



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ
ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΕ
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΜΕΣΩ ΜΗ
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΑΡΙΑ ΚΑΛΟΓΕΡΗ
ΧΑΝΙΑ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σ' αυτήν την ενότητα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ.Γεώργιο Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείου Κρήτης και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την καταλυτική συμβολή και υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια ενασχόλησης μου με το συγκεκριμένο θέμα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά την ομάδα έρευνας, τον Πάνο Κουτσιανίτη και Γεώργιο Δροσόπουλο, για την ομαλή πορεία της εργασίας αλλά και τη συνεχή επικοινωνία μέχρι το πέρας της.

Ένα ιδιαίτερο και μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου για την απεριόριστη στήριξη και βοήθεια τους ώστε να περατωθούν οι σπουδές μου με επιτυχία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύεται η συμπεριφορά των έξυπνων υλικών, οι διάφοροι τρόποι ενίσχυσης τους και η αντοχή που αποκτούν, με έμφαση στα σύνθετα υλικά που προορίζονται για πλάκες.

Ερευνούνται επίσης, μέσω των κυριότερων μεθόδων του Μη Καταστροφικού Ελέγχου, πιθανές αστοχίες εντός του υλικού καθώς και οι φορτίσεις των ατελειών με μεγαλύτερο βάρος στη ρηγμάτωση υλικού.

Επιπλέον, βάσει των συμπερασμάτων κάθε μεθόδου ανίχνευσης ατελειών, συγκρίνονται οι μέθοδοι που αναλύθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

Τα τέσσερα κεφάλαια έχουν ως εξής:

Κεφάλαιο 1

Αναλύεται τι είναι τα έξυπνα υλικά, με ποιό τρόπο ενισχύονται τα σύνθετα υλικά, ποιά τα πλεονεκτήματα αυτών και ποιά τα τυχόν μειονεκτήματα τους.

Κεφάλαιο 2

Συγκεντρωτικά οι αστοχίες που μπορούν να ανιχνευθούν στα σύνθετα υλικά με εκτενή ανάλυση της αστοχίας της ρηγμάτωσης υλικού.

Κεφάλαιο 3

Η ανίχνευση ατελειών υλικού μέσω του Μη Καταστροφικού Ελέγχου και της Ακουστικής Εκπομπής. Αναφέρονται οι μέθοδοι που ανήκουν στις κατηγορίες αυτές με λεπτομερή ανάλυση, κυρίως, αυτών για την ανίχνευση της ρηγμάτωσης υλικού.

Κεφάλαιο 4

Ένα συγκεντρωτικό κεφάλαιο για το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας με σύγκριση μεθόδων ως προς την αποτελεσματικότητά τους για την ανίχνευση ατελειών υλικού και για την καταλληλότερη μέθοδο εντοπισμού της αστοχίας της ρηγμάτωσης.

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

MKE :	Μη Καταστροφικός Έλεγχος
AE :	Ακουστική Εκπομπή
ΣΥ :	Σύνθετα Υλικά
CVD :	Χημική Εναπόθεση Ατμών
PE :	Μήτρες Πολυαιθυλενίου
PS :	Μήτρες πολυστυρενίου
HLV :	Πάχος Υποδιπλασιασμού
FPD :	Flat Panel Detectors
ASNT:	American Society For Nondestructive Testing

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύνθετα υλικά, Ίνες ενίσχυσης, Μήτρες ενίσχυσης, Ρηγμάτωση υλικού, Mode I-II-III, Μη καταστροφικός Έλεγχος, Ακουστική Εκπομπή, Πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, Υπερηχητικά κύματα, Ακτίνες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Σύνθετα και Έξυπνα υλικά

1.1	Εισαγωγή.....	7
1.2	Ιστορική αναδρομή.....	8
1.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	11
1.4	Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.....	13
1.4.1.i	Ενίσχυση με ίνες.....	13
1.4.1.i.1	Ίνες γυαλιού.....	15
1.4.1.i.2	Ίνες άνθρακα.....	16
1.4.1.i.3	Ίνες αραμιδίου.....	17
1.4.1.i.4	Μεταλλικές ίνες.....	19
1.4.1.i.5	Κεραμικές ίνες.....	20
1.4.1.i.6	Άλλες Ενισχυτικές ίνες.....	20
1.4.1.ii	Σύγκριση ινών.....	21
1.4.2.i	Μήτρες ενίσχυσης.....	23
1.4.2.i.1	Οργανικές μήτρες.....	24
1.4.2.i.2	Πολυεστερικές ρητίνες.....	24
1.4.2.i.3	Βινυλεστρικές ρητίνες.....	25
1.4.2.i.4	Εποξικές ρητίνες.....	25
1.4.2.i.5	Φαινολικές ρητίνες.....	26
1.4.2.i.6	Μεταλλικές μήτρες.....	26
1.4.2.i.7	Κεραμικές μήτρες.....	27
1.4.2.ii	Ενίσχυση με αφρώδη υλικά.....	28
1.4.2.iii	Ενίσχυση με κοκκώδη υλικά.....	28
1.4.2.iv	Στρωματικά σύνθετα υλικά.....	29
1.4.2.v	Νανοσύνθετα υλικά.....	30
1.4.2.v.1	Ταξινόμηση νανοσύνθετων υλικών.....	30
1.4.2.v.2	Εφαρμογές νανοσύνθετων υλικών.....	31
1.5	Αστοχίες σύνθετων υλικών.....	32
1.6	Εφαρμογές σύνθετων υλικών.....	32

Κεφάλαιο 2: Αστοχίες υλικού

2.1	Εισαγωγή.....	37
2.2	Είδη αστοχίας υλικού.....	37

2.3 Αιτίες αστοχίας υλικού.....	39
2.4 Φορτίσεις αστοχιών.....	39
2.5 Αναφορά στις μεθόδους ανίχνευσης αστοχιών υλικού.....	43

Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι ανίχνευσης αστοχιών υλικού

3.1 Μη Καταστροφικός Έλεγχος.....	44
3.1.1 Εισαγωγή.....	44
3.1.2 Ιστορική πορεία Μη Καταστροφικού Ελέγχου.....	45
3.1.3 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου.....	46
3.1.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ΜΚΕ.....	68
3.2 Ακουστική Εκπομπή.....	68
3.2.1 Εισαγωγή.....	68
3.2.2 Ιστορική αναδρομή.....	69
3.2.3 Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής.....	69
3.2.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ΑΕ.....	72

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

4.1 Συγκεντρωτικό κείμενο	73
4.2 Σύγκριση αποτελεσματικότητας μεθόδων ανίχνευσης αστοχιών.....	73

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Από αρχαιοτάτων χρόνων οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τα υλικά σε συνδιασμό με κράματα τους ώστε να επιτύχουν βελτιωμένες ιδιότητες και τα οποία δεν μπορούν να ενταχθούν σε καμία από τις κλασικές κατηγορίες υλικών ο διαχωρισμός των οποίων γινόταν βάσει της χημικής δομής, των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών στις εξής ομάδες:

- Μέταλλα και κράματα
- Μη μεταλλικά ανόργανα υλικά
- Οργανικά υλικά.

Για τα υλικά αυτά, έχει υιοθετηθεί ο όρος «Σύνθετα Υλικά» και παρά την πολύχρονη χρήση τους, μόλις τα τελευταία χρόνια, η επιστήμη της τεχνολογίας των υλικών τα εξετάζει ως ξεχωριστό κεφάλαιο.

Τα σύνθετα αυτά υλικά λόγω των απαιτητικών σύγχρονων τεχνολογιών δημιουργήθηκαν για να παρέχουν αυξημένη αντοχή κι αξιοπιστία αλλά και να έχουν μειωμένες τις αρνητικές παραμέτρους ενός υλικού ή κράματος.

Εν γένει, ως «Σύνθετο Υλικό» ορίζεται εκείνο που αποτελείται από πολλά διαφορετικά υλικά ή φάσεις που βρίσκονται σε μηχανική ισορροπία και προσφέρουν στο τελικό προϊόν, βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση μ'αυτές των φάσεων που τις αποτελούν. [11]

Για να ενταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο κανόνας που αναφέρει πως:

Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός πρέπει είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον πενταπλάσιες) ενώ η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός δε θα πρέπει να' ναι μικρότερη της τάξεως του 10 %.

Το χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η ανισορροπία, δηλαδή, η μηχανική διαφοροποίηση των ιδιοτήτων τους αναλόγως της διεύθυνσης του προσανατολισμού τους. Τα σύνθετα υλικά μπορεί να' ναι συνεχούς ή διακριτής ενίσχυσης. Στο σύνθετο υλικό κυριαρχούν δύο κύριες φάσεις, η μητρική και η ενισχυτική. Με την πρώτη να μεταφέρει τα φορτία στη δεύτερη και να την προστατεύει από όλους τους παράγοντες, φυσικούς ή μη, που θα μπορούσαν να επιφέρουν αστοχίες. Μπορεί να υπάρξει και μια τρίτη φάση σ' ένα σύνθετο υλικό, η ενδιάμεση φάση και αποτελεί γέφυρα μεταξύ των άλλων δύο. Είναι ανισότροπη και έχει μεταβλητές ιδιότητες.

Ως «Εξυπνα Υλικά», σε πολύ γενικό επιπέδου, δηλώνουμε τα συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο. Η αρχή τους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βήμα προς τη γενικότερη

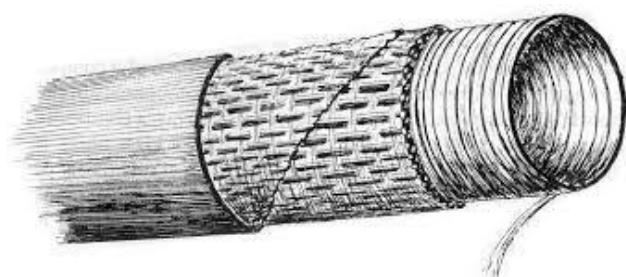
εξέλιξη των αντικειμένων που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο, σαν μια συνέχεια από τα σύνθετα υλικά, όπως και αυτά υπερτερούν των απλών υλικών και κραμάτων τους.

Πιο πάνω δόθηκε ένας γενικευμένος ορισμός καθώς οι ορισμοί που έχουν αποδοθεί στα έξυπνα υλικά ποικίλλουν, λόγω της σχετικά πρόσφατης ανακάλυψής τους και λόγω της μελέτης τους από διαφορετικούς επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς. Θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι επίσημος συμφωνημένος ορισμός δεν υπάρχει και όλοι διαφέρουν ανάλογα με την οπτική γωνία που εξετάζονται καθώς και τους στόχους που εξυπηρετεί το αντικείμενο της κάθε μελέτης.

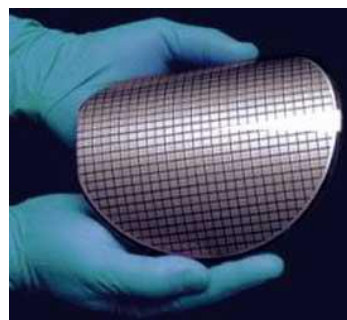
Η ουσιαστική μελέτη και έρευνα των επιστημόνων πάνω στα υλικά αυτά να πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, με την εξέλιξη τους να επιταχύνεται και πρακτικά από το 2000 και μετά.

Η ιδέα των έξυπνων υλικών (και συνεπώς των κατασκευών) έγινε εξαιρετικά καλοδεχούμενη για διαφορα πεδία εφαρμογών ενώ την παρούσα χρονική στιγμή θεωρείται ένας εκ των κινητήριων μοχλών της καινοτομίας και έρευνας της επιστήμης των υλικών.

Μερικά είδη έξυπνων υλικών που επικράτησαν λόγω της ευρείας χρήσης τους είναι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, υλικά και κράματα μνήμης σχήματος και υλικά με ικανότητα αυτό-ίασης.



Εικόνα 1: Σύνθετο Υλικό



Εικόνα 2: Υλικό με Μνήμη

1.2 Ιστορική αναδρομή

Κάποια από τα υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση είναι το ξύλο, η πέτρα, ο πηλός, τα κόκαλα και χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος πολύ γρήγορα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους, ενισχύοντας τα με επιπλέον συστατικά.

Οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Ενώ, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολυστρωτες βέργες ξύλου, προσέφεραν μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων για περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, είναι η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Περί το 1000 π.Χ στη Δυτική Ασία και Κίνα, κατασκευάστηκε σύνθετο τόξο με αλληπάλληλες στρώσεις κεράτου, τέτοιο ώστε να είναι μικρού μεγέθους και συγχρόνως ισχυρό, για να είναι δυνατό να χρησιμοποιείται από τον αναβάτη άρματος.

Η περίοδος επιβολής των Μογγόλων συνδυάστηκε με την κατασκευή ενός είδους τόξου που περιείχε μεγαλύτερη ποικιλία υλικών και ήταν ιδιαίτερα ευλύγιστο και ελαφρύ καθιστώντας το πολύτιμο όπλο στα χέρια των ιππέων τους, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από ένα είδος κεράτου συνδεδεμένο με διάφορες στρώσεις από τένοντες ζώων.

Οι Ιάπωνες πολεμιστές Σαμουράι χρησιμοποιούσαν πολυστρωματικά μέταλλα για να προσδώσουν στα σπαθιά τους επιθυμητές ιδιότητες.

Στην αρχαία Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν σύνθετες κατασκευές για όπλα όπως για παραδείγμα οι ασπίδες. Το σώμα της ασπίδας κατασκευαζόταν από κλαδιά ιτιάς, τα οποία μπλέκονταν μεταξύ τους και από στρώματα δερμάτων βοδιών, τα οποία στερεώνονταν από μεταλλική ταινία. Στην εξέλιξή τους κατασκευάζονταν ολόκληρες από μεταλλικά φύλλα που συνδύαζε την υψηλή δυσκαμψία σχήματος με την πολύ υψηλή αντοχή σε διάτρηση από τα εχθρικά δόρατα και βέλη. Ο Όμηρος στην Ιλιάδα περιγράφει την ασπίδα του Αχιλλέα, λέγοντας ότι την αποτελούσαν επτά εναλλασσόμενες στρώσεις από δέρμα-χρυσό και σίδηρο. Η ασπίδα μπορεί να συγκριθεί μόνο με τους σημερινούς προηγμένους θώρακες των μοντέρνων αρμάτων μάχης και τα αλεξίσφαιρα γιλέκα. Η δομή των κατασκευών αυτών είναι πολύστρωτη από διαφορετικά υλικά όπως, υφάσματα ινών αραμιδίου και πολυεστερικών φιλμ για τα αλεξίσφαιρα γιλέκα και συνδυασμοί χάλυβα μαζί με χαλκό και κεραμικών για τα άρματα.

Τη δεκαετία του 1920, έχουμε το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού και το οποίο ήταν μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγηθείσα ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου κατά το 1960 και κυρίως για την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων.

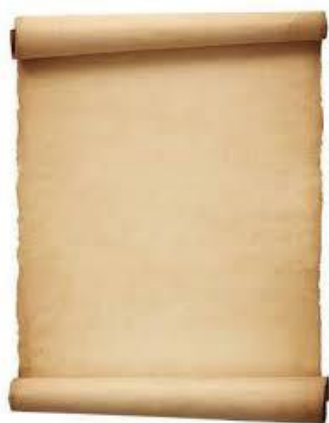
Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα, οι οποίες τελευταία αποτελούν τις συχντότερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.

Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ένας συντοπτικός πίνακας με τη πορεία εξέλιξης των σύνθετων υλικών:

Ημερομηνίες (περίπου)	Υλικά
5000 π.χ.	Πάπυρος/πίσσα (βάρκες)
1500 π.χ.	Ξύλινα επιστρώματα
1909	Φαινολικό σύνθετο
1928	Σύνθετο ουρίας φορμαλδεΰδης
1938	Σύνθετο μελαμίνης φορμαλδεΰδης
1942	Πολυεστέρας ενισχυμένος με γυαλί
1946	Σύνθετα εποξειδικών ρητινών Νάυλον ενισχυμένο με γυαλί
1951	Πολυστυρένιο ενισχυμένο με γυαλί
1956	Σύνθετα φαινόλης αμιάντου
1964	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969	Υβριδικά συστήματα ινών άνθρακα, γυαλιού
1972	Πολυμερή ενισχυμένα με αραμιδικές ίνες
1975	Υβριδικά συστήματα αραμιδικών ινών και ινών άνθρακα

Πίνακας 1: Εξέλιξη υλικών



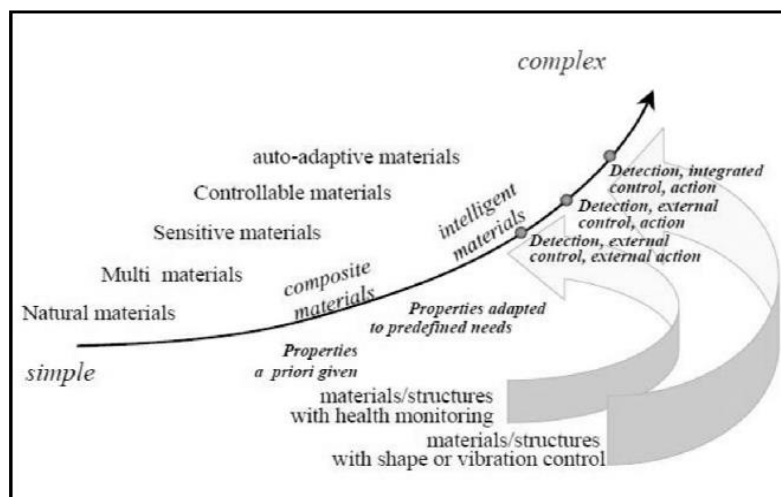
Εικόνα 3: Πάπυρος



Εικόνα 4: Φυσικό Σύνθετο Υλικό από Ξύλο



Εικόνα 5: Συνδιασμός Υλικών για Κατασκευή Τόξου



Εικόνα 6: Εξέλιξη του Υλικού

1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα σύνθετα υλικά δημιουργήθηκαν για τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που προσφέρουν έναντι των απλών υλικών που τα αποτελούν.

Το κύριο πλεονέκτημα τους σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά είναι πως σχεδιάζονται σύμφωνα με τις εκάστοτε συνθήκες για τις οποίες προορίζονται.

Μερικές από τις ενισχυμένες αυτές ιδιότητες των ΣΥ είναι:

1. Χαμηλό βάρος
2. Υψηλή αντοχή
3. Μεγάλη δυσκαμψία
4. Αντίσταση στη διάβρωση
5. Αντίσταση στη φθορά

6. Αντοχή σε κόπωση και κρούση
7. Καλή θερμική αγωγιμότητα
8. Θερμική μόνωση
9. Ακουστική μόνωση
10. Χαμηλό κόστος συντήρησης

Όπως όμως είναι λογικό κάποιοι συνδιασμοί χαρακτηριστικών δεν είναι δυνατών να συνυπάρξουν στο ίδιο τελικό προϊόν, όπως για παράδειγμα η θερμική μόνωση και η θερμική αγωγιμότητα.

Επιπλέον, λόγω της φύσης των ΣΥ, οι κατασκευές που αποτελούνται από αυτά, διευκολύνονται από το μικρό βάρος των ΣΥ και το πιστοποιούμενο από τις υψηλές ειδικές ιδιότητες τους αποτέλεσμα (λόγος τιμής ιδιότητας προς ειδικό βάρος).

Η δυνατότητα τοποθέτησης των ενισχυτικών στοιχείων ακριβώς στα σημεία που χρειάζονται (π.χ. στις διευθύνσεις των επιβαλλόμενων φορτίων), χρησιμοποιώντας με αυτόν τον τρόπο το λιγότερο αναγκαίο υλικό καθώς και το γεγονός ότι περιορίζεται το βάρος της κατασκευής, είναι μια θετική αλληλουχία αποτελεσμάτων που οφείλεται στη βελτιωμένη φύση των ΣΥ.

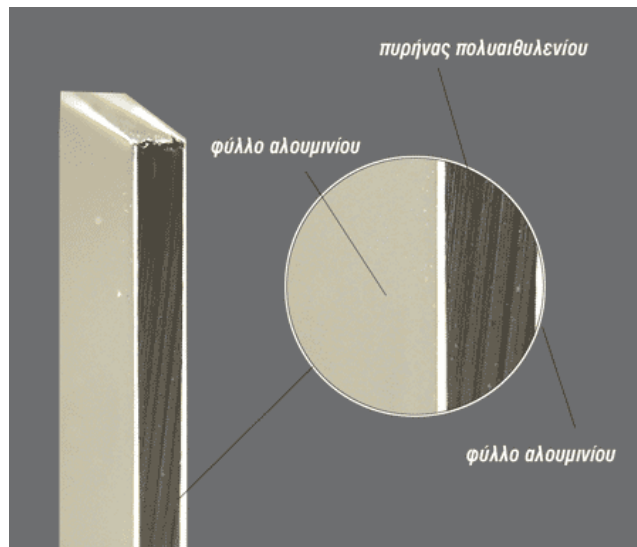
Σημαντική είναι και η αντοχή των υλικών αυτών στη διάβρωση, ιδίως στο θαλασσίνο περιβάλλον, αφού τα ινώδη σύνθετα υλικά δε διαβρώνονται, δε σαπίζουν και γενικά δεν αλλοιώνονται με κανένα τρόπο. Μάλιστα, εμφανίζουν εξαιρετική συμπεριφορά έναντι χημικών ενώσεων (όπως οξέα, αλκάλια, ενυδατωμένα άλατα, οξειδωτικά μέσα και οργανικές ενώσεις).

Ακόμα, κάποια χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν πιο πάνω, καθιστούν τα προκύπτοντα υλικά μονωτές του ηλεκτρισμού, δεν απαιτούνται ραφές και συγκολλήσεις στις κατασκευές από αυτά και μειώνουν επομένως το κόστος, έχουν πολύ καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης περιορίζοντας τη μετάδοση κραδασμών, προσφέρουν σχετικά εύκολη επισκευασιμότητα, μικρή συντήρηση και σχετικά φθηνότερο μηχανολογικό εξοπλισμό για την παραγωγή κατασκευών σε σχέση με αυτόν που απαιτείται για άλλης φύσης κατασκευές όπως οι μεταλλικές κατασκευές.

Τέλος, το μικρό μέτρο ελαστικότητας (δυσκαμψία) που παρουσιάζουν μπορεί να θεωρηθεί άλλοτε ως πλεονέκτημα, αν επιθυμούμε από το υλικό να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς να αστοχεί, και άλλοτε ως μειονέκτημα.

Από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα είναι η έλλειψη ολκιμότητας, λόγω της μηχανικής συμπεριφοράς τους στην οποία απουσιάζει πλαστική περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ενδείξεις όταν η κατασκευή κοντεύει να αστοχήσει. Επιπλέον κατά την επιθεώρηση μιας κατασκευής από σύνθετα υλικά, θα πρέπει να επιθεωρείται ολόκληρη η επιφάνειά τους, λόγω των μη σταθερών συνθηκών κατασκευής, άρα απαιτείται μεγάλης έκτασης εργασία.

Ακόμα, αρκετά σύνθετες είναι οι φαινόμενα του ερπυσμού (ιδίως στα σύνθετα με ενίσχυση ινών γυαλιού) υπό συνθήκες υψηλής και συνεχούς φόρτισης, η αντοχή σε τριβή είναι γενικά μικρή, η σύνδεση και εγκατάσταση εξαρτημάτων απαιτεί προσεκτική σχεδίαση των κατασκευαστικών λεπτομερειών που αυξάνει το κόστος και τις πιθανότητες τοπικών αστοχιών, η ευπάθεια σε φωτιά των σύνθετων υλικών είναι πολύ αυξημένη και οι μέθοδοι παραγωγής είναι πολύπλοκες σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων, απαιτώντας ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος και έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό.



Εικόνα 7: Φύλλο Αλουμινίου με Ενίσχυση Πολυαιθυλενίου

1.4 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά, μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς τρόπους σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται κάθε φορά. Μια συγκεκριμένη ταξινόμηση δεν είναι απαραίτητο να συμπεριλαμβάνει όλα τα σύνθετα υλικά που υπάρχουν.

Μια κατηγορία σύνθετων υλικών είναι τα φυσικά σύνθετα που απαντώνται στη φύση και σ' αυτήν συγκαταλέγονται τα οστά, το ξύλο και άλλα υλικά που συναντάμε στη φύση, η δομή των οποίων έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τα τεχνολογικά σύνθετα υλικά.

Το ενισχυτικό μέσο έχει επιφορτιστεί με την ευθύνη των αυξημένων μηχανικών απαιτήσεων που χαρακτηρίζουν τα σύνθετα υλικά όπως ήδη αναφέρθηκε. Οι επιθυμητές ιδιότητες για κάθε περίπτωση χρήσης των σύνθετων υλικών, επιτυγχάνονται επιλέγοντας τόσο τον κατάλληλο τύπο όσο και το υλικό ενίσχυσης. Υπάρχουν πολλά είδη ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται και διαφέρουν ως προς το μέγεθος, τη γεωμετρία και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά.

1.4.1.i Ενίσχυση με ίνες

Τα υλικά που έχουν ως ενισχυτικό μέσο τις ίνες, αποτελούνται από ένα υλικό, τη μήτρα μέσα στην οποία βρίσκονται οι ίνες ενός άλλου υλικού κατανεμημένες είτε άτακτα, είτε με ορισμένο προσανατολισμό. Στην περίπτωση αυτή ο ρόλος της μήτρας είναι να σταθεροποιεί και να προστατεύει τις ίνες καθώς επίσης, να μεταφέρει τις τάσεις μεταξύ των ινών και να τις διασκορπίζει σε μεγάλη περιοχή. Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα.

