



Πανεπιστήμιο
Ιωαννίνων



Μεταπτυχιακή Διατριβή Ουρανία-Ευτέρπη Φανίτσιου

«Κατασκευή και παρακολούθηση δομικής
ακεραιότητας σύνθετων υλικών με
νανοτροποποιημένη μήτρα και ίνες γυαλιού, με
ικανότητες αυτοδιάγνωσης μέσω διηλεκτρικής
φασματοσκοπίας και ενεργοποίηση αυτοίασης
μέσω τοπικής θέρμανσης »

Ioannina 2021

b



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»

« Κατασκευή και παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας σύνθετων υλικών με νανοτροποποιημένη μήτρα και ίνες γυαλιού, με ικανότητες αυτοδιάγνωσης μέσω διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και ενεργοποίηση αυτοίασης μέσω τοπικής θέρμανσης »

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Ουρανία-Ευτέρπη Φανίτσιου

Επιβλέπων: κ. Αλιβιάδης Παιπέτης

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής κ. Αλιβιάδης Παίπέτης

Καθηγήτρια κ. Νεκταρία-Μαριάνθη Μπάροκουλα

Καθηγητής Λεωνίδας Γεργίδης

Ιωάννινα 2023



UNIVERSITY OF IOANNINA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND
ENGINEERING
POSTGRADUATE PROGRAMME

"Master of Science in Chemistry and Technology of Materials"

M.Sc. THESSIS

«Construction and structural health monitoring of nano reinforced matrix composites, with self-diagnostic capabilities through dielectric spectroscopy and activation of self-healing through local heating»

Ourania-Efterpi Fanitsiou

Advisor: Professor Alkiviadis Paipetis

Ioannina, 2023

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (Μ.Δ.Ε.) εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Μ.Σ.) του Διατμηματικού Προγράμματος Σπουδών στην «Χημεία και Τεχνολογία των Υλικών» των Τμημάτων Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Χημείας και Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Το Δίπλωμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Μ.Σ) απονέμεται από το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (ΦΕΚ 1949/01.06.2018 τ. Β').

Εγκρίθηκε την Τρίτη 6/6/2023 και ώρα 10:00....από την εξεταστική επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

ΒΑΘΜΙΑΔΑ

- 1. Αλκιβιάδης Παιπέτης** , Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων, **Επιβλέπων**
- 2. Νεκταρία-Μαριάνθη Μπάρκουλα** , Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
- 3.Λεωνίδας Γεργίδη** , Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."

Ουρανία- Ευτέρπη Φανίτσιου

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Σύνθετων και Ευφυών Υλικών του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του τμήματος Δρ. Αλκιβιάδη Παϊπέτη για την πολύτιμη καθοδήγηση, καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας ερευνητικής εργασίας διπλώματος.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον διδάκτορα-ερευνητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών Γεώργιο Φωτεινίδη για την όλη συνεργασία μας, την στήριξη του και τις κρίσιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω την μεταδιδακτορικό ερευνήτρια του Εργαστηρίου Σύνθετων και Ευφυών Υλικών, κα. Κυριακή Τσίρκα, την διδάκτορα κα. Κοσαρλη Μαρία , υποψήφιο διδάκτορα κ. Λάμπρο Κουτσοτόλη, και όλους τους προπτυχιακούς φοιτητές για τη σημαντική βοήθεια και τη στήριξη που μου προσέφεραν κατά την παραμονή μου στο χώρο του εργαστηρίου.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στον συζηγό μου για την αδιάκοπη υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των έως τώρα σπουδών μου ,γιατί χωρίς αυτήν δεν θα τα είχα καταφέρει.

Περίληψη

Οι ιδιότητες των νανοενισχυμένων σύνθετων πολυστρωματικών υλικών, αποτελούν έναν εξαιρετικά ενδιαφέρον τομέα στην τεχνολογία, εξαιτίας των δυνατοτήτων που προσφέρουν για την παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας του υλικού και τον εντοπισμό τοπικών παραμορφώσεων και βλαβών κατά την διάρκεια δημιουργίας ανθεκτικότερων υλικών.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, αποτελείται από την κατασκευή σύνθετων υλικών νανοενισχυμένης εποξειδικής μήτρας με ίνες γυαλιού εναλλασσόμενες με ίνες άνθρακα και ενσωματωμένο σύστημα αυτοίασης για την μέτρηση της ηλεκτρικής εμπέδησης, με τελικό στάδιο την κατασκευή ενός πολυλειτουργικού υλικού με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες που έχει ικανότητες ίασης σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 70° C.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά πραγματοποιήθηκε συστηματική μελέτη και μέτρηση ηλεκτρικής εμπέδησης πολυστρωματικών πλακών ILSS και Mode II, χωρίς και με την εισαγωγή συστήματος αυτοίασης για την μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων υποβάθμισης ή αναβάθμισης του υλικού. Οι διαστάσεις αποτελούσαν πρότυπο για την εφαρμογή στις πολυστρωματικές πλάκες ινών γυαλιού με αγωγίμους δρόμους άνθρακα. Τέλος με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν πλάκες 10x15 και συγκρίθηκε ο βαθμός ίασης μηχανικά με την πάροδο του χρόνου και ο τρόπος ίασης με θέρμανση μέσω πρέσας, είτε μέσω τοπικής θέρμανσης.

Abstract

The multifunctional properties of nano-reinforced composite laminates are an extremely interesting field in composite materials technology. More specifically, my research is focused on epoxy matrix reinforced composites materials. Among several SHM techniques, the ones related with the electrical and thermal response to damage are capable of providing information about the structural degradation of the material with high sensitivity and precision. The lamination sequence is a) carbon and glass fabrics , and b) glass fabrics with nanotubes spraying , in combination with a ternary epoxy matrix where the reinforcement of matrix is homogenously dispersed Carbon Nanotube and Carbon Black. An electric field will be applied between the established local capacitors using Impedance Spectroscopy technique where the layout of the laminas will enable the damage assessment after medium velocity impact with 3D mapping that reveal useful information about the structural integrity of the composite. The aim of this master is the conversion of a conventional composite into a multifunctional material to provide crucial information while with heating will guide to healing the damages after the mechanical tests while the integration of self-healing capabilities will be studied in order to achieve the manufacturing of a smart composite with wide range of functionalities.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°.Σύνθετα υλικά.....	1
1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά.....	1
1.2 Σύνθετα υλικά συνεχών ινών	1
1.2.1 Ίνες άνθρακα	3
1.2.2 Ίνες γυαλιού	4
1.3 Εποξειδικές Ρητίνες	5
1.4 Νανοσύνθετα Τροποποιημένης Μήτρας	6
1.4.1 Νανοσωλήνες Άνθρακα	6
1.4.2 Διασπορά νανοσωλήνων άνθρακα σε σύνθετο υλικό	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°. Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας (SHM)	8
2.1 Πολύλειτουργικά-ευφύη νανοσύνθετα υλικά.....	8
2.2 Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας (SHM)	9
2.2.1 Ηλεκτρική αυτό-διάγνωση στα αγωγιμα σύνθετα.....	10
2.2.2 Σύνθετα με Εκτυπωμένες Αγωγίμες Διαδρομές.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°.Μηχανικές δομικές σύνθετων υλικών.....	12
3.1 Εφαρμογές μηχανικών δοκιμών.....	12
3.2 Δοκιμή κάμψης (Bending test).....	13
3.3 Δοκιμή κρούσης (Impact velocity test)	15
3.3.1 Κρούσεις χαμηλής ταχύτητας. (low velocity impact test)	16
3.3.2 Κρούσεις υψηλής ταχύτητας. (high velocity impact test)	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°.Διηλεκτρική φασματοσκοπία	18
4.1 Εισαγωγή στην διηλεκτρική φασματοσκοπία	18
4.2 Διηλεκτρική Φασματοσκοπία στα σύνθετα υλικά	19
4.2.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι εναλλασσόμενου ρεύματος.	21
4.2.2 Ιδιότητες Διηλεκτρικής Φασματοσκοπίας	22
4.3 Εφαρμογές της Διηλεκτρικής Φασματοσκοπίας.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°.Αυτοιάσιμα Σύνθετα Υλικά.....	26
5.1 Αστοχία υλικών	26

5.2 Τεχνικές Αυτοίασης	28
5.2.1 Τεχνικές ενθυλάκωσης μικροκάψουλων.....	29
5.3 Συστήματα αυτό-ιάσιμων υλικών με κάψουλες.....	31
5.3.1 Σχεδιασμός συστημάτων αυτό-ίασης με ενσωματωμένες μικρό-κάψουλες	31
Κεφάλαιο 6°. Θερμογραφία Υπερύθρου	34
6.1 Θερμογραφία υπέρυθρου	34
6.1.1 Τεχνικές θερμογραφικού ελέγχου	35
6.1.2 Εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας (IR)	38
6.2 Φαινόμενο θέρμανσης Joule	40
6.2.1 Φαινόμενο θέρμανσης μέσω ηλεκτρικής αντίστασης σε ιάσιμα υλικά.....	41
6.2.2 Φαινόμενο θέρμανσης σε πολυλειτουργικά υλικά αυτοδιάγνωσης	44
Κεφάλαιο 7°.Πειραματική Πορεία	46
7.1 Πειραματικός εξοπλισμός-Υλικά.....	47
7.1.1 Δημιουργία νανοενισχυμένης ρητίνης και σύνθεση μικρό-καψουλών	47
7.1.2 Κατασκευή σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού.....	49
7.1.3. Μέτρηση διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και εικόνες θερμογραφίας υπέρυθρου.....	55
Κεφάλαιο 8°.Ανάλυση-Αποτελέσματα.....	56
8.1 Εκτίμηση της ικανότητας αυτό-ίασης μέσω μηχανικών δοκιμών.....	56
8.2 Αποτελέσματα διηλεκτρικής φασματοσκοπίας.....	64
8.3 Ενεργητική παλμική θερμογραφία με εικόνες μέσω θερμοκάμερας.....	87
Κεφάλαιο 9°.Συμπεράσματα.....	90
Βιβλιογραφία	91

Εισαγωγή

Η διπλωματική χωρίζεται σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό.

Στο 1^ο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή της έννοιας των σύνθετων υλικών και της εφαρμογής τους σε βιομηχανική κλίμακα.

Στο 2^ο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνική της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας (SHM), όπου αναλύονται οι στόχοι και τα οφέλη της αυτό-διάγνωσης, καθώς παρουσιάζεται ο τρόπος παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας σύνθετων υλικών μέσω εφαρμογής ηλεκτρικών μεθόδων.

Στο 3^ο κεφάλαιο, αναλύονται κάποιες από τις τεχνικές αντοχής των σύνθετων υλικών όπως η διαστρωματική αντοχή σε χαμηλές ταχύτητες, η αντοχή σε εγκάρσιο εφελκυσμό και η αντοχή σε κάμψη.

Στο 4^ο κεφάλαιο, αναλύεται η θεωρία και οι αρχές της διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και περιγράφονται τα αποτελέσματα που μας δίνει η διηλεκτρική φασματοσκοπική ανάλυση μέσω ισοδύναμων ηλεκτρικών μοντέλων.

Στο 5^ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα αυτοϊάσιμα υλικά και κυριότερα στην μέθοδο κατασκευής υλικών με δυνατότητες αυτοίασης με εισαγωγή μικροκάψουλων στην πολυμερική μήτρα.

Στο 6^ο κεφάλαιο, αναλύεται ο θερμογραφικός έλεγχος μέσω θερμογραφίας υπερύθρου (IR) και ο έλεγχος της θερμικής απόκρισης ενός υλικού με ικανότητα αυτοίασης, μέσω φαινομένου θέρμανσης Joule.

Στο 7^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται όλη η πειραματική διαδικασία αναλυτικά. Περιγράφονται τα υλικά και τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρασκευή των δοκιμίων και των μικροκάψουλων και των ελέγχων που διενεργήθηκαν για τις δοκιμές κρούσεων και των ηλεκτρικών μετρήσεων στα διάφορα δοκίμια.

Και στο 8^ο και 9^ο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων. Παρουσιάζονται διαγράμματα διηλεκτρικής φασματοσκοπίας, αποτελέσματα, μηχανικών αποκρίσεων δοκιμίων μέσω χαρτογράφησης, και εικόνες από την θερμογραφικό έλεγχο μέσω θερμογραφίας υπερύθρου με χρήση θερμοκάμερας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°.Σύνθετα υλικά

1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Τα τελευταία χρόνια, τα σύνθετα υλικά (composite materials) αποκτούν περισσότερες εφαρμογές στην βιομηχανία. Πρόκειται για υλικά με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το μικρό βάρος τους, αλλά και ικανοποιητική αντοχή στη διάβρωση, υψηλή αντοχή και καλή συμπεριφορά στην κόπωση και στην διάδοση ρωγμών. Τα σύνθετα υλικά είναι δομικά υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά συνδυασμένα. Το ένα συστατικό, ονομάζεται ενισχυτική φάση (reinforcing) και προσδίδει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το πρώτο συστατικό είναι ενσωματωμένο στο δεύτερο συστατικό, που ονομάζεται μήτρα (matrix) η οποία είναι χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή της στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (1). Το υλικό της ενισχυτικής φάσης, είναι είτε στην μορφή ίνων, είτε στην μορφή νιφάδων και σωματιδίων ενώ το υλικό της μήτρας είναι συνεχές.

Αν και το κόστος των σύνθετων υλικών μπορεί να είναι υψηλότερο, η ελάττωση του βάρους και η μείωση του κόστους καυσίμου που αυτή συνεπάγεται, κάνουν τη χρήση τους επικερδή και αυτό αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα κίνητρα για τη χρήση σύνθετων υλικών, αν αναλογιστεί κανείς ότι τα καύσιμα συνεισφέρουν σημαντικά στο λειτουργικό κόστος των εμπορικών αερογραμμών (2), (3).

Φυσικά και τα σύνθετα υλικά, παρουσιάζουν και μερικά μειονεκτήματα όπως υψηλά επίπεδα ερπυσμού, μικρή αντίσταση μετά από μηχανική φθορά και είναι ευαίσθητα σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον) (4), καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος. Αυτά τα μειονεκτήματα αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και την συνεχή εξέλιξη των τεχνικών ελέγχων μηχανικών δυνατοτήτων από τους επιστήμονες. (5)

1.2 Σύνθετα υλικά συνεχών ινών

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών είναι ανάλογα με το υλικό του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- Ινώδη σύνθετα (fibre composites), με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Πολυστρωματικά σύνθετα (laminated composites), με επάλληλες στρώσεις υλικών
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites), με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας
- Συνδυασμός των παραπάνω.

Επίσης, ταξινομούνται και με βάση το υλικό της μήτρας στο οποίο ενσωματώνεται η ενισχυτική του φάση και ανήκει σε κάποια από τις εξής κατηγορίες (Σχήμα 1.2).



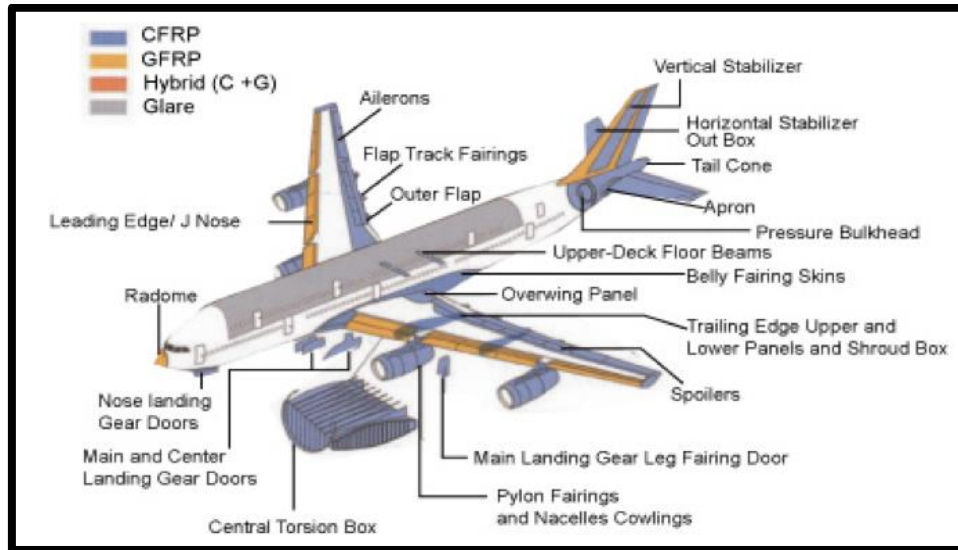
Σχήμα 1.1 Κατηγορίες Σύνθετων υλικών (1)

Τα σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες (Fiber Reinforced Polymers, FRPs) χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή έναντι κόπωσης και διάβρωσης. Η αντοχή και η δυσκαμψία τους είναι συγκρίσιμες με εκείνες των χαλύβων ενώ η πυκνότητα τους μικρότερη από αυτή του αλουμινίου. Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών επιτυγχάνονται προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή αυξημένη αντοχή σε συγκεκριμένες διευθύνσεις (tailored materials). Αυτό οφείλεται στο ότι με την ενίσχυση συγκεκριμένων μόνο διευθύνσεων της κατασκευής, οι οποίες παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των εξωτερικών φορτίων δίδεται διαφορετική και καλύτερη ευελιξία στα αποτελέσματα. Η καλύτερη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών γίνεται όταν αυτές είναι τοποθετημένες παράλληλα στη διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου (6)

Ο προσανατολισμός των ινών είναι πολύ σημαντικός στον τρόπο που θα δημιουργηθεί το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό. Αν είναι προσανατολισμένες σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις, το υλικό παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα και αντοχή όταν η κατεύθυνση είναι διαφορετικά προσανατολισμένη σε κάθε στρώμα. Οι

ίνες, π.χ. ανθρακονήματα και ίνες γυαλιού, είναι γενικά ανισοτροπικές, αφού έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό.

Οι λειτουργίες του ινώδη σύνθετου περιλαμβάνουν το «δέσιμο» των ινών μαζί, καθώς μπορούν να αναλάβουν το φορτίο και αυτών που αστοχούν, Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού που επηρεάζονται από το μητρικό υλικό είναι η αντοχή, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, και η αντοχή στην επαναλαμβανόμενη χρήση. Τέλος, παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιφάνεια διεπαφής με το μητρικό υλικό, οπότε η φόρτιση μεταφέρεται πιο εύκολα σε αυτές από τη μήτρα. (6) (7)



Σχήμα 1.2 Σύνθετα υλικά στα αεροσκάφη:

“CFRP = ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, GFRP = GFRP - Ενισχυμένο πολυμερές ινών γυαλιού ” (2)

Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων τα ινώδη σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό των μηχανικών κατασκευών από την αεροπορία, τη βιομηχανία οχημάτων και τη βιομηχανία διαστήματος μέχρι και για υποδομές κτηρίων και δρόμων.

1.2.1 Ίνες άνθρακα

Μια πρωτόγονη μορφή ινών άνθρακα με φτωχές ιδιότητες παρήχθη για πρώτη φορά κατά τον 19ο αιώνα δια εξανθρακώσεως φυτικών νημάτων (π.χ. κυτταρίνη) ή ινιδίων (π.χ. ινίδια μπαμπού) και βρήκε εφαρμογή ως νήμα ηλεκτρικών λαμπτήρων πυρακτώσεως. Οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) έχουν μικρό βάρος και είναι ισχυρές, με εξαιρετική χημική αντοχή. Επικρατούν στο χώρο της αεροδιαστημικής και οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από το ακατέργαστο υλικό και την πορεία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Μια κατηγορία των ινών άνθρακα είναι οι polyacrylonitrile (PAN) οι οποίες έχουν υψηλή απόδοση στις αεροδιαστημικές

εφαρμογές γιατί μπορούν να κατασκευάζονται με ποικίλες τιμές δυσκαμψίας και αντοχής και κατασκευαστικά είναι δυνατόν να δημιουργηθεί οποιοδήποτε συνδυασμός. (8)

Οι ίνες άνθρακα οι οποίες είναι πιο άκαμπτες από τις ίνες γυαλιού, παρέχουν καλύτερα χαρακτηριστικά κόπωσης στο σύνθετο υλικό μειώνοντας την παραμόρφωση στο σύνθετο για δεδομένο φορτίο. Επίσης, το φαινόμενο της στατικής κόπωσης παρατηρείται σπανιότερα στις ίνες άνθρακα. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που γίνεται χρήση μικρότερου λόγου τάσεων από ότι στο γυαλί στο σχεδιασμό των δοκιμίων, όπου, υφίστανται πίεση υπό μόνιμη φόρτιση.

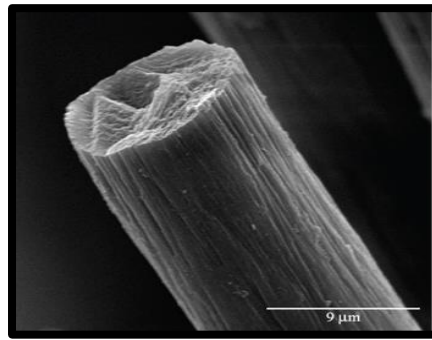
Οι ίνες αυτές είναι καλοί αγωγοί ρεύματος, γι' αυτό και προκαλείται διάβρωση (τύπου γαλβανισμού) εαν σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα έρθουν σε επαφή με μέταλλα. Για αυτό και προσθέτοντας υλικό με ίνες γυαλιού γυρω το υλικό μονώνεται. Οι ίνες άνθρακα είναι ελαφρύτερες και πιο άκαμπτες από τις ίνες γυαλιού, αλλά δεν έχουν το οικονομικό πλεονέκτημα όταν τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για να υποκαταστήσουν ένα συμβατικό υλικό όπως ο χάλυβας στις κατασκευές όπου το βάρος δεν είναι κρίσιμο. (9)

1.2.2 Ίνες γυαλιού

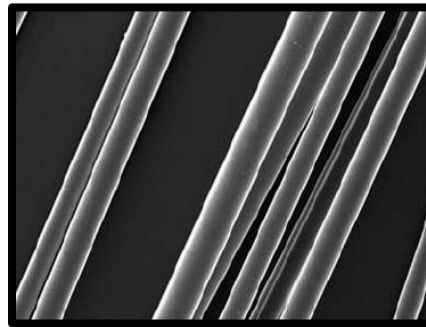
Οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού, όπως σκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επίσης, είναι εύκαμπτες, ελαφρές και σχετικά οικονομικές. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τις ίνες γυαλιού τον πλέον συνήθη τύπο ινών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μικρού κόστους. Η υψηλή αντοχή των ινών γυαλιού αποδίδεται στον μικρό αριθμό και το μικρό μέγεθος των ατελειών στην επιφάνειά τους. Όλες οι ίνες γυαλιού έχουν παρόμοιες δυσκαμψίες αλλά διαφορετικές τιμές αντοχής και διαφορετική αντοχή σε περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Οι ίνες E-glass χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν απαιτήσεις για υψηλή εφελκυστική τάση και καλή χημική αντοχή. Οι ίνες E-glass είναι το είδος ενίσχυσης που προτιμάται επειδή συνδυάζει μηχανική απόδοση, αντοχή στη διάβρωση και μικρό κόστος (περίπου \$16/Kg). Οι ίνες S-glass έχουν υψηλότερη αντοχή, αλλά είναι περιορισμένης εφαρμογής επειδή κοστίζουν 3 έως 4 φορές περισσότερο από τις ίνες E-glass. Για το λόγο αυτό, ορισμένες ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) χαμηλού κόστους θεωρούνται εναλλακτική λύση στις ίνες S-glass και S-2-glass. Οι ίνες D-glass (D=dielectric=διηλεκτρικό) χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές, όπως για ενισχύσεις καλωδίων σε υψηλής τάσης μονωτικά και κεραμικά (10)

Η μείωση της αντοχής των ινών στο σύνθετο υλικό οφείλεται μεταξύ άλλων και σε παραμένουσες τάσεις καθώς και σε δευτερογενή φορτία (διατμηματικά και εγκάρσια στην διεύθυνση των ινών). Η εφελκυστική αντοχή των ινών γυαλιού, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για ένα εύρος τιμών θερμοκρασιών .



α.



β.

Σχήμα 1.3 Μικρογραφία sem α) ίνας άνθρακα. Β) E-glass (11) (12)

1.3 Εποξειδικές Ρητίνες

Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται σε διάφορα ενισχυτικά μέσα, όπως γυαλί, γραφίτη, αραμιδικές ίνες, βαμβάκι και φύλλα μετάλλων. Οι ρητίνες που βασίζονται στις αμίνες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ενισχυτικές ίνες άνθρακα η γυαλιού στην κατασκευή δομικών σύνθετων υλικών στην αεροναυπηγική. Αυτά τα σύνθετα υλικά πλεονεκτούν έναντι των μετάλλων διότι είναι ελαφρά και ανθεκτικά στη διάβρωση. Έχουν εξαιρετική ευκαμψία, αντοχή στην κρούση και την τριβή. Αντέχουν πολλά βιομηχανικά χημικά και διαβρωτικά υλικά. Συμπεριλαμβανομένων άλλων πλεονεκτημάτων, οι εποξειδικές ρητίνες έχουν μεγάλη αντοχή στην υγρασία και στους διαλύτες, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και μακρά διάρκεια ζωής. (13)

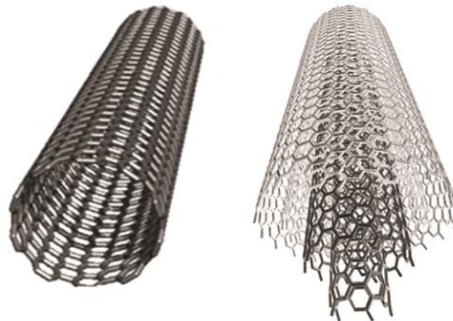
Οι εποξειδικές ρητίνες σκληραίνονται με την προσθήκη ενός παράγοντα σκλήρυνσης, που κοινώς αποκαλείται σκληρυντής. Αυτό οφείλεται στις υδροξυλομάδες της ρητίνης που υπάρχουν πριν από την σκλήρυνση και σε αυτές που δημιουργούνται με την σκλήρυνση. Σε αντίθεση με πολυεστέρα ή βινυλεστέρα ρητίνες, όπου η ρητίνη η οποία βρίσκεται συνήθως σε δοχεία καταλύεται με προσθήκη ενός καταλύτη, οι εποξικές ρητίνες απαιτούν συνήθως την προσθήκη του παράγοντα σκλήρυνσης σε μία πολύ υψηλότερη αναλογία ρητίνης προς σκληρυντικό, ή 2:1. Ο πιο κοινός τύπος του παράγοντα σκλήρυνσης είναι με βάση την αμίνη. Για τη δημιουργία διασταυρούμενης δομής ως σκληρυντές, χρησιμοποιούνται πολυαμίνες

από τις οποίες οι πιο συνηθισμένες είναι η διαιθυλενοτριαμίνη και η τριαιθυλενοτετραμίνη. (14)

1.4 Νανοσύνθετα Τροποποιημένης Μήτρας

1.4.1 Νανοσωλήνες Άνθρακα

Οι νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από φύλλα γραφενίου τοποθετημένα σε κυλινδρική μορφή που είναι τυλιγμένοι είτε σε δομή armchair ή zig zag. Το γραφένιο είναι ημιαγωγός. Οι ιδιότητες τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την μορφολογία, το μέγεθος και την διάμετρο τους. Οι χημικοί δεσμοί sp^2 του άνθρακα είναι πιο ισχυροί και από τους sp^3 που βρίσκονται στο διαμάντι. Αυτό τους προσδίδει εξαιρετικά υψηλές μηχανικές ιδιότητες. (5)



Σχήμα 1.4 A. single-wall nanotube B. multi-wall nanotube (15)

Ο νανοσωλήνας άνθρακα μπορεί να αποτελείται από ένα φύλλο γραφενίου κυλινδρικά τυλιγμένο, και μπορεί να είναι μονού τοιχώματος (MWCNT-multi wall CNTs), ή πολλαπλών τοιχωμάτων γραφενίου τυλιγμένα ομόκεντρα (SWCNT-single wall CNTs). Οι MWCNTs έχουν εξαιρετικά μικρή διάμετρο (0,8-2,0 nm) και χαμηλή πυκνότητα (περίπου 1.3-1.5 gcm^{-2}) και έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας 0.3-1.47 GPa, εφελκυστική αντοχή 10-52 GPa) και ηλεκτρικές. (16) Οι MWCNT παρουσιάζουν επίσης, αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής. Στα αρνητικά τους περιλαμβάνονται ότι είναι πιο ακριβοί όσον αφορά την παρασκευή τους και πιο επιρρεπείς στο να σχηματίσουν ρωγμές σε σχέση με τους MWCTNs (17)

Οι MWCNTs αποτελούνται από δύο ή περισσότερες στρώσεις γραφενίου, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους περίπου 0,32 nm. Η διάμετρος τους είναι μεγαλύτερη από τους SWCNTs (5-20 nm- έως εκατοντάδες nm) και η πυκνότητα τους είναι περίπου ίση με 1.8-2.0 gcm^{-2} .

