες εφαρμογές σύνθετων ανθρακούχων υλικών :

Πλέον οι ερευνητές έχουν καταφέρει να εφαρμόσουν ευρέως το γραφένιο σε διάφορους τομείς μηχανικής όπως στους [αισθητήρες γλυκόζης](#) , στην απορρόφηση ουρανίου στην πυρηνική βιομηχανία , στον διαχωρισμό αερίων , στα υλικά θερμικής διαχείρισης και στην αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και στον αυτοκαθαρισμό.

Οι εφαρμογές άνθρακα (νανο) είναι επίσης ευρέως δημοφιλείς τον τελευταίο καιρό. Μερικές από τις αξιοσημείωτες εφαρμογές των νανοσωλήνων άνθρακα , των [νανοϊνών](#) , των [οξειδίων μετάλλων](#) και του πορώδους άνθρακα αφορούν [υπερπυκνωτές](#) . Επίσης, οι [νανοσφαίρες](#) άνθρακα και οι [νανοράβδοι](#) από ίνες άνθρακα/Zn. χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τα νανοφύλλα άνθρακα για χημικούς αισθητήρες. Μια άλλη αξιοσημείωτη εφαρμογή των νανοϊνών άνθρακα/SiC είναι για απορρόφηση μικροκυμάτων με [χαμηλή θερμική αγωγιμότητα](#). Οι νανοσωλήνες άνθρακα ενισχύουν επίσης τις διηλεκτρικές ιδιότητες.

Τα σύνθετα άνθρακα χρησιμοποιούνται ευρέως από ερευνητές [63] σε διάφορους τεχνικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των επαναφορτιζόμενων μπαταριών Zn-air και Na-ion . Αλλα ανθρακούχα υλικά όπως ο ενεργός άνθρακας από κέλυφος καρύδας χρησιμοποιείται ευρέως για την εφαρμογή καθαρισμού χημικών ουσιών .

Η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος των ινών άνθρακα το έχει καταστήσει ελκυστικό υλικό εξοικονόμησης ενέργειας έναντι των συμβατικών ανθεκτικών

υλικών όπως ο χάλυβας. Συνειδητοποιώντας την τάση, ο χάλυβας υψηλού βάρους αντικαθίσταται σταδιακά από τα χαμηλού βάρους και ανθεκτικά στη διάβρωση σύνθετα ανθρακονήματα σε πολλές εφαρμογές αντοχής. Το σύνθετο υλικό πολυμερούς μήτρας ενισχυμένο με ανθρακονήματα (PMC) έχει γίνει έτσι υλικό πρώτης γραμμής στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τα αθλητικά είδη και άλλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή και υψηλό συντελεστή. Επιπλέον, η σταδιακή μείωση του κόστους του, αλλά και η εκτεταμένη έρευνα στον τομέα της τεχνολογίας ανθρακονημάτων τα τελευταία χρόνια άνοιξε την αγορά της σε διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές.

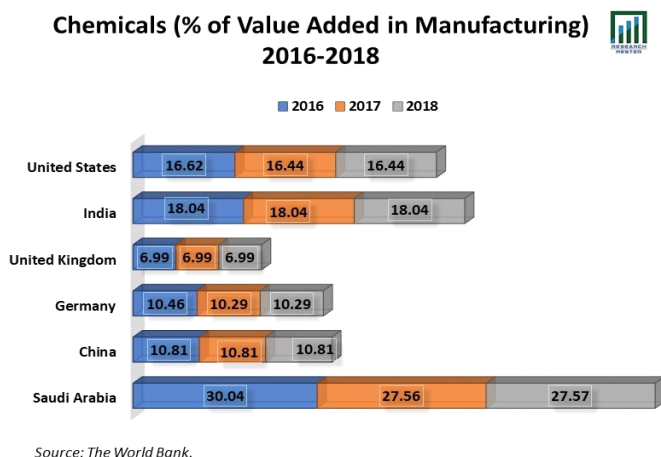
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1. Τα κυριότερα σημεία της παγκόσμιας αγοράς ανθρακονημάτων 2022 – 2030

Η παγκόσμια αγορά ανθρακονημάτων εκτιμάται ότι θα συγκεντρώσει σημαντικά έσοδα καταγράφοντας CAGR (Υπολογισμός ενός σύνθετου ρυθμού ετήσιας ανάπτυξης)

~ 9% κατά την περίοδο πρόβλεψης, δηλαδή, 2022 – 2030 (Research and Markets, 2022). Η ανάπτυξη της αγοράς μπορεί να αποδοθεί στην αυξανόμενη ζήτηση για ίνες άνθρακα για την ανάπτυξη αιολικής ενέργειας, για αεροδιαστημικές βιομηχανίες, την αυξανόμενη χρήση ανθρακονημάτων στην τρισδιάστατη εκτύπωση και την ανάγκη για αύξηση της κατανάλωσης πράσινης ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, η ζήτηση για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξήθηκε κατά 3 % το 2020. Επιπλέον, σημειώθηκε αύξηση 7 % στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές το ίδιο έτος. Τα πλεονεκτήματα των ινών άνθρακα αναμένεται να αυξήσουν τη ζήτησή της στο επικείμενο χρονικό διάστημα, κάτι που με τη σειρά του αναμένεται να τονώσει την ανάπτυξη της αγοράς. Επιπλέον, η επιβολή αυστηρών κανονισμών φιλικών προς το περιβάλλον σε ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες αναμένεται να συνεισφέρει στις άφθονες ευκαιρίες ανάπτυξης στην αγορά που έπονται τα επόμενα χρόνια.

4.2. Κύριοι μακροοικονομικοί δείκτες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της αγοράς



Γράφημα 4.1: Ετήσια αύξηση της αξίας των χημικών στην βιομηχανία, κατά την περίοδο 2016-2018, σε χώρες με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα από όλο τον κόσμο.