Στα μονοδιευθυντικά ΣΥ, οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση και στα πολυδιευθυντικά, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Επιπλέον υπάρχει και ο διαχωρισμός στις εξής υποομάδες:

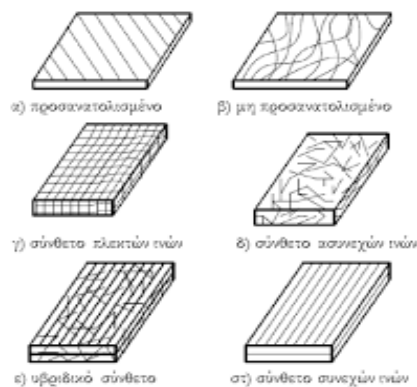
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.

Τα ινώδη συνθέτα υπόκεινται και στο διαχωρισμό που στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών (l/d), ως εξής:

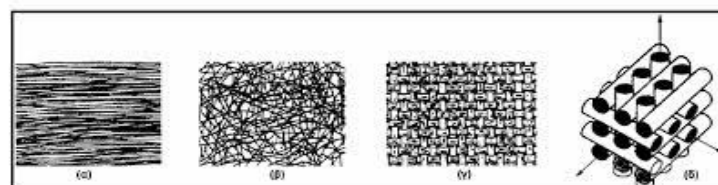
- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες, όταν $l/d \geq 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες, όταν $l/d < 100$.
- Νηματίδια ή τριχίτες, για $d < 1\mu\text{m}$ και $l \cong 100\mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

Ενώ για τις κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, έχουμε την εφαρμογή τους, συνήθως, με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής επιλέγεται έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό, μεγάλη ακαμψία, χαμηλή δυσθραυστότητα και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι γυαλιού, άνθρακα, πολυμερούς, μεταλλικές ή κεραμικές και αναλύονται πιο κάτω.



Εικόνα 8: Τύποι Συνθέτων Υλικών με Ενισχυτικές Ίνες



Εικόνα 9: Προσανατολισμός Ενισχυτικών Ινών

1.4.1.i.1 Ίνες γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα ΣΥ πρώτης γενιάς γύρω στο 1940 και η επιτυχής χρήση τους συνεχίζει μέχρι σήμερα. Ανήκουν στους διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας και η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά.

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διαφέρουν και παρουσιάζονται στον πίνακα:

Χαρακτηριστικά	Τύπος			
	E	C	S	SiO ₂
Επί Τοις Εκατο Σύσταση				
SiO ₂	54	60	65	>99.5
Al ₂ O ₃	16	25	25	/
B ₂ O ₃	8	/	/	/
CaO	17	9	/	/
MgO	5	6	10	/
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-440	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.54	2.50	2.48	2.20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Ίνας Γυαλιού

Αναλόγως με τα επίπεδα των ιδιοτήτων στα ΣΥ με ενίσχυση ίνας, προκύπτουν οι τρεις τύποι:

E-glass (E=Electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή αντίδραση στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

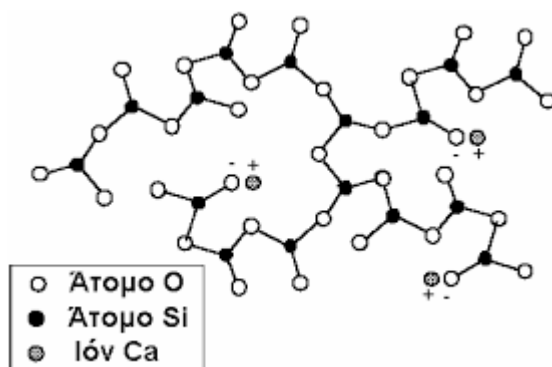
C-glass (C=Corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τις ίνες τύπου E, που όμως είναι ακριβότερες.

S-glass (S=Stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Για μεγάλα ποσοστά SiO₂ (>99,5%), παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Έτσι, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

Γενικά, ως πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, η μικρή αντοχή τους έναντι της φθοράς και υποβάθμιση των

μηχανικών ιδιοτήτων τους στις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας αλλά και η ικανότητα πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.



Εικόνα 10: Δομή Ενισχυτικής Ίνας Γυαλιού

1.4.1.i.2 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα ή αλλιώς γραφίτης είναι η επικρατέστερη ενίσχυση εάν επιθυμούμε υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας ενίσχυση, για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων ΣΥ ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς, όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο και επιθυμούμε ελάττωση του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα.

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα και τους δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων άνθρακα στις επίπεδες εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας και σε αντίθεση, με τον ασθενή δεσμό τύπου Van der Waals που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής του μέτρου ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

Πιο κάτω παρατίθεται πίνακας με τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών άνθρακα:

Χαρακτηριστικά	Ίνες υψηλής αντοχής	Ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
Έπι τοις εκατόν περιεκτικότητα σε άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.8	1.9

Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500
---------------------------------	------	------

Πίνακας 3: Ιδιότητες Ινών Άνθρακα



Εικόνα 11: Δομή Ίνας Άνθρακα

Εικόνα 12: Κατεύθυνση Ενισχυτικής Ίνας

1.4.1.i.3 Ίνες αραμιδίου

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος.

Η αντοχή τους φτάνει το μέγιστο τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, αλλά το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

- **Kevlar-29:** Μέτρο ελαστικότητας 60 GPa
Αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-49:** Μέτρο ελαστικότητας 120 GPa
Αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-149:** Μέτρο ελαστικότητας 180 GPa
Αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια και συγκεκριμένα 1.45 g/cm^3 , ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στη βελτιωμένη ευθυγράμμιση των μοριακών αλυσίδων, για αύξηση της δυσκαμψίας στη διεύθυνση του άξονα της ίνας.

Οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar παρατίθενται πιο κάτω:

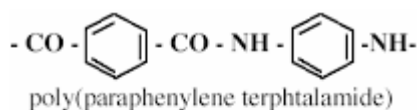
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar-29	Kevlar-49

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
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

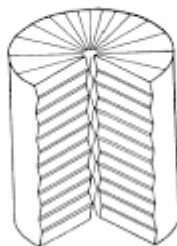
Πίνακας 4: Ιδιότητες Ινών Kelvar

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στις πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού που πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα προσδίδοντας μεν στο προϊόν

ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, εντούτοις, παρουσιάζει μεγάλη αδυναμία στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως σημείο είναι, ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων.



Τύπος αραμιδίου



Δομή ίνας Kevlar

Εικόνα 13: Δομή Ενισχυτικής Ίνας Αραμιδίου

Η σειρά Kevlar καλύπτει ένα φάσμα τιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, από τη χαμηλού μέτρου ελαστικότητας Kevlar 29, μέσω της υψηλού μέτρου ελαστικότητας Kevlar 49, μέχρι την πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας Kevlar 149 και την ανώτατη, πολύ υψηλής αντοχής Kevlar 129. Η Kevlar 49 είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κλάση σε μη-δομικά και ημι-δομικά μέρη εμπορικών αεροσκαφών και ελικοπτέρων, σε θήκες κινητήρα πυραύλων, δοχεία πίεσης και πλοία. Η Kevlar 149, η οποία δίδει χαμηλή προσρόφηση υγρασίας, εξετάζεται για εφαρμογές αεροσκάφους, ελικοπτέρων και ειδών άθλησης. Η τελευταία προσθήκη στη σειρά προϊόντος, η οποία ονομάζεται Kevlar Hp, αναφέρεται ότι χαρακτηρίζεται από μια πιο λεία επιφάνεια με ουσιαστικά

καθόλου νηματίδια. Αν και οι ιδιότητες είναι συγκρίσιμες με αυτές των Kevlar 29 και 49, υποστηρίζεται ότι η νέα ίνα προσφέρει στα σύνθετα καλύτερη αντίσταση στην κρούση και αντοχή στη φθορά. Οι κύριες εφαρμογές για την Kevlar Hp εντοπίζονται στους τομείς των ειδών άθλησης και της ναυσιπλοΐας, της αγοράς συνθέτων υψηλής απόδοσης.

1.4.1.i.4 Μεταλλικές ίνες

Το Βόριο [B] ως στοιχείο μεταξύ άλλων (Βηρρίλιου [Be] και Βολφραμίου [W]) είναι το καταλληλότερο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, αν και οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου και είναι οι εξής:

- **Αναγωγή απο αλογονίδιο του βορίου:**

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15 μm . Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100÷200 μm , ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.

- **Αποθεση με τεχνική CVD:**

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) και που ως μέθοδος είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, με το προϊόν να παρουσιάζει όμως χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ($E = 300\div 420 \text{ GPa}$, $\text{UTS} = 3000\div 3700 \text{ MPa}$), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500 °C. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου ή νιτριδίου του βορίου ώστε τα επιστρώματα αυτά να αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας. Αυτό επιβάλλεται αφού σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε ΣΥ με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοείται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του ΣΥ.



Εικόνα 14: Μεταλλικές Ενισχυτικές Ίνες

1.4.1.i.5 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες επιλέγονται να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών αφού χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al₂O₃) και σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si₃N₄, BeO, B₄C και ZrO₂.

Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Παρόλα αυτά, οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

Επιπλέον, το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400 °C, με τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του όμως να περιορίζεται στους 900 °C, λόγω της σημαντικής δραστικότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al₂O₃) διαμέτρου 250 μm έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800°C . Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

1.4.1.i.6 Άλλες ενισχυτικές ίνες

Άλλα είδη ενισχυτικών ινών, όχι τόσο διαδεδομένες είτε λόγω χαμηλών προδιαγραφών είτε άλλων δυσκολιών είναι οι ίνες από φυσικούς πόρους και οι λεγόμενοι τριχίτες.

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1μm, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά. Παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλει κρυστάλλου, έχουν εξωτερικές επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων αλλά η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου.

Για ίνες από φυσικούς πόρους, υπάρχουν αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή και μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, προσφέροντας όμως μειωμένα χαρακτηριστικά. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία. Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου περίπου 20 nm, έχουν διάμετρο περίπου 10 μm, μήκος αρκετά cm, με θερμοκρασία χρήσης 500 °C. Σημεία που δηλώνουν κατά πολύ την μηχανική αντοχή του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa.

Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa αν μιλάμε για τέλεια φυλλίδια, ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές κυμαίνονται στην

περιοχή 700÷900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητά τους 2.8 g/cm³.



Υφασμα αμιάντου

Εικόνα 15: Υφασμα από Ενισχυτικές Ίνες Αμιάντου

1.4.1.ii Σύγκριση ινών

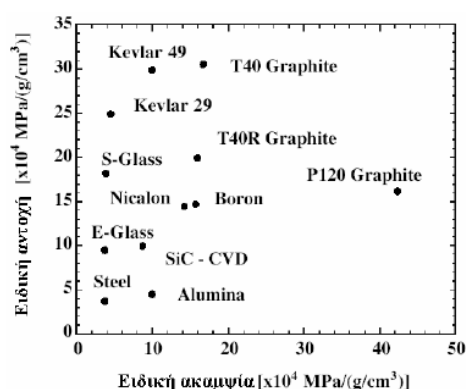
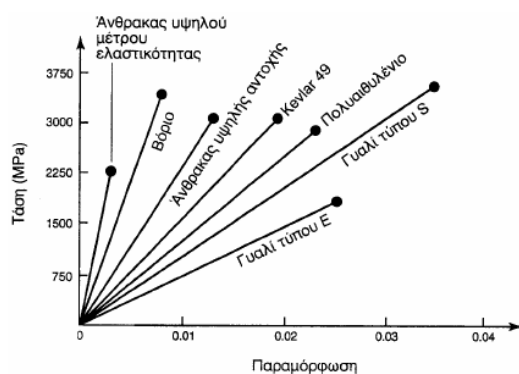
Τα πιο πάνω είδη ενισχυτικών ινών έχουν διάφορες ιδιότητες καθώς και ελαττώματα. Κατά την επιλογή ενισχυτικών ινών πέραν των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε είδους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και μια γενική σύγκριση αυτών σε γενικές κατηγορίες και η οποία παρατίθενται. Σύγκριση:

1. Ως προς την παραμόρφωση θραύσης

Ενισχυτικές ίνες	Παραμορφωση θράυσης %
Kelvar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

Πίνακας 5: Σύγκριση Ινών Ως Προς Την Παραμορφωση Θραύσης

2. Ως προς την ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία



3. Ως προς τη θερμική ευστάθεια

Ενισχυτικές ίνες	T _{max} (Βαθμοί Κελσίου)
Spectra	150
Kelvar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000 *
* Παρουσία οξυγόνου: T _{max} = 500	

Πίνακας 6: Σύγκριση Ινών Ως Προς Τη Θερμική Ευστάθεια

Στον τελευταίο πίνακα δίδονται συγκεντρωτικά μερικές εμπορικές ίνες ενίσχυσης και οι ιδιότητές τους:

Τύπος	Τυπική διάμετρος (μm)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Παραμόρφωση θραύσης (%)	Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 ⁻⁶ /°C)	Λόγος Poisson
Γυαλί						
E – glass	10	72,4	3,45	4,8	5	0,2
S – glass	10	86,9	4,30	5,0	2,9	0,22
Ανθρακας PAN						
T – 300	7	231	3,65	1,4	–0,6	0,2
AS – 1	8	228	3,10	1,32		
AS – 4	7	248	4,07	1,65		
T – 40	5,1	290	5,65	1,8	–0,75	
IM – 7	5	301	5,31	1,81		
HMS – 4	8	345	2,48	0,7		
GY – 70	8,4	483	1,52	0,38		
Ανθρακας πίσσας						
P – 55	10	380	1,90	0,5	–1,3	
P – 100	10	758	2,41	0,32	–1,45	
Αραμίδιο						
Kevlar 49	11,9	131	3,62	2,8	–2	0,35
Kevlar 149		179	3,45	1,9		
Technora		70	3,0	4,4	–6	
Πολυαιθυλένιο εκτεταμένης αλυσίδας						
Spectra 900	38	117	2,59	3,5		
Spectra 1000	27	172	3,0	2,7		
Βόριο	140	393	3,1	0,79	5	0,2
SiC						
Monofilament	140	400	3,44	0,86	1,5	
Nicalon (multifilament)	14,5	196	2,75	1,4		
Al₂O₃						
FiberFP	20	379	1,90	0,4	8,3	
Al₂O₃ – SiO₂						
Fiberfrax (ασυνεχής)	2–12	103	1,03–1,72			

Πίνακας 7: Εμπορικές Ίνες Ενίσχυσης

1.4.2.i Μήτρες ενίσχυσης

Ως μήτρα χαρακτηρίζεται εκείνο το συστατικό του σύνθετου υλικού το οποίο περιβάλλει και σταθεροποιεί τις ενισχυτικές ίνες, ενώ παράλληλα δίνει το τελικό σχήμα στη σύνθετη κατασκευή.

Η μήτρα, σαν μέρος του σύνθετου υλικού, αν και έχει χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις ενισχυτικές ίνες, λειτουργεί έτσι ώστε αναδεικνύονται οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων μεταξύ των ινών καθώς και την ακεραιότητα του σύνθετου υλικού όταν κάποιες ίνες αστοχήσουν, μεταφέροντας τα φορτία στις γειτονικές ίνες που δεν είχαν επηρεαστεί με διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα.

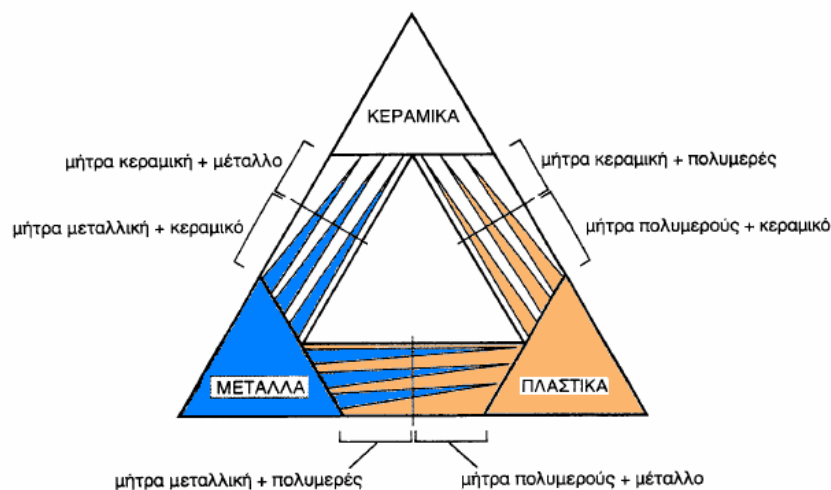
Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από τα πιο κάτω χαρακτηριστικά:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Επιπλέον, οι ιδιότητες αυτές πρέπει να παρουσιάζουν συμβατότητα με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών για το τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας και μήτρας. [15]

Οι μήτρες στα σύγχρονα σύνθετα υλικά μπορεί να είναι οργανικές, μεταλλικές ή κεραμικές, ενώ οι οργανικές μήτρες διακρίνονται επιπλέον σε δύο κατηγορίες, τις θερμοπλαστικές και τις θερμοσκληρυνόμενες και αναλύονται πιο κάτω.



Εικόνα 16: Τρόπος Ενίσχυσης Υλικών

1.4.2.i.1 Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται στις εξής δύο υποκατηγορίες:

Θερμοπλαστικές:

Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, επιλέγεται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης και αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS).

Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμιάντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

Θερμοσκληρυνόμενες:

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και παθυρότερα και σ' αυτήν την υποκατηγορία ανήκουν:

- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200 °C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
- Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 °C.

1.4.2.i.2 Πολυεστερικές ρητίνες

Στην οργανική χημεία η αντίδραση μεταξύ μιας αλκοόλης και ενός οργανικού οξέως έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εστέρα και νερού. Χρησιμοποιώντας ειδικές αλκοόλες λοιπόν, όπως η γλυκόλη, μαζί με διβασικά οργανικά οξέα και με την προσθήκη κατάλληλων μονομερών σχηματίζεται ο πολυεστέρας. Με τον τρόπο αυτό, δηλαδή χρησιμοποιώντας διαφορετικά οξέα και αλκοόλες, δημιουργείται μια μεγάλη ποικιλία πολυεστέρων με διαφορετικές ιδιότητες.

Για την κατασκευή όμως σύνθετων υλικών οι πιο βασικοί τύποι είναι:

- Οι ορθοφθαλικοί πολυεστέρες, χαμηλότερου κόστους και ευρέως χρησιμοποιούμενοι.
- Οι ισοφθαλικοί πολυεστέρες, που είναι πιο υψηλότερου κόστους, με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, καλύτερη αντοχή στο νερό και χρησιμοποιούνται σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων.

Οι περισσότερες πολυεστερικές ρητίνες είναι παχύρρευστες και περιέχουν στυρένιο σε ποσοστό μέχρι και 50%. Ο ρόλος του οποίου είναι διπλός. Πρώτον, διευκολύνει την επεξεργασία της ρητίνης αφού την καθιστά πιο λεπτόρρευστη και δεύτερον, επιτρέπει στη ρητίνη να πολυμεριστεί και να μετατραπεί από την υγρή μορφή σε στερεή, σχηματίζοντας διασταυρούμενες μοριακές αλυσίδες σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο.

Οι πολυεστερικές ρητίνες πολυμερίζονται από μόνες τους μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα αλλά για να καθοριστεί ο πολυμερισμός τους μέσα σε σαφή χρονικά όρια προστίθενται και άλλα προϊόντα, όπως οι καταλύτες, οι επιταχυντές και οι αναστολείς και ο χρόνος πολυμερισμού τους εξαρτάται από την ποσότητα του καταλύτη που προστίθεται και από την εξωτερική θερμοκρασία. Ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι από λίγα λεπτά μέχρι μερικές ώρες. Οι καταλύτες προστίθενται λίγο πριν την χρησιμοποίηση της ρητίνης, δε λαμβάνουν μέρος σε καμία αντίδραση αλλά προκαλούν την έναρξη της διαδικασίας πολυμερισμού. Ο επιταχυντής, όπως αναφέρει και το όνομα του, προστίθεται για να επιταχύνει την διαδικασία πολυμερισμού και αντίστοιχα, οι αναστολείς για να την επιβραδύνουν. Μετά την προσθήκη και του καταλύτη και του επιταχυντή ξεκινά η διαδικασία πολυμερισμού και σκλήρυνσης της ρητίνης.

Η αντίδραση πολυμερισμού είναι εξώθερμη και το ποσό της θερμότητας που εκλύεται εξαρτάται από το πάχος του υλικού που κατασκευάζεται, το οποίο εάν είναι υπερβολικό, μπορεί να καταστραφεί από τη μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας. Επίσης, κατά τον πολυμερισμό της ρητίνης παρουσιάζεται συρρίκνωση του όγκου της περίπου 5-8%.

Τέλος, όσο αφορά τη χρήση τους, οι πολυεστερικές ρητίνες είναι οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες ρητίνες για ναυπηγική χρήση και η ευρεία εφαρμογή τους οφείλεται στο λογικό τους κόστος, στην ευκολία μορφοποίησης τους και στην καλή τους συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον.

1.4.2.i.3 Βινυλεστρικές ρητίνες

Οι βινυλεστρικές ρητίνες έχουν παρόμοια μοριακή δομή με τις πολυεστερικές ρητίνες που όμως περιέχουν μικρότερο αριθμό εστερομάδων, οι οποίες είναι δεκτικές στην απορρόφηση νερού με υδρόλυση. Αυτό συνεπάγεται την καλύτερη συμπεριφορά των βινυλεστρικών ρητινών σε υγρό περιβάλλον, επειδή έχουν καλύτερη αντίσταση στο νερό και σε άλλα χημικά. Οι βινυλεστρικές ρητίνες έχουν μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με τις πολυεστερικές και καλύτερη αντοχή σε κρούση και σε κόπωση. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν σαν αποτέλεσμα οι βινυλεστρικές ρητίνες να έχουν διπλάσιο κόστος από τις πολυεστερικές. Χρησιμοποιούνται σε περιορισμένο βαθμό σε μικρά σκάφη υψηλών απαιτήσεων.

1.4.2.i.4 Εποξικές ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες αποτελούν μια πολύ μεγάλη κατηγορία ρητινών με πολύ υψηλή απόδοση σε σχέση με τις υπάρχουσες ρητίνες άλλων κατηγοριών. Οι εποξικές ρητίνες υποσκελίζουν τους περισσότερους τύπους ρητίνης όσο αφορά στις μηχανικές ιδιότητες και στην αντίσταση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι αυξημένες κολλητικές τους ιδιότητες και η πολύ καλή αντίσταση τους στο νερό, τις καθιστούν ιδανικές για ναυπηγικές χρήσεις και χρησιμοποιούνται ως κύριο υλικό για σκάφη υψηλών απαιτήσεων.

Οι εποξικές ρητίνες έχουν ένα μεγάλο αριθμό χρήσιμων ιδιοτήτων. Η ρητίνη και οι παράγοντες που την πολυμερίζουν σχηματίζουν ένα σύστημα με χαμηλή ρευστότητα, που είναι εύκολο στη χρήση. Οι εποξικές ρητίνες πολυμερίζονται εύκολα και γρήγορα, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία μεταξύ 5-150 °C. Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες των εποξικών ρητινών είναι και ότι παρουσιάζουν πολύ μικρή συρρίκνωση κατά την σκλήρυνση και έτσι ελαχιστοποιούνται οι εσωτερικές τάσεις στο υλικό.

Η υψηλή κολλητική ικανότητα και οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες συνδυάζονται με μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση και με αντίσταση σε χημικά. Οι εποξικές ρητίνες διαφέρουν από τις πολυεστερικές στο ότι για να πολυμεριστούν απαιτείται η προσθήκη σκληρυντή αντί για καταλύτη και αυτός είναι συνήθως μια αμίνη, η οποία συμμετέχει στον πολυμερισμό της ρητίνης σε αντίθεση με τον καταλύτη.

Τέλος, οι εποξικές ρητίνες έχουν κόστος που είναι κατά δύο με τρεις φορές υψηλότερο από τους κοινούς ισοφθαλικούς πολυεστέρες και μπορεί να γίνει έως δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο, για ειδικές εποξικές ρητίνες.

1.4.2.i.5 Φαινολικές ρητίνες

Βασικό πλεονέκτημα των φαινολικών ρητινών είναι η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η καλή αυτή συμπεριφορά τους οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης περίπου στους 530°C σε σχέση με τους 370°C των πολυεστερικών. Η καλή συμπεριφορά τους σε συνθήκες φωτιάς ενισχύεται από τη χαμηλή ταχύτητα διάδοσης φλόγας και από τη χαμηλή εκπομπή καπνού. Οι ιδιότητες αυτές οδήγησαν σε αυξημένη χρήση των φαινολικών ρητινών σε πυράντοχες εσωτερικές φρακτές, σε καταστρώματα και σε στοιχεία επίπλωσης.

Έχουν όμως και το μειονεκτήματα αυτό που δεν επιτρέπουν τη χρήση τους σε κατασκευές οι οποίες απαιτούν αντοχή και καλή συμπεριφορά σε θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τον πολυμερισμό τους παράγεται υδρατμός και δημιουργεί φυσαλίδες στο πολύστρωτο, με αποτέλεσμα την μειωμένη αντοχή. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλή χημική έλξη προς το νερό, που οδηγεί σε απορρόφηση νερού, τρεις φορές περισσότερου από τους ισοφθαλικούς πολυεστέρες.