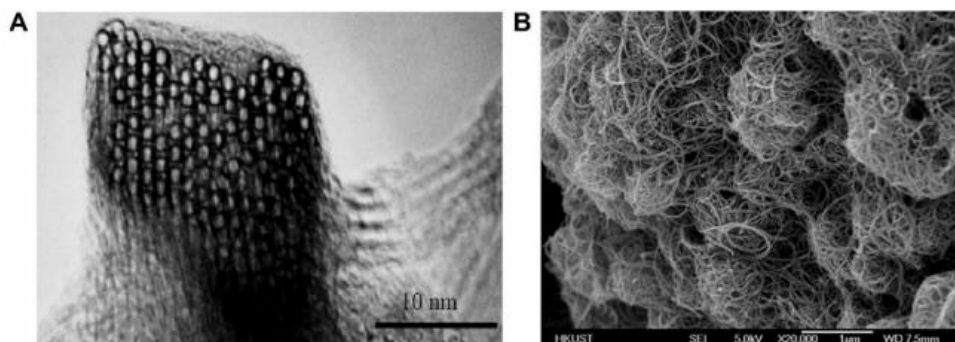
1.4.2 Διασπορά νανοσωλήνων άνθρακα σε σύνθετο υλικό

Την τελευταία δεκαετία πολλές έρευνες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη σύνθετων υλικών, τα οποία ονομάζονται ιεραρχικά (υβριδικά ή πολλαπλών κλιμάκων ή νανοενισχυμένα σύνθετα). Την πρωτογενή ενίσχυση της ίνας στο σύνθετο υλικό ακολουθεί και μια δευτερογενής ενίσχυση, που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα. Η πρωτογενής ενίσχυση είναι της τάξεως των μm , ενώ η δευτερογενής ενίσχυση είναι της τάξεως nm .

Τα σύνθετα με ενίσχυση νανοσωλήνων άνθρακα είναι σύνθετα με βελτιωμένες μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες και προτιμώνται στην βιομηχανία λόγω του χαμηλού βάρους και της αντίστασης στη διάβρωση. (19) Η δημιουργία ενός νανοενισχυμένου σύνθετου υλικού γίνεται με διασπορά νανο υλικών άνθρακα (Carbon NanoMaterials, CNMs) όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon NanoTubes, CNTs), και το γραφένιο καθώς και πρόσθετα στη μικρό-κλίμακα όπως ο άμορφος άνθρακας (Carbon Black, CB) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικό υλικό μήτρας. Το χαρακτηριστικό των CNTs που τα κάνει τόσο χρήσιμα, είναι ο λόγος του μήκους τους προς τη διάμετρο τους. Έχουν μεγάλο μήκος και μικρή διάμετρο.

Ο λόγος αυτός είναι σημαντικός γιατί σχηματίζεται αγωγίμο δίκτυο και αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, χωρίς να αυξάνουν το βάρος τους (20) (21). Μια πολυμερική μήτρα συμπεριφέρεται ως μονωτής και εμφανίζει μηδενική αγωγιμότητα. Με τη διασπορά αγωγίμης ενίσχυσης και τον εμποτισμό νανοσωλήνων άνθρακα και carbon black στην εποξειδική ρητίνη το υλικό γίνεται αρκετά αγωγίμο. (8) (22) Η αγωγιμότητα των σύνθετων, εξαρτάται από το ποσοστό των νανοσωλήνων

Με την εναπόθεση νανοσωλήνων η αγωγιμότητα του υλικού αρχίζει να αυξάνεται. Οι νανοσωλήνες, που είναι διασκορπισμένοι στην μήτρα δημιουργούν μία σύνδεση προσδίδοντας τοπική ακαμψία στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας και ακουμπούν μεταξύ τους σχηματίζοντας έτσι ένα συνεχές δίκτυο μέσα από το οποίο επιτυγχάνεται η μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου. Αυτή η μετάβαση από μονωτή σε αγωγό, επιτυγχάνεται πάνω από ένα κρίσιμο ποσοστό προσθήκης το οποίο ονομάζεται κατώφλι διήθησης (percolation threshold). (23), (24), (25)



Σχήμα 1.5 Φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο TEM νανοσωλήνων άνθρακα.

A. Singlewall nanotube, B. Multiwall nanotube. (26)

Η συγκέντρωση για ενίσχυση με ναοσωλήνες άνθρακα, ναοϊνες άνθρακα και γραφένιο είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη του απαιτείται για σωματίδια μεγαλύτερης κλίμακας, όπως είναι ο άμορφος άνθρακας. Αυτό συμβαίνει διότι ο λόγος διαστάσεων τους πολύ μεγαλύτερος. Για μικρό κλάσμα ως προς την διάμετρό τους, οι ηλεκτρικές ιδιότητες εξαρτώνται από τον βαθμό διασποράς και τον λόγο διαστάσεων του ναοπρόσθετου, ενώ για μεγάλα κλάσματα όγκου εξαρτώνται κυρίως από τη συγκέντρωσή τους. Το μικρό μέγεθος των ναοπρόσθετων τους επιτρέπουν να διεισδύουν στις περιοχές μεταξύ των ινών και να σχηματίζουν ηλεκτρικά δίκτυα διήθησης, δίχως να επηρεάζεται η δομή του σύνθετου υλικού (27) (28)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°. Παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας (SHM)

2.1 Πολύλειτουργικά-ευφύη ναοσύνθετα υλικά

Ένα υλικό ή μια κατασκευή καλούνται ευφυή, όταν περιλαμβάνουν αισθητήρες η λειτουργούν τα ίδια σαν αισθητήρες και παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Τα πολυστρωματικά πολύλειτουργικά- ευφυή υλικά , προσφέρουν την δυνατότητα για την εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών, όπως την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, τον εντοπισμό παραμορφώσεων ή βλαβών, την δυνατότητα αυτοίασης σε περίπτωση βλάβης και τον έλεγχο της θερμοκρασίας. (29) (30) (31) (32).

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των πολύλειτουργικών-ευφυών υλικών είναι η ανάπτυξη των λειτουργιών της αίσθησης που τα κάνει να λειτουργούν σαν αισθητήρες. Για αυτό, ο εμποτισμός των ναοσωλήνων άνθρακα στην ρητίνη κατά την δημιουργία σύνθετου, έχει καταφέρει να αναπτύξει ένα τέτοιο σύνθετο, με λειτουργίες αισθητήρα και ικανότητες αυτοδιάγνωσης , όπου καταγράφεται η ανάπτυξη της βλάβης που είναι πολύ σημαντικό για το σκοπό που προορίζεται. (33)

Όταν ένας αισθητήρας αποτελεί τμήμα την δομικής κατάστασης ενός υλικού, τότε το σύστημα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας έχει την δυνατότητα αυτό-διάγνωσης. Οι έξυπνοι αισθητήρες και τα έξυπνα υλικά που εγκαθίστανται σε μια δομή για παρακολούθηση της δομικής της ακεραιότητας είναι εξωτερικά ως προς αυτό συστήματα, ενώ οι αισθητήρες αυτό-διάγνωσης είναι τμήμα του υλικού

Η αυτό-διάγνωση είναι παρόμοια με εκείνη της αυτό-ίασης, όπου το υλικό έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται σ προσπαθώντας να διορθώσει τυχόν βλάβες. Τα συστήματα αυτό-διάγνωσης πολύλειτουργικών μπορούν να συνδυαστούν με υλικά που διαθέτουν την ικανότητα αυτοίασης και με θερμικώς ενεργοποιούμενα αυτό-ίασιμα υλικά και αυτό είναι που διαπραγματεύεται αυτή η διπλωματική.

Για την επίτευξη της δημιουργίας τους, αναπτύσσεται ξεχωριστά κάθε λειτουργία του και στην συνέχεια, οι βελτιστοποιημένες ιδιότητες του, ενσωματώνονται στο τελικό σύνθετο ώστε να μελετηθεί η επίδραση της εισαγωγής ενός συστήματος ίασης και η ικανότητα άυξης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων.

2.2 Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας (SHM)

Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα υλικά (CFRP), έχουν ιδιότητες υψηλής ειδικής αντοχής και δυσκαμψίας, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ελαφρές κατασκευές (34) (35) (36). Όμως οι κατασκευές αυτές, είναι ευάλωτες σε αποκόλληση κάτω από διάφορες συνθήκες πρόσκρουσης ή κυκλικής φόρτωσης (37). Η αστοχία αυτή, πρέπει να ανιχνευθεί σε πρώιμο στάδιο, επειδή οι αρχικές ρωγμές μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφική αποτυχία σύνθετων κατασκευών. (31)

Το κόστος συντήρησης και επισκευής μια κατασκευής, με το πέρασμα του χρόνου και τους εξωγενείς παράγοντες του περιβάλλοντος που αλλοιώνουν την ποιότητα της και ο συνεχόμενος έλεγχος, αποτελεί ένα πρόβλημα και ένα μεγάλο μέρος των εξόδων των βιομηχανιών. Για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των κατασκευών γίνονται συνεχόμενοι έλεγχοι, όπως μη καταστρεπτικές μέθοδοι (Non Destructive Techniques) και παίρνουμε πληροφορίες για τη κατάσταση τους.

Ωστόσο, καμία από τις μεθόδους αυτές δεν δίνει πλήρη εικόνα της βλάβης σε συνεχή παρακολούθηση, ώστε να μας παρέχει μόνιμα πληροφορίες για τη δομική κατάσταση μιας κατασκευής. (30) (38) (39). Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές παρακολούθησης δοκιμής ακεραιότητας (SHM), οι οποίες μπορούν να ανιχνεύσουν αποκόλληση ή θραύση ινών, για την πρόληψη ξαφνικής αποτυχίας των σύνθετων υλικών κατά την διάρκεια της χρήσης της σε πραγματικό χρόνο. (40).

Το SHM περιλαμβάνει την παρατήρηση ενός υλικού που αποτελείται από ένα δίκτυο αισθητήρων, που έχουν ενσωματωθεί στη κατασκευή, όπου, οι πληροφορίες που λαμβάνονται επεξεργάζονται ώστε να προσδιοριστεί η δομική του κατάσταση. (41) (42) Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, με την οποία στο σύστημα καταγράφεται η συμπεριφορά της κατασκευής, έχει την ικανότητα ανίχνευσης βλαβών, είναι μια τεχνική με ελάχιστο κόστος και δίνει την δυνατότητα εντοπισμών πιθανών σημείων εμφάνισης βλάβης (34) (43) (44) Βλάβη είναι η υποβάθμιση του υλικού, που μπορεί να παρουσιαστεί είτε στις συνδέσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων του, είτε στην ίδια την κατασκευή.

Το να επιτευχθεί η πρόβλεψη των βλαβών και η έγκαιρη ενημέρωση για την αποφυγή τους είναι το πιο δύσκολο μέρος στην δημιουργία των αισθητήρων του υλικού. Για αυτό το λόγο συνεχώς αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες, και τεχνικές SHM καθίστανται όλο και ικανότερες στην ανίχνευση και αξιολόγηση βλαβών. Στις μεθόδους αυτές, χρησιμοποιούνται πολυλειτουργικά ευφυή υλικά.

Γενικά, η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας είναι ένας νέος και βελτιωμένος τρόπος μη καταστρεπτικής αξιολόγησης (32) (45) (42). Με τις νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται, μπορεί να προσφέρει το ιστορικό της δομικής κατάστασης μιας κατασκευής, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την πρόβλεψη μελλοντικών βλαβών. (46) (45) (47). Η διαδικασία SHM περιλαμβάνει :

- Αναγνώριση της βλάβης σε πρώτο στάδιο
- Εντοπισμός μέγεθος της βλάβης μέσω αισθητήρων
- Εκτίμηση της εναπομένουσας ζωής της κατασκευής (38) (48)

Στην συνέχεια, ανιχνεύονται οι κρίσιμες συνθήκες περιβαλλοντικής φόρτισης και δίνεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης της σχεδίασης των προϊόντων στους μηχανικούς. Το κόστος εδώ μειώνεται, αφού αποφεύγεται η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων που έχουν κάποιο ελάττωμα και ελαχιστοποιείται η ανθρώπινη συμμετοχή. Έτσι μειώνεται και περιορίζεται ο εκτός λειτουργίας χρόνος της κατασκευής για επισκευή και αυξάνεται η ασφάλεια, η αξιοπιστία και ο χρόνος ζωής της.

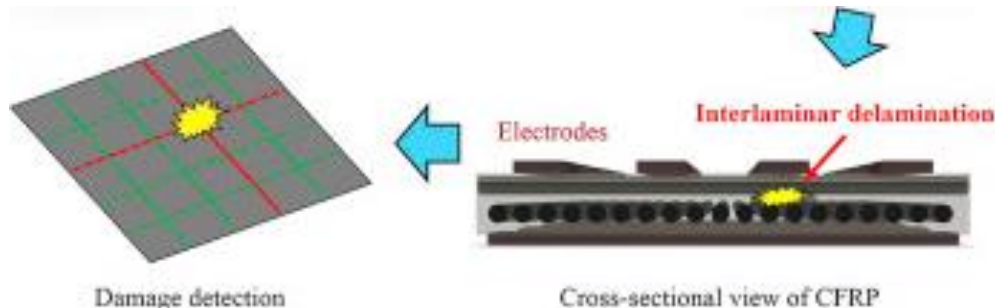
2.2.1 Ηλεκτρική αυτό-διάγνωση στα αγωγιμα σύνθετα

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση νανοσωλήνων άνθρακα έχουν βελτιωμένες μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες και προτιμώνται στην βιομηχανία λόγω του χαμηλού βάρους και της αντίστασης στη διάβρωση. (49) (50). Η δημιουργία ενός νανοενισχυμένου σύνθετου υλικού όπως είπαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο γίνεται με διασπορά των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) στην πολυμερική μήτρα του σύνθετου τα οποία δημιουργούν συσσωματώματα. Η διασπορά αγωγίμης ενίσχυσης με τον εμποτισμό νανοσωλήνων άνθρακα και carbon black στην εποξειδική ρητίνη έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να γίνεται αρκετά αγωγίμο. (43), (44)

Οι νανοίνες (Carbon NanoFibers, CNFs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου ως πληρωτικά υλικά της μήτρας. Η αγωγιμότητα των σύνθετων, εξαρτάται από το ποσοστό των νανοσωλήνων. (51) Εκτός από την δημιουργία αγωγίμου δικτύου με ίνες άνθρακα εναλλασσόμενες με ίνες υαλού με νανοενισχυμένη μήτρα, επιτυγχάνεται αγωγίμο δίκτυο με η εκτύπωση αγωγίμων διαδρομών μέσω ψεκασμού αγωγίμης μελάνης.

Τα αγωγιμα σύνθετα υλικά έχουν την ικανότητα αυτό-διάγνωσης, καθώς η εφαρμογή ηλεκτρικών μεθόδων SHM σε αυτά βασίζεται στη λειτουργία του ίδιου του υλικού ως αισθητήρα ανίχνευσης βλαβών. Η αρχή πίσω από την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας με ηλεκτρικές μεθόδους είναι ότι τόσο η παραμόρφωση όσο και το εύρος των βλαβών προκαλούν μεταβολές στις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού. Οποιαδήποτε ασυνέχεια του υλικού, είτε πρόκειται για ρωγμάτωση ή διαστρωματική αποκόλληση, προκαλεί μια τοπική διαταραχή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού αρα και αυτή καθιστάτε εύκολο να αναγνωριστεί μέσω SHM (52) (53) (54) (40). Επειδή στα CFRPs οι αγωγίμες διαδρομές είναι η ενίσχυση

λόγω των ινών ενώ στα νανοτροποποιημένα GFRPs η μήτρα, χρησιμοποιούνται διαφορετικές ηλεκτρικές μέθοδοι για παρακολούθηση της δομικής τους ακεραιότητας των δύο υλικών . Οι μέθοδοι συνεχούς ρεύματος (Direct Current, AC) και οι μέθοδοι εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternating Current, AC).



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση για ανίχνευση ζημιών σε CFRP πολυστρωματικό σύνθετο υλικό χρησιμοποιώντας εκτυπωμένο αγώγιμο δίκτυο. (55)

Οι μέθοδοι συνεχούς ρεύματος δίνουν άριστα αποτελέσματα στον εντοπισμό βλάβης των ινών άνθρακα CFRPC (56) (57) (58) (59) . Η ηλεκτρική αντίσταση των ινών, αυξάνεται όταν οι ίνες αστοχούν. Επέκταση της μεθόδου είναι η τομογραφία ηλεκτρικής αντίστασης όπου σαρώνει όλο το δείγμα προς εντοπισμό όχι μόνο της ύπαρξης αλλά και της θέσεις των βλαβών.

Στην περίπτωση συνθέτων ηλεκτρικά μη αγώγιμων, όπως είναι οι ίνες γυαλιού GFRPC ο εντοπισμός δεν επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο. Η ύπαρξη βλάβης στα υλικά αυτά μεταβάλλει τις διηλεκτρικές τους ιδιότητες οι οποίες μετριοούνται με εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος AC και να συσχετισθούν με τη δομική κατάσταση του υλικού. Οι μετρήσεις AC είναι καταλληλότερες για την ανίχνευση βλαβών της μήτρας, όπως είναι οι ρωγμές και οι διαστρωματικές αποκολλήσεις μήτρας-ινών. Ως μέθοδοι AC αναφέρονται: η φασματοσκοπία ηλεκτρικής εμπέδησης και η διηλεκτρική φασματοσκοπία, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες μετριοούνται χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση πρόσθετων αισθητήρων , αλλά λειτουργεί το ίδιο το υλικό σαν αισθητήρας (60) (61) (62) (63).

2.2.2 Σύνθετα με Εκτυπωμένες Αγώγιμες Διαδρομές

Όπως αναφερθήκαμε μια εναλλακτική μέθοδος είναι η εκτύπωση αγώγιμων διαδρομών σε μη αγώγιμα δίκτυα GFRPC. Η εκτύπωση επιτυγχάνεται με άμεσο ψεκασμό μελανιού σε υφάσματα από ίνες υάλου. Έτσι δημιουργούνται αγώγιμες διαδρομές που μπορούν να λειτουργήσουν ως αισθητήρες για τη χρήση ηλεκτρικών. Η μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υλικού επιτυγχάνεται μέσω αυτών το διαδρομών. Οι αγώγιμες διαδρομές λειτουργούν έτσι ώστε να ανιχνεύονται οι βλάβες κάθε φορά που επηρεάζονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού. Τα μελάνια από CNTs είναι πιο ελκυστικά σε σύγκριση με συμβατικά μελάνια με βάση τα

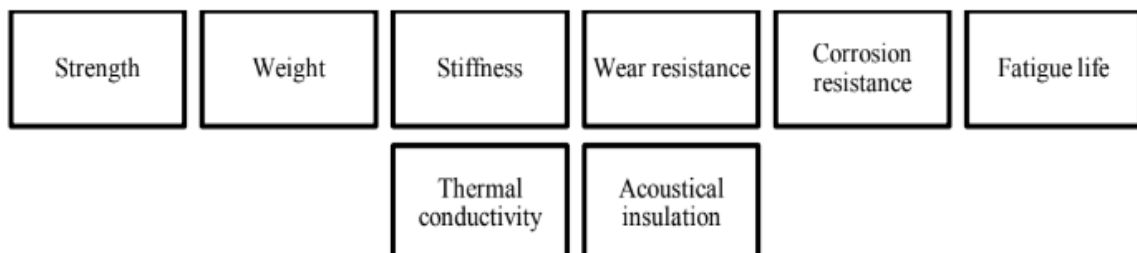
νανοσωματίδια μετάλλων, λόγω της υψηλής αγωγιμότητας ,και της υψηλής αντίστασης σε διάβρωση. (70) Το υλικό αρκεί να έχει ίνες άνθρακα οι οποίες λειτουργούν με την μορφή ηλεκτροδίων για μεταφορά του φορτίου και τους επιτρέπει να λειτουργούν ως σύστημα αυτό-διάγνωσης. Έτσι η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ή της αντίστασης προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης της παραμόρφωσης σε πραγματικό χρόνο. (64)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°.Μηχανικές δομικές σύνθετων υλικών

3.1 Εφαρμογές μηχανικών δοκιμών

Ο χαρακτηρισμός μέσω μηχανικών δοκιμών ,γίνεται για τον προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών που είναι υπό δοκιμή κάθε φορά. Οι πιο διαδεδομένοι μηχανικοί έλεγχοι που υφίστανται οι ενισχυμένες σύνθετες δομές είναι οι δοκιμές σε πολύστρωτα σύνθετα. Ο κύριος σκοπός των αποτελεσμάτων μιας μηχανικής δοκιμής είναι:

- για έλεγχο μικρομηχανικής ανάλυσης.
- για σχεδιασμό και ανάλυση της δομής τους.
- για τη διαδικασία κατασκευής κατάλληλων προϊόντων
- για σύγκριση ιδιοτήτων μεταξύ υποψηφίων υλικών στο τρόπο κατασκευής τους ,το είδος του υλικού, το μήκος , της αντοχής τους κ.τ.λ



Σχήμα 3 1.Ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν μετα από μηχανικές δοκιμές (65)

Η μήτρα μεταφέρει την τάση που δέχεται μέσω της διεπιφάνειας κατά μήκος του. Αν δεν υπήρχε η αστοχία της διεπιφάνειας, οι θραύσεις θα συνεχίζονταν μέχρι τη μακροσκοπική αστοχία της σύνθετης δομής (72) . Κύριο μέλημα, είναι να προσδιοριστεί η διεπιφανειακή αντοχή από το επιβαλλόμενο φορτίο σε κάθε δοκίμιο

,ώστε, να προσδιοριστούν τα επικίνδυνα όρια φόρτισης των υλικών ,σε όλες τις δυνατές καταπονήσεις και με βάση αυτά , να καθοριστούν τα αποδεκτά όρια φόρτισης σε κάθε περίπτωση. Επίσης με μηχανικές δοκιμές ελέγχονται οι παραμορφώσεις που θα εκδηλωθούν κάτω από την ενέργεια κάθε φόρτισης, βρίσκονται μέσα σε ανεκτά όρια.

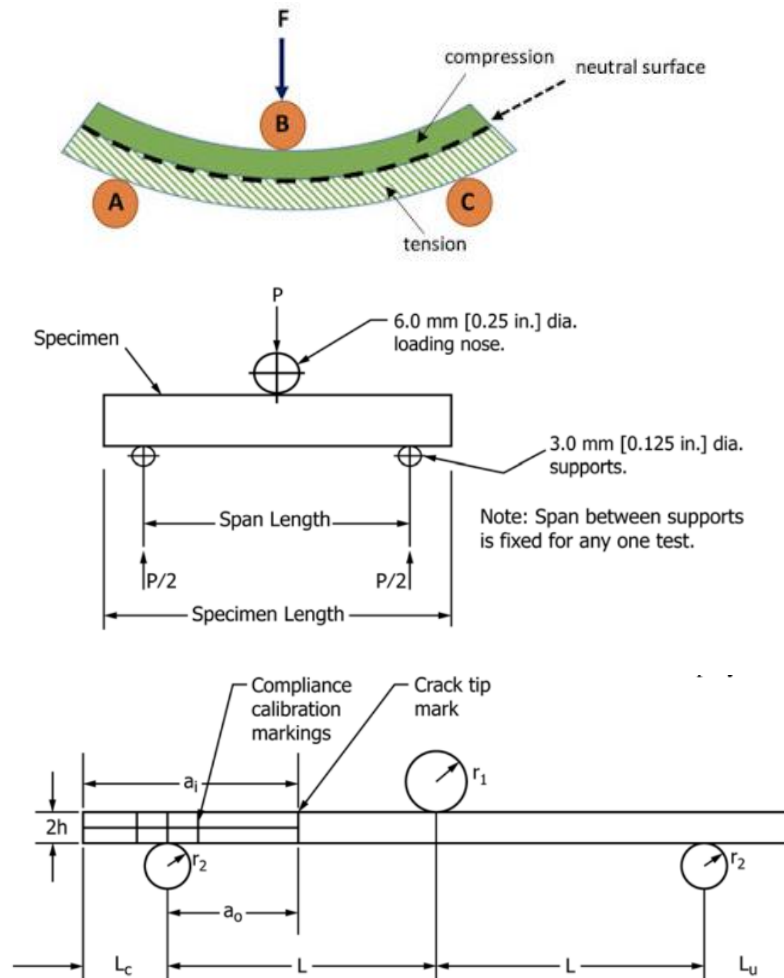
Κάποιοι από τους μηχανικούς ελέγχους είναι : ο έλεγχος διαστρωματική αντοχής ενός πολύστρωτου, η αντοχή σε εγκάρσιο εφελκυσμό και η αντοχή σε κάμψη. Καθώς δεν υπάρχει αναλυτική σχέση που να συνδέει αυτές τις μακροσκοπικές ιδιότητες με την αντοχή του διεπιφανειακού δεσμού, η τελευταία μπορεί να εκτιμηθεί μόνο ποιοτικά και συγκριτικά (13)



Σχήμα 3. 2 Μηχανικές δοκιμές σε σύνθετα υλικά (66)

3.2 Δοκιμή κάμψης (Bending test)

Η δομική κάμψης δηλώνει την ύπαρξη καμπτικών ροπών σε ένα φορτισμένο δοκίμιο, με τελικό αποτέλεσμα την κάμψη του και την ανάπτυξη ορθών μηχανικών τάσεων. Η δοκιμή της κάμψης (bending test) χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η συμπεριφορά ενός υλικού, όταν καταπονείται σε καθαρή κάμψη, ώστε να ελεγχθεί μέχρι ποιο όριο μπορούμε να φορτίσουμε ασφαλώς κάποιο σύνθετο ,στις διάφορες καταπονήσεις που είναι δυνατόν να υποβληθεί. Κατά την καταπόνηση των υλικών σε καμπτικές ροπές αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους ένας συνδυασμός εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων.



Σχήμα 3.3 δοκιμή της κάμψης τριών σημείων (3-point bending test) ανάλογα το υπο μελέτη δοκίμιο (67) (99) (100)

Κατά την διάρκεια του μηχανικού ελέγχου το δοκίμιο στα εσωτερικά και εξωτερικά σημεία μειώνεται και αυξάνεται σε μήκος αντίστοιχα. Συμπεραίνουμε έτσι ότι η ροπή τx και η τάση σx είναι αρνητικές στο άνω τμήμα των ινών (θλίψη) και θετικές στο κάτω τμήμα (εφελκυσμός). Η μετάβαση από την περιοχή των θλιβόμενων ινών στη περιοχή των εφελκυσόμενων ινών συντελείται ομαλά, πράγμα που σημαίνει ότι η περιοχή των εφελκυσόμενων ινών διαχωρίζεται από την περιοχή των θλιβόμενων ινών με μια επιφάνεια μηδενικών τάσεων. Το υπο μελέτη δοκίμιο εμφανίζει καμπτική ροπή μέχρι να περάσει το όριο αντοχής της τάσης του και στην συνέχεια να σπάσει. (68). Η δοκός παραμορφώνεται σαν άθροισμα από ανεξάρτητες μεταξύ τους ίνες.

Για τον υπολογισμό της αντοχής σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικής δοκού είναι:

$$\sigma = \frac{3 \times P_{max} \times L}{b \times h}$$

όπου P_{max} το φορτίο αστοχίας, b το πλάτος δοκιμίου, h το πάχος δοκιμίου και L το μήκος του δοκιμίου. Η προκύπτουσα καμπύλη τάσης που προκύπτει από μια τέτοια δοκιμή επιτρέπει τον υπολογισμό:

- 1) Τελικής κάμψης - το υψηλότερο όριο τάσης- αντοχής που επιτεύχθηκε πριν από την ρωγμή (εάν το δείγμα δεν σπάσει)
- 2) Την ανθεκτικότητα - σκληρότητα του υπό μελέτη δοκιμίου

Άρα μέσω της δοκιμής κάμψης, υπολογίζεται το μέγιστο φορτίο που είναι δυνατό να επιβάλλουμε με ασφάλεια σε μια κατασκευή ή ακόμη να ελέγξει κατά πόσο αυτή είναι ασφαλής κάτω από την ενέργεια συγκεκριμένης φόρτισης. Τελος να ελεγχθεί κατά πόσο οι παραμορφώσεις που θα εκδηλωθούν κάτω από την ενέργεια αυτής της φόρτισης, βρίσκονται μέσα σε ανεκτά όρια με βάση τα αντίστοιχα πρότυπα μετρήσεων. Περισσότερα για την δομική κάμψης αναφέρονται παρακάτω στο κεφάλαιο 7 και 8.

3.3 Δοκιμή κρούσης (Impact velocity test)

Οι δομές των αεροσκαφών κατασκευάζονται, χρησιμοποιώντας υλικά που διαθέτουν υψηλή αντοχή, υψηλή σκληρότητα και ελαφρύ βάρος. Τα κενά στην μικροδομή του υλικού, τα σφάλματα σχεδιασμού, η ύπαρξη εγχοπών και οπών, και η διάβρωση του υλικού είναι οι λόγοι για την εμφάνιση αποτυχίας. Για αυτό και μια από τις βασικές δοκιμές στην αντοχή είναι η δοκιμή κρούσης σε τέτοιο είδους υλικά.