Η χημική βιομηχανία αποτελεί βασικό συστατικό της οικονομίας. Σύμφωνα με το Γραφείο Οικονομικής Ανάλυσης των ΗΠΑ, το 2020, για τις ΗΠΑ, η προστιθέμενη αξία από τα χημικά προϊόντα ως ποσοστό του ΑΕΠ ήταν περίπου 1,9%. Επιπλέον, σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, η χημική βιομηχανία στις ΗΠΑ αντιπροσώπευε το 16,43% στην προστιθέμενη αξία της μεταποίησης το 2018. Με την αυξανόμενη ζήτηση από τους τελικούς χρήστες, η αγορά χημικών προϊόντων αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Σύμφωνα με το UNEP (Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον), οι πωλήσεις χημικών προβλέπεται να διπλασιαστούν σχεδόν από το 2017 έως το 2030. Στο τρέχον σενάριο, η Ασία-Ειρηνικός είναι η μεγαλύτερη περιοχή παραγωγής και κατανάλωσης χημικών.

Η Κίνα έχει τη μεγαλύτερη χημική βιομηχανία στον κόσμο, η οποία αντιπροσώπευε ετήσιες πωλήσεις περίπου άνω των 1,5 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, ή περίπου πάνω από το ένα τρίτο των παγκόσμιων πωλήσεων, τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον, η τεράστια καταναλωτική βάση και οι ευνοϊκές κυβερνητικές πολιτικές έχουν ενισχύσει τις επενδύσεις στη χημική βιομηχανία της Κίνας. Η εύκολη διαθεσιμότητα πρώτων

υλών και εργατικού δυναμικού χαμηλού κόστους, καθώς και οι κρατικές επιδοτήσεις και οι χαλαροί περιβαλλοντικοί κανόνες έχουν χρησιμεύσει ως βάση παραγωγής για βασικούς πωλητές παγκοσμίως.

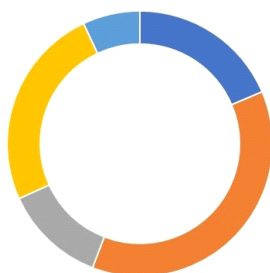
Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με την FICCI (Federation of Indian Chambers of Commerce & Industry), η χημική βιομηχανία στην Ινδία αποτιμήθηκε σε 163 δισεκατομμύρια το 2019 και συνέβαλε 3,4% στην παγκόσμια χημική βιομηχανία. Κατέχει την 6η θέση στην παγκόσμια παραγωγή χημικών. Αυτό το στατιστικό δείχνει την προσοδοφόρα ευκαιρία για επενδύσεις σε επιχειρήσεις στις χώρες της Ασίας του Ειρηνικού τα επόμενα χρόνια. Η εύκολη διαθεσιμότητα πρώτων υλών και εργατικού δυναμικού χαμηλού κόστους, καθώς και οι κρατικές επιδοτήσεις και οι χαλαροί περιβαλλοντικοί κανόνες έχουν χρησιμεύσει ως βάση παραγωγής για βασικούς πωλητές παγκοσμίως.

4.3. Περιφερειακή σύνοψη της παγκόσμιας αγοράς ινών άνθρακα

Με βάση τη γεωγραφική ανάλυση, η παγκόσμια αγορά ανθρακονημάτων χωρίζεται σε πέντε μεγάλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της Βόρειας Αμερικής, της Ευρώπης, της Ασίας Ειρηνικού, της Λατινικής Αμερικής και της περιοχής της Μέσης Ανατολής και Αφρικής. Η αγορά στην Ευρώπη εκτιμάται ότι θα καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μερίδιο, μέσα στα επόμενα χρόνια, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για οικονομικά οχήματα με κατανάλωση καυσίμου και ελαφρού βάρους και της μεγάλης βάσης κατασκευαστών ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην περιοχή. Για παράδειγμα, περισσότερες από 22 εκατομμύρια μονάδες ελαφρών οχημάτων κατασκευάστηκαν στην Ευρώπη το 2019, το οποίο υπολογίζεται ότι θα αυξηθεί έως και 24 εκατομμύρια μέχρι το τέλος του 2024. Εκτός από αυτά, οι αυξανόμενες επενδύσεις των αυτοκινητοβιομηχανιών για την ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών σύνθετων υλικών άνθρακα και η αυξανόμενη χρήση ινών άνθρακα στην αεροπορική βιομηχανία των περιοχών αναμένεται επίσης να ενισχύσουν την ανάπτυξη της αγοράς τα επόμενα

χρόνια. Επιπλέον, η αγορά στην Ασία-Ειρηνικό εκτιμάται ότι θα σημειώσει το υψηλότερο CAGR κατά την περίοδο πρόβλεψης λόγω της ταχέως αναπτυσσόμενης αστικοποίησης, της κλιμάκωσης των κρατικών δαπανών για έργα υποδομής στην Ινδία και την Κίνα και την παρουσία βασικών παραγόντων της αγοράς στην περιοχή.

Global Carbon Fiber Market Segmentation by Region, Market Share (in %)



■ North America ■ Europe ■ Latin America ■ Asia Pacific ■ Middle East and Africa

Source: Research.Nester

Γράφημα 4.2: Δείχνει πως ταξινομείται η παγκόσμια αγορά ανθρακονημάτων ταξινομείται περαιτέρω με βάση την περιοχή .