1.4.2.i.6 Μεταλλικές μήτρες

Η ανάγκη σε μήτρες με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες κατέστησαν τα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο υλικά μήτρας που προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή, ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 °C. Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στον πίνακα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.	Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος συνολικής κατασκευής.
Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων σε καταπονήσεις ασκούμενες σε	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη

διαφορετικές διευθύνσεις απο αυτές του προσανατολισμού των ινών.	διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας που συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από μήτρα που οδηγεί στην μικρορηγμάτωση και θράυση ινών.
Βελτίωση ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου.	Φαινόμενα διάλυσης ινών στην μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες.
Μείωση ευαισθησίας του σύνθετου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του.	Ασυνέχεια καμπύλης εφελκυσμού των σύνθετων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.
Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σύνθετου για ειδικές εφαρμογές.	Δύσκολη παραγωγή υλικού και μεγαλύτερο κόστος.
Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων και του σύνθετου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από την μήτρα που φέρει μικρορηγμάτωση και θράυση ινών.

Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μεταλλικών Μητρών Έναντι Άλλων

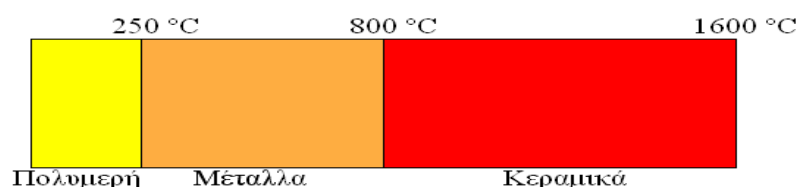
1.4.2.i.7 Κεραμικές μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν τόσο στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και όσο και στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επηρεάζουν θετικά την αντοχή της μήτρας.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών- μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές

οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα το λεγόμενο οπλισμένο σκυρόδεμα, ινών αμιάντου, ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.



Εικόνα 17: Θερμοκρασιακά Όρια Σύνθετων Υλικών

1.4.2.ii Ενίσχυση με αφρώδη υλικά

Πολλά πλαστικά μπορούν να πάρουν την μορφή αφρού με τη χρήση ειδικών διογκωτικών μέσων κατά την φάση της μορφοποίησης τους. Αποτέλεσμα αυτής της προσθήκης είναι η δημιουργία ενός υλικού με κυψελωτό πυρήνα και σκληρό περίβλημα. Αυτό είναι το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα γιατί ο τύπος του υλικού αυτού είναι πολύ χρήσιμος αφού χαρακτηρίζεται από την υψηλή τιμή της ειδικής αντοχής του.

Η αφρώδης δομή του υλικού επιτυγχάνεται με την διάχυση μέσα στην ρευστή ρητίνη αδρανούς αερίου λίγο πριν τη φάση της μορφοποίησής του. Η διάχυση αυτή επιτυγχάνεται είτε άμεσα, είτε έμμεσα με την βοήθεια διογκωτικών προσθέτων που εκλύουν το αέριο που συνήθως είναι το άζωτο. Στη συνέχεια γίνεται η απόχυση του μίγματος

ρητίνης αερίου μέσα στο καλούπι οπότε το αέριο εκτονώνεται με μεγάλη ταχύτητα και εξαναγκάζει το υλικό να καταλάβει όλον τον χώρο του καλουπιού. Έτσι δημιουργείται μία δομή κυψελωτού πυρήνα που περιβάλλεται από σκληρό περίβλημα.

Κάθε στερεό μπορεί να μετατραπεί σε αφρό και πλέον υπάρχουν τεχνικές για την κατασκευή τρισδιάστατων κυψελοειδών στερεών από πολυμερή μέταλλα, κεραμικά ακόμη και γυαλιά.

Οι δομικοί αφροί βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές, όπως στην επιπλοποιία, στην οικοδομική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, κ.α.

Τα αφρώδη υλικά είναι δυνατόν να ενισχυθούν με ίνες γυαλιού με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

1.4.2.iii Ενίσχυση με κοκκώδη υλικά

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά τυγχάνουν ενίσχυσης πολύ μικρών σωματιδίων σε σχήμα κόκκου και τα οποία είναι διεσπαρμένα σε μία μήτρα διαφορετικού ή του ίδιου υλικού.

Τα σύνθετα αυτά υλικά χρησιμοποιούνται αρκετά λόγω της ευκολίας κατασκευής τους και του χαμηλού τους κόστους και για το γεγονός πως η προσθήκη κόκκων σε πολυμερικές ή άλλου είδους μήτρες δημιουργεί μία μεγάλη ποικιλία νέων υλικών.

Λόγοι χρήσης τέτοιων εγκλεισμάτων μπορεί να είναι:

- Η αύξηση της δυσκαμψίας της μήτρας
- Η ρύθμιση του συντελεστή θερμικής διαστολής υλικού
- Βελτίωση της θερμικής αντίστασης
- Η μείωση του φαινομένου του ερπυσμού
- Η αύξηση της αντοχής του
- Η ρύθμιση της διαπερατότητας σε υγρά και αέρια
- Η βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων
- Η ρύθμιση των ρεολογικών ιδιοτήτων
- Η βελτίωση της στιβαρότητας της μήτρας
- Η μείωση του κόστους

Παρά το γεγονός τα κοκκώδη σύνθετα υλικά θεωρούνται μακροσκοπικά ισότροπα και ομογενή, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους είναι αρκετά δύσκολη, λόγω της πολύπλοκης δομής τους.

Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη, όπως και η μήτρα κα γι'αυτό προκύπτουν οι εξής συνδιασμοί:

Σύνθετα μη μεταλλικής ενίσχυσης σε μη μεταλλική μήτρα:

Το πιο κοινό παράδειγμα είναι το σκυρόδεμα, όχι όμως το οπλισμένο, που αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με ένα μίγμα τσιμέντου με νερό. Η αντοχή του σκυροδέματος αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη των κόκκων πέτρας.

Σύνθετα μεταλλικής ενίσχυσης σε μη μεταλλική μήτρα:

Πολλά υλικά του είδους αυτού έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, την μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και τη μείωση της φθοράς της μήτρας. Έτσι, μεταλλική σκόνη σαν ενίσχυση μέσα σε μία θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ενός σύνθετου υλικού που είναι πιο σκληρό και ανθεκτικό και άγει πιο εύκολα τη θερμότητα και τον ηλεκτρισμό από την καθαρή ρητίνη.

Σύνθετα μεταλλικής ενίσχυσης σε μεταλλική μήτρα:

Τα υλικά αυτού του τύπου δεν είναι κράματα. Η μεταλλική ενίσχυση έχει τη μορφή κόκκων μέσα στην μήτρα και δεν είναι διαλυμένη μέσα σ'αυτήν όπως είναι στα κράματα. Σαν παράδειγμα για αυτήν την κατηγορία μπορούμε ν'αναφέρουμε τους κόκκους του μολύβδου μέσα σε κράματα χαλκού και χάλυβα, οι οποίοι σκοπό έχουν τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του κράματος στις εργαλειομηχανές.

Σύνθετα μη μεταλλικής ενίσχυσης σε μεταλλική μήτρα:

Μη μεταλλικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή κοκκώδους ενίσχυσης μέσα σε μεταλλική μήτρα με τα προκύπτοντα σύνθετα υλικά να ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορεί να είναι δύο ειδών, ανάλογα με την ενίσχυση. Τα πρώτα είναι κεραμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων και σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική. Το άλλο είδος είναι τα κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα. Έτσι, το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών τα οποία απαιτούν πολύ υψηλή σκληρότητα, όπως σε μηχανές συρματοποίησης.

1.4.2.iv Στρωματικά σύνθετα υλικά

Σ' αυτήν την κατηγορία υλικών, η μήτρα και η ενίσχυση έχουν τη μορφή φύλλων. Έτσι, τα υλικά αυτά αποτελούνται από αλληπάλληλες στρώσεις ομοίων ή και διαφορετικών υλικών. Ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο νέο υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες που είναι μεταξύ άλλων, η αντοχή, η ακαμψία, ελαφρότερη κατασκευή, η αντίσταση στη διάβρωση, η αντίσταση στη φθορά, η αισθητική, η θερμική μόνωση και η ακουστική μόνωση.

Απ'τα κυριότερα είδη τέτοιων υλικών είναι:

Διμέταλλα:

Συνδεδεμένα φύλλα δύο μετάλλων με σημαντικά διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής.

Σύνθετα υλικά που βρίσκουν εφαρμογή σε εξαρτήματα μετρήσεως θερμοκρασίας, σε θερμοστάτες κ.λ.π.

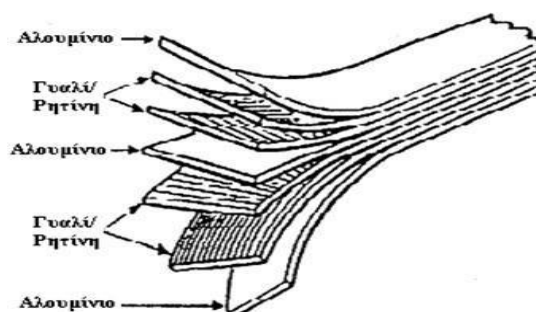
Μέταλλα επιμεταλλωμένα:

Η επιμετάλλωση ενός μετάλλου με ένα άλλο που γίνεται για να δώσει τις καλύτερες ιδιότητες και των δύο.

Έτσι ένα κράμα υψηλής αντοχής χωρίς ανθεκτικότητα στη διάβρωση, επιμεταλλωμένο με ένα κράμα ανθεκτικό στη διάβρωση, μας δίνει ένα σύνθετο με υψηλή αντοχή και καλή αντίσταση στη διάβρωση.

Υλικά με επίστρωση πλαστικού:

Πολλά υλικά μπορεί να εμποτιστούν με διάφορα πλαστικά και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως φύλλα γυαλιού και αμιάντου που μπορούν να εμποτιστούν με σιλίκονες για να παραχθεί έτσι ένα υλικό με σημαντικές πυρίμαχες ιδιότητες. Επίσης, γυαλί ή νάυλον μπορούν να εμποτιστούν με διάφορες ρητίνες και να προκύψουν υλικά ανθεκτικά στην κρούση με σημαντική σκληρότητα και τα οποία, λόγω του μικρού βάρους τους, είναι κατάλληλα για θωρακίσεις.



Εικόνα 17: Πολύστρωτο Υλικό

1.4.2.v Νανοσύνθετα υλικά

Τα νανοσύνθετα υλικά ορίζονται ως τα σύνθετα υλικά στα οποία η μία από τις φάσεις του αποτελείται από μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων με μέγεθος στην τάξη της νανοκλίμακας που είναι ομοιόμορφα διεσπαρμένα στην πολυμερή μήτρα.

Η ανάπτυξη των νανοσύνθετων έχει ωθήσει εντυπωσιακά τη βελτίωση και τη διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των συμβατικών πολυμερών, χωρίς αυτό να προϋποθέτει την αλλαγή της σύστασης και της διαδικασίας πολυμερισμού. Λόγω της

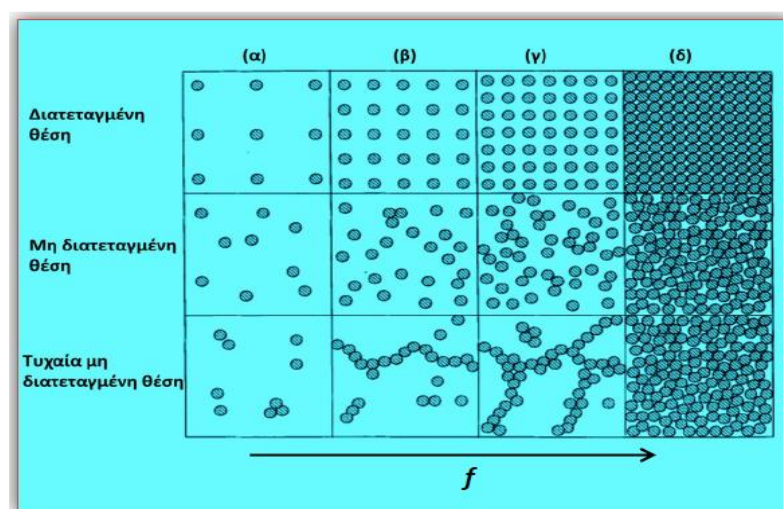
εξαιρετικά μεγάλης τιμής της ειδικής επιφάνειας των νανοεγκλεισμάτων η προσθήκη μόνο ενός μικρού ποσοστού τους είναι αρκετή για να προκληθούν σημαντικές αλλαγές στις φυσικές, χημικές, μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες της μήτρας, ειδικά αν επιλεγεί η χρήση εγκλεισμάτων με πολύ μεγάλο λόγο μήκους- διαμέτρου. Τέτοιες αλλαγές είναι συνήθως επιθυμητές αφού εξυπηρετούν μηχανολογικούς σκοπούς. [18]

1.4.2.v.1 Ταξινόμηση νανοςύνθετων υλικών

Τα νανοςύνθετα ταξινομούνται με βάση τον αριθμό των διατάσεων των εγκλεισμάτων που περιέχονται στην πολυμερική μήτρα. Νανοςύνθετα υλικά όπως ο φυλόμορφος πηλός ή ο αποφλοιωμένος γραφίτης ή αλλιώς γραφένιο είναι 1-d διάστασης, νανოსωματίδια που έχουν την μορφή ινών ή σωλήνων, όπως οι νανοςωλήνες άνθρακα, είναι 2-d διάστασης, ενώ εγκλείσματα με σφαιρική δομή όπως αιθάλη και πυριτία καθώς και τα οργανικά νανοεγκλείσματα αναφέρονται σε 3-d διάσταση. [13]

Επίσης τα νανοςύνθετα ταξινομούνται και από χημικής άποψης ανάλογα με τον τρόπο ενσωμάτωσης των νανοςωματιδίων στην πολυμερική μήτρα. Οι κύριοι τρόποι που γίνονται είναι είτε με ισχυρούς δεσμούς (όπως οι ομοιοπολικοί δεσμοί) είτε με ασθενείς δεσμούς (όπως οι δεσμοί υδρογόνου και δυνάμεις Van der Waals) ή χωρίς καμία χημική αλληλεπίδραση.

Επιπλέον με άλλο ένα τρόπο που μπορούμε να ταξινομήσουμε τα νανοςύνθετα είναι ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχουν τα νανοεγκλείσματα μέσα στην πολυμερική μήτρα όπως φαίνεται πιο κάτω.



1.4.2.v.2 Εφαρμογές νανοςύνθετων υλικών

Η τεχνολογία των νανοςύνθετων έχει επεκτείνει τις εφαρμογές της στον τομέα των δομικών υλικών, στην επένδυση και στην συσκευασία ιατρικών/ βιοϊατρικών προϊόντων καθώς επίσης στις ηλεκτρονικές και φωτονικές συσκευές.

Επιπλέον τα νανοςύνθετα υλικά λόγω της υψηλής αντοχής εφελκυσμού και μικρού βάρους μεταξύ άλλων, χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της αυτοβιομηχανίας τόσο στην κατασκευή εξαρτημάτων όσο και προϊόντων βαφής.

Στη χημική βιομηχανία γίνονται προσπάθειες να χρησιμοποιούνται ως συστατικά καυσίμων για οικονομικούς σκοπούς καθώς και για μειωμένους ρύπους.

Ενώ έχουν εντυφίσει και στο τομέα της κοσμεολογίας για την παρασκευή καλλυντικών, αντιηλικών και αντιγηραντικών προϊόντων.

1.5 Αστοχίες σύνθετων υλικών

Όπως ήδη έχει αναφερθεί τμηματικά σε κάθε υποκεφάλαιο, κάθε τύπος σύνθετων υλικών χαρακτηρίζεται από ορισμένα πλεονεκτήματα καθώς και μειονεκτήματα που πιθανόν να οδηγήσουν σε αστοχία υλικού. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει εκτενής ανάλυση στις αιτίες και είδη αστοχίας, ενώ εδώ θα γίνει μια αναφορά.

Η κύρια αιτία που οδηγεί σε αστοχία ένα υλικό εκτός από τη φθορά και τη διάβρωση είναι η παραμόρφωση με την οποία μεταβάλλεται το σχήμα ενός υλικού και αφορά κυρίως τις μηχανικές αστοχίες. Σαν αποτέλεσμα, όταν τα υλικά αυτά βρεθούν κάτω από κρίσιμο συνδυασμό εντατικών καταστάσεων να εγείρεται η διάρρηξη του δεσμού πρόσφυσής και κατά συνέπεια να αποτελούν εστίες εκκίνησης ρωγμών.

Στα σύνθετα υλικά οι κύριες αιτίες της αστοχίας των υλικών είναι:

- Σπάσιμο των ινών
- Αποκόλληση (δηλαδή διαχωρισμός των ινών και της μήτρας)
- Μικρορωγμές στη πολυμερή μήτρα
- Αποφλοίωση πολυστρωματικών υλικών

Οι τρόποι αστοχίας των σύνθετων υλικών μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικούς τύπους:

- Αστοχία εντός του στρώματος.
- Αστοχία μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων (στρωματική).
- Αστοχία που διατρέχει το μέγιστο μέρος ή το σύνολο των στρωμάτων (διαστρωματική).

1.6 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών στις κατασκευές και έχουν βελτιώσει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης. Η μεγάλη ποικιλία ενίσχυσης των υλικών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής τους παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη

συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής και συνεπώς τελικών προϊόντων για διάφορες εφαρμογές. [17]

Ενδεικτικές εφαρμογές των σύνθετων προϊόντων είναι:

Αυτοκινητοβιομηχανία:

Τα σύνθετα υλικά στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων επιτρέποντας ελαφρύτερες κατασκευές και εύκολες μεταβολές στο σχεδιασμό. Χρήση επίσης γίνεται στην κατασκευή καμπινών σε φορτηγά αυτοκίνητα, σε προφυλακτήρες και άλλα εξαρτήματα.



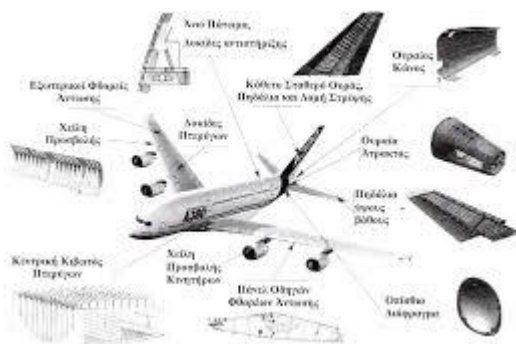
Εικόνα 18: Εφαρμογή Σύνθετων Υλικών στην Αυτοβιομηχανία

Αεροναυπηγική και αεροδιαστημική:

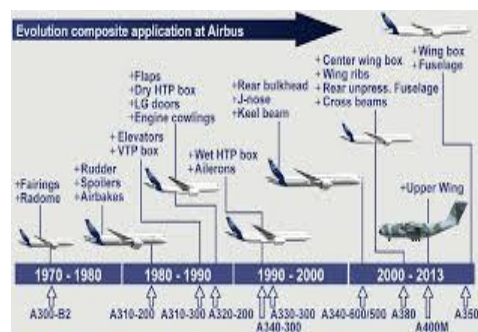
Η εποχή μας χαρακτηρίζεται από τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας νέων υλικών και το υλικό του μέλλοντος για την αεροναυπηγική θα είναι το "σύνθετο υλικό". Τα σύνθετα υλικά από τη μεταπολεμική, κιόλας, περίοδο έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική.

Το ενδιαφέρον των κατασκευαστών αεροσκαφών για τα σύνθετα υλικά εστιάζεται στα σημεία:

- Ο συνδυασμός της μικρής πυκνότητας και των καλών μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων που επιτρέπει το σχεδιασμό ελαφρύτερων κατασκευών.
- Αύξηση του ωφέλιμου φορτίου είτε μείωση του κόστους λειτουργίας για τη μεταφορά του ίδιου ωφέλιμου φορτίου.
- Η μορφοποίηση του τελικού τεμαχίου γίνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της "πρώτης ύλης", γεγονός που προσδίδει ευελιξία στο σχεδιασμό προϊόντων.



Εικόνα 19: Εφαρμογή στην Αεροναυπηγική



Εικόνα 20: Εξέλιξη Αεροναυπηγικής

✚ Ναυπηγική:

Τα παραδοσιακά υλικά, και ιδιαίτερα το ξύλο, έχουν σχεδόν πλήρως αντικατασταθεί από σύνθετα υλικά με πολυμερή μήτρα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, η χρήση των οποίων επέτρεψε σε μικρές βιομηχανίες την κατασκευή σκαφών αναψυχής με χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και παραγωγή ολόσωμων τμημάτων με χύτευση σε καλούπια αλλά και την επισκευή τους με χαμηλό κόστος.



Εικόνα 21 & 22: Εφαρμογή στην Ναυπηγική

✚ Παραγωγή αντιδιαβρωτικών:

Τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα βρίσκουν εφαρμογή στη γεωργία και στη βιομηχανία κατασκευής δεξαμενών και σωλήνων, λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού. Με χρήση σύνθετων υλικών γίνεται η κατασκευή εγκαταστάσεων παραγωγής χημικών ουσιών, δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, δεξαμενών νερού και κρασιού αλλά και σωλήνες για τη μεταφορά νερού και αποχετευτικών

λυμάτων. Τόσο το χαμηλό ειδικό βάρος όσο και η ευκολία μεταφοράς ελαχιστοποιούν το κόστος και διευκολύνουν τις οδεύσεις σε μεγάλες αποστάσεις και δύσβατες τοποθεσίες.

Βιομηχανία αθλητικών ειδών:

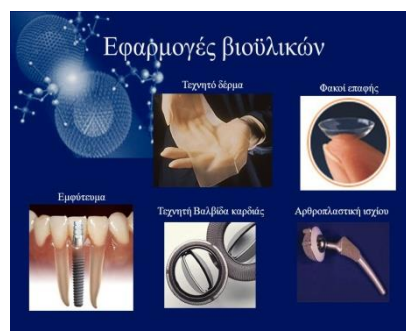
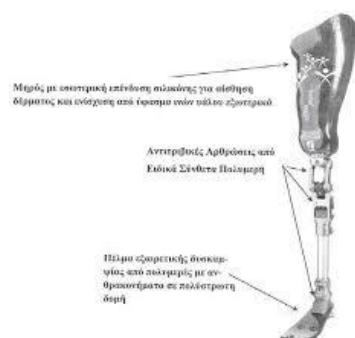
Με τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών σε διάφορους κλάδους αποκτήθηκε εμπειρία και γνώση που χρησιμοποίησε και η βιομηχανία αθλητικών ειδών. Η χρήση σύνθετων υλικών τύπου sandwich επεκτάθηκε στην κατασκευή πέδων σκι, στα μπαστούνια του golf, σε ρακέτες του τένις, σε καλάμια ψαρέματος, σε σκελετούς ποδηλάτων,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



Εικόνα 23: Εφαρμογή Σύνθετων Υλικών στη Βιομηχανία Αθλητικών Ειδών

Ιατρική:

Η ανάπτυξη της επιστήμης στα πολυμερή και στα σύνθετα υλικά βοήθησε και στην ανάπτυξη νέων βιοϋλικών και συνεπώς στην ανάπτυξη της ιατρικής και της οδοντιατρικής. Τεχνητή καρδιά, τεχνητές βαλβίδες, τεχνητό δέρμα, τεχνητά μέλη σώματος, αλλά και νέες κονίες, όπως οι υαλοϊνομερείς και εφαρμογή σύνθετων υλικών στη νέα τεχνολογία των εμφυτευμάτων αποτελούν επανάσταση στις επιστήμες αυτές.

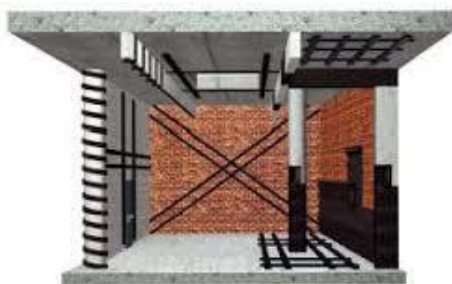


Εικόνα 24 & 25: Εφαρμογή Σύνθετων Υλικών στην Ιατρική

Κατασκευή τεχνικών έργων:

Η χρήση των πολυμερών και των σύνθετων υλικών με μήτρα πολυμερή στην κατασκευή των τεχνικών έργων σε επεμβάσεις ενίσχυσης κατασκευών, αποτελούν σήμερα μια αποτελεσματική μέθοδο που προστέθηκε στην φαρέτρα του μηχανικού για την αντιμετώπιση πάσης φύσεως κατασκευαστικών ατελειών και βλαβών. Αποδεικνύεται η εξελικτική πορεία της τεχνολογίας που προχωρά με ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή τους και έχει επιδείξει πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη και διάδοση. Τα σύνθετα υλικά, αρχικά εφαρμόστηκαν για την ενίσχυση γεφυρών στις Η.Π.Α. και ακολούθως για την ενίσχυση κτιριακών κατασκευών. Σήμερα, τα σύνθετα υλικά έχουν εκτενώς εφαρμοστεί στις ενισχύσεις πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο σε κράτη της Αμερικής, της Ασίας και της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένης και της χώρας μας. Η χρήση των σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως η φυσική εξέλιξη των ενισχύσεων με μεταλλικά ελάσματα. Ενώ παλιότερα χρησιμοποιούσαν ίνες χάλυβα, σήμερα χρησιμοποιούν ίνες πολυμερών. Οι επεμβάσεις ενίσχυσης με σύνθετα υλικά αποτελούν σήμερα δοκιμασμένες εναλλακτικές λύσεις των παραδοσιακών μεθόδων έγχυτου σκυροδέματος, εκτοξευμένου σκυροδέματος, μεταλλικών ελασμάτων και μεταλλικών κλωβών.