Πιο συγκεκριμένα, οι κατηγορίες φόρτωσης κρούσεων είναι: low velocity (χαμηλή ταχύτητας) για μεγάλη μάζα, ενδιάμεση ταχύτητα, high velocity (υψηλή βαλλιστική ταχύτητα) για μικρή μάζα και υπερβολικής ταχύτητας κρούση. Η δοκιμή κρούσης είναι σημαντική επειδή υπάρχουν μεγάλες αλλαγές κατά την μεταφορά ενέργειας που προκαλούν στο υλικό μεταβαλλόμενες χρονικά τάσεις και στις τρεις διευθύνσεις, μεταξύ του βλήματος και του στόχου, καθώς η ταχύτητα του βλήματος ποικίλλει (69) Στα πολύστρωτα το πρώτο στάδιο βλάβης είναι η διαρροή που εμφανίζεται στην πρώτη στρώση, δηλαδή το φορτίο στο οποίο η πρώτη στρώση συμπεριφέρεται μη γραμμικά. Αυτό συμβαίνει μέχρι την έναρξη των πρώτων θραύσεων. Οι κρούσεις χαμηλής ταχύτητας είναι σε ταχύτητες κάτω των 10 m/s, οι ενδιάμεσες κρούσεις συμβαίνουν μεταξύ 10 m/s και 50 m/s, και οι υψηλές έχουν εύρος ταχύτητας από 50 m/s έως 1000 m/s. (70)

Στη περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων, τα μέταλλα απορροφούν την ενέργεια κρούσης μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, και παρόλο που η παραμόρφωση της κατασκευής είναι μόνιμη, μειώνει ελάχιστα την ικανότητά της να φέρει φορτία. Στη περίπτωση κρούσης ενδιάμεσων-υψηλών ταχυτήτων, το υλικό επέρχεται διάτρηση από το βλήμα. Αν και έτσι μειώνεται η αντοχή της κατασκευής, είναι δυνατόν να

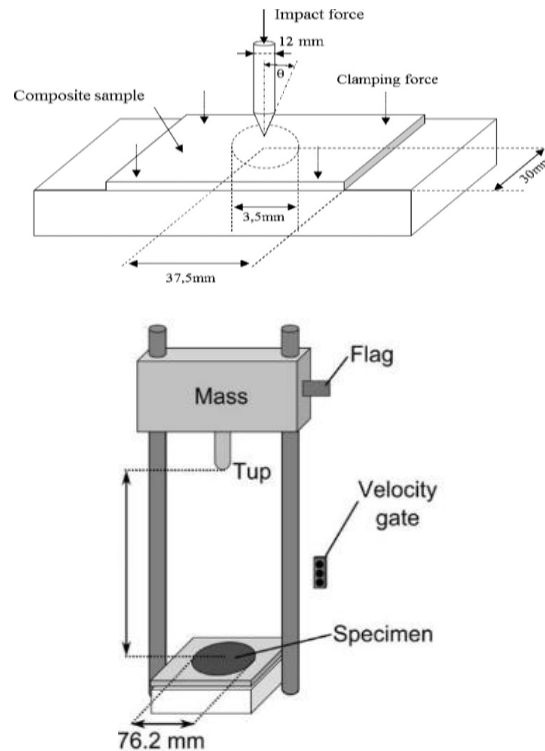
προβλεφθεί η συμπεριφορά της, χρησιμοποιώντας τις αρχές της θραυστομηχανικής (69) (71) [16]. Σε αντίθεση η ικανότητά απορρόφησης της ενέργειας κρούσης στα πολυστρωματικά υλικά είναι εξαιρετικά περιορισμένη, με αποτέλεσμα η ενέργεια κρούσης να δημιουργεί τοπικές περιοχές θραύσης, μειώνοντας έτσι την αντοχή και την δυσκαμψία της κατασκευής. (69) (71)[16].

Ο μηχανισμός ανάπτυξης βλάβης λόγω κρούσης στα πολυστρωματικά υλικά είναι συνδυασμός της θραύσης των ινών, δημιουργία ρωγμών στην μήτρα και αποκόλλησης των επιμέρους στρώσεων. Επιπλέον, οι μηχανισμοί και η συμπεριφορά αστοχίας εξαρτώνται από την κατεύθυνση των στρώσεων του υλικού. Στη περίπτωση που βρίσκονται σε εναλλασσόμενες διευθύνσεις υφασμάτων 0-90° , η τοπική παραμόρφωση των νημάτων στα σημεία πλέξης αυξάνει τη δυσκαμψία του υλικού.

Η αποκόλληση που εμφανίζεται στην πάνω διεπιφάνεια έχει σχήμα κωνικό με κεφαλή το σημείο κρούσης και διάμετρο που αυξάνει καθώς προχωράμε στις εσωτερικές στρώσεις όπου εμφανίζεται μέγιστη στη πίσω διεπιφάνεια. Σύμφωνα με τις εξισώσεις Davies-Robinson και Sjoblom, το κρίσιμο φορτίο για έναρξη της διαστρωματικής αποκόλλησης είναι ανάλογο με το $t^{3/2}$ όπου t το πάχος του πολυστρωτου (70) (72) (69) (73). Η διάδοση ρωγμών είναι επιζήμια και μειώνει τη διάρκεια ζωής του υλικού. Εμφανίζεται η τελική αστοχία όταν η ανάπτυξη και συσσώρευση ρωγμών προκαλέσει εκτενή διαστρωματική αποκόλληση [2] (72) [8].

3.3.1 Κρούσεις χαμηλής ταχύτητας. (low velocity impact test)

Οι κρούσεις χαμηλής ταχύτητας μπορούν να οριστούν ως συμβάντα που μπορούν να συμβούν στην περιοχή 1 - 10 m/s ανάλογα με το στόχο (15) . Ένα συμβάν κρούσης χαμηλής ταχύτητας μπορεί να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων συντήρησης και μπορεί να θεωρηθεί από τις πιο επικίνδυνες φόρτισης και επηρεάζει την απόδοση των σύνθετων υλικών. Οι κρούσεις αυτές στην αρχή δεν επιφέρουν διάτρηση στην επιφάνεια τους και χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλή ενέργεια. Δημιουργούνται μη ορατές μικρορωγμές λόγω της κρούσης, που μειώνουν την αντοχή του υλικού οι οποίες θεωρούνται ως ένας από τους πιο επικίνδυνους τύπους βλαβών που μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη αστοχία μιας κατασκευής σε άγνωστο χρόνο, π.χ. κατά τη διάρκεια πτήσης ενός αεροπλάνου. (74) (72) (75) .



Σχήμα 3.4 Low-High velocity impact tests στην επιφάνεια ενός υλικού (88)

Λόγω της χαμηλής ταχύτητας, η χρονική διάρκεια επαφής του βλήματος και του στόχου είναι αρκετά μεγάλη ώστε ολόκληρο το υλικό να προλάβει να αντιδράσει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση περισσότερης ενέργειας. Οι μηχανισμοί αστοχίας που προκύπτουν, όταν η ενέργεια κρούσης ξεπεράσει ένα όριο, είναι η θραύση ινών με την μορφή εσοχών στην επιφάνεια της μήτρας. Η περιοχή κρούσης παρουσιάζει βλάβη στρογγυλού σχήματος που έχει υποστεί συμπίεση, διαστρωματική αποκόλληση και αστοχία. Η στρογγυλού σχήματος βλάβη έχει κορυφή το σημείο πρόσκρουσης και βάση την πίσω επιφάνεια του πολύστρωτου. Η βλάβη στις πίσω στρώσεις οφείλεται σε καμπτικά φορτία που δημιουργούν οι τάσεις. (77) (72) (69) (78).

3.3.2 Κρούσεις υψηλής ταχύτητας. (high velocity impact test)

Οι κρούσεις υψηλών ταχυτήτων ή βαλλιστικές κρούσεις είναι της τάξης των 100-1000 m/sec. Περιλαμβάνουν κρούσεις με βλήματα όπλων και εξομοιώνονται πειραματικά με όπλα πυρίτιδος (69) (75) (76). Στις κρούσεις αυτές παρόλο που οι μηχανισμοί αστοχίας είναι παρόμοιοι με εκείνους των χαμηλών ταχυτήτων, η απόκριση στην ενέργεια που δέχεται το σύνθετο είναι διαφορετική.

Στην περίπτωση κρούσης χαμηλών ταχυτήτων, λόγω του μεγάλου χρόνου επαφής, η ενέργεια απορροφάτε μέσω των καμπτικών τάσεων στο υλικό. Στις κρούσεις υψηλών ταχυτήτων όμως, ο χρόνος επαφής βλήματος και στόχου είναι αρκετά

μικρός, με αποτέλεσμα τα φορτία κρούσης να επιφέρουν έντονα τοπικά αποτελέσματα χωρίς να επηρεάζουν το δοκίμιο. Άρα η βασική διαφορά είναι ότι προκύπτει παραμόρφωση σε όλο του δοκίμιο για κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων και μεγάλη τοπική παραμόρφωση για κρούσεις υψηλών ταχυτήτων (76). Ο μηχανισμός αστοχίας που παρατηρείται, είναι η "οπή διάτμησης". Το μέγεθος της οπής είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από την διάμετρο του βλήματος.

Αρχικά το βλήμα έρχεται σε επαφή με το πρώτο στρώμα του υλικού όπου δημιουργούνται ρωγμές και θράυση των ινών. Η διαδικασία συνεχίζεται καθώς το βλήμα δια περνάει τις επόμενες στρώσεις, μέχρι τη στρώση όπου η κινητική του ενέργεια έχει μειωθεί αρκετά. Στο σημείο αυτό οι ίνες που έρχονται σε επαφή με το βλήμα, ωθούνται προς τα εμπρός και η στρώση του υλικού ασκεί εγκάρσια φορτία στην επόμενη. Το φαινόμενο συνεχίζει έως ότου επέλθει ο πλήρης διαχωρισμός μεταξύ των στρώσεων. Η περιοχή της διαστρωματικής αποκόλλησης αυξάνεται με αύξηση του βάθους διείσδυσης του βλήματος και η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν διαπεράσει όλο το υλικό είτε εγκλωβιστεί εντός αυτού και έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία οπής (72) (76).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο.Διηλεκτρική φασματοσκοπία

4.1 Εισαγωγή στην διηλεκτρική φασματοσκοπία

Η Διηλεκτρική Φασματοσκοπία (Impedance spectroscopy-IS) είναι μία μη καταστροφική τεχνική που μας παρέχει πληροφορίες για τις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού. Το ηλεκτρικό πεδίο που ασκείτε για την διέγερση ενός σύνθετου υλικού, για την ανίχνευση βλαβών του, είναι εναλλασσόμενο. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται, είναι από 1 έως 10 MHz. Το υπο εξέταση σύνθετο, τοποθετείται μεταξύ ηλεκτροδίων σχηματίζοντας έτσι έναν πυκνωτή. [49–51].

Τα ηλεκτρόνια των ατόμων ενός διηλεκτρικού υλικού (μονωτής), είναι ισχυρά δεσμευμένα σε αυτά και κατά συνέπεια δεν έχουν στη φυσική τους κατάσταση ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια. Κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου χαρακτηρίζεται ως διηλεκτρικό. Κατά τις διαδικασίες φόρτισης ενός διηλεκτρικού υλικού, το φορτίο κατανέμεται τόσο στην επιφάνεια όσο και στον υπόλοιπο όγκο.. Επιπλέον, τα μόρια των διηλεκτρικών είναι δυνατόν να εμφανίζουν πολικά και μη πολικά μόρια αντίστοιχα. Παραδείγματος χάριν, στο HCl το μοναδικό ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου βρίσκεται τον περισσότερο χρόνο κινούμενο πιο κοντά στο άτομο του Cl. Έτσι τα κέντρα του θετικού και αρνητικού φορτίου του μορίου δεν συμπίπτουν και το μόριο παρουσιάζει μόνιμη διπολική ροπή που κατευθύνεται από το άτομο του Cl στο άτομο του H.

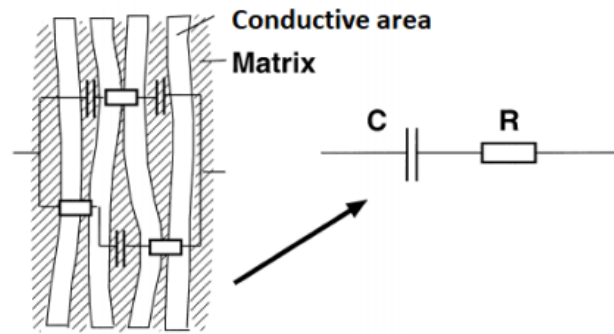
Οι πρώτες μετρήσεις ηλεκτροχημικής φασματοσκοπικής εμπέδισης (EIS) γινόταν σταδιακά και σε αρχικό πειραματικό στάδιο μέχρι το 1970, όπου και η χρήση ποτενσιόμετρων άρχισε πλέον να γίνεται διαδεδομένη. Σε όλες τις μεθόδους μέτρησης σύνθετης αντίστασης, η μέθοδος που ακολουθούταν ήταν η εξής: εφαρμογή μιας ημιτονοειδής τάσης, έως 15 mV σε ένα ηλεκτρόδιο, και η λήψη εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Αυτή η μέτρηση στη συνέχεια επαναλαμβανόταν, λαμβάνοντας σαρώσεις σε ένα εύρος συχνοτήτων. Στο τέλος μέσω της εναλλασσόμενης τάσης και του ρεύματος υπολογίζεται η εμπέδιση του μέσου για κάθε συχνότητα. Ωστόσο, η μέθοδος ήταν εφαρμόσιμη μόνο για ένα σταθερό σύστημα.

Στην συνέχεια για την εξέλιξη την διηλεκτρικής φασματοσκοπίας σε μη σταθερά συστήματα, οι Savona-Stoynov [17-20] δημοσίευσαν μαθηματικές εκφράσεις για την εξαγωγή στιγμιαίων τιμών σύνθετης αντίστασης. Ο Smith[21] χρησιμοποίησε μεθόδους οι οποίες βασίζονταν στους μετασχηματισμούς Fourier(FFT). Η θεωρία του είχε ως εξής :η ένταση του ρεύματος λαμβανόταν μετά από την εφαρμογή τάσης, η οποία είχε προκληθεί από την υπέρθεση ημιτονοειδών τάσεων σε ένα ποσο συχνοτήτων. Στη συνέχεια υπολογίζονταν οι σύνθετες αντιστάσεις από τις εναλλασσόμενες τάσεις και τα ρεύματα.

Οι Porckiron & Schindler[25] απλοποίησαν αυτή την τεχνική και την χρησιμοποίησαν σε ένα φασματογράφο διηλεκτρικής ανάλυσης όπου κατάφεραν να συμπεριλάβουν σε ένα σήμα διαφορετικές μετρήσεις και ανάλογα με το μέγεθος της συχνότητας άλλαζε και ο χρόνος κάθε πλήρης μέτρησης του φάσματος.

4.2 Διηλεκτρική Φασματοσκοπία στα σύνθετα υλικά

Μια σύγχρονη μέθοδος Structure Health Monitoring, που χρησιμοποιείται με επιτυχία σε αεροπορικές εφαρμογές, είναι η διηλεκτρική φασματοσκοπία ηλεκτρομηχανικής εμπέδισης. Η μέθοδος αυτή, επιτρέπει την ανίχνευση βλαβών με υψηλή ευκρίνεια, όμως η ενσωμάτωση αισθητήρων στη δομή προκαλεί τοπική συγκέντρωση τάσεων γύρω από τους αισθητήρες, καθιστώντας τα κάποιες φορές ως σημεία έναρξης βλαβών. Ηλεκτρικές μέθοδοι εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιούμε στην χαρτογράφηση βλάβης σύνθετων υλικών είναι η Φασματοσκοπία Ηλεκτρικής Εμπέδησης (Electrical Impedance Spectroscopy) και η Διηλεκτρική Φασματοσκοπία (Dielectrical Spectroscopy).



Σχήμα 4.1 Διηλεκτρική συμπεριφορά αγώγιμου πολύστρωτου υλικού και πιθανό ισοδύναμο κύκλωμα [2]

Τα υλικά συμπεριφέρονται σαν ένα σύνολο πολλών πυκνωτών όπου οι αγώγιμες διαδρομές έχουν τη θέση των ηλεκτροδίων του πυκνωτή και λειτουργούν σαν αντιστάτες, ενώ οι μεταξύ τους χώροι έχουν τη θέση του διηλεκτρικού όπως βλέπουμε και στο σχήμα 5.1 όπου τα ηλεκτρόδια είναι οι αγώγιμες διαδρομές. Οι μέθοδοι D.C. όπως είδαμε ανιχνεύουν ρωγμές στην ίνα και παρέχουν λιγότερες πληροφορίες, καθώς λαμβάνουν μόνο την πραγματική συνιστώσα της αντίστασης. Σε αντίθεση οι μετρήσεις AC, είναι πιο ευαίσθητες και δίνουν πληρέστερα αποτελέσματα στη ποσοτικοποίηση και ταξινόμηση των βλαβών στην μήτρα, διότι λαμβάνουν υπόψη τόσο τη τιμή της εμπέδησης όσο και τη γωνία φάσης.

Παρακάτω παρουσιάζεται η βιβλιογραφία σχετικά με τις εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος, στις οποίες παρακάτω βασίζεται το μεγαλύτερο κομμάτι της μεταπτυχιακής διατριβής.

Η δυνατότητα εντοπισμού ανίχνευσης βλαβών σε πολύστρωτα CFRP με τη χρήση ηλεκτρικών μεθόδων διερευνήθηκε από τους J.C. Abry et al όπου Οι D.C. μετρήσεις έδειξαν γραμμική αύξηση της αντίστασης με την έναρξη της φόρτισης και απότομη αλλαγή με απότομη αύξηση της όταν συμβαίνουν αστοχίες. Οι A.C. μετρήσεις που πήραν έδειξαν ότι η χωρητικότητα του υλικού μειώνεται με αύξηση των κύκλων φόρτισης. [3].

Ο R.C.Glass χρησιμοποίησε τη μέθοδο EIS για παρακολούθηση βλαβών προκαλούμενων από μηχανική καταπόνηση και περιβαλλοντική υποβάθμιση των λειτουργιών τους, σε σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης με ίνες άνθρακα. Η θραύση των ινών οδήγησε σε μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας. [1]. Οι M. Kurke et al διεξήγαγαν ηλεκτρικές μετρήσεις D.C. και A.C. σε υβριδικά GFRP/CB όπου οι μετρήσεις D.C. έδειξαν ότι η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνει με αύξηση της βλάβης ενώ στις μετρήσεις A.C. η χωρητικότητα μειώνεται με αύξηση της παραμόρφωσης. [2].

Οι Shueler et al, εφάρμοσαν μέθοδο διηλεκτρικής εμπέδησης σε CFRP υλικά τα οποία είχαν υποστεί κρούσεις. Οι οπές που σχηματίστηκαν προσομοίαζαν βλάβες.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η αγωγιμότητα των υλικών μειώνεται στα σημεία οπών. Επιπλέον μέσω ηλεκτρικών μετρήσεων ήταν δυνατός ο εντοπισμός της θέσης και του μεγέθους των οπών [4].

Ο Bekas et all , εφάρμοσε μέθοδο διηλεκτρικής φασματοσκοπίας στην επιφάνεια του εκτυπωμένου αισθητήρα σε σύνθετο υλικό εποξειδική ρητίνης με ίνες άνθρακα και χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης για την παρακολούθηση της ποιότητας της θεραπείας της εποξικής ρητίνης με αύξηση της θερμοκρασίας . Ανίχνευε την βλάβη που είχε ο αισθητήρας σε σύγκριση με αισθητήρες που δεν είχαν μέσω των καμπυλών των αποτελεσμάτων της EIS. [7]

Οι Bryan R. Loyola et all χρησιμοποίησαν τη μέθοδο EIS για προσδιορισμό της θέσης των βλαβών σε σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης με ίνες γυαλιού. Τα υφάσματα υάλου είχαν προηγουμένως ψεκάσθει με λωρίδες μελανίων με CNTs. Ανιχνευθήκαν επιτυχώς τόσο η θέση όσο και η έκταση των βλαβών και ακολούθησε χαρτογράφηση [6].

Συμπερασματικά οι παραπάνω τεχνικές ανιχνεύουν την ύπαρξη βλαβών σε αγωγίμα σύνθετα υλικά.

4.2.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι εναλλασσόμενου ρεύματος AC όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2. βασίζονται στην εκμετάλλευση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, και πως αυτές μεταβάλλονται όταν το υλικό υποστεί βλάβη [7] [8]. ΟΙ μετρήσεις παίρνονται αρχικά στο δομικά ακέραιο υλικό και κατόπιν στο υλικό το που έχει υποστεί βλάβη [1] [6]. Έχουν την ικανότητα ταυτόχρονης ανίχνευσης αλλαγών στην αντίσταση, τη συχνότητα και τη χωρητικότητα του υλικού [2]. Όταν δημιουργούνται βλάβες σε ένα διηλεκτρικό υλικό, π.χ. CFRP ή GFRP νανοενισχυμένο, η αγωγή διαδρομή του μεταβάλλεται και η αλλαγή αυτή μπορεί να ανιχνευθεί και να συσχετιστεί με τον τύπο και τη θέση της βλάβης.

Με τις AC μεθόδους, είναι δυνατή η εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με το πεδίο τάσεων-παραμορφώσεων ενός υλικού, καθώς και το κατά πόσο έχει επεκταθεί η βλάβη στο υλικό . Αυτό γίνεται διότι η ηλεκτρική εμπέδηση μεταβάλλεται όταν το υλικό παραμορφώνεται ή προκαλούνται βλάβες σε αυτό.[16].Αυτά ισχύουν ανεξαρτήτως μηχανικής δοκιμής δηλαδή ανεξαρτήτως αν η παραμόρφωση και οι βλάβες οφείλονται σε κάμψη, κόπωση, κρούση κ.λπ.

Ένα διηλεκτρικό υλικό μπορεί να προσομοιωθεί με ένα κύκλωμα αντιστάτη-πυκνωτή (R-C) όπου:

$$R = \frac{ReZ^2 + ImZ^2}{ReZ}$$

$$C = -\frac{-ImZ}{ReZ^2 + ImZ^2} \times \omega$$

Με αύξηση της βλάβης παρατηρείται απότομη μείωση του ImZ , κάτι που συνεπάγεται απότομη μείωση της χωρητικότητας όπως φαίνεται στους τύπους 5.2,5.2. Όταν ένα υλικό υφίσταται βλάβη η διηλεκτρική του σταθερά μειώνεται, συνεπώς η χωρητικότητα του μειώνεται.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad \text{όπου } \epsilon_0 \text{ η διηλεκτρική σταθερά του κενού,}$$

ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του υλικού, A η επιφάνεια των οπλισμών και d απόσταση μεταξύ οπλισμών [2].

Η εξίσωση αναλύεται περισσότερο στην επόμενη ενότητα. Πλεονέκτημα των μεθόδων A.C. είναι ότι απαιτούνται λιγότερα ηλεκτρόδια για ολοκλήρωση του αγώγιμου κυκλώματος σε σχέση με τη μέθοδο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης.

4.2.2 Ιδιότητες Διηλεκτρικής Φασματοσκοπίας

Η ηλεκτρική αντίσταση είναι μία ιδιότητα των υλικών που αφορά την δυνατότητα του κυκλώματος να αντιστέκεται στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Για να είναι μία αντίσταση ιδανική πρέπει να ακολουθεί τον νόμο Ohm:

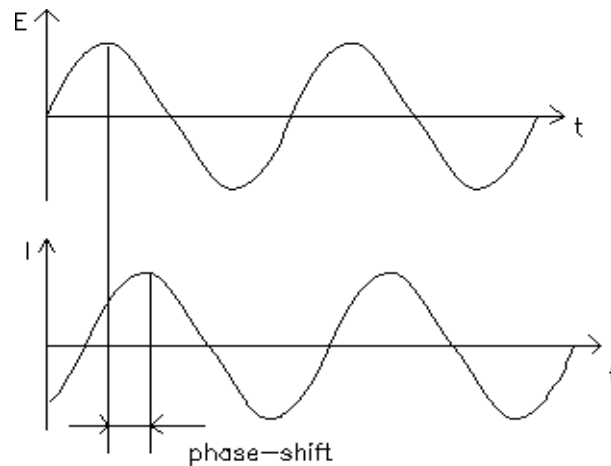
$$R = \frac{V}{I}$$

όπου V είναι η τάση που ασκείται στο υλικό και I το ρεύμα.

Ο νόμος του Ohm όμως χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις ιδανικής αντίστασης. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις που τα πράγματα είναι πολύπλοκα χρησιμοποιείται η σύνθετη αντίσταση ή αλλιώς εμπέδηση. Όπως η αντίσταση, έτσι και η σύνθετη αντίσταση είναι η ικανότητα του κυκλώματος να αντισταθεί στο ηλεκτρικό ρεύμα. Η σύνθετη αντίσταση μετριέται με την εφαρμογή εναλλασσόμενου δυναμικού σε ένα κύκλωμα.

Η εμπέδηση, μετράτε χρησιμοποιώντας ένα μικρό σήμα διέγερσης όπου η τρέχουσα απόκριση σε ένα ημιτονοειδές δυναμικό θα είναι ημιτονοειδές στην ίδια συχνότητα αλλά θα μετατοπίζεται μόνο σε φάση. Όταν ένα υλικό εισαχθεί σε ένα στατικό εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργούνται δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται σε όλα τα φορτισμένα σωματίδια, του υλικού και τείνουν να τα μετακινήσουν κατά μήκος του πεδίου. Αυτό το σύστημα ρεύματος στην συνέχεια μπορεί να αναλυθεί ως άθροισμα των ημιτονοειδών λειτουργιών (Fourier).

$$E(t) = E^0 \sin(\omega t) \quad \text{όπου } \omega = 2\pi f \quad (2.1)$$

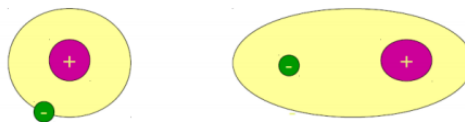


Σχήμα 4.2 Μετατόπιση σε φάση του ηλεκτρικού πεδίου

Όταν κατά μήκος των παράλληλων οπλισμών του πυκνωτή εφαρμόζεται μια τάση, τότε στο διηλεκτρικό ενδιάμεσα αποθηκεύεται ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι το διηλεκτρικό αυξάνει τον χώρο αποθήκευσης ενέργειας στον πυκνωτή. Τα διηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν μια χωρική κατανομή ηλεκτρικών φορτίων που μεταβάλλεται κατά την επίδραση εξωτερικού πεδίου. Τα φορτία αυτά πολώνονται για να αντισταθίσουν τα θετικά και αρνητικά φορτία που κινούνται σε τυχαίους προσανατολισμούς. Υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα μακροσκοπικά αυτά δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα προς τις δυναμικές γραμμές του.

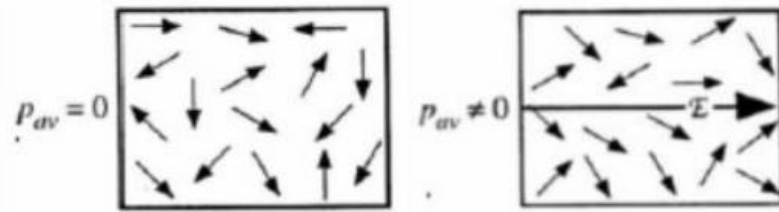
Οι μηχανισμοί που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της πόλωση είναι:

- Η ιοντική πόλωση: όταν λειτουργεί σε υλικά, τα μόρια τους διαμορφώνουν ιόντα που δεν διαχωρίζονται από ασθενή ηλεκτρικά πεδία και εμφανίζονται επιπλέον μετατοπίσεις των ιόντων εμφανίζονται νέα δίπολα.
- Η ηλεκτρονική πόλωση: κατά την ηλεκτρονική πόλωση έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται γύρω από ένα άτομο να μετακινούνται σε σχέση με το πυρήνα του ατόμου τους. (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3 Η ηλεκτρονική πόλωση

- Διπολική πόλωση (πόλωση προσανατολισμού): αναφέρεται σε υλικά τα οποία έχουν όμορφα κατανεμημένους προσανατολισμούς των μορίων τους με μόνιμες διπολικές ροπές λόγω της θερμικής ενέργειας που τα διεγείρει. Έτσι χωρίς εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο η πόλωση είναι 0. (Σχήμα 4.4)



Σχήμα 4. 4 Πόλωση προσανατολισμού

- Διεπιφανειακή: η διεπιφανειακή πόλωση παρατηρείται κυρίως σε υλικά από διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά. Είναι μια αργή διαδικασία η οποία με την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου οδηγεί σε εμφάνιση δίπολων στις διεπιφάνειες του υλικού. Η διεπιφανειακή πόλωση είναι ένας μηχανισμός που προκύπτει ως αποτέλεσμα από την δημιουργία βλάβης σε μια περιοχή ενός υλικού, που έχει ως αποτελέσματα διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τα πανιά glass λειτουργούν μη αγώγιμο υλικό, αλλά με πρόσθεση πολυμερικής νανοενισχυμένη μήτρας ως αγώγος. Αυτή η διαδικασία μας είναι χρησιμή ως αποτέλεσμα στην πειραματική πορεία της διπλωματικής.