4.4. Κορυφαίες προβεβλημένες εταιρείες που κυριαρχούν στην αγορά

Η αγορά ανθρακονημάτων είναι μια ενοποιημένη αγορά, όπου οι πέντε κορυφαίοι παίκτες αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 67% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας. Οι μεγάλες εταιρείες στην αγορά ανθρακονημάτων περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τις Toray Industries Inc. (Ασία-Ειρηνικός), Hexcel Corporation (Αμερική), Mitsubishi Chemical Corporation (Ασία-Ειρηνικός), SGL Carbon (Ευρώπη) και Teijin Limited (Ασία-Ειρηνικός).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΙΝΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

Η παγκόσμια ζήτηση ιών άνθρακα ανήλθε σε 83.000 τόνους το 2016, σημειώνοντας αύξηση 12,0% σε σχέση με ένα χρόνο πριν. Η Κίνα, μία από τις κορυφαίες πηγές ζήτησης ιών άνθρακα παγκοσμίως, κατανάλωσε 19.000 τόνους, το 22,9% του παγκόσμιου συνόλου. Ωστόσο, η Κίνα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε εισαγόμενα προϊόντα ιών άνθρακα (ιδίως υψηλής απόδοσης) λόγω των παρωχημένων τεχνικών παραγωγής και της ανεπαρκούς παραγωγικής της ικανότητας. Μόνο το 24,9% των ιών άνθρακα παρήχθησαν τοπικά στην Κίνα το 2016 και το ποσοστό τοπικοποίησης, δηλαδή το ποσοστό που παράγεται τοπικά, αναμένεται να ξεπεράσει το 35,0% το 2021 μαζί με την τεχνολογική πρόοδο.

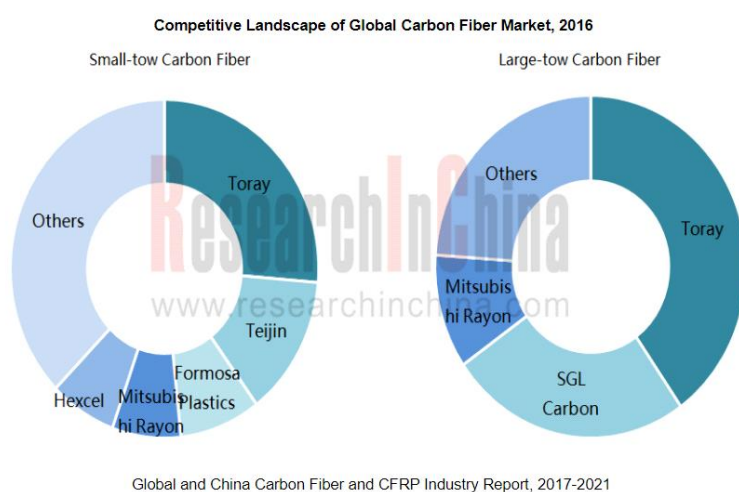
Οι ίνες άνθρακα και τα σύνθετα υλικά τους εφαρμόζονται κυρίως στους τομείς της αεροπορίας, της αεροδιαστημικής και της αιολικής ενέργειας, όπου όλοι μαζί αντιπροσώπευαν το 46% της παγκόσμιας ζήτησης το 2015, σε σύγκριση με όχι περισσότερο από 15% στην Κίνα- οι τομείς του αθλητισμού και της αναψυχής αντιπροσώπευαν περισσότερο από 50% παγκοσμίως το 2015, αλλά έχει υποστεί μείωση του ποσοστού καθώς τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται οι βιομηχανίες αυτοκινήτων/αιολικής ενέργειας/αεροπορίας και αεροδιαστημικής.

Οι ίνες άνθρακα και η βιομηχανία σύνθετων υλικών τους θα οδηγηθούν κυρίως από τους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αιολικής ενέργειας και της αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής, ιδίως από τα οχήματα νέας ενέργειας. Τα υλικά από ίνες άνθρακα μπορούν να μειώσουν σημαντικά το βάρος του αμαξώματος του οχήματος, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων και αυξάνοντας τα χιλιόμετρα.

Καθώς οι ίνες άνθρακα παράγονται με εξελιγμένες διαδικασίες παραγωγής και προηγμένη τεχνολογία, η Κίνα, απομονωμένη από αυτές τις τεχνολογίες και τον εξοπλισμό λόγω πολιτικών παραγόντων, υστερεί πολύ σε σχέση με τις ξένες χώρες.

1) Προϊόν: Η ιαπωνική Toray ξεκίνησε την έρευνα για την ανθρακική ίνα T2000 (10 φορές μεγαλύτερη αντοχή από την ανθρακική ίνα T1000 και χωρίς προσμίξεις κατά τον πολυμερισμό) το 2017, ενώ η Κίνα μόλις επιτυγχάνει τη μαζική παραγωγή της ανθρακικής ίνας T800. Οι ίνες αυτές είναι είδους PPA (polyphthalamides) και μπορούν να αντικαταστήσουν το αλουμίνιο και το μαγνήσιο σε διάφορες χρήσεις, όπως σε μέλη αυτοκινήτου ή ηλεκτρονικών συσκευών.

2) Επιχειρήσεις: Η ιαπωνική Toray, η Teijin, η Mitsubishi Rayon, η αμερικανική Hexcel, η Cytec (που εξαγοράστηκε από τη βελγική Solvay) και η κινεζική Formosa Plastics καταλαμβάνουν τη μερίδα του λέοντος στην παγκόσμια αγορά ινών άνθρακα. Μετά την εξαγορά της αμερικανικής Zoltek, η Toray κατέχει μερίδιο 30% της παγκόσμιας αγοράς ινών άνθρακα. Αντίθετα, υπάρχουν μόνο έξι κινεζικές επιχειρήσεις με παραγωγική ικανότητα 1000t και άνω/α η καθεμία, συμπεριλαμβανομένων των Zhongfu Shenyang Carbon Fiber, Jiangsu Hengshen Fiber Material και Bluestar Fibres, που διεκδικούν ένα συνδυασμένο παγκόσμιο μερίδιο μικρότερο από 15%.



Γράφημα 5.1: Στοιχεία για την παραγωγή ινών άνθρακα και σύγκριση μεταξύ Κίνας και άλλων περιοχών για το 2016.