Η χρήση των σύνθετων υλικών στην επισκευή και ενίσχυση των κατασκευών αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο με πολλές προοπτικές. Η τεχνολογία αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς, παρέχοντας ολοένα και πιο βελτιωμένες μεθόδους αντιμετώπισης προβλημάτων σε οποιοσδήποτε τομέα.



Εικόνα 26 & 27: Εφαρμογή Σύνθετων Υλικών στην Κατασκευή Τεχνικών Έργων



Εικόνα 28: Εφαρμογή Σύνθετων Υλικών στην Κατασκευή Τεχνικών Έργων

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγή

Έχοντας ήδη αναφέρει επιγραμματικά τις αστοχίες που μπορεί να υπάρξουν στα σύνθετα υλικά, στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε τόσο οι αστοχίες που συναντάμε όσο και τις αιτίες που τις προκαλούν.

Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών, είναι πολλές και σε διάφορους τομείς. Αναλόγως το πως εκμεταλλευόμαστε ένα σύνθετο υλικό για τα πλεονεκτήματά του, έχουμε και τις ιδιαίτερες αστοχίες του. Παραδείγματος χάριν, αν μελετάμε για προϊόντα που βρίσκουν εφαρμογή στο ναυτιλιακό περιβάλλον, τότε μεταξύ άλλων τα προβλήματα από τη διάβρωση είναι αναπόφευκτα. Ενώ, αν μιλάμε για αστοχίες σε δομικό περιβάλλον τότε, οι αστοχίες οφείλονται κυρίως σε λάθη των μηχανολογικού χαρακτήρα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μέτρα πριν και κατά τη διάρκεια εφαρμογής τους.

Γενικά, αστοχίες στα ενισχυτικά υλικά ανεξαρτήτως εφαρμογής τους, υπάρχουν και οφείλονται στις τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των προϊόντων και εκφράζονται με διαφορετικό αποτέλεσμα αναλόγως που ακριβώς είναι η περίσσεια των τάσεων. [20, 21]

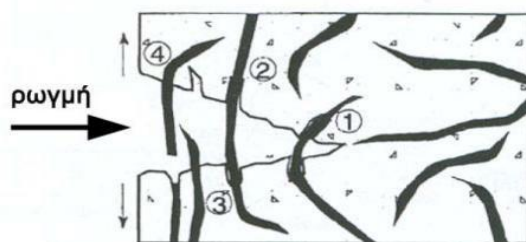
2.2 Είδη αστοχίας υλικού

Γενικά στα σύνθετα υλικά, είναι πιθανόν να εμφανιστούν οι εξής αστοχίες ανεξαρτήτως για ποιά χρήση προορίζονται λόγω της φύσης τους.

- Σπάσιμο των ινών
- Αποκόλληση (δηλαδή διαχωρισμός των ινών και της μήτρας)
- Μικρορωγμές στη πολυμερή μήτρα
- Αποφλοίωση πολυστρωματικών υλικών

Σπάσιμο των ινών:

Αρχικά, στην παρουσία αστοχίας, οι ίνες μπροστά στην ρωγμή είναι ανέπαφες. Εάν καταπονηθούν σημαντικά κοντά στην άκρη της ρωγμής οι ίνες θα σπάσουν όμως. Αμέσως πίσω από τη ρωγμή οι ίνες θα βγουν έξω από τη μήτρα και ακόμα η πίεση κοντά στην άκρη της ρωγμής μπορεί να ωθήσει τις ίνες και να ξεκολλήσουν από τη μήτρα πριν σπάσουν.



Εικόνα 29: Τρόποι Αστοχίας Ίνας

Στην Εικόνα 29, παρουσιάζεται αστοχία σε τεμάχιο με ενισχυτικές ίνες και πως οι ίνες μπορούν να επηρεαστούν ποικιλοτρόπως.

Η ίνα 1 βρίσκεται στην άκρη ρωγμής και αν δεν επέλθει αποκόλληση της από την μήτρα τότε η τάση θα μεταφέρεται στις ίνες μέχρι να αστοχήσουν, φαινόμενο που απεικονίζει η ίνα 2 αλλά και η 4 που έχει σπάσει. Εάν έχουμε τελικώς αποκόλληση ίνας από την μήτρα, τότε η ενέργεια παραμόρφωσης και λόγω τριβής μεταφράζεται ως θερμότητα και απεικονίζεται με την ίνα με αριθμό 3.

Μικρορωγμάτωση πολυμερούς μήτρας:

Οι μικρορωγμές της μήτρας είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο το οποίο υποβαθμίζει τις θερμομηχανικές ιδιότητες του υλικού συμπεριλαμβανομένου και των αλλαγών που υφίσταται σε όλες τις παραμέτρους του. Μια ακόμα αρνητική επίπτωση των μικρορωγμών είναι η θραύση των ινών οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν οδούς για την είσοδο των διαβρωτικών υγρών μέσα στο υλικό.

Αποφλοίωση πολυστρωματικών υλικών:

Η αποφλοίωση πολυστρωματικών υλικών βρίσκεται στην κορυφή των χειρότερων καταστάσεων για ένα σύνθετο υλικό γιατί μπορεί να υποβαθμίσει κατά πολύ τις ιδιότητες του ώστε να το καταστήσει χωρίς καμία χρησιμότητα για τις εφαρμογές που προορίζεται. Ο διεπιφανειακός διαχωρισμός που προκαλείται από την αποκόλληση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρο λυγισμό, κραδασμούς, διείσδυση της υγρασίας, δυσκαμψία.

Αποκόλληση:

Η αποκόλληση οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια υποστρώματος και οφείλεται κυρίως στη μικρή διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι τάσεις αυτές δεν μπορούν να μεταβιβαστούν από το ένα υλικό στο άλλο με αποτέλεσμα την αστοχία του δομικού στοιχείου. Η αστοχία αυτή είναι ψαθυρής μορφής. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτύξει το σύνθετο υλικό εξαρτάται από το μήκος αγκύρωσης και τη μέση διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι μεταξύ δύο στρώσεων σύνθετου υλικού ή μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Στην πρώτη περίπτωση, η αντοχή της διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της ρητίνης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να μεταβιβασθεί ανά μονάδα διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της εξισωτικής στρώσης με το δομικό στοιχείο.

Σ' αυτό το σημείο καλό θα ήταν να αναφέρουμε και μια υποκατηγορία αστοχίας που καλείται:

Αποκάλυψη-εκρίζωση ινών από μήτρα και αμβάνει χώρα όταν ψαθυρές ή ασυνεχείς ίνες εμποτίζονται σε δύσκαμπτη μήτρα. Οι ίνες θραύονται κατά τις αδύνατες τους διατομές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να συμπίπτουν με το επίπεδο θραύσης του σύνθετου υλικού. Λόγω της θραύσης των ινών εμφανίζεται μία συγκέντρωση τάσεων στη μήτρα η οποία τελικά ανακουφίζεται από την διαρροή του υλικού της μήτρας με αποτέλεσμα την αποφυγή ρυγμάτωσης της. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται και η θραύση των ινών σε εκείνο το σημείο μόνο.

Η διαφορά σε σχέση με την αποκόλληση των ινών έγκειται στο εξής: Στην πρώτη περίπτωση η αποκόλληση δημιουργείται όταν μια ρωγμή που διαδίδεται στην μήτρα

εμποδίζεται να διαδοθεί εγκάρσια προς την ίνα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η αποκόλληση υφίσταται όταν μία ρωγμή που ξεκινάει από τη θραύση της ίνας αδυνατεί να διαδοθεί μέσω μιας δύσκαμπτης μήτρας. Επιπρόσθετα στην δεύτερη περίπτωση το φαινόμενο συνοδεύεται από εκτεταμένη παραμόρφωση της μήτρας κάτι που δεν εμφανίζεται στην πρώτη.



Εικόνα 30: Ρηγμάτωση σε Υλικών Κατασκευών

2.3 Αιτίες αστοχίας υλικού

Κάθε σύνθετο υλικό, σύμφωνα με το λόγο για τον οποίο κατασκευάστηκε, μπορεί να επηρεαστεί και από ειδικές καταπονήσεις από το ιδιαίτερο περιβάλλον χρήσης του πέραν από τις κλασσικές αστοχίες από τις οποίες καταπονείται, όπως θαλάσσιο περιβάλλον- διάβρωση. Αυτό προβλέπει την εξέταση κάθε περίπτωση ξεχωριστά και εις βάθος.

Υπάρχουν όμως και οι αιτίες αυτές που είναι υπεύθυνες για τις πιο συνηθισμένες αστοχίες.

Η κύρια αιτία που οδηγεί σε αστοχία ένα υλικό εκτός από τη φθορά και τη διάβρωση είναι η παραμόρφωση με την οποία μεταβάλλεται το σχήμα ενός υλικού και αφορά κυρίως τις μηχανικές αστοχίες. Σαν αποτέλεσμα, τα υλικά αυτά όταν βρεθούν κάτω από κρίσιμο συνδυασμό εντατικών καταστάσεων, εγείρεται η διάρρηξη του δεσμού πρόσφυσης και κατά συνέπεια να αποτελούν εστίες εκκίνησης ρωγμών.

Δύο βασικοί παράγοντες που προκαλούν την υπολειτουργία των ενισχύσεων από ινοπλισμένα πολυμερή είναι το φαινόμενο της αποκόλλησής τους και της ανεπαρκούς αγκύρωσης. Τα δύο αυτά φαινόμενα συναντώνται πολύ συχνά και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και καλή γνώση των θεμάτων γύρω από τη συνεργασία υποβάθρου και ινοπλισμένου πολυμερούς για την αποφυγή τους.

Επίσης υπάρχουν και τα μεγέθη αυτά που είναι υπεύθυνα για τη διάδοση μιας ρωγμής μέσα στο σύνθετο υλικό και είναι η ενέργεια θραύσης καθώς και ο συντελεστής έντασης τάσεων. Σημαντική σημείωση είναι πως τα μεγέθη αυτά δεν είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία των ρωγμών παρά μόνο για την διάδοσή τους.

2.4 Φορτίσεις αστοχιών

Η ανάγκη για την εύρεση της ακριβούς διανομής των τάσεων γύρω από τα άκρα μιας ρωγμής και του τρόπου διαδόσεώς της ήταν η αιτία της δημιουργίας της επιστήμης της «Μηχανικής των θραύσεων». Η θεωρητική ανάπτυξη της

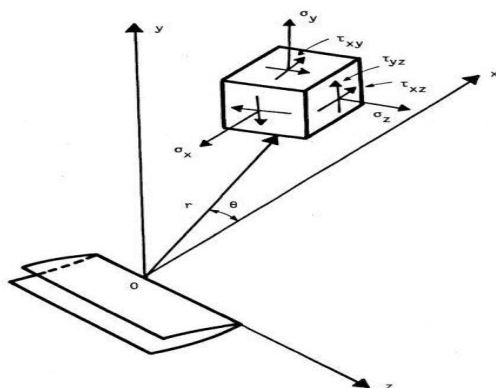
Θραυστομηχανικής, βασίστηκε πάνω στη γραμμική ελαστικότητα των απειροστών παραμορφώσεων, η οποία επιβεβαιώνεται και από τις πειραματικές μετρήσεις.

Ως ρωγμή μπορούμε να ορίσουμε γενικά την τοπική λύση της συνέχειας ενός στερεού σώματος, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν μία κοιλότητα εντός του σώματος όπου η απόσταση των απέναντι παρειών είναι μικρή σχετικά με το μήκος της.

Υπάρχουν δύο βασικά θεωρητικά υποδείγματα περιγραφής της ρωγμής στο επίπεδο. Το πρώτο θεωρεί τη ρωγμή ως το όριο μιας ελλειπτικής οπής της οποίας ο μικρός ημιάξονας τείνει προς το μηδέν. Το δεύτερο το οποίο και υιοθετούμε στην παρούσα εργασία για τη μοντελοποίηση της ύπαρξης της ρωγμής στο υλικό, θεωρεί αυτήν ως φυσική ασυνέχεια, δηλαδή μια μαθηματική γραμμή χωρίς πάχος, ή αμεληταίο πάχος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες υφιστάμενες διαστάσεις.

Οι τάσεις στα άκρα των ρωγμών είναι πεπερασμένες και για την εφικτή επίλυση των προβλημάτων των ρωγμών θεωρούνται μοριακές δυνάμεις συνάφειας παρά τα άκρα της ρωγμής.

Στα προβλήματα επιπέδων ρωγμών ως σύστημα αξόνων χρησιμοποιείται το καρτεσιανό σύστημα αξόνων με την αρχή O τοποθετημένη στο σημείο κορυφής της ρωγμής στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, ενώ το επίπεδο Oxz ταυτίζεται με το επίπεδο της ρωγμής. [2, 19]



Εικόνα 31: Αστοχία Ρωγμής Στο Καρτεσιανό Σύστημα Αξόνων

Πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τη μελέτη των φαινομένων της θραύσεως. Αναπτύχθηκαν θεωρητικές προσεγγίσεις για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων, αλλά και πειραματικές μέθοδοι οι οποίες σε συνδυασμό με τα διάφορα θεωρητικά πρότυπα αντιμετωπίζουν τα σχετικά προβλήματα.

Οι πρώτες θεωρίες αντοχής των υλικών βασιζόντουσαν στο κριτήριο της μέγιστης τάσεως του Irwin (George Rankin Irwin). Όμως το φαινόμενο κλίμακας, που παίζει σημαντικό ρόλο στη θραύση, ήταν γνωστό πριν από την εισαγωγή της έννοιας της τάσεως.

Ο Irwin επέλυσε πολλά διδιάστατα προβλήματα ρωγμών σε γραμμική ελαστικότητα και μια από τις μεγαλύτερες συνεισφορές του στη Θραυστομηχανική, ήταν ότι κατέδειξε τον καθολικό χαρακτήρα των ασυμπτωτικών πεδίων των τάσεων και των μετατοπίσεων στην γειτονιά της αιχμής της ρωγμής σε ένα γραμμικό ελαστικό στερεό.

Ο Irwin μελετώντας το τασικό πεδίο στην αιχμή μιας ρωγμής παρατήρησε ότι υπάρχουν τρεις ανεξάρτητοι τύποι παραμόρφωσης ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης φορτίσεως, ενώ οποιαδήποτε άλλη μορφή παραμορφώσεως μπορεί

να θεωρηθεί ότι προκύπτει από το συνδυασμό των τριών αυτών τύπων και έχουν ως εξής:

✚ Επίπεδος εφελκυστικός τύπος I (opening mode - mode I):

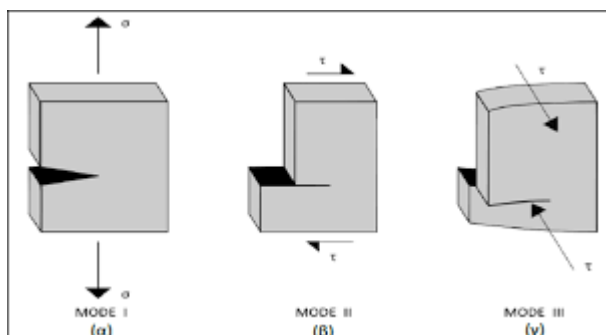
Αντιστοιχεί σε μονοαξονικό εφελκυσμό κάθετο στο μεγάλο άξονα της ρωγμής.

✚ Συνεπίπεδος διατμητικός τύπος II (sliding mode – mode II):

Αντιστοιχεί σε διάτμηση κατά μήκος του μεγάλου άξονα της ρωγμής και προκύπτει όταν οι παρειές της ρωγμής τείνουν να ολισθήσουν το ένα σχετικά με το άλλο προς αντίθετες κατευθύνσεις.

✚ Εγκάρσιος διατμητικός τύπος III (tearing mode - mode III):

Αντιστοιχεί στην εγκάρσια διάτμηση και προκύπτει όταν οι παρειές της ρωγμής διαχωρίζονται προς αντίθετες κατευθύνσεις εξαιτίας της επιδράσεως ίσων και αντίθετων δυνάμεων που είναι κάθετες στο επίπεδο του σώματος.



Εικόνα 32: Είδη Παραμόρφωσης Ρωγμής

Αυτοί οι τρόποι παραμόρφωσης, όπως φάνηκε και στα παραπάνω σχήματα χαρακτηρίζονται από αμοιβαίες μετακινήσεις των επιφανειών ρωγμής, που αναφέρονται σαν άνοιγμα (I), όταν οι επιφάνειες της ρωγμής απομακρύνονται, ολίσθηση ή διάτμηση (II), όταν οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν κατά τον άξονά της και ψαλιδισμός (III), όταν οι επιφάνειες τείνουν να μετατοπιστούν κάθετα προς τον άξονα της ρωγμής.

Ανάλογα με τον τύπο, το εντατικό πεδίο που δημιουργείται στην αιχμή της ρωγμής είναι:

- [mode - I] : συμμετρικό ως προς το επίπεδο Oxz.
- [mode - II] : πλάγια συμμετρικό ως προς το επίπεδο Oxz.
- [mode - III] : αντισυμμετρικό ως προς το ίδιο επίπεδο.

Οι τασικές συναρτήσεις για κάθε είδος φόρτισης, δίδονται από τις πιο κάτω:

✚ Για mode-I:

Οι παρειές της ρωγμής τείνουν να διαχωριστούν συμμετρικά ως προς το επίπεδο της ρωγμής παραμόρφωσης:

$$Z_I = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\zeta}}$$

Οι τάσεις σε πολικές συντεταγμένες, δίδονται:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$$

✚ Για mode-II:

Οι παρειές της ρωγμής τείνουν να ολισθήσουν, η μία σχετικά προς την άλλη, προς αντίθετες κατευθύνσεις αλλά εντός του ιδίου επιπέδου και η τασική συνάρτηση δίνεται από την σχέση:

$$Z_{II} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\zeta}}, \text{ με } K_{II} = \tau \sqrt{\pi a}$$

Οι τάσεις σε πολικές συντεταγμένες, δίδονται:

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0, \quad \text{με } 0 < \frac{r}{a} \ll 1$$

🚦 Για mode-III:

Οι παρειές της ρωγμής τείνουν να διαχωριστούν προς αντίθετες εγκάρσιες κατευθύνσεις υπό την επίδραση ίσων και αντίθετων δυνάμεων, κάθετων προς το επίπεδο του σώματος και η τασική συνάρτηση δίνεται από την σχέση:

$$Z_{III} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi\zeta}}$$

Οι τάσεις σε πολικές συντεταγμένες, δίδονται:

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

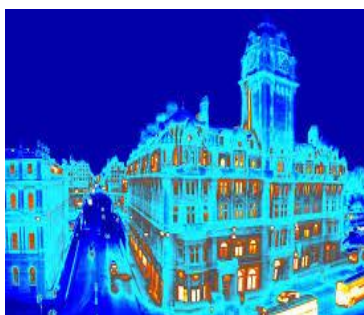
2.5 Αναφορά στις μεθόδους ανίχνευσης αστοχιών υλικού

Για ανίχνευση και πρόληψη των αστοχιών στα σύνθετα υλικά καθώς και για τυχόν επιδιόρθωση αυτών, μπορούμε να εφαρμόσουμε ελέγχους εντοπισμού. Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) ονομάζεται ο έλεγχος για ανίχνευση αστοχιών που δεν επιφέρει αλλοιώσεις στο εξεταζόμενο αντικείμενο και αυτό προτιμάται. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής που πλέον έχουν και περίπλοκα σχήματα και τεχνολογίες καθώς και για την διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς και των αρχαιοτήτων αφού δεν απαιτείται τεμαχισμός ή καταστροφή του αρχικού τεμαχίου.

Με τη συνδυασμένη χρήση των μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου και της Μηχανικής των Θραύσεων, μπορούμε να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την καλή κατάσταση λειτουργίας μιας κατασκευής και για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής της. Ο ΜΚΕ όμως δεν περιορίζεται στην ανίχνευση ρωγμών, αλλά σε ένα ευρύτερα αναπτυσσόμενο πεδίο που ασχολείται με τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, όπως της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τη μοριακή δομή, αλλά και με τα χαρακτηριστικά μικροδομής, όπως η σκληρότητα ή ο βαθμός πολυμερισμού ρητίνης κα.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τους απλούς καθημερινούς τρόπους ελέγχου. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο οπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.

Στον ΜΚΕ ανήκουν πολλές κατηγορίες ελέγχου για την καλύτερη εφαρμογή αναλόγως του προβλήματος που αντιμετωπίζεται.



Εικόνα 33 & 34 & 35: Απεικόνιση Τρόπου Ανίχνευσης Αστοχίας Με Χρήση ΜΚΕ

Κεφάλαιο 3

3.1 Μη Καταστροφικός Έλεγχος

3.1.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο επιγραμματικά, Μη Καταστροφικός Έλεγχος, ονομάζεται ο έλεγχος που δεν επιφέρει αλλοιώσεις στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος κατασκευής.

Χρησιμοποιούνται για να διαπιστώνεται η ύπαρξη και το μέγεθος των ατελειών σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να καταστρέφεται, ούτε να επηρεάζεται η λειτουργικότητά της. Ο σκοπός των μεθόδων του ΜΚΕ είναι να προβλέπεται η επέκταση τυχόν ρωγμών και να υπολογίζεται ο κίνδυνος αστοχίας του υλικού και της κατασκευής, χωρίς όμως να περιορίζεται στην ανίχνευση ρωγμών, αλλά να έχει εφαρμογή σε ένα ευρύτερα αναπτυσσόμενο πεδίο που ασχολείται με τις ιδιότητες των υλικών, όπως της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αλλά και με τα χαρακτηριστικά μικροδομής.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τους απλούς καθημερινούς τρόπους ελέγχου. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και ο οπλισμός τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.



Εικόνα 36: Εξέταση Τεμαχίου με ΜΚΕ

3.1.2 Ιστορική πορεία Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Οι μέθοδοι ΜΚΕ αναπτύχθηκαν τα τελευταία 100 χρόνια και μερικά από τα πιο αξιοσημείωτα γεγονότα που άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξή τους ήταν:

- 1854: Δυστύχημα από αστοχία πιεστικού δοχείου με 21 θύματα και 50 τραυματίες στο Hartford του Connecticut. 10 χρόνια μετά ψηφίζεται νόμος για υποχρεωτικούς ετήσιους ελέγχους.
- 1895: Ο Wilhelm Conrad Röntgen ανακαλύπτει τις γνωστές πλέον Ακτίνες-X και στην ανακοίνωσή του αναφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού ελαττωμάτων.
- 1880 – 1920: Εφαρμόζεται ο πρόδρομος της μεθόδου ελέγχου με Διεισδυτικό Υγρό με τη χρήση λαδιού και λευκού χρώματος (το εξάρτημα βυθίζεται σε λεπτόρρευστο λάδι και μετά βάφεται με λευκό χρώμα το οποίο μετατρέπεται σε καφέ όταν το λάδι που παράμεινε σε τυχόν ρωγμές βγαίνει προς τα έξω).
- 1920: Ο Δρ. H. H. Lester αναπτύσσει τη βιομηχανική Ραδιογραφία των μετάλλων.
- 1926: Διατίθεται το πρώτο όργανο Ρευμάτων Eddy που μετρά το πάχος υλικού.
- 1927 – 1928: Το πρώτο σύστημα Μαγνητικής Επαγωγής εφαρμόζεται σε σιδηροδρομικές γραμμές.
- 1940 – 1944: Αναπτύσσεται η μέθοδος Υπερήχων από τον Δρ. Floyd Firestone.
- 1950: Ο J. Kaiser εισάγει την μέθοδο ΜΚΕ των Ακουστικών Εκπομπών.

3.1.3 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Μερικές από τις πιο σημαντικές μεθόδους ΜΚΕ που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι οι:

- Οπτικός έλεγχος
- Διεισδυτικά υγρά
- Δινορευματα
- Μαγνητικά σωματίδια
- **Ραδιογραφία με ακτίνες**
- **Υπέρηχοι**

Για τις πρώτες μεθόδους ΜΚΕ θα γίνει μια απλή περιγραφή για το τρόπο που εφαρμόζονται και για τις υπολοίπες μια πιο εκτενής αναφορά ως πιο διαδεδομένες και με λιγότερους περιορισμούς όσον αφορά την εφαρμογή τους.

Οπτικός Έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος βασίζεται στον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών οι οποίες είναι ορατές με το μάτι. Για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας του πολλές φορές εφαρμόζεται με την χρήση οργάνων όπως μεγεθυντικοί φακοί, ενδοσκόπια και μικροσκόπια. Επειδή η αξιολόγηση στον οπτικό έλεγχο βασίζεται στην όραση θεωρείται η αρχική και η πιο παλιά μέθοδος ΜΚΕ. Επίσης η απλότητα της μεθόδου και η μη απαίτηση για εξειδικευμένα όργανα την καθιστούν μια πολύ φθηνή μέθοδο και της προσδίδουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων μεθόδων ΜΚΕ. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα συνεχούς επιθεώρησης της κατασκευής σε όλα τα στάδια κατασκευής ή λειτουργίας. Ο σημαντικότερος

περιορισμός είναι ότι με την μέθοδο αυτή μπορούμε να αξιολογήσουμε επιφανειακές ασυνεχείς οι οποίες είναι ορατές με το μάτι.