Άρα για να υπολογίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου E_0 ισχύει ότι

$$E = E_0 + E', \text{ όπου } E' \text{ το πεδίο πόλωσης του υλικού.}$$

Η πόλωση ισούται με:

$$P = \epsilon_0 \chi_e E, \text{ όπου } \chi_e \text{ η ηλεκτρική εμπέδηση και ισχύει ότι : } \epsilon_r = 1 + \chi_e.$$

Για την ηλεκτρική μετατόπιση D ισχύει:

$$D = \epsilon_0 E + P$$

όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού. Άρα :

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

4.3 Εφαρμογές της Διηλεκτρικής Φασματοσκοπίας

Σε ένα διηλεκτρικό υλικό με την εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, μετράμε την σύνθετη αντίσταση ή αλλιώς εμπέδηση. Σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος ταυτίζεται με την αντίσταση. Η εμπέδηση είναι αποτέλεσμα ενός μικρού σήματος διέγερσης όπου η απόκριση του στο ημιτονοειδές δυναμικό θα είναι ημιτονοειδές στην ίδια συχνότητα αλλά θα μετατοπίζεται μόνο σε φάση. Άρα το ρεύμα αντιστοιχεί σε :

$$It = I_0 \sin(\omega t + \varphi) \text{ όπου } I_0 \text{ το αρχικό πλάτος και (2.2)}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ η γωνιακή συχνότητα όπου } f \text{ η συχνότητα σε hertz}$$

Η εμπέδηση συμβολίζεται με το γράμμα Z και συχνά αναγράφεται σε μιγαδική αριθμητική μορφή. Η εμπέδηση σε ένα σύνθετο υλικό είναι χωρητική και προκύπτει από την εν σειρά σύνδεση μίας ωμικής αντίστασης με ένα πυκνωτή .

Με βάση τον νόμο του Ohm υπολογίζεται ως η τιμή της τάσης προς την ένταση. Άρα από τις εξισώσεις (2.1) , (2.2) η σύνθετη αντίσταση αντιστοιχεί σε :

$$R = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = Z(\omega) = \frac{Et}{It} = \frac{E \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \varphi)} = |Z| \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \varphi)}$$

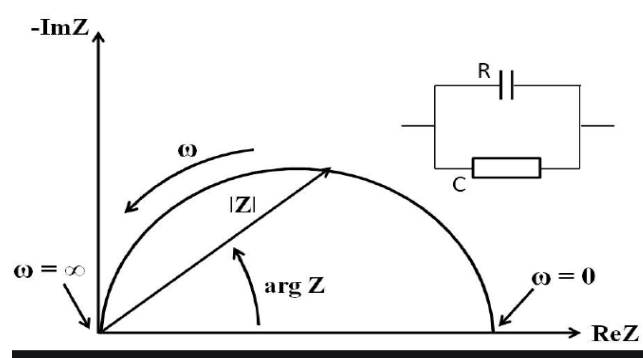
Η εμπέδηση αναπαρίσταται ως μιγαδικός αριθμός είτε σε πολική είτε σε καρτεσιανή μορφή. Η πολική μορφή της εμπέδησης ενός κυκλώματος στο οποίο η διαφορά φάσης μεταξύ έντασης και τάσης είναι φ είναι:

$$Z = |Z| e^{i\varphi}$$

Στην καρτεσιανή μορφή της εμπέδησης το πραγματικό μέρος ($\text{Re}Z$) αντιστοιχεί στην ωμική συνιστώσα της αντίστασης ενώ το φανταστικό μέρος ($\text{Im}Z$) αντιστοιχεί στην επαγωγική συνιστώσα της αντίστασης.

$$Z = |Z| (\cos\varphi + i\sin\varphi)$$

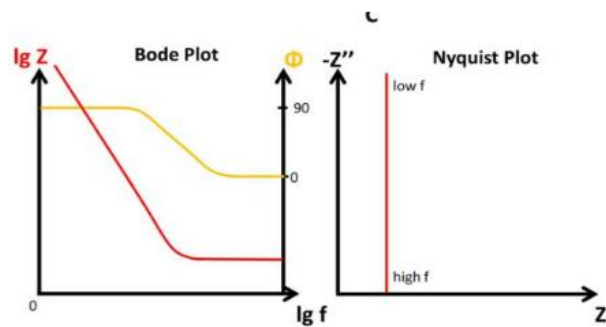
Μέσα από την καρτεσιανή μορφή του μιγαδικού αριθμού της εμπέδησης παίρνουμε τα διαγράμματα Nyquist.



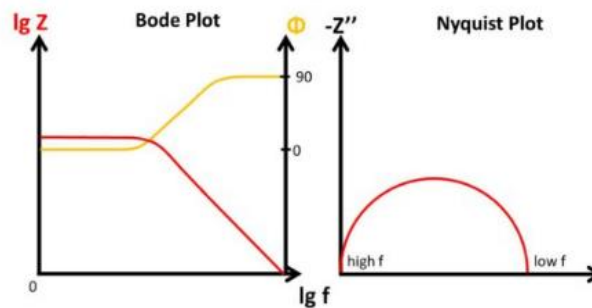
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα Nyquist

Το διάγραμμα Nyquist (Σχήμα 4.5) παρουσιάζει ένα απλό κύκλωμα μιας αντίστασης και ενός πυκνωτή κατά μία σταθερά χρόνου. Το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, $\text{Re}Z$, απεικονίζεται στον άξονα x και το φανταστικό στοιχείο, -

$\text{Im}Z$, απεικονίζεται στον άξονα y . Το $\arg Z$ είναι η γωνία φάσης και καλείται φάση φ της αντίστασης. Σε χαμηλή συχνότητα (π.χ. $\omega = 0$) η σύνθετη αντίσταση ισούται με R (αντίσταση) που είναι το πραγματικό μέρος. Το ημικύκλιο είναι χαρακτηριστικό μιας ενιαίας "χρονικής σταθεράς t ". Μια άλλη μέθοδος αναπαράστασης του μιγαδικού αριθμού της εμπέδησης είναι το διάγραμμα Bode. Η σύνθετη αντίσταση παριστάνεται στον οριζόντιο άξονα με την συχνότητα και στον κατακόρυφο άξονα με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης $|Z|$ και την μετατόπιση φάσης. Σε αντίθεση με το Nyquist Plot, το Bode Plot εμφανίζει πληροφορίες για την συχνότητα, όπως παρατηρούμε και στην επόμενη εικόνα για ένα κύκλωμα σε σειρά είτε είναι συνδεδεμένο παράλληλα. (Σχήμα 4.6)



A.



B.

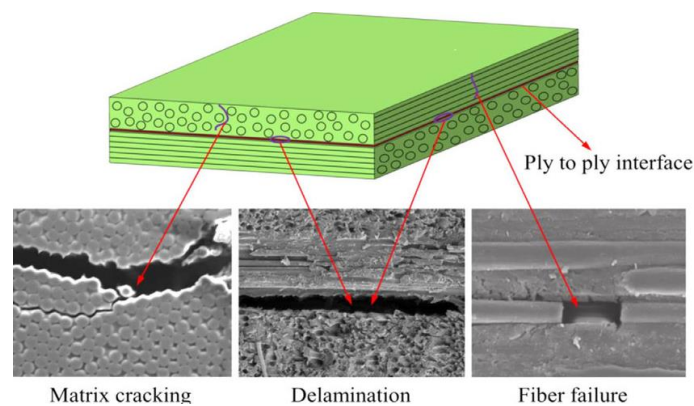
Σχήμα 4.6 A. Κύκλωμα σε σειρά
B. Κύκλωμα συνδεδεμένο παράλληλα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°. Αυτοιάσιμα Σύνθετα Υλικά

5.1 Αστοχία υλικών .

Παρότι η τεχνολογία των αυτό-ιάσιμων υλικών φαίνεται νέα, το πρώτο υλικό δημιουργήθηκε αρκετά χρόνια πριν. Πρόκειται για ένα κομμάτι τσιμέντου, το οποίο περιείχε γυάλινους σωλήνες γεμισμένους με ακρυλική ρητίνη.(16) Όταν σχηματίστηκαν ρωγμές, η ρωγμή έφτασε σε μερικές από τις ενσωματωμένες σωληνώσεις με αποτέλεσμα η ρητίνη να απλωθεί όπου υπήρχε κενό και λόγω της επαφής της με τον αέρα άρχισε να πολυμερίζεται ,ώστε τελικά να υπάρξει αποκατάσταση των ζημιών. Το σύστημα αυτό ήταν εντελώς αυτόνομο (C. Dry, 1994).

Τα υλικά αυτό- ίασης είναι μία κατηγορία ευφυή υλικών που έχουν την ικανότητα να αποκαθιστούν μικρής ή μεσαίας κλίμακας βλάβες και να επαναφέρουν τις μειωμένες λειτουργίες της δομής. Οι δύο κύριες βλάβες που βρίσκονται στα σύνθετα υλικά είναι οι ρωγμές στο εσωτερικό της μήτρας και η διαστρωματική αποκόλληση των στρώσεων τους. Από την φύση τους, οι βλάβες αυτές είναι δύσκολο να ανιχνευθούν και να αποκατασταθούν. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η ανάγκη για υλικά που να μπορούν να εντοπίσουν την ύπαρξη βλάβης και να την αποκαταστήσουν [22,23].



5.1 Διαστρωματική αποκόλληση πολυστρωματικής πλάκας μετά από καταπόνηση.

Ως βλάβη σε ένα υλικό, μπορεί να θεωρηθεί οποιαδήποτε αλλαγή εισάγεται στο σύστημα του μετά από κάποιου είδους μηχανικής φόρτισης, είτε από εξωτερικά ερεθίσματα από το περιβάλλον, που το κάνει να αποκλίνει από την αρχική βέλτιστη λειτουργία του. Μετά από πολλαπλές φορτίσεις, το υλικό και οι λειτουργίες του αρχίζουν και υποβαθμίζονται, έως ότου φτάνει σε τελική αστοχία. Με την πάροδο του χρόνου, τις συνθήκες φόρτισης, τον ρυθμό, το εύρος της καταπόνησης και των διεργασιών υποβάθμισης στις οποίες υποβάλλονται τα υλικά, ο όγκος των ζημιών αρχίζει να μεγαλώνει και αρχίζουν και τα υλικά μετατρέπονται σε λιγότερο αποδοτικά. Καθώς η βλάβη μεγαλώνει, φτάνει σε ένα σημείο όπου επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος σε τέτοιο επίπεδο, στο οποίο η κατασκευή μας γίνεται πλέον άχρηστη και επικίνδυνη για χρήση.

Με την χρήση της αυτό-ίασης μας δίνεται η δυνατότητα να προχωρήσουμε σε πιο ασφαλή υλικά, με μεγαλύτερο χρόνο ζωής που θα εντοπίζουν την ζημιά, θα θεραπεύουν την βλάβη και θα μπορούν να επαναφέρουν στο υλικό τις αρχικές του λειτουργίες και ιδιότητες. Η αποτελεσματικότητα της επούλωσης εξαρτάται από τον χρόνο ρυθμούς αύξηση της της φθοράς σε σχέση με τον χρόνο της επούλωσης. Μία βέλτιστη αυτό-ίαση επιτυγχάνεται με τον ίδιο ρυθμό που συμβαίνει η βλάβη, προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητα του υλικού [22]. Τα υλικά αυτοίασης έχουν τη δυνατότητα να είναι πιο αξιόπιστα, καθώς είναι σε θέση να αποκαταστήσουν ορατές ή εσωτερικές και ζημιές και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής [2].

5.2 Τεχνικές Αυτοίασης

Τα αυτό-ίασιμα υλικά εμφανίζουν μεγαλύτερη μοριακή κινητικότητα από οποιοδήποτε υλικό.

Η ίαση ενός συστήματος μπορεί να επιτευχθεί αυτόνομα, είτε με κάποιο εξωτερικό ερέθισμα, όπως για παράδειγμα την θέρμανση. Ανάλογα με την τεχνική ίασης που τα χαρακτηρίζει χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες:

- Με αυτογενείς ιδιότητες αυτό-ίασης
- Με εξωγενείς παράγοντες ίασης.

Οι εξωγενείς παράγοντες διακρίνονται σε:

- συστήματα που βασίζονται σε δίκτυα και
- σε συστήματα που βασίζονται σε μικρο-κάψουλες, όπου είναι και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής.

Το εύρος των ζημιών που μπορούν να θεραπευτούν διαφέρει από τεχνική σε τεχνική. Είτε γίνει αυτόματα είτε με θέρμανση, η ίαση δημιουργείται σε κάθε τεχνική μετά από βλάβη. Τα συστήματα με δίκτυα αναπληρώνουν τον χρησιμοποιούμενο παράγοντα ίασης οδηγώντας έτσι το υλικό σε επαναλαμβανόμενη ίαση για αυτό και μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερο εύρος από τις κάψουλες.

Στα συστήματα που έχουν ενσωματωμένα δίκτυα στο εσωτερικό τους, ο θεραπευτικός παράγοντας έχει τη μορφή τριχοειδών αγγείων, τα οποία μπορούν να διασυνδεθούν είτε μονοδιάστατα (1D), είτε σε δύο διαστάσεις (2D), είτε ακόμη και σε τρεις διαστάσεις (3D). Την στιγμή της πρωταρχικής βλάβης, οι θεραπευτικοί παράγοντες ρέουν από τα κατεστραμμένα τριχοειδή αγγεία, μετά το οποίο το δίκτυο μπορεί να ξαναγεμίσει από μια εξωτερική πηγή, επιτρέποντας πολλαπλά τοπικά συμβάντα επούλωσης.

Στην κατηγορία των συστημάτων με εγγενείς ιδιότητες αυτό-ίασης, δεν υπάρχει θεραπευτικός παράγοντας αλλά τα ίδια τα πολυμερή διαθέτουν μια «κρυμμένη» ικανότητα αυτό-ίασης η οποία ενεργοποιείται από την πρόκληση βλάβης ή από ένα εξωτερικό ερέθισμα. Τα συστήματα που βασίζονται στην ενσωμάτωση μικρο-κάψουλων, περιέχουν τον παράγοντα ίασης σε κάψουλες από μικρο- έως νανο-

διαστάσεις. Μόλις οι κάψουλες θραυτούν από την ρωγμή του υλικού, ενεργοποιείται ο μηχανισμός αυτό-ίασης μέσω της απελευθέρωσης του παράγοντα επούλωσης στην περιοχή της βλάβης. Στην κατηγορία αυτή, υπάρχει μια και μοναδική ίαση καθώς μετά την απελευθέρωση ο τοπικός παράγοντας έχει εξαντληθεί.

5.2.1 Τεχνικές ενθυλάκωσης μικροκάψουλων

Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά της για συγκεκριμένες εφαρμογές, οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της κάθε κάψουλας. Οι διάφορες τεχνικές ενθυλάκωσης, είναι τεχνικές στις οποίες σχηματίζονται ομοιοπολικοί δεσμοί με το διάλυμα και η διαδικασία παρασκευής γίνεται σε οργανικό ή υδατικό περιβάλλον. (Whitesides,2002)

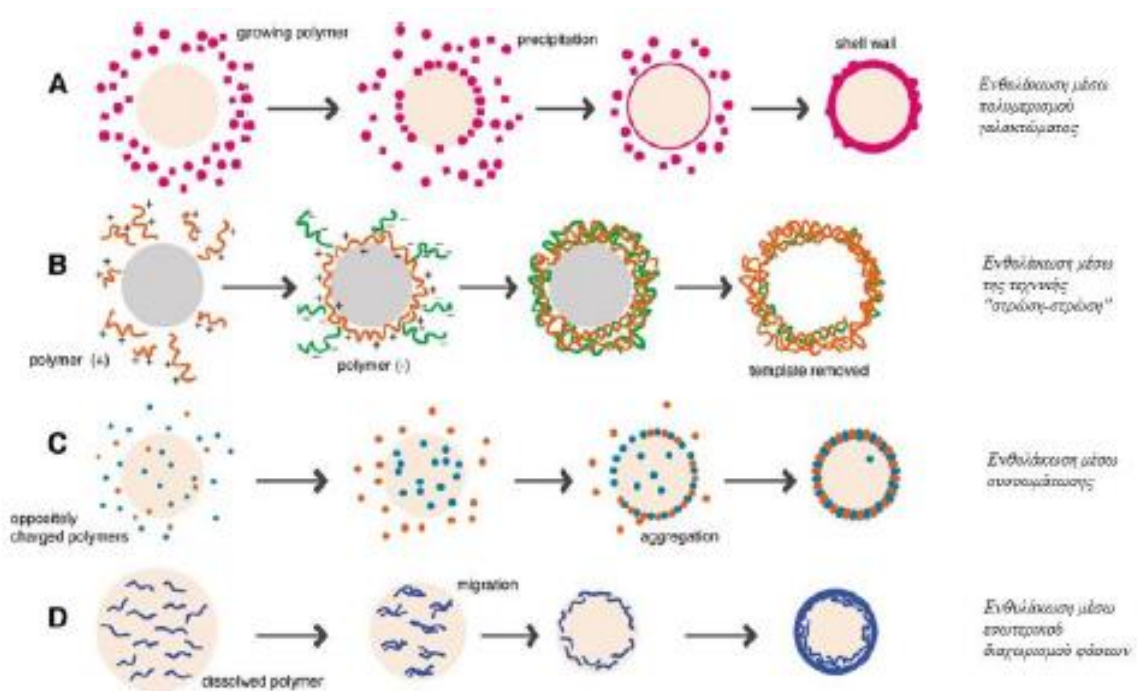
Τα χαρακτηριστικά κάθε κάψουλας που διαφοροποιούνται αναλόγως την μέθοδο είναι το πάχος του τοιχώματος, η χημική σύνθεση της κάψουλας, το είδος του πυρήνα, η μηχανική ακεραιότητα του τοιχώματος και το μέγεθος της κάψουλας.

Το τελικό σχήμα που παίρνει μια κάψουλα εξαρτάται από το αποτέλεσμα του σχήματος του υγρού σταγονιδίου στο γαλάκτωμα, από το ιξώδες και την επιλογή τασιενεργών, δηλαδή από την διαδικασία της κάθε τεχνικής. Οι τεχνικές είναι:

- Ενθυλάκωση μέσω πολυμερισμού γαλακτώματος: οι κάψουλες παρασκευάζονται μέσω πολυμερισμού είτε στην υδατική είτε στην οργανική διεπιφάνεια των σταγονιδίων μέσα στο γαλάκτωμα. Τα γαλακτώματα ελαίου σε νερό παράγονται με έντονη ανάδευση ή με κατεργασία με υπέρηχους (sonication) όπου τα σταγονίδια του υγρού, γίνονται ο πυρήνας της κάψουλας. Το τοίχωμα της κάψουλας είναι λεπτό και υψηλής αντοχής. Οι κάψουλες αυτές δεν είναι «επαναφορτιζόμενες» και γίνεται χρήση τους μία φορά. Τέτοιου είδους κάψουλες χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση οργανικών/ανόργανων υβριδικών καψουλών στις οποίες τα νανοσωματίδια ενσωματώνονται στο πολυμερικό τοίχωμα της κάψουλας.
- Ενθυλάκωση με στρωση-στρωση (layer-layer): Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών για μικροκάψουλες (43). Η βάση είναι τα σωματίδια οξειδίων των μετάλλων που αιωρούνται σε ένα υδατικό διάλυμα. Οι στρώσεις σχηματίζονται από τα θετικά και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρικά σωματίδια μέσω ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων που προσκολλούνται στα σωματίδια οξειδίων. Μερικοί πυρήνες απαιτούν πιο ισχυρά οξέα για την παρασκευή τους. Αφού η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί, χρησιμοποιείται κάποιο οξύ για την απομάκρυνση του οξειδίου του μετάλλου που βρίσκεται στον πυρήνα, αφήνοντας έτσι μια κενή μικροκάψουλα. Η εισαγωγή του υλικού του πυρήνα

γίνεται μετά την δημιουργία μικροκάψουλας. Η προετοιμασία καψουλών που είναι σταθερές μετά την ξήρανση με το οξύ, επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ανόργανων νανοσωματιδίων για την ενίσχυση των μαλακών τοιχωμάτων των καψουλών που παράχθηκαν με την τεχνική αυτή. (95)

- Ενθυλάκωση μέσω συσσωμάτωσης: είναι μια εύκολη στην διαδικασία της, μέθοδος για δημιουργία καψουλών με εφαρμογές σε τρόφιμα. Η συσσωμάτωση περιλαμβάνει την εξουδετέρωση δυο αντίθετα φορισμένων πολυμερών σε υδατικό διάλυμα (96) Η ελαιώδης φάση περιέχει ένα πολυμερές ενώ η υδατική φάση περιέχει ένα πολυμερές αντίθετου φορτίου τα οποία έλονται και δημιουργουν συσσωμάματα, τα οποία μετακινούνται στην υδατική είτε οργανική διεπιφάνεια δημιουργώντας έτσι το τοίχωμα της κάψουλας.



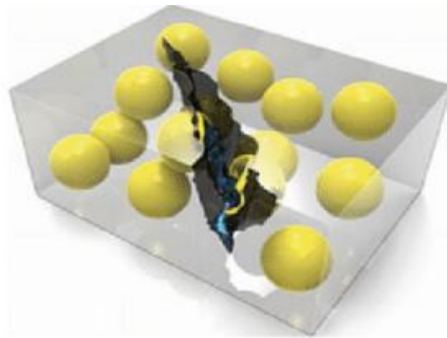
Εικόνα 5.2 Σχηματική σύνοψη των τεσσάρων τεχνικών ενθυλάκωσης [46].

- Ενθυλάκωση μέσω εσωτερικού διαχωρισμού φάσεων : κατά την τεχνική αυτή γίνεται διαχωρισμός φάσεων ενός πολυμερούς μέσα στα σταγονίδια του γαλακτώματος που είναι ένας διαλύτης. Τα σταγονίδια που προκύπτουν αιωρούνται σε ένα υδατικό στρώμα το οποίο σταθεροποιείται με συνεχή ανάδευση με την χρήση επιφανειοδραστικών. Όταν ο διαλύτης έχει εξατμιστεί τελείως, τα πολυμερή αρχίζουν να δημιουργούν το τοίχωμα της κάψουλας. Το τοίχωμα είναι υψηλής αντοχής και οι κάψουλες δεν είναι επαναφορτιζόμενες.

5.3 Συστήματα αυτό-ιάσιμων υλικών με κάψουλες

Η ακαμψία των καψουλών, είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες για την χρήση τους σε ένα αυτό-ιάσιμο λόγω της αντοχής τους σε θραύση και το μέτρο ελαστικότητας τους. Η τεχνική των κάψουλων ίασης, βασίζεται στην απομόνωση του παράγοντα ίασης μέσα σε αυτές, που κατά την αστοχία του υλικού, διαρρηγνύονται, απελευθερώνοντας τους αυτοθεραπευτικούς παράγοντες και ενεργοποιούν τον μηχανισμό ίασης.

Οι κάψουλες αποτελούνται εξωτερικά από το τοίχωμα και στο εσωτερικό τον πυρήνα τους. Για την παρασκευή ενός συστήματος κάψουλας, ώστε αυτό να έχει την μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα πρέπει να γίνει σωστή επιλογή των υλικών του τοιχώματος καθώς και την τεχνική ενθυλάκωσης. Η διαδικασία της αυτό-ίασης με χρήση κάψουλας σταματάει όταν εξαντληθεί ο θεραπευτικός παράγοντας, άρα η χρήση της είναι για μια φορά. Το κέλυφος του τοιχώματος της, λειτουργεί ως αισθητήρας στις ατέλειες.



Σχήμα 5.3 3-D ρωγή σε υλικό που έχει ενσωματωθεί σύστημα ίασης.

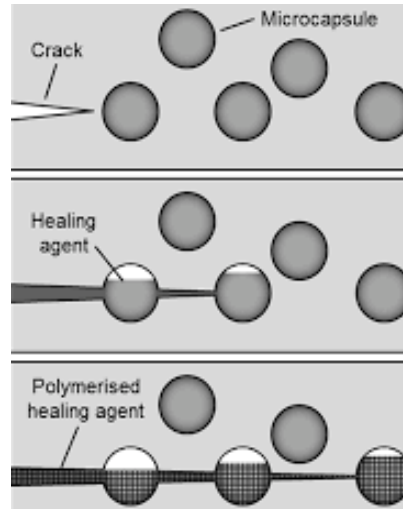
Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παράγοντες ίασης μπορεί να είναι: εποξειδικές ρητίνες, διαλύτες είτε πολυαμίνες. Όσον αφορά τον πυρήνα τους, θα πρέπει να έχουν χαμηλό ιξώδες και να είναι διαλυτός σε έλαιο και να είναι μη πεπτικός [26,28]. Οι κάψουλες με διαλύτη και εποξειδική ρητίνη είναι η πιο οικονομικά αποδεκτή τεχνική ενθυλάκωσης. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η εξαιρετική σύνδεση των κάψουλων με την μήτρα. Οι δύο πιο κοινές εποξειδικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι η Epon 828 (JEBA) και Epon 862 (DGEBF) [28].

5.3.1 Σχεδιασμός συστημάτων αυτό-ίασης με ενσωματωμένες μικρό-κάψουλες

Ο σχεδιασμός των αυτό-ιάσιμων υλικών με ενσωματωμένες μικρό-κάψουλες περιλαμβάνεται σε πέντε στάδια :

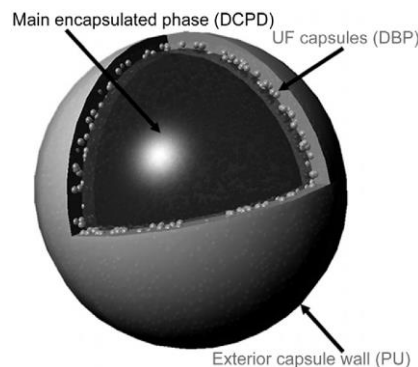
1. Εγκλωβισμός
2. Ενσωμάτωση

3. Μηχανικός χαρακτηρισμός
4. Ενεργοποίηση
5. Αξιολόγηση της αυτό-ίασης



Σχήμα 5.4 Διαδικασία κατά την οποία γίνεται η ίαση του υλικού

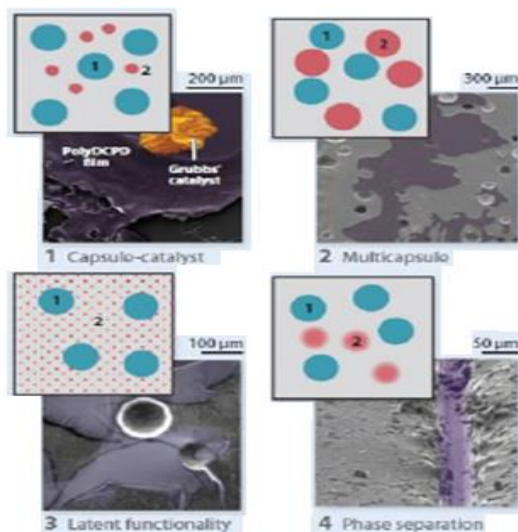
Τα κύρια χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την παγίδευση του παράγοντα ίασης κατά την ενθλάκωση είναι η διαλυτότητα, η αντιδραστικότητα, το ιξώδες και το pH του υλικού. Ο εγκλωβισμός τους μπορεί να επιτευχθεί είτε με ενθλάκωση είτε με διαχωρισμό των φάσεων. Αφού επιτευχθεί ο εγκλωβισμός, το επόμενο στάδιο είναι η ενσωμάτωση. Οι κάψουλες αναπτύσσονται δια τμηματικές τάσεις λόγω ανάμιξης και παράγονται μέσω *in situ*-ουρίας φορμαλδεΐδης και μελαμίνης-ουρίας-φορμαλδεΐδης. Οι κάψουλες ουρίας-φορμαλδεΐδης και μελαμίνης-ουρίας-φορμαλδεΐδης έχουν την δυνατότητα να επιβιώνουν στις συνθήκες που υποβάλλονται. Το μέγεθος των καψουλών κατά την διαδικασία ενθλάκωσης του ιοντικού παράγοντα, επηρεάζεται από την ταχύτητα με την οποία δημιουργείται. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα, τόσο μικρότερο μέγεθος έχουν οι κάψουλες. [36–38].