5.2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

Λόγω των εξαιρετικών επιδόσεων, η ζήτηση στην αγορά για CFs είναι ισχυρή και αναμένεται υψηλός ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της τάξης του 10% μέχρι το 2020 [88,89]. Η παγκόσμια ζήτηση CF ανήλθε σε περισσότερους από 70.000 τόνους τα τελευταία πέντε χρόνια. Συγκεκριμένα, η ζήτηση από την ελαφριά αυτοκινητοβιομηχανία αυξήθηκε ταχύτερα, γεγονός που προσέλκυσε πολλές εταιρείες να εμπλακούν σε αυτόν τον τομέα. Η SGL (Wiesbaden, Γερμανία) και η BMW (Μόναχο, Γερμανία) συνεργάστηκαν για τη χρήση υλικών CF. Η Toyota χρησιμοποίησε επίσης τα CF της Toray για τα οχήματα Mirafuel cell. Πρόσφατα, η παγκόσμια παραγωγική ικανότητα σε ανθρακόνημα ανήλθε σε περίπου 130.000 τόνους, με κύρια συνεισφορά της Ιαπωνίας, της Ευρώπης και των ΗΠΑ. Μία από τις κυρίαρχες εταιρείες παραγωγής, οι οποίες μοιράζονται από κοινού το 60% της παγκόσμιας δυναμικότητας ανθρακικών ινών, είναι η γερμανική SGL.

Η ακόλουθη ανάλυση SWOT, που αφορά την Ευρώπη, δείχνει τις ευκαιρίες που προκύπτουν στον τομέα, τις πιθανές απειλές και τα κύρια σημεία προσοχής.

Προτερήματα:

Καλό επίπεδο θεμελιώδους κατανόησης και ακαδημαϊκής έρευνας
Καινοτόμες διαδικασίες παραγωγής

Ευρεία γκάμα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές

Καλές ικανότητες σε συγκεκριμένους τομείς (π.χ. αθλητικές και ψυχαγωγικές κατασκευές)

MME με ευέλικτες προσεγγίσεις.

Ελλωτάματα:

Έλλειψη εκπαιδευμένου προσωπικού και ειδικευμένων μηχανικών

Περιορισμένη γνώση σύνθετων υλικών

Έλλειψη οδηγών σχεδιασμού και σχεδιαστικών δεδομένων

Η βιομηχανία κατακερματισμένη και υστερεί σε σχέση με τις ΗΠΑ

Χαμηλά περιθώρια κέρδους για σύνθετες βιομηχανίες

Ελάχιστη εφαρμογή E&A για σύνθετες βιομηχανίες

Ασταθής προσφορά και κόστος πρωτογενούς υλικού

Λίγοι προμηθευτές και πολλές πρώτες ύλες που χρειάζονται

Οι μικρές εταιρείες δεν μπορούν να επηρεάσουν τους ειδικούς

Μη καθορισμένες / σαφείς διαδρομές ανακύκλωσης για σύνθετα υλικά

Υψηλότερο κόστος εργασίας στην ΕΕ από τους ξένους ανταγωνιστές

Ευκαιρίες:

Νέες αγορές στις υποδομές, τις αεροπορικές και σιδηροδρομικές μεταφορές, την ξηρά, τα ελαφριά προϊόντα και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Χρήση σύνθετων υλικών σε νέες εφαρμογές λόγω περιβαλλοντικών κανονισμών

Ισχυρότεροι δεσμοί μεταξύ εταιρειών και πανεπιστημίων και μεταφορά γνώσεων από τον ακαδημαϊκό χώρο για την αντιμετώπιση ορισμένων προβλημάτων της βιομηχανίας.

Χρήση φυσικών υλικών

Χρήση υλικών άνθρακα χαμηλού κόστους

Χρήση νέων διεργασιών και νέων υλικών

Απειλές:

Εισαγωγές χαμηλού κόστους από φθηνότερες χώρες

Έλλειψη οδηγιών και προτύπων σχεδιασμού

Περιβαλλοντική νομοθεσία και άλλοι κανονισμοί

Έλλειψη σαφούς οδού ανακύκλωσης, ιδίως για τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά

Μειωμένη χρηματοδότηση της έρευνας και της ανάπτυξης νέων ιδεών και συνακόλουθη τεχνική στασιμότητα

Υπερπώληση των σύνθετων υλικών και κίνδυνος αστοχιών υψηλής ποιότητας

Η ανάπτυξη ανταγωνιστικών τεχνολογιών, όπως το τιτάνιο και ο χάλυβας υψηλής αντοχής.

5.3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΛΑΤΙΝΙΚΗ ΑΜΕΡΙΚΗ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

Η Βραζιλία έχει τη μεγαλύτερη βιομηχανία σύνθετων ινών άνθρακα στην περιοχή της Λατινικής Αμερικής και μία από τις μεγαλύτερες στον κόσμο. Η ανάκαμψη της αυτοκινητοβιομηχανίας και η αυξημένη αστικοποίηση οδήγησαν στην ανάπτυξη της αγοράς σύνθετων ινών αυτοκινήτων της περιοχής. Ωστόσο, η χώρα βλέπει ξανά πτώση από την αρχή της πανδημίας COVID-19. Ωστόσο, η αυτοκινητοβιομηχανία επέστρεψε έως και τα μέσα του 2022, προωθώντας τις πωλήσεις για σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα στην περιοχή της Λατινικής Αμερικής.

Η βιομηχανία σύνθετων άνθρακα για αυτοκίνητα της Βραζιλίας χαρακτηρίζεται από μικρές και μεγάλες εταιρείες όπως η Elekeiroz, η Embrapoi, η Cromitec και η Fiabbras, που κυμαίνονται στους προμηθευτές χύτευσης, κατασκευής και υλικών. Η Βραζιλία έχει μια καλά εδραιωμένη τοποθεσία παραγωγής στο κέντρο της Λατινικής Αμερικής, όπου τα αγαθά μπορούν εύκολα να εξαχθούν σε γειτονικές χώρες ως πρώτες ύλες ή τελικά προϊόντα που χρειάζονται για σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα αυτοκινήτων.