Εικόνα 37: Εξέταση Τεμαχίου με την Οπτική Μέθοδο

Πλεονεκτήματα

- Αρχική μέθοδος επιθεώρησης
- Συνεχής επιθεώρηση
- Η πιο οικονομική μέθοδος επιθεώρησης
- Εφαρμόσιμη σε όλα τα στάδια κατασκευής ή λειτουργίας

Μειονεκτήματα

- Περιορίζεται σε επιφανειακές ασυνέχειες
- Απαιτεί καλή όραση
- Απαιτεί καλό φωτισμό
- Απαιτεί προσωπικό με μεγάλη εμπειρία και ικανότητα για να μπορέσει να αναγνωρίσει τι είναι αυτό που ψάχνει κατά την διάρκεια της επιθεώρησης

Διεισδυτικά Υγρά

Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών βασίζεται στην τριχοειδής δράση των υγρών και εφαρμόζεται για τον εντοπισμό ρωγμών, πορώδους υφής και άλλων ατελειών που δημιουργούν ανοίγματα στην επιφάνεια του υλικού και έχουν αρκετά μεγάλο όγκο για να παγιδεύσουν και να κρατήσουν το διεισδυτικό υγρό. Το διεισδυτικό υγρό εφαρμόζεται στην κατάλληλα προετοιμασμένη επιφάνεια του υλικού και αφήνεται για κάποιο προκαθορισμένο διάστημα ώστε να διεισδύσει σε οποιοδήποτε άνοιγμα της επιφάνειας λόγω της τριχοειδής δράσης. Αφαιρείται προσεκτικά το επιπλέον υγρό και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας κάποια σκόνη αναστρέφεται η τριχοειδής δράση και το υγρό εξέρχεται από τα ανοίγματα στην επιφάνεια όπου είναι πλέον ορατό και καταδεικνύει τις περιοχές που εμφανίζουν ατέλειες. Τις περισσότερες φορές, το διεισδυτικό υγρό είναι εμπλουτισμένο με χρωστικές ουσίες και το τελικό στάδιο της οπτικής επιθεώρησης γίνεται κάτω από υπεριώδες φωτισμό.



Εικόνα 38: Εντοπισμός Αστοχίας με τη Χρήση Διεσδυτικού Υγρού

Πλεονεκτήματα

- Δυνατότητα επιθεώρησης μεγάλων επιφανειών κατασκευών και υλικών πολύ γρήγορα και με μικρό κόστος
- Μέρη με πολύπλοκη γεωμετρία μπορούν εύκολα να επιθεωρηθούν
- Οι ενδείξεις εμφανίζονται στην επιφάνεια του κομματιού και προσφέρουν εικόνα των ασυνεχειών
- Η επένδυση σε εξοπλισμό είναι η ελάχιστη

Μειονεκτήματα

- Περιορίζεται σε επιφανειακές ασυνέχειες
- Η προετοιμασία της επιφάνειας είναι κριτικής σημασίας αφού μολυσματικές ουσίες μπορούν να καλύψουν τις ατέλειες
- Απαιτεί ομαλή και μη πορώδη επιφάνεια
- Απαιτεί πολλαπλές διαδικασίες κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες
- Είναι απαραίτητος μετά τον έλεγχο ο καθαρισμός της επιφάνειας από τα χημικά
- Είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα χημικής προστασίας

Δινορεύματα

Η μέθοδος βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ρωγμών και ατελειών σε αγωγίμα υλικά (μέταλλα). Επίσης χρησιμοποιείται για την κατάταξη των υλικών σε σχέση με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα και την μαγνητική διαπερατότητα ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του πάχους φύλλων μετάλλων και μη αγωγίμων επιστρώσεων (βαφή) .

Το εναλλασσόμενο ρεύμα που διέρχεται από τις σπείρες του πηνίου δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Όταν το πηνίο τοποθετηθεί κοντά στο υπό εξέταση αγωγίμο υλικό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ρεύμα στην επιφάνεια του δοκιμίου - επαγωγικά ρεύματα Foucault. Αυτά τα ρεύματα ταξιδεύουν σε κλειστό βρόγχο και ονομάζονται δινορεύματα. Τα δινορεύματα παράγουν το δικό τους μαγνητικό το οποίο μπορεί να μετρηθεί και να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ατελειών καθώς και για τον χαρακτηρισμό της αγωγιμότητας, της διαπερατότητας και των διαστάσεων.



Εικόνα 39: Απεικόνιση Μεθόδου Δινορευμάτων

Πλεονεκτήματα

- Μπορούν να ανιχνευθούν επιφανειακές και κοντά στην επιφάνεια ατέλειες
- Δεν απαιτεί την επαφή των αισθητήρων με την υπό εξέταση κατασκευή
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραπάνω από μια ατέλεια – ρωγμή
- Απαιτεί ελάχιστη προετοιμασία της κατασκευής

Μειονεκτήματα

- Μπορούν να επιθεωρηθούν μόνο μαγνητικά υλικά
- Τα φερρομαγνητικά υλικά απαιτούν ειδική προετοιμασία
- Το βάθος της διεισδυτικότητας της μεθόδου είναι περιορισμένο
- Ατέλειες με προσανατολισμό παράλληλο με τον τύλιγμα του πηνίου μπορεί να μην ανιχνευθούν
- Απαιτεί μεγαλύτερη εκπαίδευση και επιδεξιότητες από το προσωπικό σε σχέση με άλλες τεχνικές
- Η επιφανειακή τραχύτητα και τα φινιρίσματα των επιφανειών μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της μεθόδου

Μαγνητικά σωματίδια

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση φερρομαγνητικών υλικών, όπως σιδηρούχα κράματα, για ατέλειες που έχουν επίδραση στην μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Η μαγνητική επιθεώρηση σωματιδίων μπορεί να εντοπίσει ατέλειες στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια της υπό εξέτασης κατασκευής. Οι μαγνητικές γραμμές της δύναμης ταξιδεύουν μέσα από το υλικό και εξέρχονται και εισέρχονται στους πόλους. Ατέλειες όπως ρωγμές και κενά δεν μπορούν να υποστηρίξουν το μέγεθος αυτής ροής και οδηγούν κάποιο ποσό ροής έξω από το σώμα. Τα μαγνητικά σωματίδια που κατανέμονται στο σώμα θα συγκεντρωθούν σε περιοχές της διαρρέουσας μαγνητικής ροής και θα προκύψει οπτική ένδειξη.



Εικόνα 40: Εντοπισμός Αστοχίας με τη Μέθοδο των Μαγνητικών Σωματιδίων

Πλεονεκτήματα

- Μεγάλες επιφάνειες πολύπλοκων κατασκευών μπορούν να εξετασθούν πολύ γρήγορα
- Μπορούν να ανιχνευθούν επιφανειακές και υπό- επιφανειακές ατέλειες
- Η προετοιμασία της επιφάνειας είναι λιγότερο σημαντική από ότι στην επιθεώρηση με διεισδυτικά υγρά
- Οι ενδείξεις των μαγνητικών σωματιδίων παράγονται απευθείας στην επιφάνεια και δημιουργούν μια εικόνα των ασυνεχειών
- Το κόστος του εξοπλισμού είναι σχετικά μικρό

Μειονεκτήματα

- Μπορούν να επιθεωρηθούν μόνο φερρομαγνητικά υλικά
- Ο κατάλληλος προσανατολισμός μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την ατέλεια είναι κριτικής σημασίας
- Υψηλά ρεύματα χρειάζονται για μεγάλες κατασκευές
- Απαιτεί σχετικά ομαλή επιφάνεια
- Η βαφή ή άλλες μη μαγνητικές επικαλύψεις επηρεάζουν την ευαισθησία της μεθόδου
- Συνήθως απαιτείται απομαγνητισμός και εν συνεχεία καθαρισμός

Οι επόμενες μέθοδοι θα αναλυθούν λεπτομερώς, όντας πιο διαδεδομένες και με σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων, κυρίως τη διεισδυτικότητα για εντοπισμό αστοχίας.

Ραδιογραφία με ακτίνες [22]

1. Στον τομέα των μη καταστροφικών ελέγχων η ραδιογραφία είναι μία από τις πιο σημαντικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους, η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής διεισδυτικότητας. Η μέθοδος βασίζεται στην ικανότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βραχέος μήκους κύματος (φωτόνια υψηλής ενέργειας) να διαπερνά σε διαφορετικό βαθμό τα υλικά. Η ποσότητα της εξερχόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το πάχος διείσδυσης και την

πυκνότητα του υλικού. Η ένταση της ακτινοβολίας αποτυπώνεται είτε σε ένα βιομηχανικό φιλμ, η λεγόμενη ραδιογραφία σε φιλμ και το οποίο τοποθετείται πίσω από το δοκίμιο ελέγχου, ή σε μια επίπεδη συστοιχία ευαίσθητων στην ακτινοβολία αισθητήρων και που ονομάζεται ψηφιακή ραδιογραφία ή ραδιογραφία πραγματικού χρόνου. Η ραδιογραφική απεικόνιση, η οποία είναι ανάλογη του βαθμού απορρόφησης της ακτινοβολίας από το υπό έλεγχο δοκίμιο, είναι μια μέθοδος ανίχνευσης ατελειών στο εσωτερικό των υλικών.

Η ραδιογραφία χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η ιατρική, η τεχνολογία, η εγκληματολογία, η ασφάλεια, κ.λπ.

2. Οι ακτίνες X ανακαλύφθηκαν το Νοέμβριο του 1895 από Wilhelm Conrad Roentgen, καθηγητή στο πανεπιστήμιο Wuerzburg στη Γερμανία. Ο Roentgen, ενώ εργαζόταν σε ένα ημι-σκοτεινό εργαστήριο και πειραματιζόταν με ένα σωλήνα κενού (τη λυχνία Crooke), τον οποίο είχε καλύψει με μαύρο φωτογραφικό χαρτί, παρατήρησε φθορισμό σε παρακείμενο πίνακα με επίστρωση κρυστάλλων αλάτων βαρίου με κυανιούχο λευκόχρυσο. Επίσης παρατήρησε ότι όπως μετακινούσε τον πίνακα πλησιέστερα στον καθοδικό σωλήνα, ο φθορισμός είχε ακόμα μεγαλύτερη ένταση, πράγμα που απεδείκνυε ότι κάποια άγνωστη ακτινοβολία πήγαζε από το σωλήνα. Ως αποτέλεσμα αυτής της ανακάλυψης, ο Roentgen άρχισε να πειραματίζεται και να λαμβάνει ακτινογραφίες διαφορετικών υλικών στο εργαστήριό του, συμπεριλαμβανομένης της παλάμης του χεριού της συζύγου του, όπου παρατήρησε τη δομή των οστών ανάμεσα στον ιστό να εμφανίζεται στον πίνακα με επίστρωση κρυστάλλων αλάτων.

Κατά τις πρώτες ημέρες της ανακάλυψης, αναφερόταν στην άγνωστη ακτινοβολία ως «φωςX» ή ως «ακτίνες-Roentgen», όρος που επικρατούσε στις αρχές του 1900, ενώ από το 1902 επικράτησε η ονομασία «ακτίνες X» την οποία έδωσε ο ίδιος Roentgen. Κατά την πρώτη εικοσαετία μετά την ανακάλυψή τους, οι ακτίνες X χρησιμοποιήθηκαν στην ιατρική.

Το 1912, οι Laue, Knipping, και Frederick έκαναν το πρώτο επιτυχημένο πείραμα χρησιμοποιώντας την περίθλαση των ακτίνων X. Αμέσως μετά το πείραμα αυτό, ο W. D. Coolidge της General Electric Co. ανακάλυψε την ομώνυμη λυχνία, η οποία έκανε δυνατή την παραγωγή ακτίνων X με πολύ μεγαλύτερη ένταση και επέτρεπε ομοιόμορφο έλεγχο της ακτινοβολίας.

Στον τομέα του μη καταστροφικού ελέγχου, ο Dr. H. H. Lester άρχισε να πειραματίζεται με διαφορετικά υλικά στις αρχές της δεκαετίας του 1920 στο Watertown Arsenal στο Watertown της Μασαχουσέτης. Ενώ κάποιες εργασίες συνέχισαν, η σημασία των ακτίνων X για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών δεν έγινε πλήρως γνωστή, ούτε η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε ευρέως, μέχρι τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η σημασία της βιομηχανικής ραδιογραφίας αντικατοπτρίζεται στο παλαιότερο όνομα της Αμερικάνικης Εταιρείας Μη Καταστροφικού ελέγχου (American Society for Non Destructive Testing – ASNT) που ιδρύθηκε το 1941 υπό το όνομα Αμερικανική Εταιρεία Βιομηχανικού Ραδίου και ακτίνων X (The American Industrial Radium and X-ray Society). Οι εξελίξεις λόγω του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου οδήγησαν σε σημαντικές καινοτομίες και εφευρέσεις στον ακτινογραφικό εξοπλισμό ώστε να παράγει περισσότερο έντονες δέσμες και υψηλότερες ενέργειες. Αμέσως μετά από την ανακάλυψη των ακτίνων X, ήλθε στο φως μια άλλη μορφή της διεισδύουσας ακτινοβολίας.

Το 1896, ο γαλλικός επιστήμονας Henri Becquerel (1852 – 1908) ανακάλυψε τη φυσική ραδιενέργεια ερευνώντας τις ιδιότητες φθορισμού μεταλλευμάτων ουρανίου. Επίσης, ο Βρετανός επιστήμονας Ernest Rutherford (1871 – 1937), ανέπτυξε τη

θεωρία ότι τα χημικά στοιχεία έχουν ισότοπα και σ' αυτόν οφείλεται η αναγνώριση της ύπαρξης του νετρονίου.

Κατά την διάρκεια της ανακάλυψης Becquerel, η Πολωνή ερευνήτρια Marie Curie και ο Γάλλος σύζυγός της Pierre Curie παρατήρησαν ότι το θόριο έδινε τις ίδιες ακτίνες όπως και το ουράνιο. Επίσης ανακάλυψαν ότι υπήρχαν ορισμένες αντιδράσεις που προερχόταν από υλικά που περιείχαν βισμούθιο και βάριο. Στα τέλη του Ιουνίου 1898, το ζεύγος Curie υποψιάστηκε ότι ένα μέταλλευμα ουράνιου γνωστό ως pitchblende περιέχει και άλλα ραδιενεργά στοιχεία. Την ίδια χρονιά οι Curies ανακάλυψαν ένα άλλο άγνωστο μέχρι τότε ραδιενεργό στοιχείο στο pitchblende, παρόμοιο με το βισμούθιο, που το ονόμασαν «πολώνιο» προς τιμήν της πατρίδας της Marie Curie. Στις πρώιμες εκείνες ημέρες εισήχθη ο όρος «ραδιενέργεια».

Τέλος, στις 26 Δεκεμβρίου 1898, απέδειξαν ότι υπάρχει ένα πολύ ενεργό νέο υλικό που αντιδρούσε και συμπεριφερόταν χημικά σχεδόν σαν το καθαρό βάριο και του έδωσαν το όνομα «ράδιο». Το ράδιο έγινε η αρχική βιομηχανική πηγή ακτινοβολίας γάμμα. Η έρευνα των Curies σηματοδότησε την έναρξη πολλών άλλων εξελίξεων που οδήγησαν τελικά στις ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στη σύγχρονη βιομηχανική ραδιογραφία, όπως το Ιρίδιο 192 και το Κοβάλτιο 60, ραδιοϊσότοπα που παράγουν ακτίνες-γ. Με την ανάπτυξη των πυρηνικών αντιδραστήρων ικανών να παράγουν νετρόνια υψηλής έντασης, η δυνατότητα παραγωγής τεχνητών ραδιοϊσοτόπων έγινε πραγματικότητα.

Για παράδειγμα, το Ιρίδιο 191 και το Κοβάλτιο 59 είναι σταθερά στοιχεία που βρίσκονται στη φύση. Όταν εκτίθενται σε θερμικά νετρόνια, τα σταθερά ισότοπα συλλαμβάνουν ένα θερμικό ή επιβραδυνόμενο νετρόνιο και αποκτούν μεγαλύτερη μάζα. Με την προσθήκη του νετρονίου, το Ιρίδιο 191 γίνεται Ιρίδιο 192 και το Κοβάλτιο 59 γίνεται Κοβάλτιο 60. Και τα δύο τεχνητά παραγόμενα ισότοπα είναι ασταθή και συνεπώς ραδιενεργά.

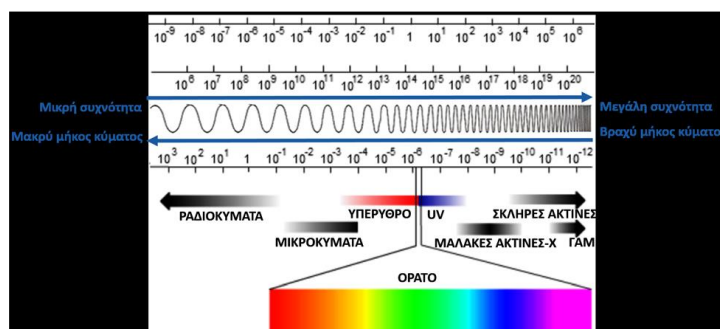
Άλλες σημαντικές εξελίξεις στον τομέα των ραδιενεργών ισοτόπων περιλαμβάνουν τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τον εγκλεισμό των ραδιενεργών πηγών, και τις «κάμερες» που αποθηκεύουν τα ραδιοϊσότοπα και από τις οποίες λειτουργούν.

3. Η ένταση της ακτινοβολίας είναι η ποσότητα ενέργειας που διαπερνά μια συγκεκριμένη περιοχή του δοκιμίου που είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας στη μονάδα χρόνου. Η ένταση ορίζεται ως το πλήθος των σωματιδίων ή των φωτονίων που περνούν από μια επιφάνεια εμβαδού 1 cm^2 σε χρόνο 1 sec . Αν δηλαδή μια δέσμη φωτονίων έχει ένταση $1000 \text{ φωτόνια/cm}^2 \cdot \text{sec}$, αυτό σημαίνει ότι μέσα σε ένα δευτερόλεπτο περνούν 1000 φωτόνια από μια επιφάνεια ενός τετραγωνικού εκατοστού. Ένας τρόπος μέτρησης της έντασης των ακτίνων X ή γάμμα είναι να εκτιμηθεί η ποσότητα ιοντισμού που προκαλούν στον αέρα. Η ποσότητα ιοντισμού στον αέρα που προκαλείται

από την ακτινοβολία ονομάζεται έκθεση. Η μονάδα Roentgen (R) είναι μέτρηση της έντασης των ακτίνων X ή γάμμα. Ορίζεται ως η ένταση της ακτινοβολίας που απαιτείται για να παράγει φορτίο ιοντισμού $0,000258 \text{ coulombs}$ ανά χιλιόγραμμα αέρα. Οι περισσότερες φορητές συσκευές ανίχνευσης ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για την ασφάλεια των ραδιογράφων μετρούν την έκθεση ή ένταση και παρουσιάζουν το

αποτέλεσμα σε Roentgens ή Roentgens ανά μονάδα χρόνου, που είναι γνωστό ως ρυθμός δόσης. Η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα του

τετραγώνου της απόστασης από την πηγή της. Δηλαδή, όσο αυξάνει η απόσταση από την πηγή, η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται και μάλιστα ραγδαία. Αυτό οφείλεται στη γεωμετρική θεώρηση σύμφωνα με την οποία κάθε σημειακή πηγή η οποία εκπέμπει εξίσου σε όλες τις κατευθύνσεις και χωρίς περιορισμό εμβέλειας, θα υπακούσει στο νόμο του αντίστροφου τετραγώνου της απόστασης.

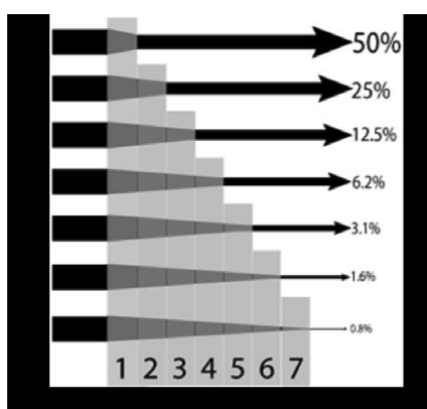


Εικόνα 41: Φάσμα Κυμάτων

4. Οι ακτίνες X και γάμμα έχουν πολύ βραχύτερα μήκη κύματος συγκριτικά με άλλες ακτινοβολίες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όταν αυξάνει η ενέργεια της ακτινοβολίας, παράγονται βραχύτερα μήκη κύματος τα οποία παρέχουν μεγαλύτερη διείσδυση στο υπό έλεγχο υλικό.

Η ικανότητα διείσδυσης μιας δέσμης ακτινοβολίας μετράται με το πάχος υποδιπλασιασμού σε mm υλικού. Είναι το πάχος του υλικού που χρειάζεται γ για να μειωθεί η ένταση της ακτινοβολίας κατά 50% αναφορικά με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η τιμή της HVL

εξαρτάται από την ενέργεια της ακτινοβολίας (υψηλότερη ενέργεια, μεγαλύτερο πάχος υποδιπλασιασμού), τον τύπο του υλικού (υψηλότερη η πυκνότητα του υλικού, μεγαλύτερο πάχος υποδιπλασιασμού), και το πάχος του υλικού (η HVL έχει συγκεκριμένη τιμή για δεδομένο υλικό και ενέργεια ακτινοβολίας).



Εικόνα 42: Αναλογία HVL

Το πάχος υποδιπλασιασμού (HVL) είναι αντιστρόφως ανάλογο του συντελεστή εξασθένησης και η τιμή του χρησιμοποιείται συχνά στη ραδιογραφία διότι είναι ευκολότερο να θυμάται κανείς τιμές και να

πραγματοποιεί απλούς υπολογισμούς. Όπως προαναφέρθηκε, ένα πάχος υποδιπλασιασμού ενός υλικού μπορεί να εξασθενίσει την ένταση της ακτινοβολίας στο μισό. Συνεπώς, δυο πάχη υποδιπλασιασμού θα μειώσουν την ένταση κατά 4 φορές, και n πάχη υποδιπλασιασμού θα μειώσουν την ένταση μιας δέσμης φωτονίων κατά 2^n φορές. Για τον υπολογισμό της θωράκισης, εάν το πάχος ενός HVL είναι γνωστό είναι δυνατόν να προσδιοριστεί, για παράδειγμα, γρήγορα η ποσότητα του υλικού που απαιτείται για μείωση της έντασης της ακτινοβολίας σε λιγότερο από 1% της αρχικής της τιμής.

5. Δεν διαθέτουν ηλεκτρικό φορτίο και μάζα και διαδίδονται

σε ευθείες γραμμές χωρίς να επηρεάζονται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Όμως, η διεύθυνση διάδοσής τους κάμπτεται σε μικρό βαθμό στις διεπιφάνειες ανάμεσα σε δυο διαφορετικά υλικά. **Δεν εστιάζονται** και εάν η ακτίνες X ή γάμμα κατευθύνονται προς ένα υάλινο φακό, η ακτινοβολία δεν θα εστιαστεί όπως θα έκανε το φως. Στην πραγματικότητα, η ακτινοβολία που διέρχεται μέσω του φακού που θα απορροφηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό στο παχύτερο μέρος του φακού και περισσότερη ακτινοβολία θα περάσει τις λεπτότερες περιοχές του φακού.

Δεν ανιχνεύονται με τις ανθρώπινες αισθήσεις όπως η όραση, η ακοή, η γεύση, η όσφρηση ή η αφή. Τα αποτελέσματα της έκθεσης του ανθρώπινου οργανισμού στην ακτινοβολία δεν γίνονται αντιληπτά για κάποιο χρονικό διάστημα. Με άλλα λόγια, ο οργανισμός περνάει από μια λανθάνουσα περίοδο πριν γίνουν προφανείς οι βλαβερές επιπτώσεις στην υγεία της έκθεσης σε ακτινοβολία. **Προκαλούν φθορισμό σε μερικά υλικά** όπως σε ορισμένα ορυκτά και άλατα όταν υποβάλλονται σε ακτινοβολία. Η ακτινοσκόπηση χρησιμοποιεί μια φθορίζουσα οθόνη που μετατρέπει τμήμα της ακτινοβολίας σε φως. Το φως που εκπέμπεται από την οθόνη φθορισμού αυξάνει την έκθεση του παρακείμενου φιλμ, γεγονός που μειώνει σημαντικά την έκθεση στην ακτινοβολία.

Προκαλούν ιονισμό της ύλης, μια μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της ύλης. Ο όρος ιονισμός αναφέρεται στην πλήρη απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από ένα άτομο ως αποτέλεσμα της μεταφοράς ενέργειας από διερχόμενο φορτισμένο σωματίδιο. Όπως κινείται η διεισδύουσα ακτινοβολία από σημείο σε σημείο στο υλικό, χάνει ενέργεια μέσω διαφόρων αλληλεπιδράσεων με τα άτομα που συναντά. Για το λόγο αυτό, η διεισδύουσα ακτινοβολία ονομάζεται και ιοντίζουσα ακτινοβολία. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων εκτός τροχιάς με αποτέλεσμα την αλλαγή στην ηλεκτρική ισορροπία του ατόμου. Ο ρυθμός απώλειας της ενέργειας εξαρτάται από τον τύπο και την ενέργεια της ακτινοβολίας, καθώς και την πυκνότητα και την ατομική σύνθεση του υλικού από το οποίο διέρχεται. Το φαινόμενο του ιονισμού προκαλεί τη μεγαλύτερη ανησυχία για τον άνθρωπο. Όταν δηλαδή η ακτινοβολία διέρχεται από ζώντες ιστούς, τα κύτταρα υπόκεινται σε ηλεκτρικές μεταβολές με αποτέλεσμα την πρόκληση βλάβης ή την καταστροφή τους.