Σχήμα 5.1 Κάψουλες ουρίας-φορμαλδεΐδης (112)

Υπάρχουν 4 συστήματα για την παγίδευση του θεραπευτικού παράγοντα :

- κάψουλα-καταλύτης: ο παράγοντας επούλωσης είναι ένα υγρό ενθυλακωμένο στις κάψουλες και ο πολυμεριστής-αντιδραστής είναι ένας διασπαρμένος καταλύτης στην μήτρα. Ένα τέτοιο σύστημα , είναι το δικυκλοπενταδιένιο (DCPD) με σύστημα καταλύτη Grubbs. Τα μεγέθη αυτού του συστήματος κυμαίνονται από 5 έως 200 μm.
- πολυκάψουλα: βρίσκονται ενθυλακωμένα και ο παράγοντας ίασης μέσω υγρού και ο πολυμεριστής ο οποίος δημιουργεί αναλογά με τον πολυμεριστή διαφορετικά είδη κάψουλας, Τα δύο υγρά αντιδρούν μεταξύ τους αμέσως μόλις σπάσουν οι κάψουλες και πολυμερίζονται. Είναι μία μικρό-κάψουλα πολλαπλών στρώσεων όπου οι στρώσεις της είναι εγκλεισμένες σε μικρές σφαίρες μέσα σε μεγάλη σφαίρα . Τα μεγέθη αυτού του συστήματος κυμαίνονται έως 300 μm.
- σύστημα λανθάνουσας λειτουργικότητας : εδώ ο θεραπευτικός παράγοντας είναι ενθυλακωμένος σε κάψουλες με την μορφή σωματιδίων και το μέσο πολυμερισμού είναι ένα εξωτερικό περιβαλλοντικό ερέθισμα. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος είναι η εναπομένουσα λειτουργικότητα αμίνης σε μια εποξική μήτρα (96) Τα μεγέθη αυτού του συστήματος κυμαίνονται έως 100 μm.
- σύστημα διαχωρισμού φάσεων : όπου είτε ο θεραπευτικός παράγοντας, είτε ο πολυμεριστής είναι μια διαχωρισμένη φάση μέσα στο υλικό της μήτρας. Το μέγεθος τους κυμαίνεται μέχρι 50 μm.
- σύστημα μίας κάψουλας: στο σύστημα αυτό υπάρχει μόνο ένα υλικό ενθυλακωμένο. Ο θεραπευτικός παράγοντας μπορεί να είναι διαλύτης π.χ. μέταλλο χαμηλού σημείου τήξης ή η ίδια η μήτρα. Με το σπάσιμο της κάψουλας, το υλικό απελευθερώνεται και πολυμερίζεται με την βοήθεια του κοντινού καταλύτη.



Σχήμα 5.6 Συστήματα παγίδευσης παράγοντα ίασης (χρήση με καταλύτη στην έρευνα)
(115)

Κεφάλαιο 6°. Θερμογραφία Υπερύθρου

6.1 Θερμογραφία υπέρυθρου

Η προέλευση της τεχνολογίας IR ξεκίνησε με την ανακάλυψη του Sir William Herschel έξω από το βαθύ κόκκινο του ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αρχικά το αποκάλεσε αόρατο φως και αργότερα υπέρυθρο. Πέρασε ένας αιώνας τον πολλαπλασιασμό των ιδεών και των συζητήσεων μεταξύ επιφανών επιστημόνων (μεταξύ αυτών οι Macedonio Melloni, Gustav Kirchhoff, Clark Maxwell, Joseph Stefan, Ludwig Boltzmann) έως τις αρχές του 20ου αιώνα όταν ο Γερμανός φυσικός Max Planck προέβη στον βασικό νόμο της ακτινοβολίας, ο οποίος περιγράφει με ακρίβεια τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας από ένα σώμα και στην οποία βασίζεται η υπέρυθη ακτινοβολία (planck law) :

$$E_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_b T} - 1)}$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στον χώρο ως περιοδικά κύματα, με μήκος κύματος λ καθορισμένο για κάθε είδος και χρονική περίοδο ταλάντωσης. Τη οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας διάδοσης του κύματος

$$f=1/T \text{ όπου } f \text{ η συχνότητα ,} T \text{ ταλάντωση}$$

Το μήκος κύματος λ του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, συνδέεται με την συχνότητα f μέσω της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων στο κενό c , με την σχέση:

$$c=f \cdot \lambda \text{ όπου } c=2.9979 \times 10^8 \text{ [m/s] ταχύτητα διάδοσης}$$

Αντίστοιχα, το ποσό της ενέργειας E που μεταφέρεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας :

$$E=h \cdot f \text{ με } h=6.6256 \times 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s] σταθερά Planck}$$

Η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας σε μη καταστροφικές τεχνικές αξιολόγησης (non destructive techniques- NDT) εντοπίστηκε από τον Vavilon (103) στις αρχές του περασμένου αιώνα όταν ο πρώτος ανιχνευτής υπέρυθρων κατοχυρώθηκε από τον Parker το 1914 (104) Η πρόταση για χρήση ενός συστήματος υπέρυθρων για ανίχνευση ήρθε από το Barker το 1934 (3). Εν τω μεταξύ, ο Nichols το χρησιμοποίησε πρώτος σε βιομηχανική εφαρμογή [104] για έλεγχο της ομοιόμορφης θέρμανσης λωρίδων χάλυβα.

Οι πρώτες θερμογραφίες υπερύθρου ως NDT εκτελούνται από τον Green, ο οποίος ανέπτυξε μια τεχνική ελέγχου πυρηνικών καυσίμων αντιδραστήρα [5]. Στη δεκαετία του 1960, το πρώτο εμπορικό υπέρυθρο σύστημα (AGA Thermovision) εισήλθε στην αγορά. Χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο ηλεκτρικών /ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και αργότερα χρησιμοποιήθηκε για μη καταστρεπτικούς ελέγχους, όπως η δοκιμή του πυραυλοκινητήρα Polaris[6]. Αρχές της δεκαετίας του 1980 χάρις στην κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας [9] η θερμογραφία υπερύθρου από εκείνη τη στιγμή και μετά, χρησιμοποιείται ως η πιο χρήσιμη τεχνική στην αεροναυτική. (100)

Η θερμογραφία υπερύθρου, βασίζεται στην καταγραφή της ακτινοβολίας που εκπέμπει η επιφάνεια ενός σώματος στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (1mm έως 700 nm). Κατά την διάρκεια θερμογραφικού ελέγχου, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας στο υπό εξέταση σώμα. Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται είτε με αγωγή, είτε με ακτινοβολία και παρατηρείται μέχρι να επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία. Υπάρχουν τρία βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας με μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής α)η θερμική αγωγιμότητα, β)η ειδική θερμότητα c_p και γ) η πυκνότητα μάζας ρ . Όπου :

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c}, \text{ συντελεστής θερμικής διάχυσης}$$

$$\text{και } e = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c}, \text{ συντελεστής θερμικής αδράνειας}$$

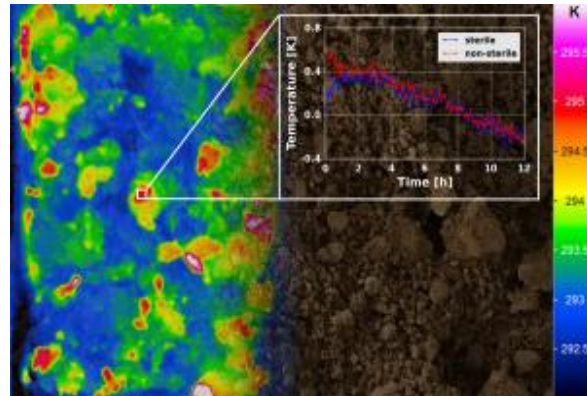
Η ύπαρξη εσωτερικών κενών σε ένα υλικό, μειώνουν τοπικά τη θερμική αγωγιμότητα και την πυκνότητα του συστήματος, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του συντελεστή θερμικής διάχυσης. Το αποτέλεσμα της θερμογραφίας υπερύθρου, είναι οι θερμικές εικόνες (θερμογράφηματα) σε έγχρωμη μορφή, στις οποίες αποτυπώνονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υπό εξέταση σώματος με διαφορετικές χρωματικές διαβαθμίσεις. Άρα η θερμογραφία υπερύθρου χαρτογραφεί την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού, καθιστώντας έτσι δυνατό τον εντοπισμό μη φυσιολογικών θερμοκρασιών, που με τη σειρά τους αποκαλύπτουν την ύπαρξη επιφανειακών ή υπό επιφανειακών ανωμαλιών.

6.1.1 Τεχνικές θερμογραφικού ελέγχου

Οι δύο βασικές τεχνικές του θερμογραφικού ελέγχου είναι η παθητική και η ενεργητική προσέγγιση. Ο παθητικός θερμογραφικός έλεγχος, εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο σώμα βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία από το περιβάλλον λόγω εσωτερικής παραγωγής θερμότητας, όπου η μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί παράμετρο για την αξιολόγηση της κατάστασης και της σωστής λειτουργίας του υπό εξέταση σώματος.

Η παθητική θερμογραφία, χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που η μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί παράμετρο αξιολόγησης της σωστής λειτουργίας του υπό

εξέταση στόχου. Όπως προαναφέρθηκε, η καταγραφή μη φυσιολογικών θερμοκρασιακών κατανομών στην επιφάνεια ενός υλικού εντοπίζει επιφανειακές ανωμαλίες που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι. Επίσης λόγω του Ohm μια αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης σε ένα σώμα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας και είναι δυνατόν να μελετηθεί η υπερθέρμανση μεταξύ καθώς και ελαττωμάτων.



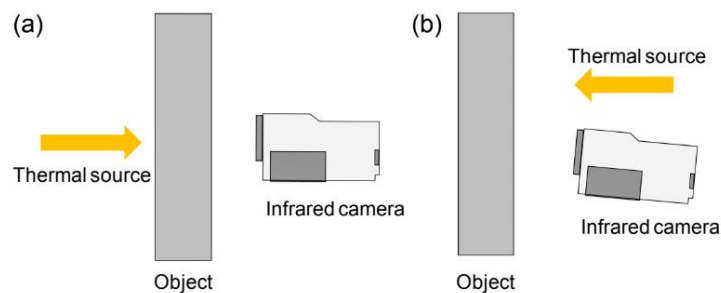
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα με μεγαλύτερη θερμοκρασία στα σημεία μικρο-ρωγμών

Ενδεικτικά, η τεχνική αυτή θερμογραφίας υπερύθρου, χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση κατασκευών και στην εξέταση μηχανολογικού εξοπλισμού, όπου, η χρήση μιας θερμογραφικής κάμερας μπορεί να εντοπίσει μη φυσιολογικές θερμοκρασίες και υπερθερμάνσεις. Η ύπαρξη κάποιου προβλήματος παρουσιάζεται γιατί, είτε αλλάζει τοπικά ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, είτε μεταβάλλεται ο συντελεστής θερμικής αντίστασης, συντελώντας έτσι, στην ανάπτυξη θερμοκρασιακών διαφορών στην επιφάνεια του εξεταζόμενου στοιχείου. Όμως, είναι δυνατή η ανάκτηση μόνο ποιοτικών πληροφοριών ανίχνευσης, χωρίς να είναι δυνατή η ανάκτηση ποσοτικών πληροφοριών για τις επιφανειακές ζημιές.

Ο ενεργητικός θερμογραφικός παλμικός έλεγχος, απαιτεί τη χρήση μιας εξωτερικής πηγής θέρμανσης η οποία διεγείρει το υλικό. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο υλικό, βρίσκεται σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας με μικρές βλάβες που δεν είναι δυνατό να εντοπιστούν με τον παθητικό έλεγχο. Κατά την διάρκεια της ενεργής θερμογραφίας, με τη διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του γίνεται καταγραφή της μεταβολής με το χρόνο, θερμοκρασιακής κατανομής σε μία ακολουθία θερμικών εικόνων.

Βασίζεται στον εντοπισμό θερμοκρασιακών διαφορών στο υλικό, λόγω της θερμικής ανομοιογένειας. Στην περίπτωση ενός ομοιογενούς μέσου, η θέρμανση είναι σταθερή, ενώ στην περίπτωση ύπαρξης μιας εσωτερικής ατέλειας (ρωγμάτωσης), η θέρμανση επιβραδύνεται μέχρι να φτάσει σε ισορροπία. Η διάδοση της θερμότητας εξαρτάται από πολλά ιδιότητες όπως θερμική αγωγιμότητα ή πυκνότητα, αλλά οι ανωμαλίες στην επιφάνεια που έχουν ως αποτέλεσμα διαφορά θερμοκρασίας. (102)

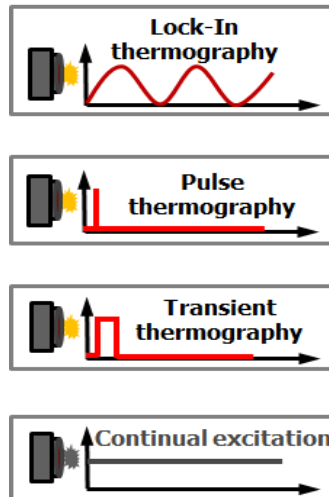
Ο ενεργητικός θερμογραφικός έλεγχος, πραγματοποιείται μέσω της ανακλαστικής μεθόδου ή μέσω της μεθόδου μεταφοράς. Στην πρώτη περίπτωση, η εξωτερική πηγή θερμικής διέγερσης και ο ir ανιχνευτής βρίσκονται στην ίδια πλευρά με το υλικό. Αντίθετα ο θερμογραφικός έλεγχος σε διάταξη μεταφοράς εκτελείται τοποθετώντας την πηγή και τη θερμογραφική κάμερα από την αντίθετη πλευρά. Για αυτό τον λόγο, έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί διάφορα μέσα παραγωγής θερμικής ενέργειας όπως οπτικά μέσα φωτογραφικά φλας, λάμπες υπερύθρου και λάμπες αλογόνου, είτε πηγές ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης όπως επαγωγικά πηνία παραγωγής δινορρευμάτων ή άλλα μέσα.



Σχήμα 6. 2 Σύστημα θερμογραφικού ελέγχου με χρήση θερμοκάμερας.

Από τις κατηγορίες ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου, η παλμική θερμογραφία (pulsed thermography) είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική. Το κύριο χαρακτηριστικό, είναι η θερμική διέγερση μικρής χρονικής διάρκειας με τη χρήση φωτογραφικών φλας η οποία διαρκεί κάποια sec για υλικά μεγάλης ή μικρής θερμικής αγωγιμότητας. Η εφαρμογή ενός σύντομου θερμικού παλμού, έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά όσο διαχέεται η θερμότητα στο εσωτερικό του υλικού. Τα δεδομένα, λαμβάνονται μέσω θερμικών εικόνων σε καθορισμένο χρονικό βήμα (Δt), ανάλογα με το χρόνο πτώσης της θερμοκρασίας. Η ανάλυση των δεδομένων βασίζεται στο γεγονός ότι η ύπαρξη ατελειών μεταβάλλει τις θερμικές ιδιότητες του υλικού, με αποτέλεσμα ο ρυθμός επιφανειακής ψύξης στις περιοχές χωρίς και στις περιοχές με ατέλειες να είναι διαφορετικός.

Η lock-in θερμογραφία, είναι ένας άλλος τύπος ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου. Αναφέρεται στο «κλείδωμα» της συχνότητας για κάθε περίοδο, ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής μετά από έναν κύκλο περιόδων. Η πειραματική διάταξη είναι ίδια με αυτήν του παλμικού θερμογραφικού ελέγχου, αλλά η θερμική διέγερση πραγματοποιείται με τη διάδοση περιοδικών θερμικών κυμάτων διαμορφωμένης συχνότητας και σταθερού πλάτους και όχι με τη διάδοση ενός απότομου θερμικού παλμού.



Σχήμα 6. 3 Παλμική θερμογραφία και lock in, με βάση το χρόνο.

Στην τεχνική διαμορφωμένου θερμογραφικού ελέγχου που είναι ένας άλλος είδος θερμογραφικού ελέγχου, είναι απαραίτητη η παρατήρηση τόσο του σήματος εξόδου όσο και του σήματος εισόδου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία των δεδομένων με τον υπολογισμό των διακυμάνσεων πλάτους και φάσης του σήματος εξόδου σε σχέση με του σήματος εισόδου.

6.1.2 Εφαρμογές υπέρυθρης θερμογραφίας (IR)

Σήμερα, υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές NDT(non destructive technique) και πολύ αποτελεσματικές, πολύ αποτελεσματικό. Όμως κάθε τεχνική έχει τους περιορισμούς της και, συχνά, πρέπει να υπολογίσει κανείς τον θόρυβο που εμφανίζεται μέσω των ελέγχων. Η τεχνική μέσω υπερήχων είναι υπερηχητική και η πιο γνωστή τεχνική στην αεροναυτική βιομηχανία, αλλά η υπέρυθρη θερμογραφία (IRT) αναγνωρίστηκε αργότερα και είναι πολύ χρήσιμη λόγω της δυνατότητας της ελέγχου μεγάλων περιοχών έχει αποδειχθεί επιτυχημένη για μη καταστροφικές δοκιμές.(18)

Οι κρούσεις μειώνουν την αντοχή των σύνθετων υλικών και μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρές συνέπειες λόγω της υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Για αυτό απαιτούνται τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου για την ανίχνευση ζημιών από κρούσεις, χωρίς να επηρεαστούν περισσότερο οι μηχανικές ιδιότητες του. Η ισχύς που εφαρμόζεται πρέπει να επαρκεί για τη θέρμανση του δείγματος, ώστε να θεραπεύσει ζημιές. Αυτό επιτυγχάνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Βέβαια, η μεγάλη είσοδος θερμικής ενέργειας και η υπερθέρμανση, μπορεί να υποβαθμίσουν την πρωτογενή δομή (ιδιαίτερα στην περίπτωση του CFRP, όπου η θερμοκρασία του σύνθετου πρέπει να διατηρείται σχετικά σταθερή). Στην περίπτωση περιοδικής

θερμικής φόρτωσης, η είσοδος ενέργειας πρέπει να επιτρέπει ομοιόμορφη θέρμανση του ελεγχόμενου εξαρτήματος.

Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση της συσκευή απεικόνισης απευθείας κατά τη διάρκεια της κρούσης, μπορεί να είναι επωφελής και να λάβουμε πληροφορίες σχετικά με την επέκταση της ατέλειας και την ένταση της σε πραγματικό χρόνο. Κατά τον έλεγχο, το υλικό δέχεται μια θερμική διέγερση και η διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του μελετάται μέσω θερμογραφικών εικόνων. Οι αστοχίες και οι βλάβες κοντά στην επιφάνεια, αλλά και στο εσωτερικό, μπορούν εύκολα να ανιχνευτούν από τα θερμοκρασιακά δεδομένα. (18) Στην πραγματικότητα, η ζημιά που προκαλείται από την πρόσκρουση σχετίζεται με την διαφορετική θερμοκρασία από την γύρω περιοχή που αναπτύσσεται, και μπορεί να απεικονιστεί on-line, στην επιφάνεια λόγω της πρόσκρουσης. [101] Η θερμογραφία υπερύθρου, χρησιμοποιείται και για την εγγραφή βίντεο εκτός των θερμικών εικόνων. Η απεικόνιση της θερμικής αλλαγής, που προκαλείται από την τοπική απορρόφηση της ενέργειας μέσω της κρούσης, επιτρέπει την απόκτηση πληροφοριών που είναι χρήσιμες για την απόκριση του υλικού στην εφαρμοζόμενη μηχανική καταπόνηση. Συγκεκριμένα, ελέγχουμε την αποκόλληση και το σημείο της βλάβης, που είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό και την επισκευή υλικών. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ανιχνευσιμότητα και η έγκαιρη ενημέρωση για την κατάσταση ενός υλικού, παρέχοντας οπτικές πληροφορίες με την ανάλυση θερμοκρασιακών δεδομένων. Βέβαια ένα στοιχείο που θερμαίνεται μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία, λόγω της ενεργειακής απόρριψης ή της υπερβολικής θερμότητας. Τέτοια προβλήματα μπορεί να οφείλονται σε χαλαρά προβλήματα συνδέσεις, υπερφορτωμένα ή ελαττωματικούς διακόπτες επαφής κ.τ.λ. (103). Οπότε πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Η παρούσα διπλωματική έρευνα, επιλέγει ως μέθοδο μη καταστρεπτικής μεθόδου δοκιμών για την ανίχνευση ζημιάς τη θερμογραφία υπερύθρου.

Ο Takahashi et al. [109] που εξέτασε την εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης ενός εποξειδικού πολυμερούς από τη θερμοκρασία. Ανέφεραν μείωση 0,3% στην τιμή ηλεκτρικής αντίστασης στην κατεύθυνση ενίσχυσης όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από τις συνθήκες δωματίου έως τους 60 ° C. Επίσης, όπως φαίνεται σε προηγούμενες μελέτες, η προκύπτουσα αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση είναι αμελητέα σε σύγκριση με την τοπική αλλαγή αντίστασης λόγω βλάβης. Παρουσιάζεται μια καινοτόμος τεχνική μη καταστροφικής αξιολόγησης (NDE) με βάση την τρέχουσα διεγερμένη θερμογραφία. Το διαμορφωμένο ηλεκτρικό ρεύμα εγχέεται σε πολυστρωματικά πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) ως εξωτερική πηγή θερμικής διέγερσης. Η θερμογραφία παλμού φάσης (PPT) χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για τον εντοπισμό βλάβης που προκαλείται από κρούση χαμηλής ταχύτητας. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου αποδεικνύεται τόσο

για απλές όσο και για τροποποιημένες μεμβράνες νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs), οι οποίες υπόκεινται σε σύνθετα ελασματοποιημένα κατεστραμμένα με χαμηλή ταχύτητα πρόσκρουση σε διαφορετικά επίπεδα ενέργειας. (104)

6.2 Φαινόμενο θέρμανσης Joule

Το φαινόμενο θέρμανσης μελετήθηκε για πρώτη φορά και χαρακτηρίστηκε από τον τότε διάσημο ερασιτέχνη επιστήμονα φυσικό J. P. Joule, γύρω στο έτος 1840. Μεταξύ των πειραμάτων που πραγματοποίησε, ήταν και η μελέτη της σχέσης μεταξύ του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μέσω ενός αγωγού και της αύξησης της θερμοκρασίας του. Η ανάλυση των καταγεγραμμένων δεδομένων οδήγησε στην αρχική μορφή της σχέσης που είναι τώρα γνωστή ως ο πρώτος νόμος του Joule, ότι «η θερμότητα ανά μονάδα χρόνου που αναπτύσσεται στο καλώδιο είναι ανάλογη της αντίστασης του καλωδίου και του τετραγώνου του ρεύματος».

Σε μαθηματική μορφή:

$$\frac{H}{t} = I^2 R$$

όπου H είναι η θερμότητα που παράγεται από τον αγωγό.

Η θερμότητα που παράγεται λόγω της ροής ρεύματος μέσα σε ένα ηλεκτρικό καλώδιο, εκφράζεται σε μονάδα Joules. **Ο νόμος του Joule** δίνεται με τον ακόλουθο τρόπο.

1. Η ποσότητα θερμότητας που παράγεται σε ένα ρεύμα είναι σύμφωνο με το τετράγωνο της ποσότητας ρεύματος που ρέει μέσω του σύρματος, όταν η ηλεκτρική αντίσταση του σύρματος και ο χρόνος ρεύματος ρέουν σταθερά.

$$i.e. H \propto i^2 \text{ [When } R \text{ and } t \text{ are constant]}$$

2. Η ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας είναι ανάλογη της ηλεκτρικής αντίστασης του καλωδίου όταν το ρεύμα στο καλώδιο και ο χρόνος ρεύματος ρέουν σταθερά.

$$i.e. H \propto R \text{ [When } i \text{ and } t \text{ are constant]}$$

3. Η θερμότητα που παράγεται λόγω της ροής ρεύματος είναι ανάλογη με το χρόνο ροής ρεύματος, όταν η ηλεκτρική αντίσταση και η ποσότητα ρεύματος είναι σταθερή.

$$H \propto i^2 \cdot R \cdot t \text{ [When } i, R \text{ and } t \text{ all are variable]}$$

$$H = \frac{1}{J} \cdot i^2 \cdot R \cdot t \text{ [}\therefore J \text{ is a Joule constant]}$$

Εδώ, 'H' είναι η θερμότητα που παράγεται σε Joules, 'i' είναι το ρεύμα που ρέει μέσω του αγωγίου σύρματος σε ampere και το 't' είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα. Υπάρχουν τέσσερις μεταβλητές στην εξίσωση. Όταν οποιαδήποτε τρεις από αυτές είναι γνωστές, η άλλη μπορεί να υπολογιστεί. Τώρα σύμφωνα με το νόμο του Joule, όπου I ένταση του ρεύματος, μέσω μιας αντίστασης R (ohms) για t (sec).

$$H = \frac{I^2 R t \text{ Joules}}{4.2 \text{ Joules/cal}} = \frac{I^2 R t}{4.2} \text{ cal} = 0.24 I^2 R t \text{ cal}$$

Με την εξάλειψη των I και R με τη σειρά τους στην παραπάνω έκφραση με τη βοήθεια του νόμου του Ohm, παίρνουμε εναλλακτικές μορφές

$$H = 0.24 V I t \text{ cal} = 0.24 \frac{V^2}{R} \text{ cal (as } V = IR)$$

Το τελικό αποτέλεσμα του φαινομένου Joule, είναι ότι όταν σε έναν αντιστάτη διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα, τότε η θερμοκρασία του αυξάνεται. Το ηλεκτρικό ρεύμα δεν είναι τίποτα περισσότερο από την προσανατολισμένη κίνηση ροής των ηλεκτρονίων, που προκαλείται μια διαφορά στο ηλεκτρικό δυναμικό μέσω δύο σημείων σε ένα υλικό, το οποίο τείνει να προκαλεί την κίνηση των ηλεκτρονίων στο υλικό όπου ισχύει ο νόμος του Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Η αντίσταση (R) του αγωγού να μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

όπου ρ ειδική αντίσταση, l το μήκος του αγωγού και A η μονάδα επιφάνειας

Η θέρμανση Joule (αναφέρεται επίσης ως θέρμανση αντίστασης ή ωμική θέρμανση) περιγράφει τη διαδικασία όπου η ενέργεια ενός ηλεκτρικού ρεύματος μετατρέπεται σε θερμότητα καθώς ρέει μέσω μιας αντίστασης. Όταν εφαρμόζεται υψηλότερη ισχύς παράγεται περισσότερη θερμότητα στο δείγμα και επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες. Αρκετές εφαρμογές που βασίζονται στη θέρμανση Joule περιλαμβάνουν θερμαινόμενες πλάκες. Για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των εξαρτημάτων και των συσκευών σε ηλεκτρονικά συστήματα, οι μηχανικοί μπορούν να ενσωματώσουν τη σχεδίαση ψύξης. Χρησιμοποιούμε το φαινόμενο Joule σε πολλές εφαρμογές στα σύνθετα υλικά, όπως στην δημιουργία ένας καλου θερμοηλεκτρικού υλικού που πρέπει να έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα (λ) ώστε να μπορεί να διατηρηθεί εύκολα η θερμική και ψυχρή περιοχή στα δύο άκρα του, στην ανίχνευση των αστοχιών του υλικού και στην επίτευξη ίασης υλικών μέσω θέρμανσης.

6.2.1 Φαινόμενο θέρμανσης μέσω ηλεκτρικής αντίστασης σε ιάσιμα υλικά

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός σύνθετου υλικού ,εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο σώμα και αποτελεί αντίστροφο μέτρο της ηλεκτρικής αντίστασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα θα ρεύσει εντός του αγωγίμου δρόμου του υλικού. Ανάλογα λοιπόν με την τιμή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως αγωγός ή μονωτής. Στα σημεία όπου η αντίσταση είναι μέγιστη, το υλικό μας δεν λειτουργεί ως αγωγός γιατί δεν περνάει με ευκολία το ρεύμα. Τα σημεία στα οποία γίνεται υπερφόρτωση τους ρεύματος είναι τα σημεία όπου όπου το υλικό μας έχει υποστεί βλάβη.

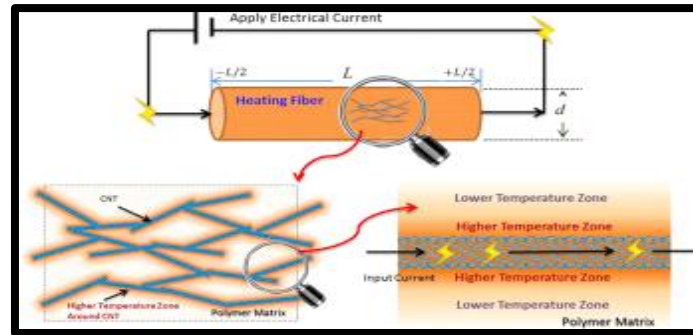
Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για τη θερμική διέγερση είναι η εκμετάλλευση της αγωγίμης φύσης των CFRPs. Μέσω θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να επιτευχθεί επούλωση των ζημιών σε ένα σύνθετο υλικό. Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφερθήκαμε ότι για να ενεργοποιηθεί ο παράγοντας ίασης είναι απαραίτητη η θέρμανση. Η σχέση η οποία περιγράφει το φαινόμενο σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα ρεύματος για τη χρήση τους ως θερμαντικά στοιχεία Joule.

$$j = \sigma E , \text{ οδηγεί σε θέρμανση του υλικού.}$$

Με βάση την βιβλιογραφία Chen και άλλοι, (2002) ανέπτυξαν ένα πολυμερικό υλικό που μπορεί να σχηματίσει εκ νέου τους ομοιοπολικούς δεσμούς στο πολυμερές όταν θερμαίνεται. Σε αυτό το υλικό, το 30% των συνδέσεων μεταξύ των μονομερών αποσυνδέεται κατά τη θέρμανση του δείγματος πάνω από 120°C και στη συνέχεια επανα συνδέεται κατά την ψύξη. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θεραπεύσει διαδοχικές ζημιές.