Επιπλέον, το χαμηλό κατά κεφαλήν εισόδημα βοηθά τη ζήτηση για κατανάλωση σύνθετων υλικών άνθρακα για αυτοκίνητα στη Λατινική περιοχή. Η άνοδος της αυτοκινητοβιομηχανίας στη Βραζιλία οδήγησε σε σημαντική ζήτηση για

κατασκευαστές σύνθετων υλικών άνθρακα για να καλύψουν την ανάγκη για διάφορους πελάτες στην περιοχή της Λατινικής Αμερικής.

Ανταγωνιστικό τοπίο:

Στην αγορά σύνθετων ινών άνθρακα της Λατινικής Αμερικής, γενικά, την κυριαρχία την έχουν διάφοροι διεθνείς και περιφερειακοί παίκτες όπως οι Reichhold, Ashland, Toray, Owens Corning και Teijin. Αν και για να έχουν το προβάδισμα έναντι των ανταγωνιστών τους, οι μεγάλες εταιρείες κατασκευής ανθρακονημάτων αυτοκινήτων κάνουν κοινοπραξίες, συνεργασίες για την κυκλοφορία νεότερων προϊόντων.

Το 2018, η Shimtech Industries Ltd. με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο επέκτεινε το τμήμα σύνθετων υλικών στο Μεξικό. Η εταιρεία εργάζεται στην κατασκευή εξαρτημάτων από ανθρακονήματα, από την αεροδιαστημική έως την αυτοκινητοβιομηχανία. Η κύρια εγκατάσταση συναρμολόγησης βρίσκεται στο Hermosillo, Sonora

Το 2019, η Toray Industries επιβεβαίωσε την ανάπτυξη του πιο πρόσφατου σύνθετου υλικού από ανθρακονήματα για αυτοκίνητα με βελτιωμένη σχέση κόστους-απόδοσης. Μια νέα εγκατάσταση ενανθράκωσης θα δημιουργηθεί το 2020 για μαζική παραγωγή στο μεξικανικό εργοστάσιο της θυγατρικής της στις ΗΠΑ Zoltek.

5.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ ΙΣΡΑΗΛ ΓΙΑ ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

Η ισραηλινή Plasan, με θυγατρικές στις ΗΠΑ και τη Γαλλία, έχει κατασκευάσει περισσότερα από 30.000 ειδικά προσαρμοσμένα οχήματα, για πολλές εθνικές αγορές και μπορεί να συμπράξει με άλλες εταιρείες του αμυντικού τομέα του Ισραήλ. Έχει την έδρα της σε ένα χωριό του Βόρειου Ισραήλ και διαθέτει θυγατρικές στις ΗΠΑ την Γαλλία. Απασχολεί 1300 άτομα εκ των οποίων τα 650 στις ΗΠΑ και 180 στη Γαλλία, και είναι ένας από τους βασικούς διεκδικητές της ΕΛΒΟ.

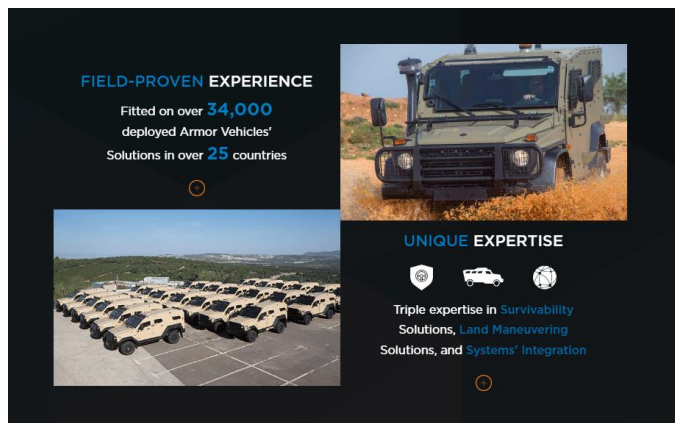
Χρησιμοποιώντας την βασική τεχνολογία για την παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα που αναπτύχθηκε από την Q-Flo, η Tortech αναπτύσσει μια κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διαδικασία για την κατασκευή εξαιρετικά μακράς στρώσης CNT μη υφασμένων για ένα ευρύ φάσμα εμπορικών και αμυντικών εφαρμογών.

Οι επικαλύψεις CNT της Toltec συνδυάζουν μοναδικές ιδιότητες, όπως υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, εξαιρετική θωράκιση, μικρόβάρος και χημική αντοχή. Εφαρμόζονται σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η ενέργεια, η τεχνολογία νερού και η αμυντική βιομηχανία.

Η Prasan Sasa, που ιδρύθηκε το 1985, είναι ένας από τους κορυφαίους παγκοσμίως προγραμματιστές, κατασκευαστές και συναρμολογητές συστημάτων θωράκισης οχημάτων και σχεδίων θωράκισης πλαισίου για ελαφρά στρατιωτικά τακτικά φορτηγά και APC [τροχήλατα και ερπυστριοφόρα], αεροσκάφη σταθερής και περιστροφικής πτέρυγας και εμπορικά οχήματα, καθώς και πρόσθετα κιτ θωρακισμένης προστασίας. Είναι ένας από τους κορυφαίους προμηθευτές παγκοσμίως.

Πωλεί επίσης σε αστυνομικές δυνάμεις και συνοριοφύλακες παγκοσμίως. Ένα 24θέσιο ειδικό όχημα ημέρας/νύχτας που κατασκευάστηκε για την αστυνομία του Σάο Πάολο χρησιμοποιήθηκε επίσης κατά τη διάρκεια των Ολυμπιακών Αγώνων της Βραζιλίας. Οι καινοτομίες της Sasa περιλαμβάνουν κιτ καμπίνας οχήματος, σασί και εξωτερική θωράκιση για την προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού σε οχήματα όπως τα MaxxPro, MRAP (Mine Resistant and Ambush Protected) και M-ATV (All-Ground).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ισραηλινή αμυντική βιομηχανία θεωρείται μία από τις πιο προηγμένες, παράγοντας οπλικά συστήματα που έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε πολεμικές επιχειρήσεις και απολαμβάνουν μεγάλη φήμη. Πράγματι, ορισμένα από αυτά έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τεχνολογικής ανάπτυξης. Μάλιστα κάποια από αυτά διαθέτουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τεχνολογικής εξέλιξης.