6. Κατά το μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών με ραδιογραφία το υπό εξέταση υλικό τοποθετείται ανάμεσα στην πηγή ακτινοβολίας και σε φιλμ ευαίσθητο στην

ακτινοβολία. Η πηγή της ακτινοβολίας μπορεί να είναι είτε γεννήτρια ακτίνων X ή άλλη ραδιενεργός πηγή

Το υπό έλεγχο δοκίμιο θα σταματήσει μέρος της ακτινοβολίας, με τις παχύτερες και πυκνότερες περιοχές του δοκιμίου να σταματούν περισσότερη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία που θα διαπεράσει το δοκίμιο, θα εκθέσει το φιλμ, και θα σκιαγραφήσει το δοκίμιο. Το επίπεδο αμαύρωσης του φιλμ σχετίζεται με την πυκνότητα τμημάτων του υπό έλεγχο δοκιμίου και μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που φτάνει στο φιλμ. Οι σκοτεινότερες περιοχές του φιλμ υποδεικνύουν περισσότερη έκθεση (υψηλότερη ένταση ακτινοβολίας)

ενώ αντίθετα, οι λιγότερο αμαυρωμένες περιοχές του φιλμ υποδεικνύουν μικρότερη έκθεση (χαμηλότερη ένταση ακτινοβολίας).

Για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών χρησιμοποιούνται τελευταία συσκευές ψηφιακής ραδιογραφίας που διαθέτουν επίπεδους ψηφιακούς ανιχνευτές ακτινοβολίας (Flat Panel Detectors – FPD), αντί των παραδοσιακών φωτογραφικών φιλμ.

Τα πλεονεκτήματα μεταξύ άλλων είναι η μείωση του χρόνου επεξεργασίας, παρακάμπτοντας τη χημική επεξεργασία του φιλμ, καθώς και η δυνατότητα ψηφιακής μεταφοράς και βελτίωσης των απεικονίσεων.

Επιπλέον, μικρότερη ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί εικόνα με παρόμοια αντίθεση με τη συμβατική ραδιογραφία. Εκτιμάται ότι το 30% της ραδιογραφίας με φιλμ θα μπορούσε να αντικατασταθεί σήμερα με την ψηφιακή ραδιογραφία. Παρ' όλα αυτά, μόνο λίγες από αυτές τις εφαρμογές έχουν πράγματι αντικαταστήσει

το φιλμ. Η επιλογή για τη μετάβαση στην ψηφιακή εποχή εξαρτάται από το κόστος, την ποιότητα, τη ροή και την απόδοση.

Τα συστήματα ψηφιακής ραδιογραφίας χωρίζονται σε δύο μορφές:

(α) την άμεση ψηφιακή απεικόνιση, με απευθείας σύνδεση με υπολογιστή, η οποία χρησιμοποιεί ανιχνευτή άμορφου πυριτίου συνδισσόμενο με σπινθηριστή για τη μετατροπή των ακτίνων X ή γάμμα σε ορατό φως

(β) την έμμεση ψηφιακή απεικόνιση ή υπολογιστική τομογραφία, η οποία χρησιμοποιεί επαναχρησιμοποιούμενη πλάκα (αισθητήρα PSP - Photostimulable Phosphor Plate) στη θέση του φιλμ και ψηφιακή σάρωση.

7. Ακτίνες X

Οι ακτίνες X παράγονται από τη μεταλλική άνοδο λυχνίας κενού (λυχνία εκκένωσης ή σωλήνας Coolidge), όταν σε αυτήν προσπίπτουν ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας, τα οποία εκπέμπονται από κατάλληλη κάθοδο και επιταχύνονται προς την άνοδο με την επιβολή υψηλής τάσης. Αν εφαρμοστεί στη λυχνία υψηλότερο ρεύμα θα έχει ως αποτέλεσμα παραγωγή μεγαλύτερου αριθμού ηλεκτρονίων μέσω θερμιονικής εκπομπής και συνεπώς, υψηλότερη ένταση ακτινοβολίας. Η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης της ανόδου. Μεγαλύτερη η ενέργεια, βραχύτερο το μήκος κύματος, και μεγαλύτερη η ικανότητα διείσδυσης. Επειδή σχεδόν όλη η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα, η άνοδος πρέπει να έχει την

ικανότητα να διαχέει τη θερμότητα. Στην πραγματικότητα, ενώ το 97-99% της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα, μόνο το 1-3% περίπου μετατρέπεται σε ακτίνες X.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ακτίνες X παράγονται όταν ροή ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας κατευθύνονται προς ένα υλικό-στόχο, όπως το βολφράμιο το

οποίο έχει υψηλό ατομικό αριθμό. Ακτίνες X παράγονται όταν τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται ή σταματούν λόγω της αλληλεπίδρασης με τα ατομικά σωματίδια του στόχου. Αυτό

επιτυγχάνεται με τη λυχνία παραγωγής ακτίνων X. Ο καθοδικός σωλήνας θερμαίνεται με την εφαρμογή ρεύματος χαμηλής τάσης λίγων amperes. Όταν το νήμα του σωλήνα από βολφράμιο θερμαίνεται τα ηλεκτρόνια

συγκρατούνται χαλαρά. Ένα μεγάλο ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ καθόδου και ανόδου (το μέταλλο σε θετικό δυναμικό) δημιουργείται από τη γεννήτρια υψηλής τάσης. Τα ηλεκτρόνια που αφήνονται ελεύθερα από την κάθοδο προσελκύονται έντονα από το στόχο της ανόδου, η οποία ονομάζεται και εστία της λυχνίας. Η ροή των ηλεκτρονίων μεταξύ καθόδου και ανόδου είναι το ρεύμα της λυχνίας. Το ρεύμα της λυχνίας μετράται σε milliamperes (mA) και ελέγχεται ρυθμίζοντας το ρεύμα θέρμανσης χαμηλής τάσης που εφαρμόζεται στην κάθοδο. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της λυχνίας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που φεύγουν από την κάθοδο και οδεύουν προς την άνοδο. Τα mA ή ρύθμιση του ρεύματος στην κονσόλα ελέγχου ρυθμίζει τη θερμοκρασία της λυχνίας, η οποία σχετίζεται με την ένταση των ακτίνων X που παράγονται. Η υψηλή τάση ανάμεσα στην κάθοδο

και στην άνοδο, η οποία ρυθμίζεται στην κονσόλα ελέγχου, επηρεάζει την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια και προσπίπτουν στην άνοδο. Όσο υψηλότερη η τάση σε kV τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα

των ηλεκτρονίων, άρα και η ενέργεια που έχουν όταν προσπίπτουν στην άνοδο. Ηλεκτρόνια που προσπίπτουν με περισσότερη ενέργεια παράγουν ακτίνες X με μεγαλύτερη ισχύ διείσδυσης. Αύξηση των kV προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση της έντασης των ακτίνων X, αριθμό δηλαδή φωτονίων, πέρα από την αύξηση της ενέργειας, ενώ το μεγαλύτερο

ρεύμα (περισσότερα mA) αυξάνει μόνο την ένταση χωρίς αλλαγή του φάσματος. Στην κονσόλα ελέγχου ρυθμίζεται επίσης και ο χρόνος έκθεσης. Το μέγεθος του στόχου είναι σημαντική παράμετρος, καθώς επηρεάζει την ευκρίνεια της εικόνας του ραδιογραφούμενου αντικειμένου (μικρότερος ο στόχος της πηγής ακτινοβολίας, ευκρινέστερη η ραδιογραφία). Η ροή των ηλεκτρονίων εστιάζεται λοιπόν σε μια μικρή περιοχή του στόχου που ονομάζεται «εστιακόσημείο» με τη

χρήση ειδικού κατευθυντήρα. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που εφαρμόζεται στη λυχνία μετατρέπεται σε θερμότητα στο εστιακό σημείο της ανόδου. Για το λόγο αυτό, ο στόχος της ανόδου είναι συνήθως

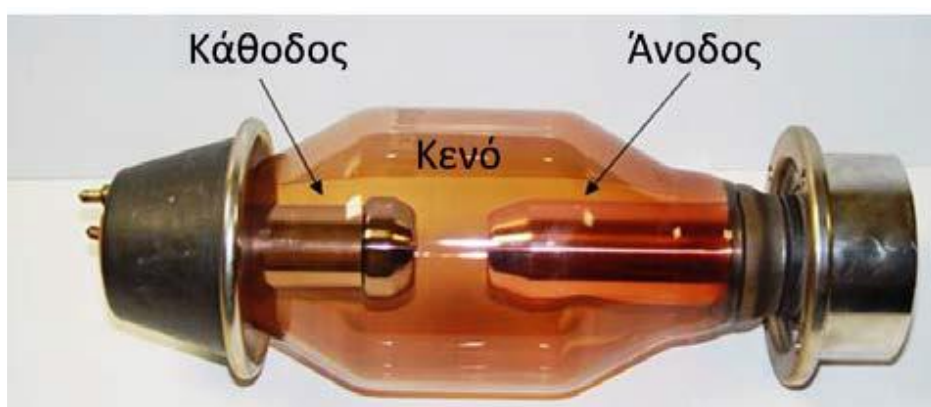
κατασκευασμένος από βολφράμιο, υλικό που διαθέτει υψηλό σημείο τήξης (3249 °C), αλλά και υψηλόατομικό αριθμόπου το κάνει ιδανικό υλικό ώστε να αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Ωστόσο, είναι αναγκαία η ψύξη της ανόδου με κύκλωμα νερού ή λαδιού. Μερικές λυχνίες χαμηλής ισχύος ψύχονται απλά με τη χρήση θερμικά αγωγίμων υλικών και ανεμιστήρες.

Για την αποφυγή καύσης της καθόδου, καθώς και δημιουργίας τόξου μεταξύ ανόδου και καθόδου, η λυχνία θα πρέπει να βρίσκεται υπό κενό. Μερικά συστήματα ακτίνων X διαθέτουν εξωτερικές αντλίες κενού. Όμως, τα περισσότερα συστήματα ελέγχου με ακτίνες X απαιτούν απλά να ακολουθείται μια διαδικασία προθέρμανσης πριν τη χρήση, η οποία συνίσταται σε προσεκτική αύξηση του ρεύματος της λυχνίας και της τάσης ώστε να καεί αργά το διαθέσιμο οξυγόνο πριν η λυχνία τεθεί σε λειτουργία σε υψηλή ισχύ. Επιπρόσθετα, οι γεννήτριες ακτίνων X διαθέτουν συνήθως ένα φίλτρο κατά μήκος της διαδρομής της δέσμης. Το φίλτρο αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο υλικού με υψηλό ατομικό αριθμό, όπως ο μόλυβδος, ο χαλκός ή ο ορείχαλκος. Το φίλτρο χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της ποιότητας της εξερχόμενης ακτινοβολίας που επιτυγχάνεται με την απορρόφηση των φωτονίων χαμηλής

ενέργειας, τα οποία εκπέμπονται από τη λυχνία πριν φτάσουν στο στόχο, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται καθαρότερη εικόνα αφού τα φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας έχουν την τάση να σκεδάζονται περισσότερο. Τέλος, η λυχνία είναι κατάλληλα θωρακισμένη, ώστε οι ακτίνες X να εξέρχονται μόνο από το ειδικό παράθυρο.

Οι περισσότερες τεχνικές βιομηχανικής ραδιογραφίας χρησιμοποιούν ενέργειες από περίπου 100 keV έως 400 keV και σε γενικές γραμμές, η ενέργεια της ακτινοβολίας μπορεί να περιγραφεί ως «ποιότητα» της ακτινοβολίας και η ένταση (σε mA) ως «ποσότητα».

Ακτίνες X με ενέργεια πάνω από 400 keV θεωρούνται ακτινοβολία υψηλής ενέργειας. Εξοπλισμός που παράγει ακτίνες X υψηλής ενέργειας είναι οι λυχνίες ακτίνων X με μετασχηματιστή συντονισμού, το βήτατρον, οι γραμμικοί επιταχυντές, και οι γεννήτριες Van de Graaff.



Εικόνα 43: Παραγωγή Ακτίνων X

8. Ακτινοβολία γάμμα

Η ακτινοβολία γάμμα παράγεται από ραδιενεργά άτομα. Ανάλογα με το λόγο των νετρονίων ως προς τα πρωτόνια στον πυρήνα ενός ισότοπου κάποιου στοιχείου, το άτομο μπορεί να είναι σταθερό ή ασταθές.

Όταν η ενέργεια σύνδεσης δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να διατηρήσει τη συνοχή του πυρήνα ενός ατόμου, το άτομο αυτό είναι ασταθές. Άτομα με ασταθείς πυρήνες αλλάζουν συνεχώς ως αποτέλεσμα την ανισορροπία της ενέργειας μέσα στον πυρήνα τους. Με την πάροδο του χρόνου, οι πυρήνες των ασταθών ισοτόπων αποσυντίθενται αυθόρμητα, ή μετατρέπονται με μια διαδικασία που είναι γνωστή ως «ραδιενεργός διάσπαση» και το υλικό αυτό ονομάζεται «ραδιενεργό υλικό».

Η ακτινοβολία γάμμα είναι ένας από τους τρεις τύπους φυσικής ραδιενέργειας και εκπέμπονται από ασταθείς πυρήνες ατόμων υπό μορφή φωτονίων με διακριτές ενέργειες.

Η εκπομπή των ακτίνων γάμμα δεν αλλάζει τον αριθμό των πρωτονίων ή νετρονίων στον πυρήνα, έχει όμως ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση του πυρήνα από υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση σε χαμηλότερη, δηλαδή από ασταθή σε σταθερή. Η εκπομπή των ακτίνων γάμμα ακολουθεί τη διάσπαση των άλλων δυο τύπων της φυσικής ραδιενέργειας, δηλαδή τη βήτα διάσπαση και την άλφα διάσπαση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι δυο πιο κοινοί τύποι πηγών ακτίνων γάμμα στη βιομηχανική ραδιογραφία είναι το ιρίδιο 192 και το κοβάλτιο 60. Άλλες πηγές που χρησιμοποιούνται σε μικρότερο βαθμό στη βιομηχανία είναι το θάλιο 170, το καίσιο 137, και το ράδιο 226.

Τα ραδιοϊσότοπα χαρακτηρίζονται από ορισμένες ιδιότητες όπως, η ενέργεια, ο χρόνος ημιζωής, και η ενεργότητα.

Η ενέργεια ενός ραδιοϊσοτόπου είναι μοναδικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου ραδιενεργού υλικού. Για πηγές ραδιενέργειας, η ενέργεια δεν μεταβάλλεται ποτέ για ένα δεδομένο ραδιενεργό ισότοπο.

Η διάσπαση των ραδιοϊσοτόπων με το χρόνο προκαλεί μείωση της ενεργότητας ή της ποσότητας του ραδιενεργού υλικού. Η ενεργότητα χαρακτηρίζει ποσοτικά τη ραδιενέργεια ενός στοιχείου και ορίζεται ως ο αριθμός των πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζει δηλαδή τη δυνατότητα παραγωγής ακτινοβολίας από μια δεδομένη ποσότητα ενός ραδιενεργού υλικού. Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα συγκεκριμένο ραδιοϊσότοπο να διασπαστεί ή να μειωθεί στο ήμισυ η αρχική του ενεργότητα. Όπως είδαμε πιο πάνω, η ένταση ή ποσότητα της παραγόμενης ακτινοβολίας πηγής ακτίνων X είναι συνάρτηση του εφαρμοζόμενου ρεύματος.

Όμως, η ενεργότητα ή ποσότητα ακτινοβολίας που παράγει μια πηγή ραδιενεργού ισότοπου εκφράζεται σε Ci εξ' ονόματος της Curie ή Bq από Becquerel. Ένα Ci ισοδυναμεί με $3,7 \times 10^{10}$ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και ένα Bq ισοδυναμεί με μια διάσπαση ανά δευτερόλεπτο.

Το μεγαλύτερο όφελος που προκύπτει από τη χρήση πηγών υψηλής ειδικής ενεργότητας είναι η βελτίωση της ανάλυσης που θα προκύψει από την υψηλή ενεργότητα (Bq ή Ci) και το μικρό φυσικό μέγεθος της πηγής.

Οι ακτίνες γάμμα διαθέτουν υψηλότερη ενέργεια συγκριτικά με τις ακτίνες X. Οι υψηλές αυτές ενέργειες δίνουν στην ακτινοβολία γάμμα τη δυνατότητα να διαπερνά υλικά με μεγάλο πάχος, με σχετικά σύντομο χρόνο έκθεσης. Το γεγονός αυτό, καθώς και η εξαιρετική φορητότητα των πηγών ακτίνων γάμμα είναι οι κυριότεροι λόγοι που η ακτινοβολία γάμμα χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία.

Φυσικά, το μειονέκτημα της χρήσης ραδιενεργών πηγών είναι ότι ποτέ δεν μπορεί να απενεργοποιηθεί, και συνεπώς, η ασφαλής διαχείριση της πηγής είναι μια μόνιμη ευθύνη για τον χρήστη.

Το φυσικό μέγεθος του ραδιενεργού υλικού κυμαίνεται μεταξύ κατασκευαστών, αλλά γενικά το ισότοπο που χρησιμοποιείται είναι ένας σβόλος διαστάσεων 1,5 mm x 1,5 mm και ανάλογα με το επίπεδο επιθυμητής ενεργότητας, η κάψουλα από ανοξείδωτο ατσάλι γεμίζει με σβόλους και σφραγίζεται με συγκόλληση. Η κάψουλα

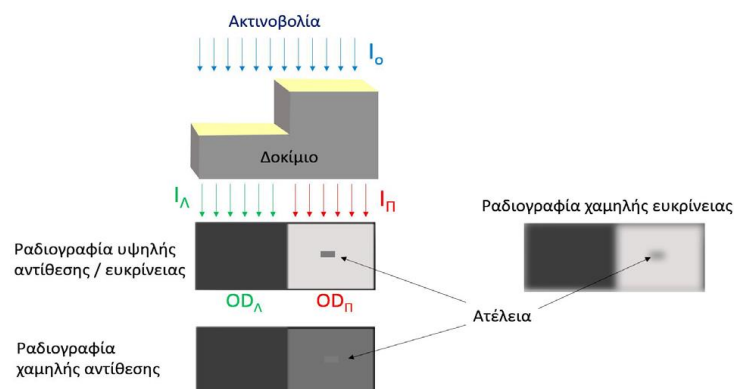
στεγάζεται σε θωρακισμένο δοχείο το οποίο ονομάζεται συσκευή έκθεσης ή γ-κάμερα. Το απεμπλουτισμένο ουράνιο συχνά χρησιμοποιείται ως υλικό θωράκισης για ραδιενεργές πηγές. Η κάμερα για πηγές Ιριδίου 192 και Κοβαλτίου 60 περιέχουν 22 kg και 225 kg υλικού θωράκισης, αντίστοιχα. Οι κάμερες κοβαλτίου, λόγω του βάρους

της θωράκισης, συχνά τοποθετούνται σε ρυμουλκούμενη βάση για τη μεταφορά τους στα διάφορα σημεία ελέγχου. Στη θύρα εξόδου της πηγής συνδέεται σωλήνας-οδηγός που έχει στο άκρο του κατευθυντήρα (συνήθως από βολφράμιο) για τη θωράκιση της ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις εκτός από εκείνη στην οποία πραγματοποιείται η έκθεση.



Εικόνα 44: Παραγωγή Ακτίνων Γ

9. Η ραδιογραφική ευαισθησία είναι ένα μέτρο της ποιότητας της εικόνας αναφορικά με την παραμικρή λεπτομέρεια ή ασυνέχεια που μπορεί να εντοπιστεί, και εξαρτάται από την αντίθεση και την ασάφεια της εικόνας. Η αντίθεση καθιστά ευκολότερη την διάκριση περιοχών ενδιαφέροντος στο δοκίμιο (π.χ. ατέλειες) από τη γύρω περιοχή. Επίσης, η ελάττωση της ασάφειας (δηλ. αύξηση της ευκρίνειας) μειώνει τη θολότητα της εικόνας με αποτέλεσμα την καλύτερη απεικόνιση των ατελειών.



Εικόνα 45: Ραδιογραφική Ευαισθησία

10. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ραδιογραφίας

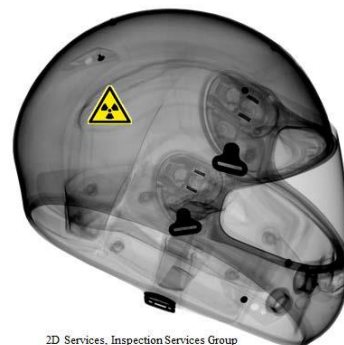
Ο μη καταστροφικός έλεγχος με ραδιογραφία προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι άλλων μη καταστροφικών δοκιμών, ωστόσο, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο κίνδυνος για την υγεία που συνδέεται με την «δισεξιδύουσα» ακτινοβολία, που επιβάλλει εξειδικευμένη εκπαίδευση, λήψη των απαραίτητων μέτρων προστασίας και εφαρμογή των διεθνών κανόνων ακτινοπροστασίας.

■ Πλεονεκτήματα της ραδιογραφίας

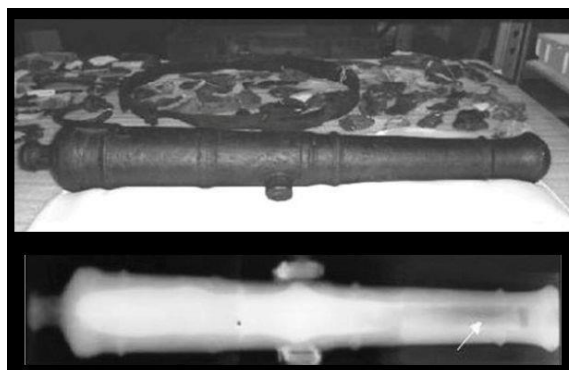
- Δεν περιορίζεται από τον τύπο του υλικού ή την πυκνότητα
- Δυνατότητα επιθεώρησης συναρμολογημένων εξαρτημάτων
- Απαιτεί ελάχιστη επιφανειακή προετοιμασία
- Ευαίσθητη σε μεταβολές του πάχους, στη διάβρωση, στη παρουσία κενών και ρωγμών, καθώς και σε μεταβολές πυκνότητας του υλικού
- Ανιχνεύει επιφανειακά και εσωτερικά ελαττώματα
- Παρέχει μόνιμη καταγραφή της επιθεώρησης
- Καλή φορητότητα, ειδικά των πηγών ακτίνων γάμμα

■ Μειονεκτήματα της ραδιογραφίας

- Πολλές προφυλάξεις ασφαλείας για τη χρήση ακτινοβολίας υψηλής έντασης
- Πολλές ώρες εκπαίδευσης του τεχνικού πριν από τη χρήση
- Απαιτείται πρόσβαση και στις δύο πλευρές του δείγματος
- Η διαδικασία επιθεώρησης είναι γενικά αργή
- Υψηλά κατευθυντική τεχνική (ευαίσθητη στον προσανατολισμό της ατέλειας)
- Ο προσδιορισμός του βάθους της ατέλειας είναι αδύνατος χωρίς πρόσθετες γωνίες έκθεσης
- Μεγάλο αρχικό κόστος εξοπλισμού



Εικόνα 46 & 47 & 48: Χρήση Ακτινοβολίας για Εντοπισμό Αστοχιών



Υπέρηχοι

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους χρησιμοποιεί ελαστικά μηχανικά κύματα για τον έλεγχο των υλικών. Συνήθως χρησιμοποιείται μια κατευθυνόμενη δέσμη μηχανικών ελαστικών κυμάτων υψηλής συχνότητας μεταξύ 20kHz και 20MHz. Η επιλογή για τη χρήση των υπερηχητικών κυμάτων οφείλεται κυρίως στην ιδιότητα τους να διεισδύουν στο εσωτερικό των υλικών, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα καταγραφής του και παράστασης του γραφικά. Τα υπερηχητικά κύματα διέπονται από τους νόμους της ακουστικής και περιγράφονται από τα ίδια μεγέθη με τα ηχητικά κύματα.

Τα μεγέθη αυτά είναι:

- Η συχνότητα - f : ορίζεται ως ο αριθμός των ταλαντώσεων στη μονάδα του χρόνου. Η μονάδα συχνότητας είναι το Hz.
- Το μήκος κύματος - λ : είναι η απόσταση, προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δύο γειτονικών σωματιδίων που βρίσκονται στην ίδια φάση. Το μήκος κύματος δίνεται από τη σχέση $\lambda = c/f$.
- Η ταχύτητα διάδοσης - c : είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το κύμα σ' ένα μέσο και είναι χαρακτηριστική του μέσου.
- Πλάτος ταλάντωσης - A : είναι η μέγιστη απομάκρυνση ενός ταλαντευόμενου σωματιδίου από τη θέση ισορροπίας του. Το πλάτος ταλάντωσης εξαρτάται από το ποσό της ενέργειας που παρέχεται στο ελαστικό μέσο.

Είδη υπερηχητικών κυμάτων

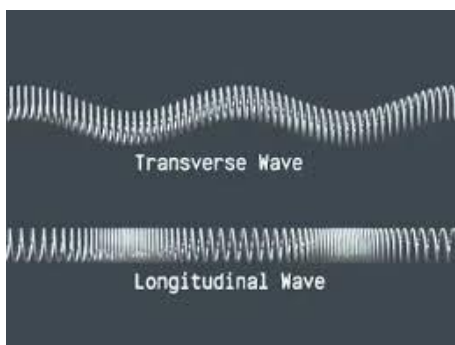
Τα υπερηχητικά κύματα διαδίδονται στα ελαστικά μέσα, στερεά, υγρά και αέρια, αλλά δεν διαδίδονται στο κενό. Τα δομικά σωματίδια του ελαστικού μέσου, ταλαντώνονται γύρω από μια θέση ισορροπίας και μεταφέρουν τη δόνηση τους σε άλλα γειτονικά, κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τη διάδοση των κυμάτων χαρακτηρίζουν δύο διευθύνσεις, η διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου. Η σύμπτωση ή όχι των δύο αυτών διευθύνσεων, δημιουργεί την πρώτη διάκριση των υπερηχητικών κυμάτων σε εγκάρσια και διαμήκη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου οι διαστάσεις του υλικού, που είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος δεν είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης, παράγονται και άλλα είδη κυμάτων. Από αυτά θα αναφερθούν τα κύματα πλακών, ή κύματα του Lamb, και τα επιφανειακά κύματα, τα οποία χρησιμοποιούνται, επίσης, στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών.