Ο Williams (2007) προτείνει ένα ηλεκτρικά αγωγίμο πολυμερικής μήτρας υλικό ως υλικό που ανταποκρίνεται στην παραγωγή θερμότητας. Ένα πιθανό πρόβλημα όμως που είχε προκύψει ήταν για την παραγωγή θερμότητας μακριά από την θέση της ζημιάς, λόγω υψηλής αντίστασης επαφών. Όταν σχηματίζεται μια ρωγμή , κατά μήκος της ίνας προκαλείτε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Τα ηλεκτρικά κυκλώματα που συνδέονται με το υλικό θα μπορούσαν να παρακολουθούνται και να ανιχνεύουν την αλλαγή στην αντίσταση και να πυροδοτούν την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Σε αυτή την έρευνα βασίζεται και η μελέτη αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής.

Η ρωγμή είναι η πηγή αυξημένης αντίστασης. Επομένως, το εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο παράγει θερμότητα τοπικά στη ζημιά (Williams (2007)) και μπορεί να επιτευχθεί η ενεργοποίηση του παράγοντα ίασης. Γίνεται χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας για την επούλωση ζημιών μπορεί να επιτευχθεί μέσω ηλεκτρικής αντίστασης θέρμανσης.



Σχήμα 6.4 Ίνα άνθρακα. Δημιουργία ηλεκτρικού κυκλώματος για επούλωση ρωγμής.

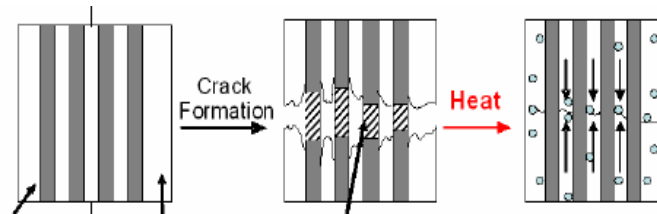
Οι Kwok και Hahn (2007) διερεύνησαν τη χρήση ινών άνθρακα ως θερμαντικά στοιχεία για αυτό ιάσιμα σύνθετα υλικά. Στο πείραμα τους, παρασκεύασαν σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα με ίνες άνθρακα (CFRP) και δοκίμασαν διαφορετικού τύπου επαφές με ηλεκτρόδια. Η αντίσταση θέρμανσης αποδείχθηκε και συγκρίθηκε με αποτελέσματα προσομοίωσης στοιχείων. Στα αποτελέσματά τους, η αντίσταση στην επαφή ήταν εκεί όπου αυξανόταν μόνο η θερμοκρασία σε σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά η σύνθετη αντίσταση εμπέδησης κυριαρχούσε σε μεγάλες αποστάσεις ώστε το υλικό να θερμαίνεται και μακριά από την επαφή.

Οι Park και άλλοι (2008) χρησιμοποίησαν ίνες άνθρακα και ηλεκτρική αντίσταση που θεράπευσε τη ζημιά. Σε αυτό το έργο, ένα πολυμερικό υλικό θεραπεύεται όταν θερμαίνεται κοντά στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Το ρεύμα που διέρχεται μέσω ινών άνθρακα, παράγει θερμότητα σε κάθε στρώση στο πολυστρωματικό υλικό. Η ηλεκτρική αντίσταση θέρμανσης των ανθρακικών ινών επουλώνει με επιτυχία τη ζημιά λόγω κάμψης τριών σημείων

Όταν το πάχος του υλικού γίνεται λεπτότερο, επιτυγχάνεται υψηλότερη θερμοκρασία στη διασύνδεση μεταξύ των στρωμάτων του υλικού. (Misses 2009) Επίσης ο χρόνος θέρμανσης ολόκληρου του υλικού, επηρεάζει το προφίλ θερμοκρασίας. Ο Pedro το 2011 ανέφερε μελέτη σχετικά με τη θέρμανση Joule στο νανοσωλήνα. Αυτός είχε κάνει πραγματική απεικόνιση στη θέρμανση Joule, αλλά περιορίζεται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες. Η τρέχουσα πυκνότητα στις διασυνδέσεις αυξάνει τις θερμοκρασίες. Είχε τονίσει ότι, η πυκνότητα ρεύματος αυξάνει τη θερμοκρασία και αλλάζει την ειδική τιμή αντίστασης της επαφής και κατά συνέπεια θερμαίνει όλο το σύνθετο.

Σε κάθε δοκιμή υπάρχει μια διάρκεια κατά την οποία το δείγμα θεωρείται ότι έχει φτάσει σε μία θερμοκρασία σταθερής κατάστασης. Το πείραμα δεν θα αυξήσει τη θερμοκρασία του δείγματος μετά από μία σταθερή θερμοκρασία που του έχει επιβληθεί εξωτερικά. Με βάση αυτή την παρατήρηση ο θεραπευτικός χαρακτηρισμός θα πραγματοποιείται στο δείγμα για να ενεργοποιηθεί ο παράγοντας ίασης σε συγκεκριμένο χρόνο. Για να θερμάνουμε ένα υλικό ώστε να ενεργοποιήσουμε τον παράγοντα ίασης μέσω ωμικής αντίστασης, αντιλαμβανόμαστε ότι όταν εφαρμόζεται

υψηλότερη ισχύς θα παράγεται περισσότερη θερμότητα στο δείγμα και θα επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες. Επίσης κάθε πείραμα ακολουθεί μια συγκεκριμένη προσέγγιση εύρους θερμοκρασίας σε σταθερή κατάσταση. Ο έλεγχος του θεραπευτικού χαρακτηρισμού πραγματοποιείται με βάση αυτές τις παρατηρήσεις.



Εικόνα 6.5 Διαδικασία επούλωσης σε υλικά με σύστημα ίασης

Άρα η διέλευση ρεύματος μέσω ινών άνθρακα προκαλεί θέρμανση, μεταφέροντας θερμότητα στο υλικό και ενεργοποιεί την ίαση. Το φαινόμενο κατά 90% δημιουργείται στις περιοχές κοντά στα ηλεκτρόδια, δηλαδή στις περιοχές όπου η ισχύς η οποία καταναλώνεται είναι μεγαλύτερη του 1 W/m^3 . Σε περίπτωση θέρμανσης μέσω του φαινομένου Joule, κινδυνεύει η περιοχή του μετάλλου που συνδέεται με τα ηλεκτρόδια να υπερθερμανθεί λόγω της υψηλής του ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Συνεπώς είναι απαραίτητο να ελέγχεται η τιμή του ρεύματος των ηλεκτροδίων, αλλά και η θέση τοποθέτησης τους στο υλικό, ώστε να μην παρατηρούνται φαινόμενα υπερθέρμανσης. Η μέγιστη τιμή η οποία υπολογίστηκε είναι στις γωνίες των ηλεκτροδίων και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 105 και 107 W/m^3 [4, 12, 44, 47].

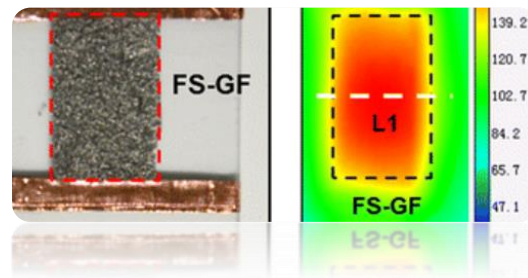
6.2.2 Φαινόμενο θέρμανσης σε πολυλειτουργικά υλικά αυτοδιάγνωσης

Το σύνθετο αυτοδιάγνωσης είναι κατασκευασμένο με νανοενισχυμένες ίνες και αγωγή υλικά. Το φαινόμενο Joule ενεργοποιείται και σε ένα σύνθετο υλικό αυτοδιάγνωσης (αισθητήρα), όπου οι αντιστάσεις του διαρρέονται από ρεύμα και το υλικό θερμαίνεται.

Όταν δημιουργείται ρωγμή στο υλικό, μειώνεται η αγωγή πορεία και αυξάνεται η ηλεκτρική του αντίσταση γύρω από τη ρωγμή, θερμαίνοντας επιλεκτικά το κατεστραμμένο μέρος. Αυτή η θέρμανση γύρω από τη ρωγμή με τη σειρά της απελευθερώνει τον παράγοντα ίασης και γεμίζει τη ρωγμή. Με αυτόν τον τρόπο, αναμένεται το σύστημα αυτοθεραπείας να λειτουργήσει. Το σύνθετο αυτό διάγνωσης μας δίνει πληροφορίες για την ρωγμή, με την μέτρηση της αλλαγής της ηλεκτρικής του αντίστασης και κατά συνέπεια, το σύστημα αυτοθεραπείας θα ενεργοποιηθεί σε αυτά τα σημεία. Επιπρόσθετα σε αυτές τις μελέτες, η αντίσταση θέρμανσης των αυτοθεραπευτικών σύνθετων υλικών έχει εφαρμοστεί με επιτυχία προκειμένου να ενεργοποιηθεί η διαδικασία «επούλωσης» της πολυμερούς μήτρας [46], [47], [48], [49]. Άρα λειτουργεί ως συσκευή θέρμανσης, αυτοίασης και αυτοδιάγνωσης.

Φυσικά μπορεί να επιτευχθεί μετατροπή ενέργειας έως και 100% από ηλεκτρική σε θερμική. Είναι πλέον καθιερωμένο ότι οι ηλεκτρικές ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν μέσω της ενσωμάτωσης αγώγιμων φάσεων στη μονωτική μήτρα. Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι η διασπορά αγώγιμων νανοσωληνών άνθρακα (CNTs) στην εποξική μήτρα του πολυστρωματικού υλικού [51], [52], [53], [54].

Θεωρώντας ότι θα υπάρχει ένα κύκλωμα με τον αγωγό και τις ίνες άνθρακα κατά την ίαση, προτείνεται η ανίχνευση ζημιών με της μέτρηση της αντίστασης μεταξύ αυτών των δύο «ηλεκτροδίων». Οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ζημιών στα εσωτερικά των μονωτικών στρωμάτων που βρίσκονται μεταξύ των ινών άνθρακα και το ρεύμα μπορεί να φτάσει μέχρι 7mA πριν υπερθερμανθεί και είναι ανάλογο της αντίστασης R του υλικού. Η αλλαγή στην χωρητικότητα χρησιμεύει, ως σήμα ανίχνευσης. Μετά την επούλωση, το κύκλωμα μετρά και αποθηκεύει μια νέα αντίσταση. Μέσω (IR) θερμογραφίας μπορεί να ελεγχθεί το πόσο αυξήθηκε η θερμοκρασία και να ελεγχθεί εάν έχει επουλωθεί το υλικό, μιας που δεν θα υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στα σημεία των ρωγμών, αλλά το σύνθετο θα είναι θερμοκρασιακά ομοιόμορφο.



Σχήμα 6. 4 Εικόνες από θερμική κάμερα με εφαρμογή θέρμανσης αντίστασης

ΜΕΡΟΣ ΙΙ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 7°.Πειραματική Πορεία

Η χρήση νανοενισχυμένων υλικών, οδηγεί στην δημιουργία ενός συνθέτου με βελτιωμένες ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες και μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, σε σχέση με τα συμβατικά υλικά (π.χ. ίνες υάλου, ίνες άνθρακα) [1]. Η δημιουργία του αγώγιμου δικτύου με νανοσωλήνες άνθρακα, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αύξηση της αγωγιμότητας.[6] Το να επιτευχθεί η πρόβλεψη των βλαβών και η έγκαιρη ενημέρωση για την αποφυγή τους είναι το πιο δύσκολο μέρος στην δημιουργία των υλικών. Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την παρασκευή σύνθετων αυτοιάσιμων υλικών, με σκοπό την παρακολούθηση του αγώγιμου δικτύου μέσω διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του υλικού μετά από μηχανικές καταπονήσεις. Ειδικότερα, εστιάζει στις δυνατότητες ίασης σύνθετων ενισχυμένων υλικών μέσω δύο διαφορετικών τρόπων θέρμανσης που μπορούν να εφαρμοστούν ακόμα και σε σύγχρονες εφαρμογές.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής ακολουθήθηκε η εξής πειραματική πορεία:

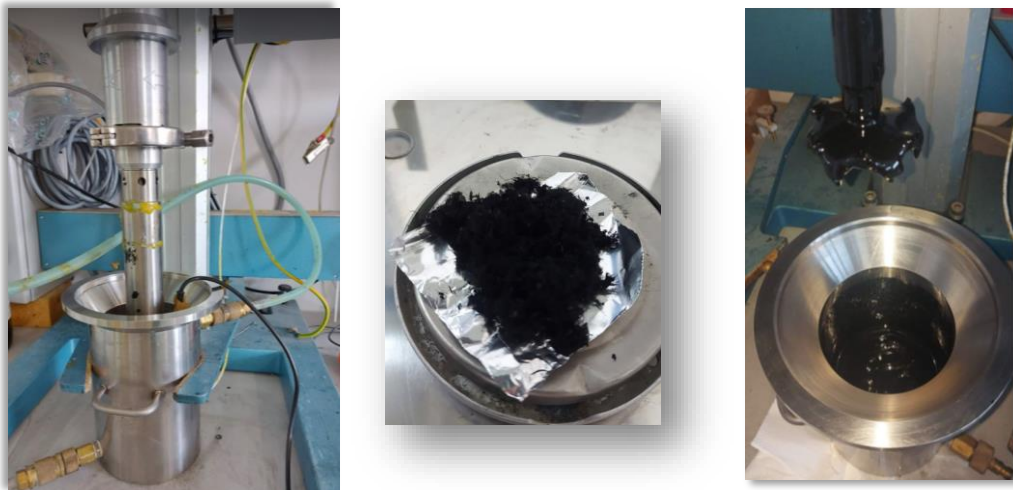
1. Δημιουργία νανοενισχυμένης ρητίνης για την πολυμερική μήτρα των δοκιμών
2. Σύνθεση μικρό-καψουλών με τη μέθοδο της ενθυλάκωσης μέσω πολυμερισμού γαλακτώματος σε 2 διαφορετικές κλίμακες διαστάσεων.
3. Κατασκευή δοκιμών ILSS (μικρής δοκού) ,mode II (μακράς δοκού) και πολυστρωματικών πλακών, είτε με εκτυπωμένους αγώγιμους δρόμους, είτε με χρήση ινών άνθρακα ως αγώγιμα δίκτυα με εφαρμογή ή χωρίς το σύστημα ίασης.
4. Μέτρηση αγώγιμου δικτύου δοκιμών μέσω διηλεκτρικής φασματοσκοπίας
5. Μηχανικές καταπονήσεις δοκιμών μέσω κάμψης 3 σημείων και κρούσεις μεσαίων ταχυτήτων σε όλα τα δοκίμια ανάλογα με τα standards δοκιμών.
6. Θέρμανση μέσω θερμοπρέσσας και αντίστασης θέρμανσης και στην συνέχεια παρακολούθηση με χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας.
7. Μηχανικός και ηλεκτρικός χαρακτηρισμός δοκιμών και εύρεση του ποσοστού ικανότητας αυτό-ίασης δοκιμών

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Σύνθετων και Ευφυών Υλικών, του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

7.1 Πειραματικός εξοπλισμός-Υλικά

7.1.1 Δημιουργία νανοενισχυμένης ρητίνης και σύνθεση μικρό-καψουλών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τα αποτελέσματα για την τροποποίηση της μήτρας με προσθήκη αγωγίμης φάσης, επιτυγχάνονται, όταν οι ίνες είναι αγωγίμες ή υπάρχουν εκτυπωμένοι αγωγίμοι δρόμοι σε ίνες γυαλιού. Για αυτό το λόγο τροποποιήσαμε την μήτρα για να πραγματοποιηθεί η πειραματική κατασκευή των πολυστρωματικών πλακών. Για την παρασκευή της μήτρας των υλικών στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε εποξικό σύστημα δύο μερών. Το ένα μέρος είναι η ρητίνη εταιρείας Araldite LY5052 της εταιρείας Huntsman Advanced Materials LLC όπου κατά την δημιουργία της μήτρας θα αναμειχθεί με σκληρυντή Aradu 5052 της ίδιας εταιρείας. Η ρητίνη όμως, για να προσφέρει καλύτερη αγωγιμότητα στο υλικό, θα είναι ternary. Δηλαδή θα περιέχει νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος (Multi Wall CNTs) σε ποσοστό 0,5% και άμορφο άνθρακα (CB) σε ποσοστό 1 % ώστε ικανά να σχηματίσουν ένα συνεχές αγωγίμο ηλεκτρικό δίκτυο εντός των ρητινών.



Σχήμα 7.1 Dissolver (λουτρό ανάδευσης) για δημιουργία ρητίνης και η ποσότητα MWCNTs που χρησιμοποιήθηκε ανά ποσότητα ανάδευσης.

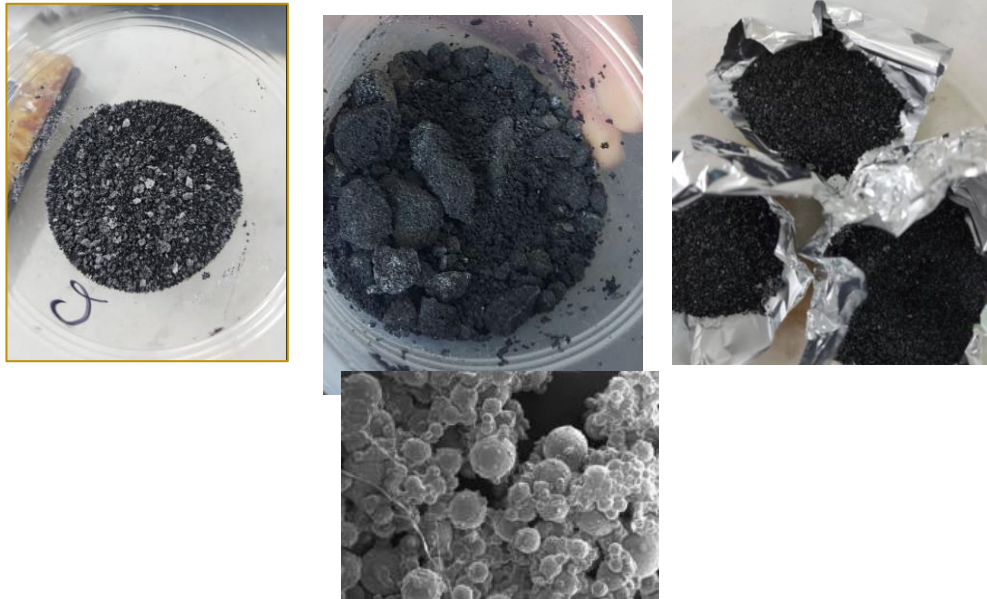
Λόγω της μεγάλης ποσότητας των πλακών που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμα, δημιουργήθηκε ρητίνη σε πολλές αναμίξεις σε μεγάλες ποσότητες με χρήση αναδευτήρα. Η ανάδευση διήρκεσε 3,5 ώρες κάθε φορά με ταχύτητα 3000 στροφές

ανά λεπτό σε ώστε να παρατηρηθεί ομογενοποίηση και να καταστεί η ρητίνη αγώγιμη σε όλη της την έκταση. Η διαδικασία ανάδευσης πραγματοποιείται εντός λουτρού σε 25° C ώστε η θερμοκρασία να παραμένει σταθερή για να μην καταστραφούν οι νανοσωλήνες. Η αναλογία ρητίνης και νανοσωλήνων ήταν 200 gr 1% CNTs και άμορφου άνθρακα 2% CB σε δύο δόσεις. Οι νανοσωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν MWNTs με διαμέτρους μεταξύ 10-15 nm και μήκη μεταξύ 1-10 μm. Αφού η ρητίνη ήταν έτοιμη αφαιρέθηκε από τον λουτρό και τοποθετήθηκε σε δοχεία για χρήση κατά την διάρκεια της κατασκευής των συνθέτων.

Για την παρασκευή μικρό-καψουλών επιλέχθηκε η μέθοδος ενθυλάκωσης με πολυμερισμό γαλακτώματος για τον εγκλωβισμό του παράγοντα ίασης. Επιλέχθηκε το τοίχωμα του διαλύτη να είναι ουρίας-φορμαλδεΐδης και ο παράγοντας ίασης εποξική ρητίνη τύπου DGEBA με πρόσθετη εφαρμογή 0,5% CNTs. Η ανάμιξη έγινε με 400 στροφές το λεπτό. Για την σύνθεση των μικρό-καψουλών χρειάστηκαν τα παρακάτω υλικά: • 2,5 gr Ουρία • Φορμαλίνη (37% φορμαλδεΐδη σε νερό) • 0,25 Ρεσορκινόλη • 0,25 Χλωρίδιο του αμμωνίου • 2,5 gr Συμπολυμερές αιθυλενομαλεϊκού ανυδρίτη (EMA) • Ρητίνη: Epikote 828 (DGEBA) • Διαλύτης: Αιθυλφαινυλ-οξικό άλας (EPA) • Απεσταγμένο νερό • Υδροξείδιο του Νατρίου (NaOH) ως βάση για την ρύθμιση του pH κατά την διάρκεια της ανάδευσης, • 0,5% CNTs.

Αρχικά τοποθετήθηκαν σε δοχείο ζέσεως, 100ml αποσταγμένου νερού και η μετρούμενη ποσότητας EMA και αφέθηκε υπό συνεχή ανάδευση για 2 ώρες, ώστε να προκύψει διάλυμα 2,5% w/v EMA . Στην συνέχεια τοποθετήθηκε το διάλυμα στον αναδευτήρα υψηλών στροφών, τύπου Disolver τα 100ml απεσταγμένου νερού και 25ml διαλύματος EMA σε θερμοκρασία δωματίου έτσι ώστε να ξεκινήσει η ανάδευση. Στη συνέχεια προστέθηκαν τα 2,5g ουρίας, 0,25g χλωρίδιο του αμμωνίου και 0,25g ρεσορκινόλη και συνεχίστηκε η ανάδευση μέχρι το διάλυμα να είναι και πάλι διαυγές για περίπου 15 λεπτά. Έπειτα με τη βοήθεια ενός πεχάμετρου μετρήθηκε το pH το οποίο παρέμεινε στον αναδευτήρα καθόλα την διάρκεια της ανάδευσης. Για την μείωση του ιξώδους της ρητίνης- διαλύτη, χρησιμοποιήθηκε ένας μη-τοξικός διαλύτης, το EPA. Η αραιώση που πραγματοποιήθηκε ήταν της τάξεως του 5% και το προσθέσαμε στο διάλυμα ρητίνης -διαλύτη. Στην συνέχεια προσθέσαμε τα 6,33g φορμαλίνης και αυξήθηκε η θερμοκρασία με ρυθμό 7°C/min μέχρι τους 55,5 °C, η οποία είναι και η τελική θερμοκρασία όπου αναδυόταν το μείγμα για 4 ώρες (σχήμα 7.1) Σε όλη τη διάρκεια της αντίδρασης μετρούταν συνεχώς το pH. Παρατηρήθηκε μια απότομη μείωση από το 3,18 απ' όπου ήταν αρχικά, στο 2,15 όταν η θερμοκρασία έφτασε στους 55°C και στη συνέχεια το pH παρέμεινε σχεδόν σταθερό. Όταν ολοκληρώθηκε η αντίδραση μετά από 4 ώρες, ακολούθησε η έκπλυση για την ανάκτηση των μικροκάψουλων, με τη βοήθεια ενός φίλτρου τύπου Buchner το οποίο περιείχε διηθητικό χαρτί σε σύνδεση με σωλήνα κενού. Στο φίλτρο τοποθετήθηκαν οι κάψουλες και έγινε έκπλυση.

Το μέγεθος των καψουλών εξαρτάται από το ρυθμό ανάδευσης. Όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός ανάδευσης τόσο πιο μικρή η διάμετρος στις κάψουλες που παρασκευάζονται. Η επιλογή λοιπόν των στροφών ανάμειξης καθόρισε και το μέσο μέγεθος των καψουλών που θέλαμε να παρασκευαστούν (150 mm). Τέλος, οι κάψουλες τοποθετήθηκαν σε ένα δίσκο με απορροφητικό χαρτί και τοποθετήθηκαν στον φούρνο σε θερμοκρασία (27°C) για τουλάχιστον 48 ώρες ώστε να γίνει η ξήρανση τους (εικόνα 19).



Σχήμα 7.2 Κάψουλες ουρίας-φορμαλδεΐδης με SWCNTs μετά την έκλυση

7.1.2 Κατασκευή σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού

Για την επίτευξη της παρούσης διπλωματικής κατασκευάστηκαν 25 δοκίμια με τη μορφή σύνθετων πολύστρωτων πλακών. Οι πλάκες, διαφέρουν στην δημιουργία των στρώσεων, ανάλογα με τους μηχανικούς ελέγχους που θέλαμε να επιτύχουμε για τον έλεγχο των βλαβών με βάση τα πρότυπα και παρουσιάζονται λεπτομερώς στη συνέχεια.

Για τη κατασκευή των πλακών χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές: επίστρωση με χρήση σακούλας κενού και επίστρωση με χρήση πρέσας. Η επίστρωση με κενό σε σύγκριση με την πρέσα παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι :ο μικρότερος χρόνος παραγωγής του προϊόντος, ελάχιστο κόστος εξοπλισμού και εργαλείων, η ικανότητα προσαρμογής της διαδικασίας παρασκευής για διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, η εύκολη ενσωμάτωση διαφόρων στοιχείων π.χ. εκτυπωμένες αγώγιμες διαδρομές και ηλεκτρόδια. Σε αντίθεση όμως με την χρήση πρέσας, η ομοιομορφία της κατασκευής εξαρτάται από την ικανότητα του μηχανικού και επίσης υπάρχει μεγάλη πιθανότητα

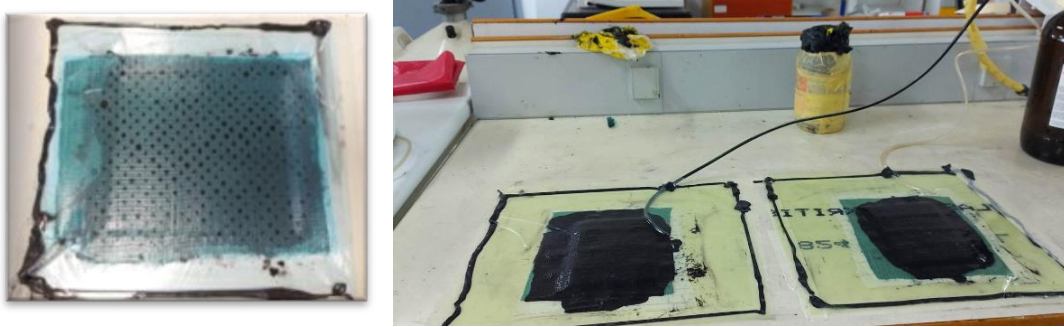
κενών και θορύβων στο τελικό προϊόν. Ειδικά στην περίπτωση χρήσης καψουλών όπως θα παρατηρήσουμε παρακάτω.

Σε σακούλα κενού χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά:

- Φιλμ αποκόλλησης (peel ply)
- Ύφασμα με πόρους που επιτρέπει στην πολύστρωτη να αναπνέει (breather σε μορφή νάιλον/bleeder με μορφή σίτας).
- Σακούλα κενού.
- Duck tape που βοηθάει στο να κλείσει αεροστεγώς η σακούλα,
- Αντλία κενού.

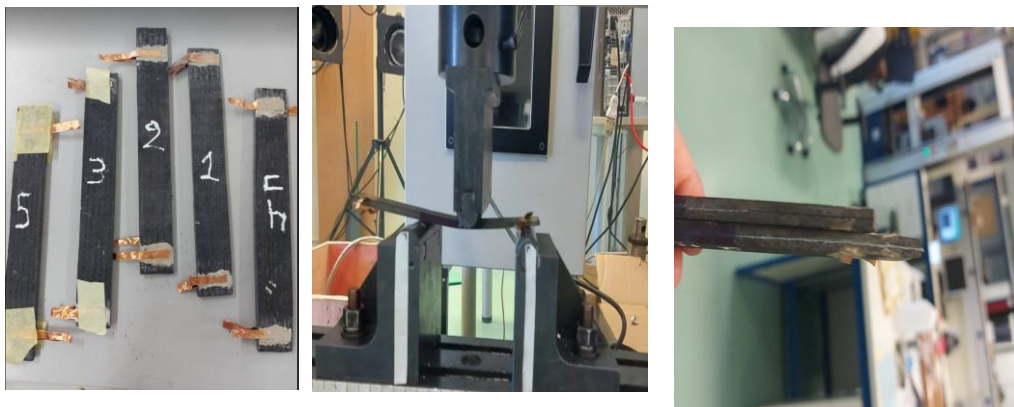
Για την δημιουργία της μήτρας των πλακών χρησιμοποιήσαμε ρητίνη-σκληρυντή. Η αναλογία μίξης για την δημιουργία της μήτρας είναι για 100 gr ternary ρητίνης, 38 gr σκληρυντή. Η αναλογία αυτή πρέπει να τηρείται αυστηρά αν θέλουμε να πετύχουμε υψηλή απόδοση της μήτρας, ειδικά στην περίπτωση των εποξικών ρητινών.