Εικόνα 5.1: Οχήματα από την Ισραηλινή αμυντική βιομηχανία.

5.5. Αξιολόγηση κύκλου ζωής των σύνθετων προϊόντων από ίνες άνθρακα

Η αυξανόμενη ζήτηση για κατασκευές από ανθρακονήματα ενισχύει την ανάπτυξη της οικολογικής κατασκευής. Στο πλαίσιο της βελτίωσης, εμπλέκονται τόσο οικολογικές όσο και οικονομικές πτυχές. Από τη μία πλευρά, η υπερθέρμανση του πλανήτη και το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής έχουν συνδεθεί με το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) ως το κύριο εκπεμπόμενο αέριο, του θερμοκηπίου. Οι κατασκευές από CFRP μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση π.χ. του κενού βάρους των οχημάτων. Αυτή η μείωση του βάρους μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ έως και 20% κατά τη λειτουργία [106]. Από την άλλη πλευρά, η οικονομική πτυχή είναι ζωτικής σημασίας για τη διαμόρφωση του μέλλοντος της εφαρμογής του CFRP στην αεροδιαστημική βιομηχανία, ενώ η μείωση του κόστους αποτελεί βασικό παράγοντα της αγοράς.

Απαραίτητο είναι να αναζητηθούν πιθανές άμεσες εφαρμογές, από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει χρήση προηγμένων τεχνολογιών για τη μείωση των αποβλήτων ξυλείας κατά την κοπή και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη σκλήρυνση.

Στη βιομηχανία σύνθετων υλικών, οι πιστοποιήσεις και οι κανονισμοί θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις άμεσες εφαρμογές (αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία κ.λπ.)- η ανάπτυξη ενός ολιστικού εργαλείου είναι ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, όπως είναι και η αξιολόγηση του ανθρακικού αποτυπώματος και του άμεσου κόστους της διαδικασίας κατασκευής. Για τη συλλογή δεδομένων σε μια αξιολόγηση της οικολογικής αποδοτικότητας με βάση τη δραστηριότητα, απαιτούνται δεδομένα και για όλες τις εφαρμογές των υλικών στην πράξη.

Ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος των CFRP κυριαρχείται από την παραγωγή άνθρακα. Συνεπώς, οι τεχνολογικές βελτιώσεις μέσω της χρήσης της AKZ ως εργαλείου λήψης αποφάσεων, όπως η μείωση των αποβλήτων παραγωγής, η ανακύκλωση των κομμένων υλικών και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, θα οδηγήσουν σε περιβαλλοντικά οφέλη. Η μείωση των παργόμενων αποβλήτων και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ανθρακικής ίνας εξακολουθούν να προσφέρουν τις μεγαλύτερες δυνατότητες βελτίωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τόσο της ανθρακικής ίνας όσο και των εξαρτημάτων από CFRP.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέγεθος και το πάχος του εξαρτήματος, τα οποία έχουν τον κύριο αντίκτυπο στη ζήτηση ενέργειας για το βάρος της διεργασίας, συνήθως καθορίζονται από την απαιτούμενη απόδοση, το μεγαλύτερο δυναμικό μείωσης της ενέργειας της διεργασίας έγκειται στο χρόνο σκλήρυνσης. Στις μελλοντικές μελέτες LCA* των εξαρτημάτων από CFRP θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια ολιστική προσέγγιση, η οποία θα περιλαμβάνει το παραμετρικό μοντέλο μοναδιαίας διεργασίας, θα λαμβάνει υπόψη τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος και θα προσδιορίζει τον αντίκτυπο ανά kg υλικού εξόδου.

*Η αξιολόγηση κύκλου ζωής ή LCA είναι μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός εμπορικού προϊόντος, διαδικασίας ή υπηρεσίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάσει των προηγούμενων κεφαλαίων έχουν γίνει σαφείς οι μέθοδοι παραγωγής και η χρησιμότητα των ινών ανθράκων, καθώς και η κατάσταση της παγκόσμιας αγοράς ανθρακονημάτων. Η εργασία αυτή αποτέλεσε απλώς μία γενική παρουσίαση των υπαρχουσών πληροφοριών στην διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τα στοιχεία ανέδειξαν την τεράστια αξία των ανθρακονημάτων για πολλαπλούς κλάδους της βιομηχανίας και, συνεπώς, για τις συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις του μοντέρνου κόσμου. Περαιτέρω έρευνα μπορεί να αφορά τα θέματα της παραγωγής και εφαρμογής των ανθρακικών ινών, αλλά και την βελτιστοποίηση της οικονομικής σχέσης: Κόστος Παραγωγής-Κέρδος. Σημαντικός τομέας για τον οποίο δεν υπάρχει επαρκής βιβλιογραφία και ο οποίος πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω είναι το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της αντικατάστασης υλικών της βιομηχανίας με ανθρακονήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπανικολάου, Γ., & Μουζάκης, Δ. (2007). Σύνθετα υλικά. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ.
2. Rethwisch, G. D., & Callister, D. W. (2016). Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών (9^η εκδ.) ΤΖΙΟΛΑ.
3. Τσούβαλης Ν.Γ., “Ανάλυση και σχεδίαση σκαφών από σύνθετα υλικά”
4. Das, T. K., Ghosh, P., & Das, N. C. (2019). Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2(2), 214–233. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0072-z>
5. No title. (n.d.). [Scanned]. <http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC138/ines.pdf>
6. Kotelnikova-Weiler, N., Baverel, O., Ducoulombier, N., & Caron, J. F. (2018). Progressive damage of a unidirectional composite with a viscoelastic matrix, observations and modelling. *Composite Structures*, 188, 297–312. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.067>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026382231730644X>
7. *Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey.* (2020). https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/546-NR_2021-10.pdf
8. *DNV homepage.* (n.d.). Dnv. Retrieved January 8, 2023, from <https://www.dnv.com/>
9. Na, W., Kwon, D., & Yu, W. R. (2018). X-ray computed tomography observation of multiple fiber fracture in unidirectional CFRP under tensile loading. *Composite Structures*, 188, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069> [HYPERLINK](#)
["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"://](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069) [HYPERLINK](#)

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069) doi HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069). HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069)org HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069)/10.1016/ HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069)j HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069). HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069)compstruct HYPERLINK

["https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069"](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.069).2017.12.069

10. ΠΑΠΑΠΕΤΡΟΥ, Β. (2013). ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ. [Διπλωματική εργασία]. ΕΜΠ..