Διαμήκη υπερηχητικά κύματα

Τα διαμήκη υπερηχητικά κύματα, ή κύματα πύσεως, είναι ο τύπος κυμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην εξέταση των υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαδίδονται και στις τρεις μορφές ύλης. Στα διαμήκη κύματα, η διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η διεύθυνση ταλάντωσης των δομικών σωματιδίων συμπίπτουν.

Το χαρακτηριστικό των διαμήκων κυμάτων είναι ότι δημιουργούνται στα δομικά σωματίδια του μέσου διάδοσης, πυκνώσεις και αραιώσεις. Το μήκος κύματος είναι η

απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυκνώσεων ή αραιώσεων ή διαφορετικά η απόσταση μεταξύ δύο επιπέδων, στα οποία τα δομικά σωματίδια βρίσκονται στην ίδια κατάσταση κίνησης.



Εικόνα 49: Διαμήκη Κύματα

Εγκάρσια υπερηχητικά κύματα

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματιδίων είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο σε υλικά που μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις, γι' αυτό καλούνται και κύματα διάτμησης. Επομένως, δεν διαδίδονται στα υγρά και στα αέρια. Διαδίδονται σε ορισμένα παχύρρευστα υγρά, που παρουσιάζουν μεγάλη συνεκτικότητα. Τα εγκάρσια κύματα παράγονται από ειδικές κεφαλές εγκαρσίων κυμάτων ή από τα διαμήκη κύματα, εάν εκμεταλλευτούμε κατάλληλα τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης, όταν τα διαμήκη κύματα προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών.

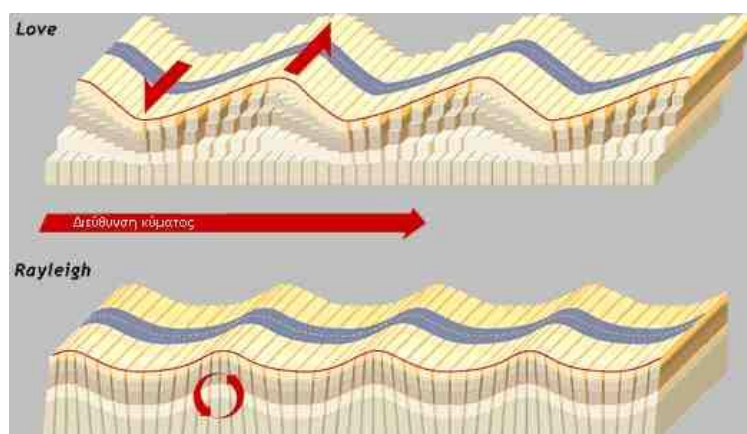
Το χαρακτηριστικό των εγκαρσίων κυμάτων είναι η δημιουργία όρεων και κοιλάδων στα δομικά σωματίδια του μέσου διάδοσης. Ως μήκος κύματος ορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών όρεων ή κοιλάδων. Τα εγκάρσια κύματα εφαρμόζονται σε πολλές περιπτώσεις στο μη καταστροφικό έλεγχο και είναι απαραίτητα, κατά τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών ενός υλικού με τη μέθοδο των υπερήχων.

Επιφανειακά κύματα (Rayleigh waves)

Τα επιφανειακά κύματα είναι ένα άλλο είδος υπερηχητικών κυμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται στον έλεγχο των υλικών. Διαδίδονται, στην επιφάνεια στερεών, με σχετικά μεγάλο πάχος. Στα επιφανειακά κύματα, τα δομικά σωματίδια συνδυάζουν την εγκάρσια και τη διαμήκη κίνηση, με αποτέλεσμα να κινούνται σε ελλειπτική τροχιά. Ο μεγάλος άξονας της έλλειψης είναι κάθετος στην επιφάνεια του στερεού. Διαδίδονται με ταχύτητα που είναι περίπου ίση με το 90% αυτής των εγκαρσίων κυμάτων στο ίδιο υλικό. Τα επιφανειακά κύματα παράγονται, όταν τα διαμήκη προσπίπτουν σε μια επιφάνεια υπό γωνία, που η τιμή της είναι ίση ή μεγαλύτερη της δεύτερης κρίσιμης γωνίας. Διεισδύουν μέσα στο στερεό υλικό, σε βάθος που είναι ίσο με ένα μήκος κύματος και έχουν την ιδιότητα να ακολουθούν το προφίλ της επιφάνειας στην οποία διαδίδονται.

Για παράδειγμα, τα επιφανειακά κύματα θα διαδοθούν στην παράπλευρη επιφάνεια ενός κυλίνδρου και, αν δεν συναντήσουν κάποια ατέλεια, θα φτάσουν ξανά στο σημείο εισχώρησης. Τα κύματα Rayleigh είναι πολύ χρήσιμα στο μη καταστροφικό έλεγχο καθώς είναι πολύ ευαίσθητα στις επιφανειακές ατέλειες και ανακλώνται από απότομες αλλαγές στο προφίλ, όπως είναι οι ρωγμές.

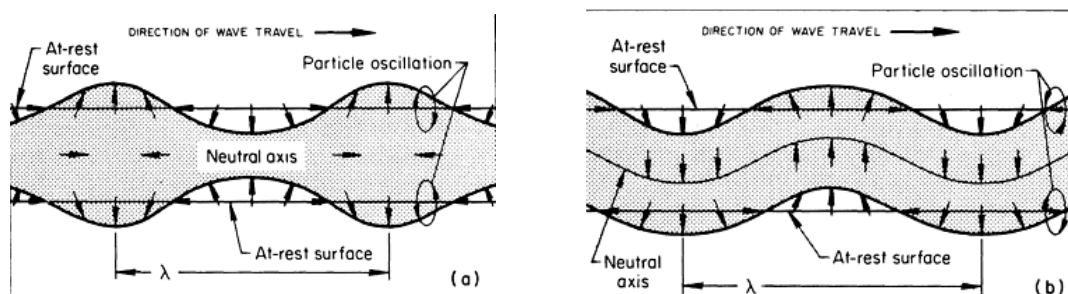
Τέλος, μπορούν να φτάσουν σε περιοχές που άλλα είδη κυμάτων συναντούν δυσκολία.



Εικόνα 50: Κύματα Rayleigh

Κύματα πλακών ή κύματα του Lamb

Τα κύματα πλακών μοιάζουν με τα επιφανειακά κύματα. Παράγονται, όμως, σε πλάκες, των οποίων το πάχος είναι ίσο με μερικά μήκη κύματος και καταλαμβάνουν όλο το πάχος της πλάκας. Η διάδοση τους εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τη συχνότητα του κύματος και το πάχος της πλάκας. Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων πλακών, που ορίζονται από το είδος της κίνηση των δομικών σωματιδίων. Εάν τα δομικά σωματίδια κινούνται συμμετρικά, ως προς τον ουδέτερο άξονα της πλάκας, έχουμε τα διασταλτικά κύματα, ενώ εάν κινούνται αντισυμμετρικά, έχουμε τα καμπτικά. [2, 7]



Εικόνα 51 & 52: Κύματα Lamb

Κάθετη πρόσπτωση ηχητικού κύματος στη συνοριακή επιφάνεια δύο υλικών

Στην εξέταση των υλικών με υπερήχους, τα υπερηχητικά κύματα σε όλες τις περιπτώσεις διαδίδονται σε δύο μέσα. Τα μέσα αυτά μπορεί να είναι το μέσο σύζευξης και στη συνέχεια το εξεταζόμενο υλικό ή η διαδοχικές στρώσεις ενός υλικού. Σε κάποιο σημείο μεταξύ των δύο υλικών, υπάρχει η διαχωριστική επιφάνεια, που σημειώνει το τέλος του μέσου σύζευξης και την αρχή του εξεταζόμενου υλικού. Όταν το υπερηχητικό κύμα, που διαδίδεται στο μέσο σύζευξης, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια, τότε ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας του κύματος διαδίδεται στο εξεταζόμενο υλικό, ενώ το άλλο μέρος ανακλάται πίσω προς το μέσο. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα οποιοδήποτε το υπερηχητικό κύμα συναντά διαχωριστικές επιφάνειες και είναι ιδιαίτερα έντονο στα σύνθετα υλικά, καθώς κάθε στρώση έχει μια διαχωριστική επιφάνεια με την προηγούμενη και την επόμενη στρώση.

Το χαρακτηριστικό των υλικών που καθορίζει το ποσό της ακουστικής πίεσης, που θα ανακλαστεί από τη διαχωριστική επιφάνεια, ονομάζεται ακουστική αντίσταση και εκφράζει την αντίσταση που προβάλλουν τα δομικά σωματίδια ενός υλικού στη διάδοση του ηχητικού κύματος. Η τιμή της ακουστικής αντίστασης είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό.

Οπότε, όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται σ' ένα υλικό ακουστικής αντίστασης Z_1 και συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια με ένα άλλο υλικό ακουστικής αντίστασης Z_2 ορίζεται ο συντελεστής ανάκλασης R .

Αντιστοίχως ορίζεται ο συντελεστής διάδοσης T και εκφράζει το ποσοστό της ακουστικής πίεσης που εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό.

Οι παραπάνω συντελεστές εκφράζουν το ποσοστό της ακουστικής πίεσης, που ανακλάται ή εισέρχεται στο υλικό. Η ακουστική πίεση είναι σημαντική ιδιότητα του υπερηχητικού κύματος και το τετράγωνο της καθορίζει την ακουστική ενέργεια του κύματος. Ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να είναι θετικός ή αρνητικός. Το αρνητικό πρόσημο εκφράζει την αλλαγή φάσης του ανακλώμενου κύματος σε σχέση με το προσπίπτον στη διαχωριστική επιφάνεια.

Αναλυτικότερα, εάν το προσπίπτον κύμα τη στιγμή που συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια έχει φτάσει στο θετικό μέγιστο της ακουστικής πίεσης, τότε την ίδια χρονική στιγμή, το ανακλώμενο κύμα θα βρίσκεται στο αρνητικό μέγιστο της ακουστικής πίεσης. Ο συντελεστής διάδοσης μπορεί να είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος της μονάδας.

Στα σύνθετα υλικά οι αποκολλήσεις στρώσεων, οι ρωγμές και οι φυσαλίδες αντιστοιχούν σε διαχωριστικές επιφάνειες αέρα-σύνθετου υλικού. Σ' αυτή τη μεγάλη μεταβολή της ακουστικής αντίστασης στηρίζεται ο μη καταστροφικός έλεγχος για να ανιχνεύσει ατέλειες και βλάβες μέσα στα σύνθετα υλικά. Η εναλλαγή των δεικτών στις ακουστικές αντιστάσεις δηλώνει σε ποιο υλικό διαδίδονται πρώτα τα υπερηχητικά κύματα. Φαίνεται λοιπόν, ότι καθώς τα υπερηχητικά κύματα συναντούν τις ατέλειες και βλάβες ανακλώνται κατά 100% και παράγονται ισχυρές ανακλάσεις, στις οποίες στηρίζεται ο έλεγχος με υπερήχους για τον εντοπισμό τους.

Πλάγια πρόσπτωση υπερηχητικών κυμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών

Αναφέρεται ότι, οι στρώσεις στο εσωτερικό μιας πολύστρωτης πλάκας δεν είναι απαραίτητο να είναι παράλληλες με την πάνω και την κάτω επιφάνεια, αλλά να σχηματίζουν μια κυματοειδή επιφάνεια, που μπορεί να οφείλεται σε περιοχές με

αυξημένη ή μειωμένη περιεκτικότητα σε ρητίνη. Επίσης, τα νήματα των ενισχυτικών στρώσεων μετά τη στερεοποίηση της ρητίνης αποκτούν ελλειπτικό σχήμα ως προς το πλάτος τους, με αποτέλεσμα η υπερηχητική δέσμη να μη προσπίπτει κάθετα σ'αυτά. Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε μόνο διάδοση και ανάκλαση, πράγμα που συμβαίνει στην κάθετη πρόσπτωση, αλλά έχουμε αλλαγή στη διεύθυνση και στο είδος των κυμάτων που διαδίδονται, τόσο στο ανακλώμενο μέρος του υπερηχητικού κύματος όσο και στο διαθλώμενο. Τα φαινόμενα αυτά επηρεάζουν ολόκληρη την ηχητική δέσμη, ή μέρος της, και το συνολικό αποτέλεσμα των αλλαγών που παρατηρούνται εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και από την ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων, που συναντούν τη διαχωριστική επιφάνεια.

Από εκεί και πέρα, μέχρι την πρώτη κρίσιμη γωνία, συνυπάρχουν διαμήκη και εγκάρσια κύματα με μικρότερο πλάτος. Μετά την πρώτη κρίσιμη γωνία, διαδίδονται μόνο εγκάρσια κύματα, αρχικά με μέγιστο πλάτος που καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει μειώνεται μέχρι τη δεύτερη κρίσιμη γωνία, όπου μηδενίζεται το πλάτος τους. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από τη δεύτερη κρίσιμη, διαδίδονται μόνο επιφανειακά κύματα.

Κατά τον έλεγχο σύνθετων υλικών με τη χρήση κάθετης δέσμης υπερηχητικών κυμάτων, τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της μετατροπής των διαμήκων κυμάτων σε άλλα είδη κυμάτων συμβαίνουν στο εσωτερικό τους με τυχαίο τρόπο. Η πρόσπτωση στις διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες έχει σαν αποτέλεσμα τη διάθλαση και την ανάκλαση μέρους, ή ολόκληρης, της δέσμης προς τυχαίες διευθύνσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της ακουστικής πίεσης, καλείται διασπορά.

Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων

Η ένταση της υπερηχητικής δέσμης που επιστρέφει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή, μετά τη διάδοση της στο εξεταζόμενο υλικό, είναι πολύ μικρότερη από την ένταση της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης. Όλα τα υλικά παρουσιάζουν την τάση να εξασθενούν την ένταση των υπερηχητικών κυμάτων, άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο.

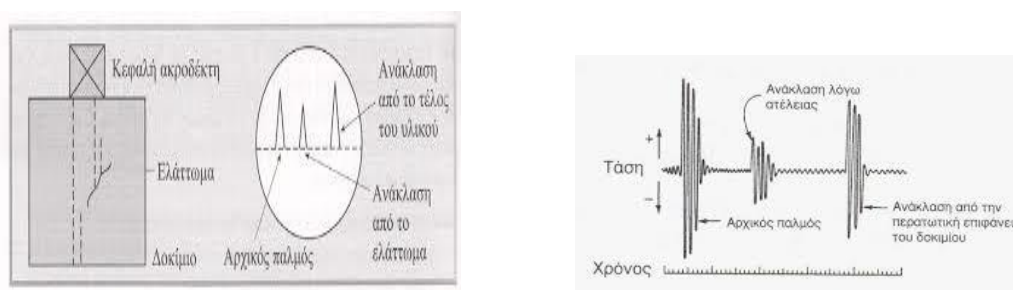
Η εξασθένηση αυτή, είναι αποτέλεσμα της διασποράς και της απορρόφησης που περιγράφονται συνολικά με τον όρο απόσβεση. Απορρόφηση είναι η άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων σε θερμότητα.

Κατά την ελαστική κίνηση των δομικών σωματιδίων του μέσου, κάτω από την επίδραση του υπερηχητικού κύματος, θερμαίνονται τα σημεία, όπου σχηματίζονται πυκνώσεις και ψύχονται τα σημεία, όπου σχηματίζονται αραιώσεις. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της ενέργειας του υπερηχητικού κύματος. Η απορρόφηση είναι πιο έντονη όταν οι ταλαντώσεις γίνονται με μεγαλύτερη ταχύτητα, δηλαδή με υψηλότερη συχνότητα.

Στα περισσότερα υλικά η απορρόφηση είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας των υπερηχητικών κυμάτων. Η διασπορά εμφανίζεται όταν η δέσμη των υπερήχων συναντά υπό γωνίες διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες και ανακλάται ή διαθλάται ακανόνιστα ή μετατρέπεται σε άλλα είδη κυμάτων. Η διασπορά των υπερηχητικών κυμάτων, ιδιαίτερα στα σύνθετα υλικά είναι ένα έντονο φαινόμενο, που πολλές φορές έχει σαν αποτέλεσμα ο έλεγχος με υπερήχους να γίνεται από δύσκολος έως ανέφικτος. Οφείλεται στο γεγονός ότι τα σύνθετα υλικά είναι ετερογενή και ανισότροπα. Η φύση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται στο εσωτερικό τους πολλές διαχωριστικές επιφάνειες. Ως διαχωριστικές επιφάνειες μπορούν να θεωρηθούν οι ενισχυτικές στρώσεις, τα νήματα των στρώσεων, τα εγκλείσματα αέρα, οι οποιεσδήποτε ατέλειες

και βλάβες ανάλογα με το μήκος κύματος της υπερηχητικής δεσμής που χρησιμοποιείται. Το φαινόμενο της διασποράς γίνεται εντονότερο, όταν το μέγεθος της θεωρούμενης διαχωριστικής επιφάνειας γίνεται ίσο με το 10% του μήκους κύματος.

Η απόσβεση δεν είναι ίδια σε όλα τα υλικά. Έτσι σε σχέση με τα μέταλλα, τα σύνθετα έχουν μεγαλύτερη απόσβεση λόγω της ετερογενούς φύσης τους. Τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά απόσβεσης. Σε σχέση με τα μονοαξονικά υφάσματα, τα πλεγμένα υφάσματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσβεση. Αποτέλεσμα της απόσβεσης είναι η μείωση της ηχητικής πίεσης των υπερηχητικών κυμάτων από την αρχική τιμή σε κάποια τυχαία τιμή, όταν το κύμα διαπερνά το υλικό σε ορισμένο βάθος. Ο συντελεστής απόσβεσης συμβολίζεται με a (attenuation coefficient) και εκφράζεται συνήθως σε dB/mm ή σε dB/m.



Εικόνα 53 & 54: Εντοπισμός Αστοχίας με τη Χρήση Κυμάτων

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα καθώς και οι περιορισμοί της μεθόδου των υπερήχων για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών περιγράφονται παρακάτω:

➤ Πλεονεκτήματα

- Μεγάλη διεισδυτική ικανότητα που επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών σε μεγάλο βάθος (μπορούν να ελεγχθούν αντικείμενα με μήκος και πάχος αρκετών μέτρων)
- Ακριβής προσδιορισμός της θέσης και μεγέθους εσωτερικών ατελειών και χαρακτηρισμός του προσανατολισμού, μορφής και τύπου τους
- Τεχνική ευαίσθητη σε επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ασυνέχειες
- Απαιτείται πρόσβαση σε μία μόνο επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του αντικειμένου προς έλεγχο

- Τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν πλήρη αυτοματοποίηση με δυνατότητα απεικόνισης υψηλής ευαισθησίας, παρέχοντας άμεσα αποτελέσματα
- Η υψηλή ευαισθησία της μεθόδου επιτρέπει την ανίχνευση πολύ μικρών ατελειών
- Δυνατότητα ογκομετρικής ανίχνευσης, που επιτρέπει τον έλεγχο του συνολικού όγκου του αντικειμένου, που εκτείνεται από την εμπρός επιφάνεια ως την πίσω επιφάνειά του
- Παρέχει τα αποτελέσματα σε μορφή ώστε να υπάρχει δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας για το χαρακτηρισμό ελαττωμάτων και βλάβης και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών
- Φορητότητα
- Κανένας κίνδυνος για την υγεία των χειριστών από τη χρήση της μεθόδου
- Δεν απαιτούνται αναλώσιμα

➤ Μειονεκτήματα

- Δεν υπάρχει μόνιμη καταγραφή των δεδομένων, παρά μόνο όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα ελέγχου
- Τα αποτελέσματα του ελέγχου απαιτούν ερμηνεία (εξαιρούνται οι ψηφιακοί μετρητές πάχους τοιχώματος)
- Ο χειριστής της μεθόδου πρέπει να είναι ιδιαίτερα έμπειρος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ελέγχου
- Η ανάπτυξη διαδικασιών ελέγχου απαιτεί εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις
- Αντικείμενα που έχουν τραχεία επιφάνεια, ακανόνιστο σχήμα, ή είναι πολύ μικρά σε μέγεθος ή έχουν πολύ λεπτή διατομή ή μη ομοιογενή, είναι δύσκολο να ελεγχθούν
- Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι προσπελάσιμη για μετάδοση υπερήχων
- Ασυνέχειες που υπάρχουν σε μικρό βάθος αμέσως κάτω από την επιφάνεια, είναι δύσκολο να ανιχνευθούν
- Είναι δύσκολος ο έλεγχος χονδρόκοκκων υλικών, όπως για παράδειγμα ο χυτοσίδηρος, εξαιτίας της μεγάλης εξασθένησης των υπερήχων και του υψηλού σήματος θορύβου στα υλικά αυτά
- Γραμμικές ατέλειες προσανατολισμένες παράλληλα με τη δέσμη των υπερήχων μπορεί να μην ανιχνευτούν

- Απαιτείται μέσο σύζευξης για την αποτελεσματική μεταφορά της ηχητικής ενέργειας στο δοκίμιο
- Απαιτούνται πρότυπα αναφοράς τόσο για την βαθμονόμηση του εξοπλισμού όσο και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών

3.1.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ΜΚΕ

Οι ΜΚΕ έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής για εντοπισμό αστοχιών αλλά και για γενικούς ελέγχους. Συνήθως υπάρχουν διάφορες τεχνικές ή διαδικασίες σχετιζόμενες με κάθε μέθοδο. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπ' όψιν μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ.

Όπως έγινε κατανοητό και από την παραπάνω ανάλυση, κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και δεν μπορούμε να εντοπίσουμε μία και μοναδική μέθοδο ΜΚΕ που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές, για την εξέταση μιας κατασκευής ή ανίχνευση τύπου βλάβης.

3.2 Ακουστική Εκπομπή

3.2.1 Εισαγωγή

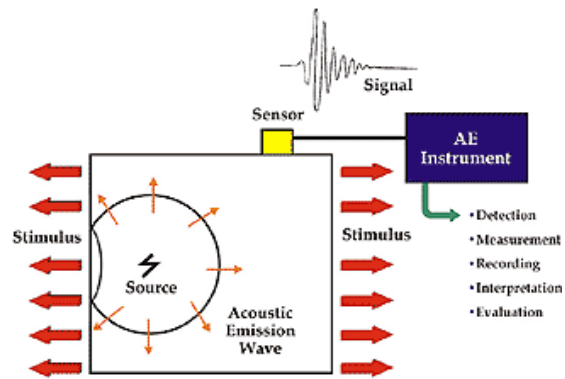
Η Ακουστική Εκπομπή είναι μία από τις υποσχόμενες τεχνικές για έλεγχο δομικής ακεραιότητας υλικών και κατασκευών και λόγω της παθητικής και μη καταστροφικής της φύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας κατασκευής και να παρέχει πληροφορία που δεν μπορεί να συλλεχθεί από άλλη μέθοδο. [23, 24]

Βασίζεται στη καταγραφή και μελέτη ελαστικών κυμάτων που διεγείρονται κυρίως από διάδοση βλάβης στο υλικό αλλά και από άλλες αιτίες. Τα σήματα αυτά καταγράφονται από αισθητήρες και μετατρέπονται σε ηλεκτρικές κυματομορφές που παρέχουν πληροφορία για την πηγή της βλάβης και την τοποθεσία της.

Η δομική ασφάλεια κατασκευών είναι υψίστης σημασίας. Φορτία λειτουργίας, περιβαλλοντικές επιδράσεις και τυχαία γεγονότα όπως σεισμοί, συσσωρεύουν βλάβη και πλήττουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Με σκοπό την αποφυγή απώλειας ανθρώπινων ζωών και κεφαλαίου, έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται διαδικασίες Ελέγχου

Δομικής Ακεραιότητας. Αυτές αφορούν στην ανίχνευση, γεωμετρικό εντοπισμό και χαρακτηρισμό της βλάβης που επιτρέπει την κατάλληλη συντήρηση, επιδιόρθωση ή αντικατάσταση του υπό έλεγχο κομματιού. Ένα μεγάλο ποσοστό των διαθέσιμων υποδομών έχει ηλικία πάνω από 50 χρόνια τονίζοντας την ανάγκη για κατάλληλο έλεγχο και συντήρηση.

Η Ακουστική Εκπομπή, είναι μεταξύ άλλων τεχνικών ένα πολύτιμο εργαλείο για το σκοπό αυτό. Μπορεί να εφαρμοστεί κατά διαστήματα ή και συνεχώς για να παρέχει πληροφορία σε πραγματικό χρόνο και αξιόπιστη αξιολόγηση της κατάστασης βλάβης σε υλικά και κατασκευές.