Αρχικά δημιουργήθηκαν δοκίμια Mode II μακράς δοκού. Στη τεχνική αυτή, τα υφάσματα από ίνες υάλου σε μονοδιεύθυντική ενίσχυση (UD) 0 , εμποτίζονται με υγρή ρητίνη σε αναλογία με τον σκληρυντή ώστε να σχηματιστεί ένα πολύστρωτο υλικό. Ο εμποτισμός της ρητίνης έγινε ταυτόχρονα με την επίστρωση των πανιών. Κατασκευάστηκαν 5 πολύστρωτες πλάκες, 2 με ενσωματωμένο σύστημα ίασης, 2 χωρίς σύστημα ίασης-κάψουλών (reference) για την αποτίμηση της μείωσης της αντοχής μετά την εισαγωγή του συστήματος αυτό-ίασης και για παρακολούθηση την θέρμανσης μέσω αντίστασης και 1 με εξωτερικά πανιά εμποτισμένα με μελάνι. Οι στρώσεις για την δημιουργία της πλάκας ήταν 16, 18x16 cm, όπου δύο εξωτερικές στρώσεις είναι κατασκευασμένες από ύφασμα ινών άνθρακα, ενώ οι ενδιάμεσες από ύφασμα ινών υάλου. Μεταξύ των στρώσεων 8 και 9 τοποθετήθηκε νάιλον πολύ (τετραφθοροαιθυλενίου)- (PTFE) για τη δημιουργία προ-ρωγμής στα δοκίμια. Στην περίπτωση που είχαμε προσθέσει το σύστημα αυτό-ίασης μεταξύ των στρώσεων 8 και 9 εκτός από το νάιλον, προσθέσαμε το σύστημα μικρό-καψουλών σε ποσοστό 2,5 gr και καταλύτη αλουμινίου 0.25 gr. Η αναλογία σκληρυντή-ρητίνης που εφαρμόστηκε ήταν 18,62 gr-49 gr αντίστοιχα. Μετα από κάθε επίστρωση, τα δοκίμια αφήθηκαν για πολυμερισμό σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες.



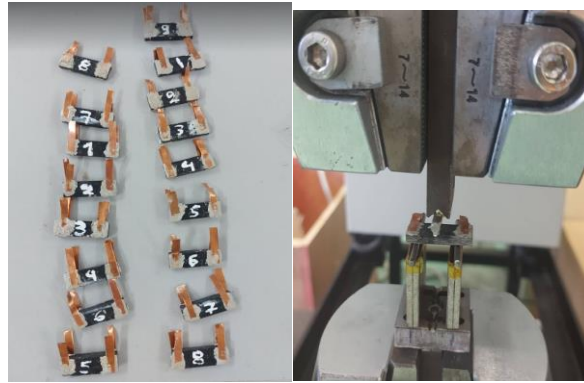
Σχήμα 7.3 Δημιουργία πλακών με αντλία κενού.

Στη συνέχεια τα δοκίμια κόπηκαν σύμφωνα με το πρότυπο σε συγκεκριμένες διαστάσεις, όπου μήκος $l = 16$ cm και πλάτος δοκιμίου $b = 1$ cm. Στις άκρες τους τοποθετήθηκαν για την μέτρηση των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων, αλλά και για την ενεργοποίηση της ίασης μέσω αντίστασης στην συνέχεια, ηλεκτρόδια από χαλκό τα οποία επικολλήθηκαν με χρήση silver paste. Στην συνέχεια τα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε κάμψη 3 σημείων για εισαγωγή βλάβης και μετρήθηκαν οι πειραματικές και ηλεκτρικές ιδιότητες πριν και μετά την ενεργοποίηση της ίασης. (Σχήμα 7.4)



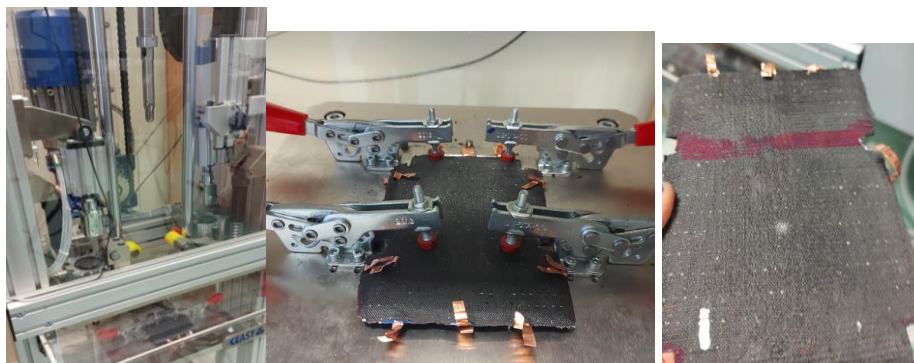
Σχήμα 7.4 Δοκίμια Mode II και δοκιμή κάμψης 3 σημείων (bending test)

Στην συνέχεια κατασκευάσαμε πλάκες για δοκίμια ILSS. Κατασκευάστηκαν 5 πολυστρωτες πλάκες. 2 με ενσωματωμένο σύστημα ίασης για την αποτίμηση της μείωσης της αντοχής μετά την εισαγωγή του συστήματος και για παρακολούθηση την θέρμανσης μέσω αντίστασης, 2 χωρίς σύστημα ίασης-κάψουλων (reference) και 1 όπου τα εξωτερικά πανιά ήταν εμποτισμένα με μελάνι. Ο τρόπος επίστρωσης των πολυστρωματικών πλακών ήταν υφασμάτων $0, 90, \pm 45, 0, 0, \pm 45, 90, 0$ σε μήκος 10×10 cm από ίνες γυαλιού συμμετρικά. Το σύστημα ίασης προστέθηκε σε όλη την επιφάνεια της πλάκας, όπου οι δύο εξωτερικές στρώσεις είναι κατασκευασμένες από ύφασμα ινών άνθρακα ή ψεκασμένες με επίστρωσή μελανιού. Αφού βάλαμε τις πλάκες σε σακούλα αντλίας κενού αφήσαμε το σύστημα $43,47$ gr ρητίνης- $16,52$ gr σκληρυντή να πολυμεριστεί και στην συνέχεια κόψαμε τα δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο σε διαστάσεις. specimen length $l = 8$ cm, specimen width $b = 1,92$ cm, Στα δοκίμια αυτά ασκήθηκε κάμψη τριών σημείων με βάση το standard D2344/D2344M – 13 (100).

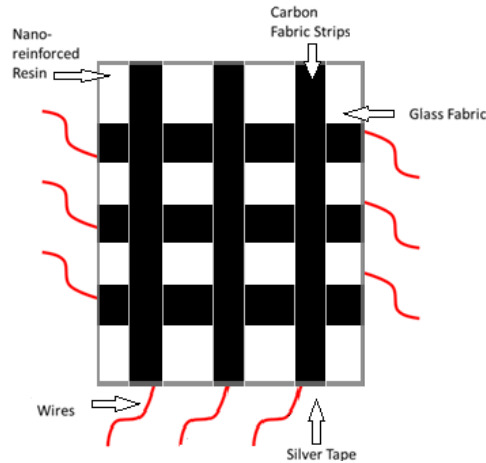


Σχήμα 7.5 Δοκίμια ILSS και δοκιμή κάμψης 3 σημείων (bending test)

Για την δημιουργία των υπόλοιπων 15 πολυστρωματικών πλακών ακολουθήθηκε η εξής διαστρωμάτωση υφασμάτων $0, 90, \pm 45, \pm 45, 90, 0, 0, 90, \pm 45, \pm 45, 90, 0, 0, 90, \pm 45, \pm 45, 90, 0$ σε μήκος $12 \times 15 \text{cm}$ από ίνες γυαλιού συμμετρικά. Το σύστημα ίασης προστέθηκε μεταξύ $0, 90, \pm 45, \pm 45, 90, 0$ (επίπεδο 1) $0, 90, \pm 45, \pm 45, 90, 0$ (επίπεδο 2) $0, 90, \pm 45, \pm 45, 90, 0$ (επίπεδο 3). Για τους σκοπούς της χαρτογράφησης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων δημιουργήθηκαν εντός των πολυστρωτων υλικών αγωγάμοι δρόμοι με σχήμα λωρίδας στα σημεία: $0,90$ με φορά στο 90 , $0,0$ με φορά στο 0 , $0,90$ με φορά στο 90 και στο $90,0$ με φορά στο 0 . Αυτό πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με τη χρήση δεσμών ινών άνθρακα, οι οποίες επιστρώνονται πάνω στα υφάσματα και ο δεύτερος είναι η εκτύπωση μέσω ψεκασμού μελανιού με νανοσωλήνες άνθρακα. (Σχήμα 7.6, Σχήμα 7.7)



Σχήμα 7.6 Δοκιμή κρούσης υψηλής ταχύτητας test σε σύνθετο υλικό νανοτροποιημένης μήτρας



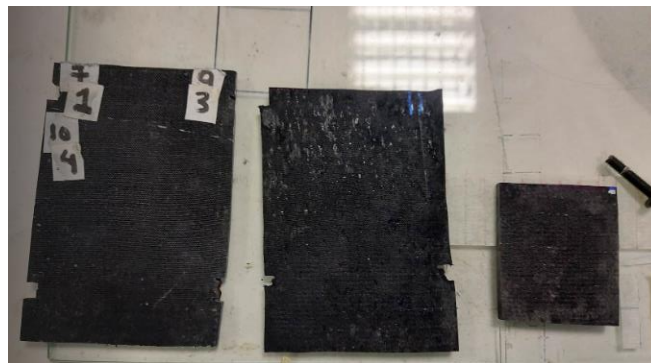
Σχήμα 7.7 Δημιουργία αγωγικών δρόμων ανα επίπεδο. (12 αγωγίμες διαδρομές)

Η κατανάλωση ρητίνης/σκληρυντή των υφασμάτων είναι 300 g/m^2 . Η συνολική επιφάνεια του δοκιμίου υπολογίστηκε ίση με $10 \times 10 \times 2 + 15 \times 15 \times 8 = 2.880 \text{ cm}^2$. Συνεπώς η απαιτούμενη ποσότητα συστήματος ρητίνης/σκληρυντή ήταν $2.880 \cdot 300/100 \cdot 100 = 76,4 \text{ gr} \rightarrow 80 \text{ gr}$. Η μικρή προσαύξηση γίνεται για να λάβουμε υπόψη τυχόν απώλειες. Συνεπώς, δεδομένης της αναλογίας του συστήματος, προέκυψαν 58 gr ρητίνης και 22 gr σκληρυντή. Από αυτή την αναλογία χρησιμοποιήθηκαν 2x30 gr συστήματος ρητίνης- σκληρυντή στα οποία εισάγαμε το σύστημα ίασης σε ποσότητα 7,5 gr κάψουλες και 0,75 gr αλουμίνιο ώστε να επιτύχουμε την εφαρμογή των καψουλών χωρίς την γρήγορη αντίδραση πολυμερισμού που προκαλείτε από τον σκληρυντή. Το υπόλοιπο ποσό ρητίνης-σκληρυντή εφαρμόστηκε στα σημεία όπου δεν μας ενδιέφερε η μελέτη της μετέπειτα αποκόλλησης.

Οι αγωγίμες διαδρομές σε σχήμα λωρίδας άνθρακα τοποθετούνται σε συγκεκριμένες στρώσεις του πολύστρωτου όπως είδαμε, έτσι ώστε αυτό να αποτελεί πυκνωτή. Ο τρόπος αυτός είναι απαραίτητος, ώστε να είναι δυνατή η χρήση της μεθόδου διηλεκτρικής φασματοσκοπίας για τη μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων της πλάκας και δημιουργία του χάρτη- βλάβης και για την αποτίμηση σε σύγκριση με και χωρίς την εισαγωγή του συστήματος αυτό-ίασης. Σε κάθε άκρο των αγωγίμων διαδρομών τοποθετήθηκαν κατά τη διάρκεια κατασκευής ηλεκτρικές επαφές από καλώδια χαλκού. Οι ηλεκτρικές επαφές κολλήθηκαν στις αγωγίμες διαδρομές με αγωγή ταινία silvertape, ούτως ώστε να έχουμε πλήρη επίγνωση για όλο το πάχος του υλικού. Τα καλώδια-ηλεκτρόδια προστατεύτηκαν με μονωτική ταινία, η οποία αφαιρέθηκε μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σκλήρυνσης. Όταν οι αγωγίμες οδοί κατασκευάζονται από λωρίδες υφάσματος ινών άνθρακα, υπάρχει ο κίνδυνος κατά τη δοκιμή πρόσκρουσης να συμβεί αποκόλληση των υφασμάτων άνθρακα από τα υφάσματα υάλου. Κάτι τέτοιο θα έδινε εσφαλμένες μετρήσεις διηλεκτρικής φασματοσκοπία καθώς θα έδειχνε βλάβη κατά μήκος όλης της λωρίδας. Όταν οι αγωγίμες διαδρομές εκτυπώνονται στο ίδιο το ύφασμα υάλου, τότε γίνονται κομμάτι του υλικού. Με το τρόπο αυτό αποφεύγεται η αποκόλληση όλης της αγωγίμης διαδρομής. (σχήμα 7.8)



A.

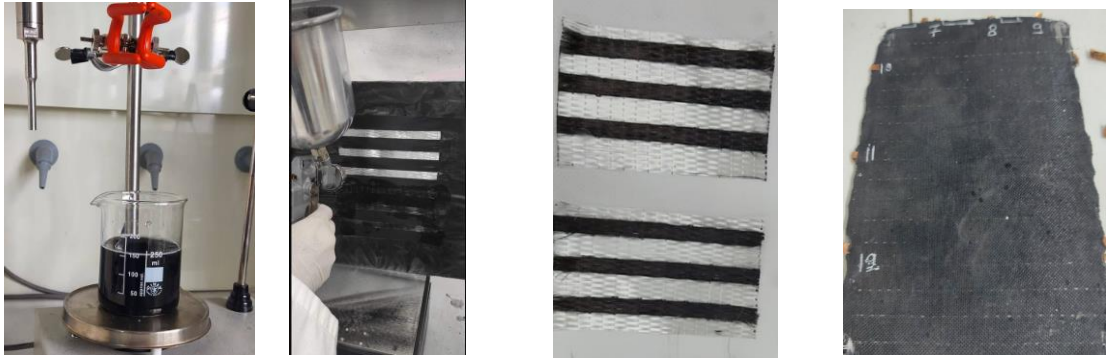


B.

Σχήμα 7.8 Α. Φωτογραφίες πολυστρωματικών πλακών ινών υαλού με αγώγιμες διαδρομές ινών άνθρακα

Β. Φωτογραφίες πολυστρωματικών πλακών ινών υαλού με αγώγιμες διαδρομές ινών άνθρακα μετά την ίαση των ατελειών

Στην συνέχεια ακολουθήθηκε η διαδικασία ψεκασμού (σχήμα 7.9) που έλαβε χώρα σε θερμαινόμενο υπόστρωμα των 115° C, ώστε το μελάνι να στεγνώσει σχετικά γρήγορα ώστε το σχήμα των αγώγιμων λωρίδων να μην μεταβληθεί. Το μελάνι αυτό ήταν διάλυμα ύδατος περιεκτικότητας w.t. 0,3% σε νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος (SWCNT) . Το μελάνι αραιώθηκε για την συγκεκριμένη διπλωματική με την ίδια ποσότητα απιονισμένου νερού, οπότε η τελική του περιεκτικότητα έγινε w.t. 0,1%.



Σχήμα 7.9 Διαδικασία δημιουργίας μελανιού και ψεκασμός πανιών για δημιουργία πλάκας

. Οι διαδρομές εκτυπώνονται παράλληλα με τις ίνες υάλου και σε σχήμα λωρίδας κατά την επίστρωση όπως ειπώθηκε παραπάνω. Για την επίτευξη του σχήματος αυτού και αποφυγή της επαφής μεταξύ των αγώγιμων περιοχών, κάτι που μπορεί να δημιουργήσει βραχυκύκλωμα, χρησιμοποιήθηκε προστατευτική μάσκα και ακολουθήθηκε η επίστρωση με ιδιαίτερη προσοχή. Οι εκτυπωμένες αγώγιμες διαδρομές έχουν διαστάσεις 1,5x10 cm, 1,5x15 cm ανά συγκεκριμένες στρώσεις με βάση την συμμετρία. Τέλος αναφέρεται ότι η αγωγιμότητα των εκτυπωμένων διαδρομών όπως αυτή είχε μετρηθεί παλαιότερα στο εργαστήριο ευφών και σύνθετων υλικών του τμήματος είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των υφασμάτων από ίνες άνθρακα.

7.1.3. Μέτρηση διηλεκτρικής φασματοσκοπίας και εικόνες θερμογραφίας υπερύθρου

Μετά τη κατασκευή των πολυλειτουργικών πλακών και των δοκιμών ILSS και Mode II, μετρήθηκαν οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες με την εφαρμογή ενός ημιτονοειδούς ηλεκτρικό πεδίου με εύρος συχνοτήτων από 1 Hz έως 100 kHz μεταξύ των σημείων σύνδεσης του των αγώγιμων λωρίδων μέσω της μεθόδου διηλεκτρικής φασματοσκοπίας. (σχήμα 7.10) Στην συνέχεια τα υλικά, υποβλήθηκαν σε δοκιμή κρούσης υψηλών ταχυτήτων και τα δοκίμια ILSS και Mode II σε δοκιμή κάμψης.



Σχήμα 7.10 Μετρήσεις διηλεκτρικής φασματοσκοπίας

Οι τιμές σύνθετης αντίστασης μετρήθηκαν ξανά μετά την εισαγωγή βλάβης, αλλά και μετά την ίαση με θερμοπρέσσα. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία μιας 3D τοπογραφικής εικόνας και σχηματίστηκε ένας χάρτης χωρικής κατανομής της κατεστραμμένης περιοχής, η οποία αποκάλυψε κρίσιμες πληροφορίες για την δομική ακεραιότητα του υλικού, για τον μηχανικό χαρακτηρισμό των δοκιμών και την εύρεση του ποσοστού ικανότητας αυτό-ίασης δοκιμών. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και στα δοκίμια πλακών είτε με ίνες άνθρακα. είτε με μελάνι με θέρμανση μέσω αντίστασης φαινομένου Joule.



Σχήμα 7.11 Θέρμανση με Joule Heating με εφαρμογή ρεύματος

Κεφάλαιο 8°.Ανάλυση-Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν, όπως προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων. Θα παρουσιαστούν εικόνες από τα διαγράμματα μηχανικών δοκιμών για την εύρεση ικανότητας αυτοίασης, τα διαγράμματα διηλεκτρικής φασματοσκοπίας ILSS, Mode II και των πολυστρωματικών πλακών και τα θερμογραφήματα των θερμικών αναλύσεων που προέκυψαν .

8.1 Εκτίμηση της ικανότητας αυτό-ίασης μέσω μηχανικών δοκιμών

Ο μηχανισμός αυτοθεραπείας εντοπίζεται είτε με μηχανικό έλεγχο του συστήματος ίασης ή μέσω δισδιάστατης ανάλυσης με βάση την ηλεκτρονική

μικροσκοπία σάρωσης. Για την αποτίμηση της ικανότητας ίασης τα δοκίμια τύπου Mode II και ILSS, δοκιμάστηκαν σε μηχανικούς ελέγχους βάσει προτύπων ASDTM. Για την ενεργοποίηση της ίασης, μετά την κάμψη, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην πρέσσα στους 80°C για 48 ώρες. Τα δοκίμια πριν την ίαση αναφέρονται ως virgin, ενώ αυτά που υπέστησαν βλάβη και επανεξετάστηκαν μετά την ίαση αναφέρονται ως repair. Το ποσοστό της ίασης υπολογίστηκε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι βάσει του μέγιστου φορτίου και της αντοχής του ορίου της δύναμης της δοκού (short beam strength) και ο δεύτερος μέσω του κρίσιμου συντελεστή απελευθέρωσης ενέργειας G_{II} στα Mode II. Ο τύπος για το συντελεστή ενέργειας είναι για τα δοκίμια Mode II:

$$G_{IIc} = \frac{9Fua^2}{2b(\frac{1}{4}L^3 + 3a^2)}$$

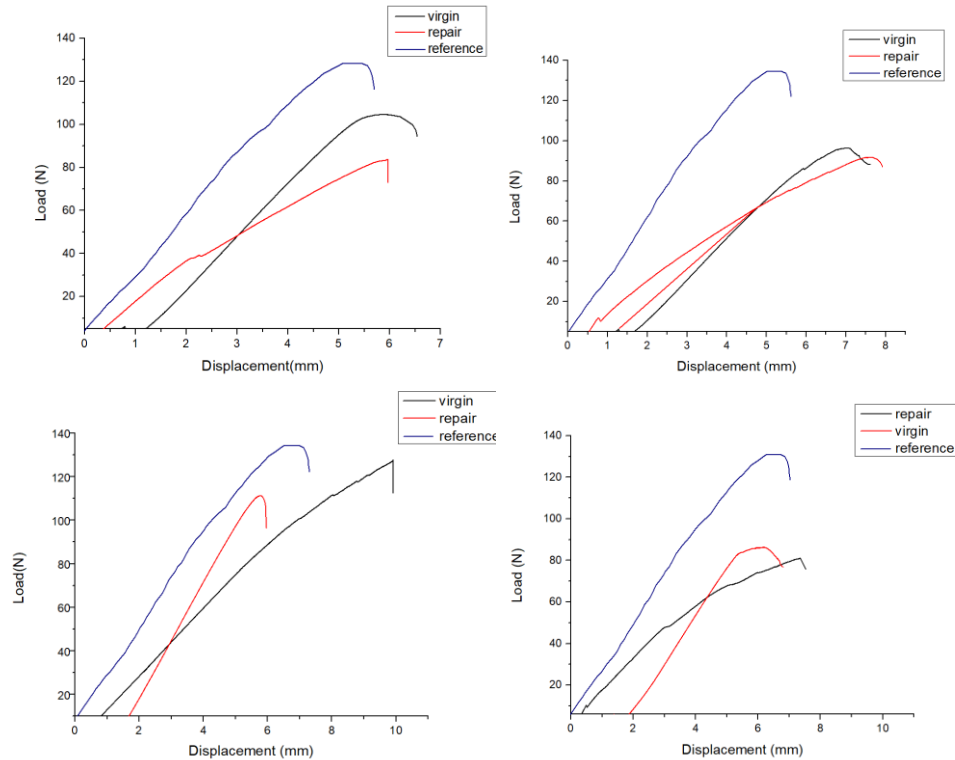
όπου F=μέγιστο φορτίο, u=μετατόπιση κεφαλών κατά την αποκόλληση του δοκιμίου, a=απόσταση προ-ρωγμής από την κεφαλή, b=πλάτος δοκιμίου, L=ενεργό μήκος δοκιμίου.

Για τον υπολογισμό αυτοίιασης του δοκιμίου, δίνεται ο τύπος:

$$\zeta = \frac{\text{Μεγ. Φορτίο}_{\text{Μετά την ίαση}}}{\text{Μεγ. Φορτίο}_{\text{Πριν την ίαση}}} \%$$

Για τα δοκίμια αναφοράς (reference) Mode II χωρίς το σύστημα ίασης, το μέγιστο φορτίο που σημειώθηκε ήταν κατά μέσο όρο 130 N (Πίνακας 1). Με την εφαρμογή του συστήματος ίασης ο μέσος όρος των δοκιμίων (virgin) πριν την δοκιμή κάμψης είναι 106 N, ενώ μετά την ίαση (repair) είναι 94 N με ποσοστό ίασης της τάξεως του 92,4 %. Τα αποτελέσματα στο σχήμα 8.1 και στους Πίνακες 1 και 2, δείχνουν μεγαλύτερη υποβάθμιση της αντοχής στο μέγιστο φορτίο που ασκείται κατά την εισαγωγή βλάβης μετά την εισαγωγή του συστήματος ίασης και μετά την ενεργοποίηση της ίασης σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Τα ποσοστά της υποβάθμισης του συντελεστή απελευθέρωσης ενέργειας G_{II} είναι μικρότερα σε σχέση με του μέγιστου φορτίου και μας δείχνουν το πόσο αργούν να αποκολληθούν οι άκρες στα δοκίμια στο σημείο που έχουμε τοποθετήσει το νάιλον για να γίνει η διάδοση της ρωγμής. Τα δοκίμια 1,2 και 4 έχουν μικρό συντελεστή θραύσης G_{II} και μέγιστο φορτίο αντοχής σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δοκίμια άρα και περισσότερο χρόνο μέχρι την κάμψη από τις κεφαλές στα άκρα του δοκιμίου. Τα δοκίμια 1,2,3 με τις εξωτερικές στρώσεις άνθρακα παρουσιάζουν αντοχή σε κάμψη με ποσοστό αυτό ίασης 90-94 % και 86-89 %. Το δοκίμιο 5 με εξωτερικές στρώσεις από μελάνι 87%. Το δοκίμιο 4 στο οποίο η ίαση ενεργοποιείται μέσω θέρμανσης Joule, είναι 95%. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα ο τύπος των εξωτερικών στρώσεων επηρέασαν την αντοχή σε κάμψη και το πάχος του δοκιμίου, με αποτέλεσμα τα δοκίμια με άνθρακα να γίνουν πιο άκαμπτα από τα υπόλοιπα. Επίσης για το ποσοστό αυτό ίασης,

παρατηρείται ότι σε κάποια δοκίμια ανάλογα με την πίεση που ασκούν οι κεφαλές της μηχανής, οι κάψουλες μπορεί να έχουν σπάσει πριν την μηχανική δοκιμή ή να έχουν περάσει σε κάποια άλλη στρώση κατά την επιστροφή πανιών με αποτέλεσμα οι κάψουλες να δρουν ως ατέλεια και να δημιουργούν κενά κατά τη δημιουργίας τους.



Σχήμα 8.1 Διάγραμμα Load (N)-Displacement (mm) δοκιμίων Mode II δοκίμια 1,2 με άνθρακα με θέρμανση μέσω πρέσας, δοκίμιο 3 με εξωτερικά πανιά ψεκασμένα μελάνι , 4 με θέρμανση μέσω αντίστασης

F_{max} (virgin)	F_{max} (repair)	F_{max} (reference)	% ποσοστό αυτοίασης	% ποσοστό υποβάθμισης
114	103	130	90.3588	-16
104	83	130	93.02326	-26
96	91	130	94.79167	-34
126	110	130	87.30159	-4
87	81	130	95.55112	-43

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίων Mode II ποσοστού αυτο-ίασης και υποβάθμισης με την τεχνική της πρέσας ή θέρμανσης μέσω αντίστασης , βάση του μέγιστου φορτίου

G_{II} virgin (kJ/m ²)	G_{II} repair (kJ/m ²)	G_{II} reference (kJ/m ²)	% ποσοστό αυτοίαισης	% ποσοστό υποβάθμισης
2.38	1.94	3.105	81.63281	-7.17
1.98	1.26	3.105	63.69268	-1.11
1.69	1.52	3.105	89.8546	-1.41
2.91	2.22	3.105	76.21567	-1.88
1.39	1.20	3.105	86.68252	-1.71

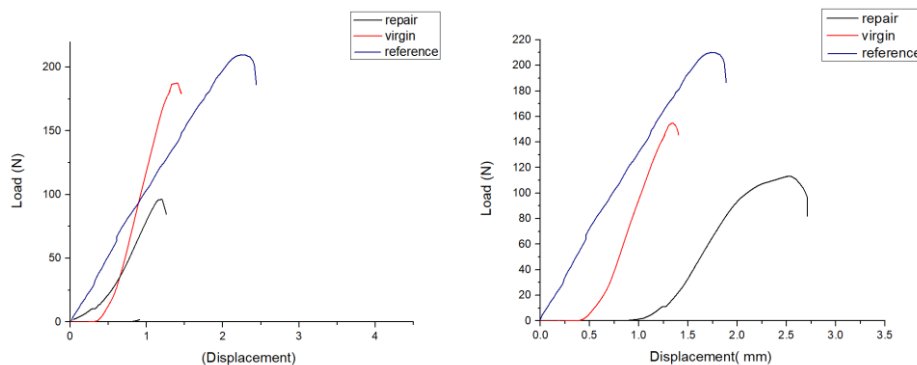
Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας ποσοστού αυτο-ίασης και υποβάθμισης σε επίπεδο σύνθετου υλικού με την τεχνική της πρέσας ή σύνθετης αντίστασης βάσει του μέγιστου φορτίου βάσει του συντελεστή G_{II}

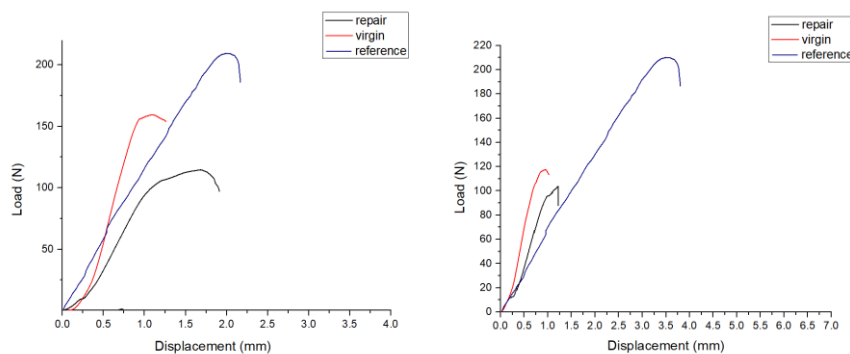
Για τον υπολογισμό του μέγιστου ορίου αντοχής-πίεσης των δοκιμίων ILSS:

$$F^{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h}$$

όπου F = μέγιστο όριο αντοχής (MPa), P_m = μέγιστο φορτίο κατά τη δοκιμή, b = πλάτος δοκιμίου και h = μετρούμενο πάχος δοκιμίου σε mm.