11. Παντελής Δ.Ι. (2008). Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά: πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα

υλικά, ξύλο: δομή, ιδιότητες, τεχνολογία, εφαρμογές, (2^η εκδ.) Παπασωτηρίου

12. ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ, Χ., & ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ, Ν. (2006). *ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ*. Πανεπιστήμιο Πατρών.

13. How it works - The Carbon Cycle - Geochemistry, Biogeochemical cycles, Elements and Compounds, Electrons and chemical reactions. (n.d.). <http://www.scienceclarified.com/everyday/Real-Life-Earth-Science-Vol-3/The-Carbon-Cycle-How-it-works.html>

14. Κ.Α. Χαριτίδης, Η. Κούμouλος, Α.Φ. Τρομπέτα, "Τεχνολογίες παραγωγής και εφαρμογών υλικών με βάση τον άνθρακα", Σημειώσεις μαθήματος στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών "Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών".

15. Ιωάννης Χρ. Σμιτζής, "Θερμοαναλυτικές μέθοδοι και θερμικές ιδιότητες υλικών", ΕΜΠ, Αθήνα, 2006, σελ. 18-23.

25. Wikipedia contributors. (2023, January 24). Polyacrylonitrile. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyacrylonitrile>
26. *How Products Are Made*. (n.d.). <http://www.madehow.com/>
27. ΜΠΑΛΙΑΣ, Κ. Σ. (2014). *ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΜΙΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ (CFS), ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ (CNTS) ΜΕΣΩ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΕΣΕΩΣ ΑΤΜΩΝ (CVD)*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
28. Γκάση, Ε., & Σιούγρο, Κ. (2012). Οι ανθρακοΐνες και τα ανθρακονήματα ως ικρίσματα και μεταφορείς στην αναγεννητική ιατρική. *Ιδρυματικό Αποθετήριο Ωκεανίς*.
- Han, H., Sun, H., Lei, F., Huang, J., Lyu, S., Wu, B., Yang, M., Zhang, C., Li, D., Zhang, Z., & Sun, D. (2021). Flexible Ethylene-vinyl Acetate Copolymer/Fluorographene Composite Films with Excellent Thermal Conductive and Electrical Insulation Properties for Thermal Management. *ES Materials & Manufacturing*. <https://doi.org/10.30919/esmm5f523>
 - Chowdhury, P., Sehitoglu, H., & Rateick, R. (2018). Damage tolerance of carbon-carbon composites in aerospace application. *Carbon*, 126, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.10.019>
 - Kundalwal, S. I., & Ray, M. C. (2014). Smart damping of fuzzy fiber reinforced composite plates using 1--3 piezoelectric composites. *Journal of Vibration and Control*, 22(6), 1526–1546. <https://doi.org/10.1177/1077546314543726>
 - Ποια προϊόντα χρησιμοποιούν ίνες άνθρακα σήμερα; (2020). Greelane. Retrieved January 10, 2023, from <https://www.greelane.com/el/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1-%CE%BC%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9>

<http://www.innotra.ru/uploads/TorayRoadMap.pdf>

- Masayoshi, K. (n.d.). *Toray's Strategy for Carbon Fiber Composite Materials* [Slide show]. 3rd IT-2010 Strategy seminar. innotra. <http://www.innotra.ru/uploads/TorayRoadMap.pdf>
- Sankaran, S., Deshmukh, K., Ahamed, M. B., & Khadheer Pasha, S. (2018). Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 49–71. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.006>
- Mouritz, A., Gellert, E., Burchill, P., & Challis, K. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*, 53(1), 21–42. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(00)00175-6)
- Das, N., Khastgir, D., Chaki, T., & Chakraborty, A. (2000). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(10), 1069–1081. [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(00)00064-6)
- Oh, J. H., Oh, K. S., Kim, C. G., & Hong, C. S. (2004). Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges. *Composites Part B: Engineering*, 35(1), 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2003.08.011>
- Nadeem, G., Safiee, N. A., Bakar, N. A., Karim, I. A., & Nasir, N. A. M. (2021). Connection design in modular steel construction: A review. *Structures*, 33, 3239–3256.
- Tabatabaei, Z. S., Volz, J. S., Baird, J., Gliha, B. P., & Keener, D. I. (2013). Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.01.006>

- Wang, Z., Zhao, Y., Liang, X., & He, Z. (2013). Analysis of the Dynamic Response in Blast-Loaded CFRP-Strengthened Metallic Beams. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/521404>
- Gijare, M., Chaudhari, S., Ekar, S., & Garje, A. (2021). Reduced Graphene Oxide Based Electrochemical Nonenzymatic Human Serum Glucose Sensor. *ES Materials & Manufacturing*. <https://doi.org/10.30919/esmm5f486>
- Liu, H., & Mao, Y. (2021). Graphene Oxide-based Nanomaterials for Uranium Adsorptive Uptake. *ES Materials & Manufacturing*. <https://doi.org/10.30919/esmm5f453>
- Nidamanuri, N., Li, Y., Li, Q., & Dong, M. (2020). Graphene and Graphene Oxide-Based Membranes for Gas Separation. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es8d128906>
- Yuan, B., Guo, M., Murugadoss, V., Song, G., & Guo, Z. (2021). Immobilization of graphitic carbon nitride on wood surface via chemical crosslinking method for UV resistance and self-cleaning. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(2), 286–293. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00235-y>
- Qu, K., Sun, Z., Shi, C., Wang, W., Xiao, L., Tian, J., Huang, Z., & Guo, Z. (2021). Dual-acting cellulose nanocomposites filled with carbon nanotubes and zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67)–derived polyhedral porous Co₃O₄ for symmetric supercapacitors. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(3), 670–683. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00293-2>
- Ma, Y., Xie, X., Yang, W., Yu, Z., Sun, X., Zhang, Y., Yang, X., Kimura, H., Hou, C., Guo, Z., & Du, W. (2021). Recent advances in transition metal oxides with different dimensions as electrodes for high-performance supercapacitors. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(4), 906–924. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00358-2>