Εικόνα 55: Απεικόνιση Μεθόδου Λειτουργίας AE

3.2.2 Ιστορική αναδρομή

Ως φαινόμενο, η AE είναι όσο παλιά είναι και η θραύση αφού είναι γνωστό ότι κάθε παρόμοιο γεγονός εκπέμπει ήχους που πολλές φορές είναι αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί (π.χ. σπάσιμο ξύλου, βήματα πάνω σε ξερά φύλλα που θρυματίζονται κλπ.). Η πρώτη αναφορά πρακτικής εφαρμογής AE για έλεγχο ποιότητας τοποθετείται χιλιάδες

χρόνια π.Χ., όταν κατασκευαστές κεραμικών άκουγαν τους ήχους ρηγμάτωσης από πήλινα αγγεία που είχαν αποθερμανθεί πολύ γρήγορα. Η εμπειρία έδειξε ότι τα αγγεία που είχαν εκπέμψει τον ήχο ήταν ελαττωματικά και είχαν μικρή διάρκεια ζωής.

Υπάρχει καταγεγραμμένο ένα παλαιό πείραμα από τον Ιάπωνα επιστήμονα F.Kishinoue το 1933, όπου κατέγραψε τη θραύση ξύλου υπό κάμψη τοποθετώντας μεταλλική βελόνα γραμμοφώνου στην εφελκυστική του πλευρά και μετέπειτα ακολούθησε το πείραμα του Kaiser.

Το παρόν κεφάλαιο φιλοδοξεί να παρέχει τις βασικές αρχές λειτουργίας αλλά και βιβλιογραφία ώστε να δίνεται η δυνατότητα αναζήτησης στον ενδιαφερόμενο σε διάφορα πιο συγκεκριμένα πεδία.

3.2.3 Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής

Η τεχνική της AE ανιχνεύει και καταγράφει τα ελαστικά κύματα που εκλύονται μετά από μη αντιστρεπτές διαδικασίες σε ένα υλικό. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν έναρξη και διάδοση βλάβης σε οποιαδήποτε μορφή κυρίως όμως ρωγμές, αποκολλήσεις, εξόλκευση ινών και την ανάπτυξη διάβρωσης, διαρροών κ.α.

Συνήθως πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες εφαρμόζονται στην επιφάνεια του υλικού με κατάλληλο μέσο σύζευξης (γράσο, τζελ, μέλι) και μετατρέπουν οποιαδήποτε μεταβολή της πίεσης στην επιφάνεια τους σε ηλεκτρική κυματομορφή. Κατόπιν τα σήματα τροφοδοτούνται στον προ-ενισχυτή και στην κάρτα καταγραφής, όπου λαμβάνει χώρα η ψηφιοποίηση, ενώ μετρώνται οι κύριες παράμετροι της κυματομορφής σε πραγματικό χρόνο.

Η «καρδιά» του αισθητήρα είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που μετατρέπει την πίεση της επιφάνειας σε ηλεκτρικό δυναμικό. Σε επαφή με τον πιεζοκρύσταλλο βρίσκεται το υλικό απόσβεσης που αποτρέπει το συνεχές «κουδούνισμα» του στοιχείου.

Για να αποφευχθεί η φθορά του κ ρυστάλλου υπάρχει πλάκα προστασίας η οποία έρχεται σε επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων κυμαίνεται από μερικές δεκάδες kHz έως περίπου 1 MHz και καθορίζεται από το πάχος και τις μηχανικές ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Οι αισθητήρες μπορεί να

είναι «συντονισμού» ή ευρέως φάσματος.

Η συνολική δραστηριότητα AE (απλά πόσα σήματα καταγράφηκαν) είναι ενδεικτική της έκτασης της βλάβης ή αριθμού ρωγμών και είναι το πιο σημαντικό δεδομένο, αφού σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη και διάδοση βλάβης.

Επιπρόσθετα, το σχήμα της καταγεγραμμένης κυματομορφής προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή του σήματος. Ως εκ τούτου, πολλές παράμετροι χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της κυματομορφής.

Βασικό στοιχείο του πειράματος είναι το «κατώφλι», μία τιμή τάσης που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να ξεκινήσει η καταγραφή. Έτσι αποφεύγεται ο χαμηλού επιπέδου θόρυβος.

Μία παράμετρος που σχετίζεται με την ένταση του φαινομένου είναι το «Εύρος» και η οποία είναι η τάση του υψηλότερου σημείου της κυματομορφής.

Επιπλέον, η ενέργεια λαμβάνει υπόψη το περιεχόμενο ολόκληρης της κυματομορφής. Ο χρόνος μεταξύ της πρώτης υπέρβασης κατωφλίου και του χρόνου της μέγιστης κορυφής ονομάζεται χρόνος ανύψωσης. Παρομοίως, ως «Διάρκεια», ορίζεται ο χρόνος μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας υπέρβασης κατωφλίου.

Το περιεχόμενο συχνότητας είναι επίσης σημαντικό και υπάρχουν διάφορες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αυτής της πληροφορίας. Η απλούστερη είναι η «μέση συχνότητα», η οποία υπολογίζεται στο πεδίο του χρόνου ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των υπερβάσεων κατωφλίου προς τη διάρκεια της κυματομορφής σε kHz. Άλλες παράμετροι είναι η μέγιστη συχνότητα που είναι η συχνότητα με το μεγαλύτερο εύρος, και η κεντρική συχνότητα ή κέντρο βάρους του φάσματος που μετρώνται στο πεδίο συχνοτήτων. Για να μετρηθούν αυτές οι παράμετροι είναι απαραίτητη η συλλογή ολόκληρης της κυματομορφής και να γίνει μετασχηματισμός Fourier σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κάποια καθυστέρηση και πιθανή

απώλεια δεδομένων σε στιγμές υψηλού ρυθμού καταγραφής αλλά από την άλλη διευρύνει τις δυνατότητες ανάλυσης αφού επιτρέπει την ανάλυση του «τανυστή ροπής» για τον χαρακτηρισμό του τύπου θραύσης και φιλτράρισμα θορύβου.

Σκεφτόμενοι το σχήμα της κυματομορφής, παράμετροι όπως ο χρόνος ανύψωσης R, T και η διάρκεια D παρουσιάζουν υψηλές τιμές για πηγές διατμητικού χαρακτήρα, ενώ οι τιμές συχνότητας αυξάνονται για χαρακτήρα εφελκυσμού.

Ο τρόπος που οι πληροφορίες εξάγονται από τις μετρήσεις AE εξαρτάται από τη εφαρμογή, τη διάταξη του πειράματος και την προτίμηση του χρήστη. Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία.

Ορισμένες βασίζονται στη συνολική δραστηριότητα AE σε σχέση με τη φόρτιση. Άλλες χρησιμοποιούν το εύρος και την κατανομή του εύρους των κυματομορφών, ενώ άλλες χρησιμοποιούν τις παραμέτρους κυματομορφών με τη χρήση απλών ή πιο εξελιγμένων εργαλείων ανάλυσης για να αναδειχθεί η κρυμμένη πληροφορία.

Η δραστηριότητα AE είναι στενά συνδεδεμένη με τη διαδικασία ρηγμάτωσης των υλικών. Ως εκ τούτου, ο αριθμός και μόνο των σημάτων AE κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για τον χαρακτηρισμό. Η συνολική AE έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές με σκοπό την παραγωγή συσχετίσεων με το φορτίο και συσσωρευμένη βλάβη όπως μετράται για παράδειγμα από τη μετατόπιση ανοίγματος ρωγμής σε δοκίμια με εγκοπές.

Σε μελέτες χημικής υποβάθμισης, η δραστηριότητα ΑΕ αποδίδεται σε μικρο-ρωγμές και διήθηση του νερού σε πόρους και παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση με τη διαδικασία ενανθράκωσης και τους θερμικούς κύκλους που υποβλήθηκε το υλικό.

Σε άλλες μελέτες η ανάπτυξη επιταχυνόμενης διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος παρακολούθηθηκε με ΑΕ. Τα διάφορα στάδια της διάβρωσης προσδιορίστηκαν από τη συνολική δραστηριότητα, ενώ οι μετρήσεις συμπληρώνονται από τις μεταβολές των παραμέτρων όπως και ανάλυση τανυστή ροπών. Ο αριθμός των σημάτων έχει χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση βλάβης δοκιμών σκυροδέματος με ένα παράδειγμα σχετικά με το μεγάλο σεισμό του 2011 στην περιοχή Tohoku στην Ανατολική Ιαπωνία, όπου η πιθανότητα καταγραφής συμβάντων ΑΕ συσχετίστηκε με το επίπεδο τάσεων σε δοκιμές θλίψης.

Η αύξηση του ποσοστού των καταγεγραμμένων γεγονότων ΑΕ χρησιμοποιήθηκε για να δηλώσει την έναρξη των σοβαρών ρωγμών σε δοκούς σκυροδέματος υπό καμπτικό φορτίο. Ο συνολικός αριθμός υπερβάσεων έδειξε καλή συσχέτιση με την πρόοδο της υδάτωσης και τη σύσταση του νωπού σκυροδέματος, το ποσοστό ινών χάλυβα, και τη δυσθραυστότητα.

Για δομικά υγιές υλικό αυτή η παράμετρος λαμβάνει τιμές κοντά στο μηδέν, λόγω της αμελητέας δραστηριότητας ΑΕ κατά την πτώση του φορτίου. Ωστόσο, όταν συσσωρεύεται σημαντική βλάβη, σοβαρή δραστηριότητα ΑΕ καταγράφεται και κατά την αποφόρτιση αυξάνοντας αυτό το λόγο, ακόμη και σε τιμές υψηλότερες από 0.5 που σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας λαμβάνει χώρα μετά το μέγιστο φορτίο του κύκλου. Το «κατώφλι» μεταξύ μικρής και μεγάλης σοβαρότητας βλάβης ορίζεται σε συνδυασμό με άλλες παρατηρήσεις, όπως οπτική αξιολόγηση και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες. Πιο σημαντική είναι η αυξητική τάση του *Calm ratio* που προειδοποιεί για την ανάπτυξη σοβαρής βλάβης.

Ζωτικής σημασίας για τη δομική συμπεριφορά ενός στοιχείου είναι η μορφολογία της θραύσης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων τα δομικά υλικά είναι σύνθετα, ινώδη, κοκκώδη, φέρουν ράβδους ενίσχυσης ή επιθέματα. Λόγω της πολυπλοκότητας τους, η θραύση τους περιλαμβάνει διαφορετικούς μηχανισμούς. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα από το χώρο των συνθέτων υλικών είναι η αρχική ρηγμάτωση της πολυμερικής μήτρας που ξεκινά σε χαμηλό φορτίο, ενώ τα φαινόμενα που αναπτύσσονται αργότερα περιλαμβάνουν αποκόλληση στρώσεων, ινών ή οπλισμού. Τα τελευταία φαινόμενα περιλαμβάνουν ισχυρή δράση διάτμησης υπό την έννοια ότι οι πλευρές της ρωγμής κινούνται παράλληλα, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση.

Λόγω του ότι τα φαινόμενα αυτά αποχωρίζουν τον οπλισμό από την πιο ευάλωτη μήτρα, θεωρούνται κρίσιμα για την μηχανική συμπεριφορά. Είναι γενικά αποδεκτό ότι αυτά τα φαινόμενα συμβαίνουν σε υψηλό

φορτίο και οδηγούν στην τελική θραύση, ενώ τα εφελκυστικά φαινόμενα παρατηρούνται σε χαμηλό φορτίο, όταν η ακεραιότητα της κατασκευής δεν έχει ακόμα πληγεί καίρια. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο χαρακτηρισμός του μηχανισμού θραύσης (εφελκυσμός-διάτμηση) παρέχει σημαντική πληροφορία για τη δομική ακεραιότητα. Μπορεί να είναι ένα μέρος μιας ολόκληρης διαδικασίας μιας κατασκευής αλλά και μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς υλικών στο εργαστήριο.

Όπως έχει αναφερθεί εφελκυστικά φαινόμενα διεγείρουν υψηλότερες συχνότητες και βραχείες κυματομορφές. Ως εκ τούτου οι παράμετροι λαμβάνουν υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με διατμητικά γεγονότα. Αντίθετα, άλλοι παράμετροι έχουν υψηλότερες τιμές για διάτμηση.

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον από πλευράς ΑΕ λόγω της πολύπλοκης θραύσης τους που επιτρέπει την παρακολούθηση διαφόρων μηχανισμών μέσω αλλαγών στα χαρακτηριστικά ΑΕ. Συγκεκριμένα η ΑΕ μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για αναγνώριση διαδοχικών φάσεων καταπόνησης (ρωγμές στη μήτρα, αποκόλληση στρώσεων, θραύση ινών) και γεωμετρικό εντοπισμό της βλάβης. Ο συνολικός αριθμός γεγονότων συνδέεται με τον αριθμό και τη φύση των αντίστοιχων γεγονότων θραύσης. Πολλές φορές τα σήματα αναλύονται με διαδικασίες αναγνώρισης προτύπων για να αυξηθεί το ποσοστό επιτυχίας του χαρακτηρισμού.

Αντίστοιχες μελέτες σε σύνθετα υπό κόπωση στοχεύουν σε εκτίμηση της υποβάθμισης ως συνάρτηση των κύκλων φόρτισης.

3.2.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ΑΕ

Το παρόν τμήμα επιχειρεί μία σύνοψη της μεθόδου της ΑΕ για το χαρακτηρισμό υλικών.

Η ΑΕ θεωρείται εργαλείο καθολικού ελέγχου αφού με ένα μικρό αριθμό αισθητήρων μπορεί να συλλέγεται πληροφορία από μεγάλο μέρος του όγκου της κατασκευής. Σε αντίθεση, η συγγενής μέθοδος υπερήχων είναι σημειακή μέθοδος αφού συλλέγει πληροφορία μόνο τοπικά σημείο προς σημείο. Εφόσον η τεχνική της ΑΕ χρησιμοποιείται για μη καταστροφική παρακολούθηση θραύσης, εξωτερικό φορτίο είναι απαραίτητο ώστε να υπάρξει κινητικότητα ρωγμών. Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι η ΑΕ δεν είναι επαναλήψιμη διότι κάθε γεγονός θραύσης είναι μοναδικό και αν δεν καταγραφεί, δεν υπάρχει πιθανότητα επανάληψης της μέτρησης (σε αντίθεση με τον υπέρηχο).

Τέλος μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στην αποφυγή θορύβου ειδικά σε περιπτώσεις ελέγχου στο πεδίο, όπου πολλοί αστάθμητοι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν ακουστικά σήματα που αν δεν φιλτραριστούν θα «μολύνουν» τα χρήσιμα δεδομένα (π.χ. αέρας, βροχή, ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος). Κάποια χαρακτηριστικά της μεθόδου ΑΕ σε σύγκριση με άλλες μεθόδους φαίνονται στον πίνακα πιο κάτω:

ΑΕ	ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
Καθολικός έλεγχος	Σημειακός έλεγχος
Πρόσβαση σε συγκεκριμένα σημεία	Πρόσβαση σε όλη την επιφάνεια
Απουσία επανάληψης	Επανάληψη
Απαραίτητη εξωτερική φόρτιση για ανιχνευση ρωγμών	Μη απαραίτητη εξωτερική φόρτιση
Ευαισθησία σε θόρυβο	Ευαισθησία σε θόρυβο

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά Μεθόδου ΑΕ Έναντι Άλλων

Κεφάλαιο 4

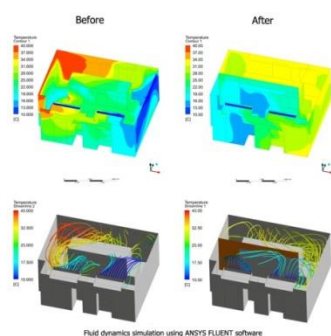
4.1 Συγκεντρωτικό κείμενο

Η παρούσα διπλωματική εργασία, περιέχει τρία κύρια κεφάλαια στα οποία αναλύεται η ιστορία των σύνθετων υλικών. Τι είναι τα σύνθετα υλικά, πως ενισχύονται, τι προσφέρουν αλλά και ποιά τα μειονεκτήματά τους. Επειδή πρόκειται για υλικά που τυγχάνουν επένδυσης, υπάρχουν και οι αστοχίες κατά την επένδυση που αναλύονται στο δεύτερο κεφάλαιο. Οι αστοχίες καθώς και αιτίες πρόκλησής τους, ανιχνεύονται με το λεγόμενο Μη Καταστροφικό Έλεγχο και τις μεθόδους του, που δεν επηρεάζουν το υπό εξέταση υλικό αρνητικά αφού δεν το καταστρέφει ή αλλοιώνει. Αναλόγως του υλικού του τεμαχίου, της ενίσχυσης καθώς και τον τύπο αστοχίας επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος από την γκάμα μεθόδων ανίχνευσης ατελειών που ανήκουν στο ΜΚΕ για την εξέταση και λύση του προβλήματος.

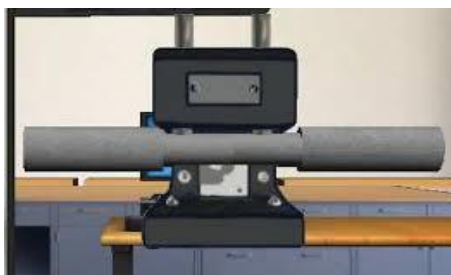
4.2 Σύγκριση αποτελεσματικότητας μεθόδων ανίχνευσης αστοχιών

Εν ελλείψει πειραματικών αποτελεσμάτων για σύγκριση μεθόδων ανίχνευσης αστοχιών, θα γίνει μια σύγκριση βάσει πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μεθόδου που ανήκει στον ΜΚΕ.

Μπορεί να γίνει όμως η βάση για εφαρμογή της σύγκρισης τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον όσο και σε περιβάλλον προσομοίωσης για επιβεβαίωση της λειτουργικότητας κάθε μίας από τις μεθόδους.



Εικόνα 56: Εύρεση και Απεικόνιση Αστοχιών με ΜΚΕ σε Περιβάλλον Προσομοίωσης



Εικόνα 57: Εύρεση και Απεικόνιση Αστοχιών με ΜΚΕ σε Εργαστηριακό Περιβάλλο

Συγκεντρωτική σύγκριση μεθόδων ΜΚΕ:

Κατηγορίες	Εφαρμογές	
Μηχανικές και Οπτικές	Χρώμα Ρωγμές Διαστάσεις Πάχος	Επιφανειακή τραχύτητα Συντελεστής ανάκλασης κ.ά.
Διεισδύουσες ακτινοβολίες	Ρωγμές Διαφοροποίηση στην πυκνότητα Εγκλείσματα Πάχος	Μικροπορώδες Διαχωρισμός κ.ά.
Ηλεκτρομαγνητισμός	Ανισοτροπία Κοιλότητες Τοπικές παραμορφώσεις Σκληρότητα	Θερμική επεξεργασία Κρυσταλλική δομή Συγκέντρωση ιόντων κ.ά.
Υπέρηχοι	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Αποκολλήσεις Πυκνότητα Μέτρο ελαστικότητας	Μηχανική υποβάθμιση Επιφανειακές τάσεις κ.ά.
Υπέρυθρη ακτινοβολία	Έναρξη & διάδοση ρωγμής Θερμική αγωγιμότητα Πάχος Ρωγμές Υγρασία	Διάβρωση Αποκολλήσεις Εγκλείσματα Πορώδες κ.ά.
Χημική ανάλυση	Σύσταση Στοιχειακή ανάλυση Μέγεθος κόκκου Εγκλείσματα	Επιφανειακές ατέλειες Πορώδες Αναγνώριση κραμάτων κ.ά.

Πίνακας 10: Κατηγορίες και Εφαρμογες Χρήσης ΜΚΕ

Πιο συγκεκριμένα,

Μέθοδος ΜΚΕ	Τυπικές ατέλειες που ανιχνεύει	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ραδιογραφία	Κενά, πορώδες, εγκλείσματα, ρωγμές	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολλήσεις, δομικές κατασκευές	Ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες, εφαρμόσιμη για μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Υψηλό κόστος, χαμηλή ευαισθησία σε λεπτές στρωματικές ατέλειες, όπως κλειστές ρωγμές κόπωσης και αποκολλήσεις, πιθανός κίνδυνος για την υγεία
Διεισδυτικά υγρά	Ρωγμές, σχισμές, επικαλύψεις, ραφές στην επιφάνεια	Χύτευση, σφυρηλασία, συγκολλήσεις, εξαρτήματα που υπόκεινται σε κόπωση ή ρηγματώση λόγω καταπόνησης και διάβρωσης	Χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων	Το ελάττωμα πρέπει να είναι ανοικτό σε μια προστιθέ επιφάνεια, το επίπεδο ανιχνευσιμότητας εξαρτάται από τον χειριστή
Δινορεύματα	Ρωγμές, σύνθεση ή θερμική επεξεργασία κράματος, πάχος τοιχώματος, διαστάσεις	Σωληνώσεις, μεταλλικά ελάσματα, διαλογή κράματος, μέτρηση πάχους επικάλυψης	Μέτριο κόστος, αυτοματοποίηση, φορητότητα	Ανιχνεύει ατέλειες που μεταβάλουν την αγωγιμότητα των μετάλλων, μικρό βάθος διεύθυνσης, ευαίσθητη στη γεωμετρία του δοκιμίου

Μέθοδος ΜΚΕ	Τυπικές ατέλειες που ανιχνεύει	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μαγνητικά σωματίδια	Ρωγμές , επικαλύψεις, κενά, πορώδες, εγκλείσματα	Χύτευση, σφυρηλασία, διέλαση	Απλή, χαμηλό κόστος, ανιχνεύει επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες	Εφαρμόσιμη μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, συχνά παρατηρούνται άσχετες ενδείξεις, εξαρτάται από τον χειριστή
Θερμογραφία	Κενά ή αποκολλήσεις σε μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά, θέση ζεστών ή ψυχρών περιοχών σε θερμικά ενεργές δομές	Πολυ-στρωματικές δομές, κυψελοειδείς δομές, ηλεκτρονικά κυκλώματα	Πλήρους πεδίου, σε πραγματικό χρόνο, θερμική απεικόνιση που ερμηνεύεται εύκολα	Δυσκολία ελέγχου της εκπαιδευτικότητας της επιφάνειας, μικρή διακριτική ικανότητα ανάμεσα σε ατέλειες διαφορετικών τύπων
Υπέρηχοι	Ρωγμές, κενά, πορώδες, εγκλείσματα, αποκολλήσεις, έλλειψη συγκόλλησης μεταξύ ανόμοιων υλικών	Σύνθετα υλικά, σφυρηλασία, χύτευση, συγκολλήσεις, σωλήνες	Εξαιρετικό βάθος διείσδυσης, καλή ευαισθησία και ανάλυση, μόνιμο αρχείο των αποτελεσμάτων	Απαιτεί ακουστικό μέσο σύζευξης με το εξάρτημα, χαμηλής ταχύτητας, η ερμηνεία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικός Πίνακας Καταλληλότητας Μεθόδων ΜΚΕ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Low-velocity impact-induced delamination detection by use of the S0 guided wave mode in cross-ply composite plates: A numerical study Khazar Hayat and Sung Kyu Ha.
[Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 1271, Sa 3-dong, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 426-791, Korea].
2. Lamb Wave Based Monitoring of Delamination Growth in Mode I and Mode II Fracture Tests
[Oleksii Y. Karpenko, Mahmoodul Haq, Anton Khomenko, Lalita Udpa, and Satish Udpa].
3. Application of Algorithms for Identifying Structural Damage — Case Studies
4. Detection and Localization of Delaminations in Thin Carbon Fiber Reinforced Composites with the Ultrasonic Polar Scan.
5. Application of SFEM to SHM: Simplified Damage Models.
6. In-service Structural Health Monitoring of a Full-scale Composite Horizontal Tail.
7. Fundamentals and Analysis of Lamb Waves.
8. Wave propagation in inhomogeneous layered media: solution of forward and inverse problems.
9. Long Range Detection of Defects in Composite Plates Using Lamb Waves Generated and Detected by Ultrasonic Phased Array Probes.
[Alban Leleux · Philippe Micheau · Michel Castaings].
10. S. Tsantzalis, P. Karapappas, A. Vavouliotis, P. Tsotra, V. Kostopoulos, K. Friedrich. On the improvement of toughness and fatigue life of FRP with resin doped with micro CNF and PZT particles. Composites Part A Vol.38 (2007) pp.1159-1162.
11. Collister W.D Jr., Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, 5^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλας, 2004.
12. Engineered Material Handbook Composites V-1 ASM International 1987.
13. Ajayan P.M., Schadler L.S., Braun P.V., Nanocomposite Science and Technology, Wiley Editions, 2003.
14. Σημειώσεις μαθήματος Σύνθετων Υλικών, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.

15. Μπέλτσιος Κ., Επιστήμη και Τεχνολογία Σύνθετων Υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
16. Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007.
17. Μανωλάκος Δ., Σημειώσεις Μαθήματος Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2007.
18. J.P. Salvetat et al. Mechanical properties of individual nanotubes and composites.
[Lect. Notes Phys. 677, 439–493 (2006)].
19. Βασ.Δ. Κωνσταντέλλου, Μελέτη του πεδίου των μετατοπίσεων σε άπειρες πλάκες με εσωτερικές ρωγμές. Συνέπειες στη μελέτη της Θραύσης, 1986.
20. Ευ.Γ. Κυριαζή, Μελέτη της Ελαστικής - Απολύτως Πλαστικής Εντατικής και Παραμορφωσιακής Καταστάσεως Ρηγματωμένων Πλακών Σε Συνθήκες Επίπεδης Έντασης, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1989.
21. Ιωάννης Ν. Πρασιανάκης Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ Μη καταστροφικός έλεγχος των υλικών. Η μέθοδος των υπερήχων. Γ Έκδοση Αθήνα 1993.
22. http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Theory-Sources.htm
23. http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.htm
24. www.wnit.gr
25. <http://www.materialslibrary.org.uk/MaterialsLibrary/materials.htm>
26. <https://el.wikipedia.org/wiki>

ΙΣΤΟΤΟΠΙΟΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

27. www.images.google.com