47. Sun, Z., Qu, K., Li, J., Yang, S., Yuan, B., Huang, Z., & Guo, Z. (2021). Self-template biomass-derived nitrogen and oxygen co-doped porous carbon for symmetrical supercapacitor and dye adsorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(4), 1413–1424. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00352-8>
48. Lu, X., Zhu, D., Li, X., Li, M., Chen, Q., & Qing, Y. (2021). Gelatin-derived N-doped hybrid carbon nanospheres with an adjustable porous structure for enhanced electromagnetic wave absorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(4), 946–956. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00258-5>
- Umar, A., Kumar, R., Algadi, H., Ahmed, J., Jalalah, M., Ibrahim, A. A., Harraz, F. A., Alsaiari, M. A., & Albargi, H. (2021). Highly sensitive and selective 2-nitroaniline chemical sensor based on Ce-doped SnO₂ nanosheets/Nafion-modified glassy carbon electrode. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(4), 1015–1026. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00283-4>
 - Wang, P., Yang, L., Gao, S., Chen, X., Cao, T., Wang, C., Liu, H., Hu, X., Wu, X., & Feng, S. (2021). Enhanced dielectric properties of high glass transition temperature PDCPD/CNT composites by frontal ring-opening metathesis polymerization. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(3), 639–646. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00287-0>
 - Zhao, J., Wei, D., Zhang, C., Shao, Q., Murugadoss, V., Guo, Z., Jiang, Q., & Yang, X. (2021). An Overview of Oxygen Reduction Electrocatalysts for Rechargeable Zinc-Air Batteries Enabled by Carbon and Carbon Composites. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es8d420>
 - Dong, X., Zhao, X., Chen, Y., & Wang, C. (2021). Investigations about the influence of different carbon matrixes on the electrochemical performance of Na₃V₂(PO₄)₃ cathode material for sodium ion batteries. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(4), 1070–1081. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00319-9>
 - Deng, Z., Deng, Q., Wang, L., Xiang, P., Lin, J., Murugadoss, V., & Song, G. (2021). Modifying coconut shell activated carbon for improved purification of

- benzene from volatile organic waste gas. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(3), 751–760. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00273-6>
- Carbon Fiber Market | Size, Demand Analysis & Opportunity Outlook 2030. (n.d.). <https://www.researchnester.com/reports/carbon-fiber-market/3429>
 - Carbon Fiber Market. (n.d.). MarketsandMarkets. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carbon-fiber-396.html?gclid=Cj0KCQjwmouZBhDSARIsALYcourMM3yFkbYtDKJGcEWCua-7hoEeUHqti2fA8Fohuc7xWn1bJG5wx3MaAvEPEALw_wcB
 - Global and China Carbon Fiber and CFRP Industry Report, 2017-2021 - ResearchInChina. (n.d.). <http://www.researchinchina.com/htmls/report/2017/10364.html>
 - Σχοινά, Α. (2020, June 21). Ποια είναι η . . . βασίλισσα των θωρακισμένων από το Ισραήλ που θέλει την ΕΛΒΟ. *Business Daily*. https://www.businessdaily.gr/oikonomia/20476_poia-einai-i-basilissa-ton-thorakismenon-apo-israil-poy-thelei-tin-elbo
 - Koumoulos, E., Trompeta, A. F., Santos, R. M., Martins, M., Santos, C., Iglesias, V., Böhm, R., Gong, G., Chiminelli, A., Verpoest, I., Kiekens, P., & Charitidis, C. (2019). Research and Development in Carbon Fibers and Advanced High-Performance Composites Supply Chain in Europe: A Roadmap for Challenges and the Industrial Uptake. *Journal of Composites Science*, 3(3), 86. <https://doi.org/10.3390/jcs3030086>
 - Yildiz, T. (2019b). Design and Analysis of a Lightweight Composite Shipping Container Made of Carbon Fiber Laminates. *Logistics*, 3(3), 18. <https://doi.org/10.3390/logistics3030018>

- Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., & Carlone, P. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.3390/jmse8010026>
- Σύκας, Β. (2019). *ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ, ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥΣ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
- ΠΑΡΔΟΥ, Α. (2020). Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας με Ανόργανα και Οργανικά μέσα ενίσχυσης Μηχανικών και Θερμικών ιδιοτήτων [ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ]. ΕΜΠ.
- Wang, T., Kunimoto, M., Mori, T., Yanagisawa, M., Niikura, J., Takahashi, I., Morita, M., Abe, T., & Homma, T. (2022). Carbonate formation on carbon electrode in rechargeable zinc-air battery revealed by in-situ Raman measurements. *Journal of Power Sources*, 533, 231237. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231237>
- Heeg, F., Kilzer, L., Seitz, R., & Stoll, E. (2020). Design and Test of a Student Hybrid Rocket Engine with an External Carbon Fiber Composite Structure. *Aerospace*, 7(5), 57. <https://doi.org/10.3390/aerospace7050057>
- Markets, R. A. (2023, January 30). Long Fiber Thermoplastics Market Report 2022: Sector to Reach \$9.3 Billion by 2030 at a 9.7% CAGR. <https://www.prnewswire.com/news-releases/long-fiber-thermoplastics-market-report-2022-sector-to-reach-9-3-billion-by-2030-at-a-9-7-cagr-301733548.html>