Στο σχήμα 8.2 επιλέγονται 4 δοκίμια. Δύο με στρώσεις άνθρακα, ένα με στρώσεις από μελάνι και ένα στο οποίο η ίαση έχει γίνει μέσω θέρμανσης αντίστασης φαινομένου Joule. Το μέγιστο short beam length όριο αντοχής από τον Πίνακα 3. του reference είναι 102 MPa, των δοκιμίων με εξωτερικά πανιά από ίνες άνθρακα είναι 88 MPa και 77 MPa για το virgin και 44 MPa και 56 MPa αντίστοιχα για τα repair δοκίμια μετά την ενεργοποίηση της ίασης. Για το δοκίμιο με εξωτερικά πανιά από μελάνι είναι 74 MPa για το virgin και 56 MPa για το repair. Για τα δοκίμια με ενεργοποίηση ίασης μέσω φαινομένου Joule είναι 57 MPa για το virgin και 43 MPa για το repair. Το μέσο μέγιστο φορτίο που ασκείται στο (reference) δοκίμιο είναι στα 213 N, ενώ με την εφαρμογή του συστήματος ίασης (virgin) είναι 139 N. Μετά την ενεργοποίηση της ίασης (repair) είναι στα 91N με μέσο ποσοστό αναβάθμισης-αυτοίαισης που υπολογίστηκε από το μέγιστο φορτίο πριν και μετά την ίαση είναι 64% περίπου. [115].





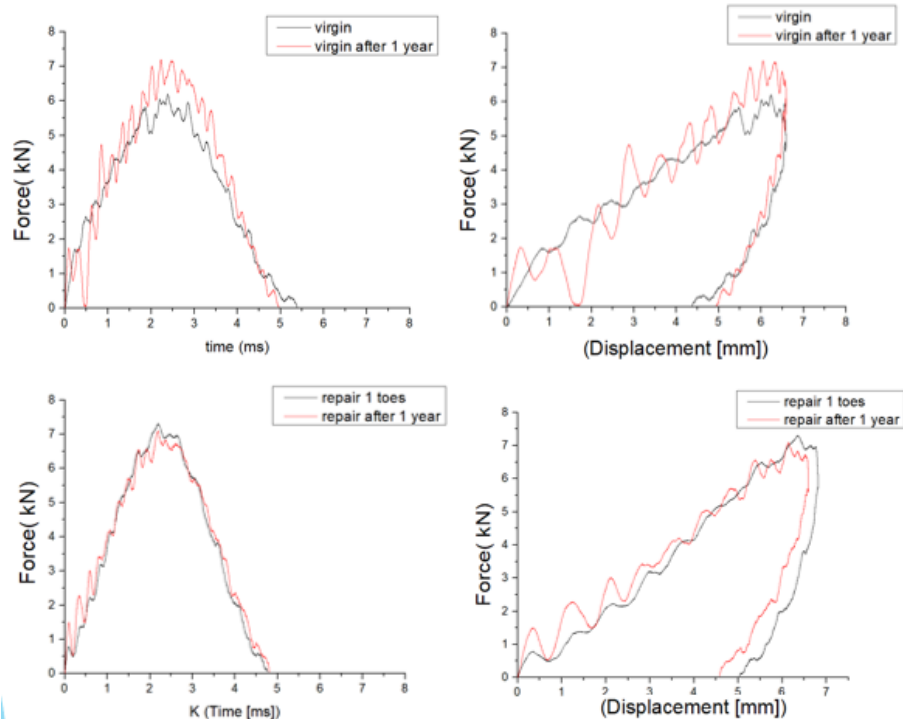
Σχήμα 8.2 Διάγραμμα Load (N)-Displacement (mm) δοκιμίων ILSS

P_{max} virgin (N)	P_{max} (repair)	P_{max} (reference)	% ποσοστό αυτοίασης	% ποσοστό υποβάθμισης	Μέγιστο φορτίο F virgin (strength) (MPa)	Μέγιστο φορτίο F Repair (strength) (MPa)	Μέγιστο φορτίο F reference (strength) (MPa)
182	97	213	53.2967	-30	88	44	102
159	114	213	71.69811	-54	77	56	102
152	114	213	79.4702	-61	74	56	102
117	96	213	82.05128	-96	57	43	102
152	114	213	79.4702	-60	74	56	102
200	116	213	58	-11	90	57	102
160	93	213	58.125	-51	77	42	102
141	104	213	73.75887	-70	63	52	102

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας ποσοστού αυτο-ίασης και υποβάθμισης σε επίπεδο σύνθετου υλικού ILSS με την τεχνική της πρέσας και σύνθετης αντίστασης βάση του μέγιστου φορτίου αντοχής

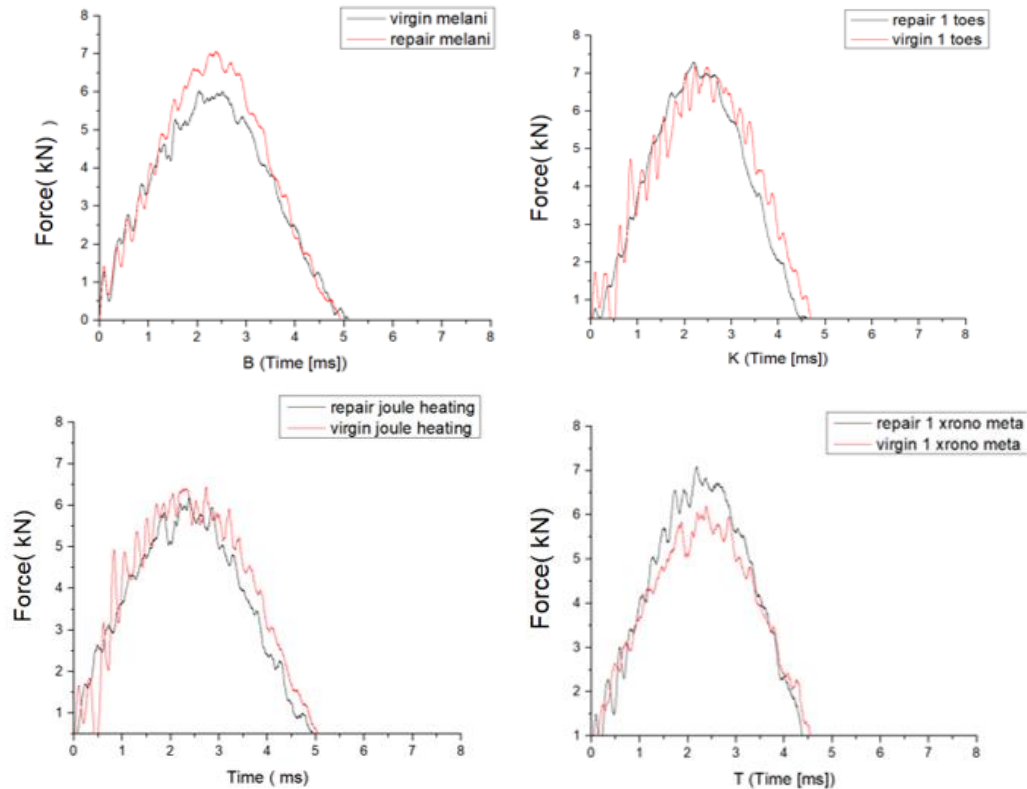
Η υποβάθμισή της αντοχής είναι μεγαλύτερη στα δοκίμια ILSS από ότι στα Mode II. Αυτό μπορεί να οφείλετε σε ατέλειες κατά την θέρμανση στο σημείο που βρίσκονται τα ηλεκτρόδια. Ίσως σε κάποια δοκίμια οι κάψουλες μπορεί να έχουν ήδη σπάσει πριν την μηχανική δοκιμή κατά την επίστρωση πανιών ή κατά το κόψιμο βάση προτύπων, με αποτέλεσμα οι κάψουλες να δρουν ως ατέλεια κατά την δημιουργία των δοκιμίων με αντλία κενού και να μην έχει επιτευχθεί η ίαση, όπως στο δοκίμιο 1 όπου το μέγιστο φορτίο μετά την ίαση πέφτει στο μισό στο υλικό μας. (Πίνακας 3). Πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά η επικόλληση των ηλεκτροδίων ώστε να μην είναι τόσο μειωμένη η αντοχή στην κάμψη. Βέβαια οι τιμές repair και virgin είναι σχετικά κοντά σε όλα τα υπόλοιπα δοκίμια που έχει ενεργοποιηθεί η ίαση. Άρα ως αποτέλεσμα μπορούμε να δούμε ότι επιτυγχάνεται η ίαση και η ενεργοποίηση της θέρμανσης μέσω αντίστασης. Άρα μπορούμε να συνεχίσουμε με τις μηχανικές δοκιμές πολυστρωματικών πλακών με αντίστοιχες διαστάσεις σε 3 επίπεδα.

Στα πολυστρωματικά υλικά που δημιουργήσαμε, ασκήθηκαν μηχανικές δοκιμές κρούσης υψηλών ταχυτήτων. Από τα διαγράμματα στο σχήμα 8.3Α και 8.3Β, παίρνουμε τις τιμές για το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στα δοκίμια με βάση το χρόνο αλλά και με βάση την μετατόπιση .

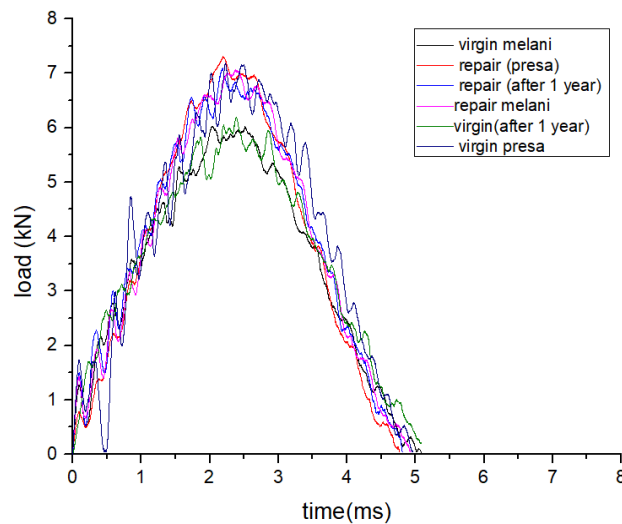


Σχήμα 8.3 Α. Διαγράμματα Load (kN)-Time (ms) και Load (kN)-Displacement (mm) για σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών 48 ώρες μετά και 1 χρόνο μετά

Στα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η δύναμη φορτίου αρχίζει να αυξάνεται μέχρι να φτάσει ένα μέγιστο, που είναι το max φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο κατά την χρονική στιγμή που δημιουργείται η οπή και πραγματοποιείται η εισαγωγή βλάβης στο υλικό. Οι τιμές load max για το δοκίμιο 1 toes virgin και 1 toes repair όπου η θέρμανση και η ενεργοποίηση της ίασης έγινε με πρέσα στα 6.177 kN και 7.285 kN αντίστοιχα, για το δοκίμιο όπου οι μηχανικές δοκιμές έγιναν 1 χρόνο μετά την δημιουργία των καβουλών και των πολυστρωματικών πλακών το μέγιστο φορτίο είναι virgin 7.077 kN και repair 7.141 kN. Για τις πλάκες όπου οι αγωγίμες διαδρομές δημιουργήθηκαν με μελάνι και η θέρμανση έγινε μέσω πρέσα είναι για το δοκίμιο μετά την ενεργοποίηση ίασης repair 6.144 kN και για το δοκίμιο στην αρχική του μορφή virgin 6.026 kN. Τέλος για τις πλάκες που έχει ενεργοποιηθεί η ίαση μέσω αντίστασης θέρμανσης το μέγιστο φορτίο virgin 6.1418 kN και repair 6.4147 kN.



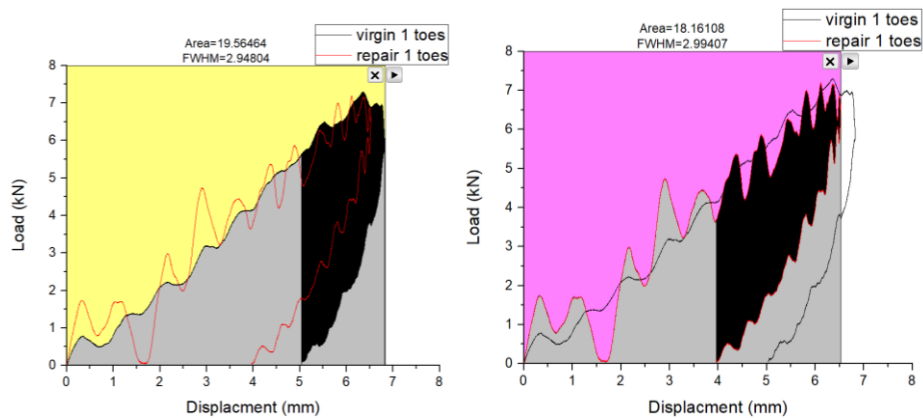
Σχήμα 8.3 Β. Διαγράμματα (kN) Time (ms) για σύγκριση μηχανικής αντοχής των σύνθετων υλικών



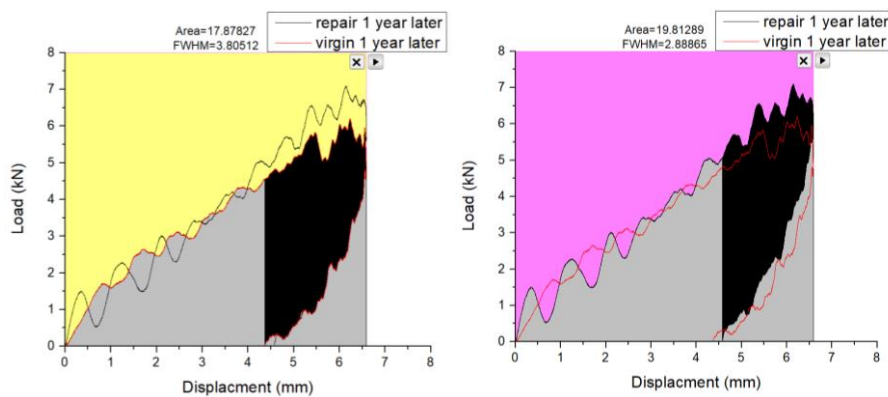
Σχήμα 8.4 Διάγραμμα Load (kN)-Time (ms)

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα αποτελέσματα, τα δοκίμια τα οποία έχουν αγωγίμες διαδρομές από μελάνι δεν είναι τόσο άκαμπτα όσο τα δοκίμια από τα οποία οι αγωγίμες διαδρομές είναι με άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κάψουλες ίσως αντιδρούν όταν έρχονται σε επαφή με τις ουσίες που έχει το μελάνι και δεν ενεργοποιούνται σωστά οι κάψουλες. Για αυτό δεν παρατηρούμε μεγάλη διαφορά

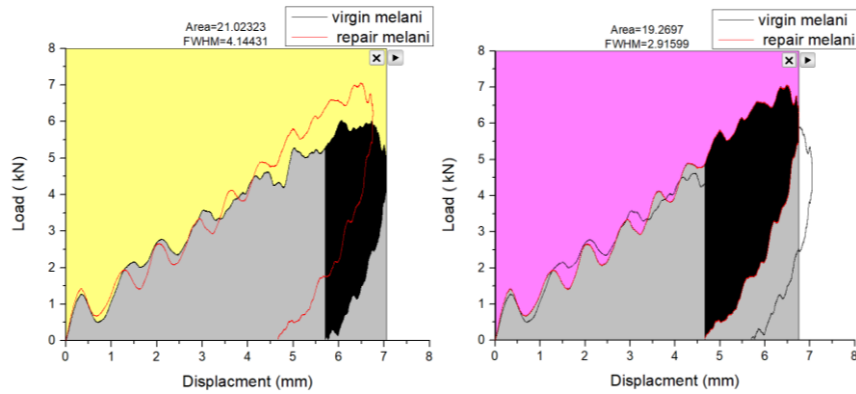
μεταξύ virgin και repair . Επίσης επειδη οι αγωγίμες διαδρομές έχουν ψεκαστεί πανω στο ύφασμα με μελάνι, το δοκίμιο έχει μικρότερο πάχος και δεν χρειάζεται να ασκηθεί μεγάλη δύναμη όπως σε αυτές με λωρίδες άνθρακα οπου το πάχος του δοκιμίου είναι 5,8 mm . Επίσης από τις τιμές μέγιστου φορτίου του δοκιμίου το οποίο δοκιμάστηκε μηχανικά μετα από ένα χρόνο, εάν συγκρίνουμε τις τιμές του μέγιστου φορτίου του , παρατηρούμε μεγαλύτερη αντοχή και κάμψη από κάθε άλλο δοκίμιο. Αυτό έχει δημιουργηθεί λόγω του ότι μετά από 365 μέρες με διάφορες μεταβολές της θερμοκρασίας, μπορεί καποιες από τις κάψουλες της πλάκας μας να έχουν ήδη πολυμεριστεί, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να έχει γίνει πιο άκαμπτο. Για αυτό και το load max του δοκιμίου virgin είναι μεγαλυτερο από το 1 toes virgin , αλλά το load max μετα την ενεργοποίηση της ίασης repair μικρότερο από το 1 toes repair.



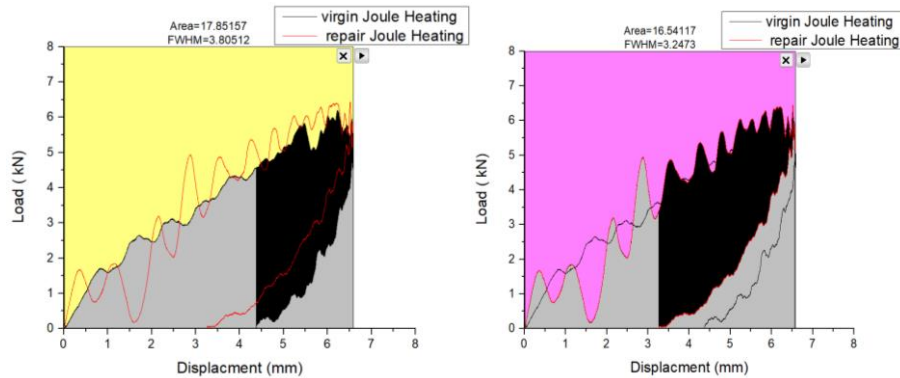
Σχήμα 8.5 Διαγράμματα Load-Displacement με τις τιμές full width half maximum (FWHM) 1 toes



Σχήμα 8.6 Διαγράμματα Load-Displacement με τις τιμές full width half maximum (FWHM) after 1 year



Σχήμα 8.7 Α. Διαγράμματα Load-Displacement με τις τιμές full width half maximum (FWHM) με μελάνι



Σχήμα 8.7 Β. Διαγράμματα Load-Displacement με τις τιμές full width half maximum (FWHM) θέρμανση με Joule Heating

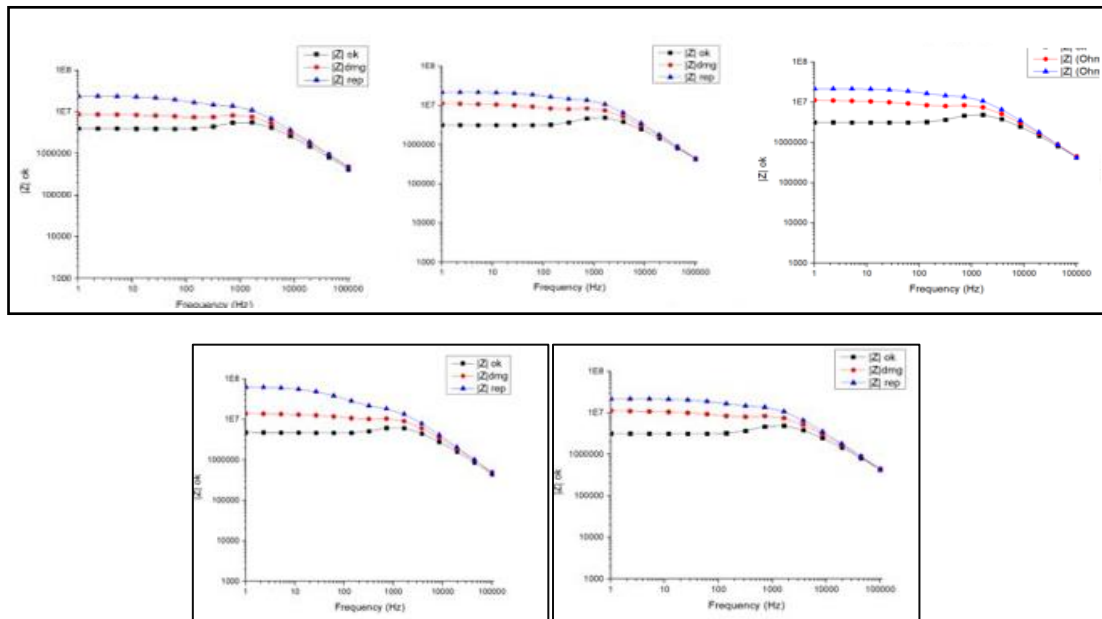
Από τα διαγράμματα στο σχήμα 8.5, 8.6 και 8.7Α και 8.7Β παίρνουμε τις τιμές full width half maximum (FWHM) και τις τιμές για το εμβαδό της κάθε καμπύλης. Το εμβαδό μετράτε μεταξύ εκείνων των σημείων στον άξονα y που είναι το μισό του μέγιστου πλάτους και μας δείχνει το πόση ενέργεια καταναλώθηκε ανά δοκίμιο. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο δοκίμιο 1 toesvirgin το εμβαδό είναι 2.94084 και όλη η περιοχή 19.56464 και για το 1 toesrepair 2.99407 και όλη η περιοχή 18.16108. Για το δοκίμιο που η ενεργοποίηση της ίασης έγινε ένα χρόνο μετά για το virgin 3.80512 με 17.87627 περιοχή και για repair δοκίμιο 2.88865 και όλη η περιοχή 19.81289. Για το δοκίμιο με ψεκασμένες αγωγίμες διαδρομές από μελάνι το virgin 4.14431 και 21.02323 και το repair το FWHM 2.91599 και όλη η περιοχή 19.2697. Τέλος για τις πλάκες που έχει ενεργοποιηθεί η ίαση μέσω Joule Heating το μέγιστο εμβαδό είναι μετά την εισαγωγή βλάβης στο virgin 17.85157 και FWHM 3.80512 και μετά μετά την εισαγωγή βλάβης στο repair 16.54117 και FWHM 3.2473.

8.2 Αποτελέσματα διηλεκτρικής φασματοσκοπίας

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που πήραμε από τα διαγράμματα σύνθετης αντίστασης του έξυπνου σύνθετου υλικού (smart material) για όλες τις θέσεις δομικής παρακολούθησης, στις οποίες έχουμε ενσωματώσει ηλεκτρόδια για

την μέτρηση της και τα διαγράμματα μετρήσεων της σύνθετης αντίστασης των δοκιμίων Mode II και ILSS. Αρχικά, οι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης εφαρμόστηκαν στα δείγματα πριν την δοκιμή πρόσκρουσης με την ονομασία virgin και στην συνέχεια οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια, με την εισαγωγή της βλάβης με την ονομασία damage και την ενεργοποίηση της ίασης πρόσκρουσης με την ονομασία repair. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, οι καμπύλες έχουν διαφορετικό χρώμα ανάλογα με το ποιο δοκίμιο μελετάμε.

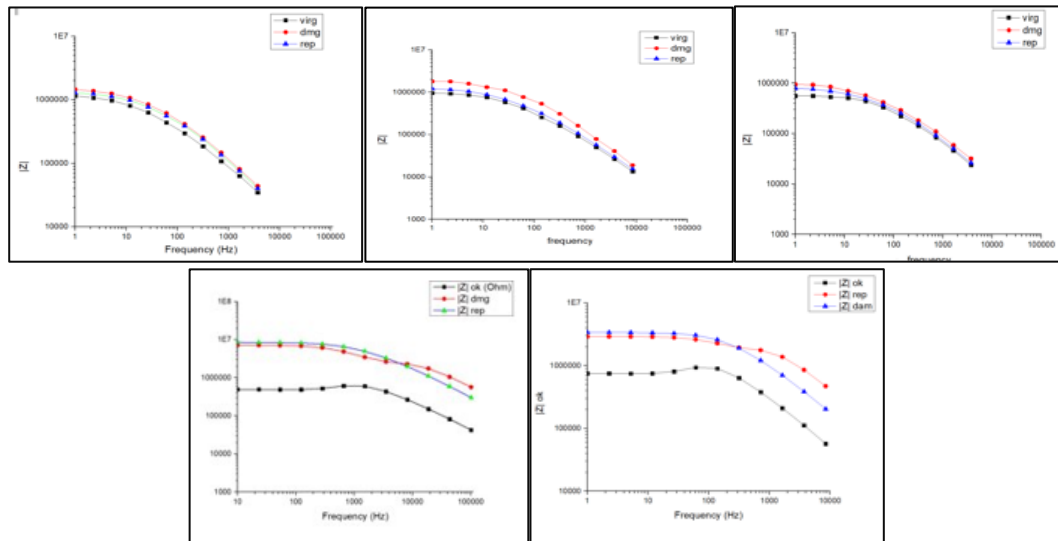
Διαγράμματα Bode δοκιμίων Mode II και δοκιμίων ILSS



Σχήμα 8.8 Διαγράμματα Bode ILSS (δοκίμια 1,2,3 με άνθρακα με θέρμανση μέσω πρέσας, 4 με άνθρακα με θέρμανση μέσω αντίστασης, 5 πανιά με μελάνι)

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα διαγράμματα Bode στο σχήμα 8.8 όπου τα διαγράμματα αντιστοιχούν στα δοκίμια 1,2,3 με άνθρακα με θέρμανση μέσω πρέσας, το δοκίμιο 4 με εξωτερικά πανιά με ίνες άνθρακα με θέρμανση μέσω αντίστασης και το δοκίμιο 5 με εξωτερικά πανιά από μελάνι, γίνεται φανερή η αύξηση των τιμών της αντίστασης λόγω της βλάβης. Παρατηρούμε πολύ σωστά μια αύξηση των τιμών της σύνθετης αντίστασης στα δοκίμια τα οποία που έχουν υποστεί μηχανική δοκιμή σε σχέση με τα virgin δοκίμια. Η καμπύλη όπου οι μετρήσεις έχουν γίνει αφού έχει ενεργοποιηθεί το σύστημα ίασης repair σε όλα τα υπό μελέτη δοκίμια, παίρνει μέγιστες τιμές από 22 Mohm έως 70 Mohm, σε σύγκριση με τα δοκίμια που έχουν υποστεί damage. Η καμπύλη είναι πιο ψηλά από την καμπύλη των δοκιμίων μετά την εισαγωγή damage. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι δεν έσπασαν όλες οι κάψουλες ώστε να ιαθεί σωστά το δοκίμιο και να επιστρέψει κοντά στις virgin τιμές η καμπύλη μετά το repair, που πρέπει να είναι (όπως θα δούμε και στις επόμενες μετρήσεις) στο ενδιαμέσο. Επίσης τα δοκίμια έχουν πολύ μικρό μήκος οπότε για αυτό οι αντιστάσεις

εμφανίζουν τόσο πολύ μεγάλες τιμές. Οι τιμές στα δοκίμια ILSS (virgin) είναι κατά μέσο όρο της τάξης των 5.5 MOhm και της αντίστασης αφού τα δοκίμια έχουν υποστεί κάμψη (damage) πλησιάζει κατά μέσο όρο τιμές των 10 MOhm.

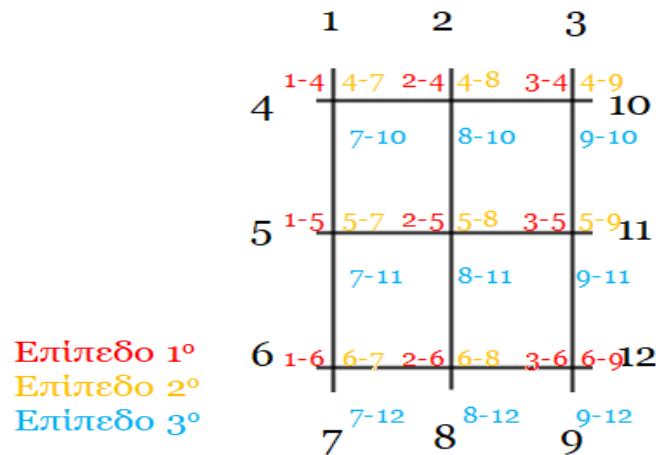


Σχήμα 8.9 Διαγράμματα Bode Mode II (δοκίμια 1,2,3 με άνθρακα και ίαση μέσω πρέσας , 4 με ίαση μέσω θέρμανσης αντίστασης, 5 πανιά με μελάνι)

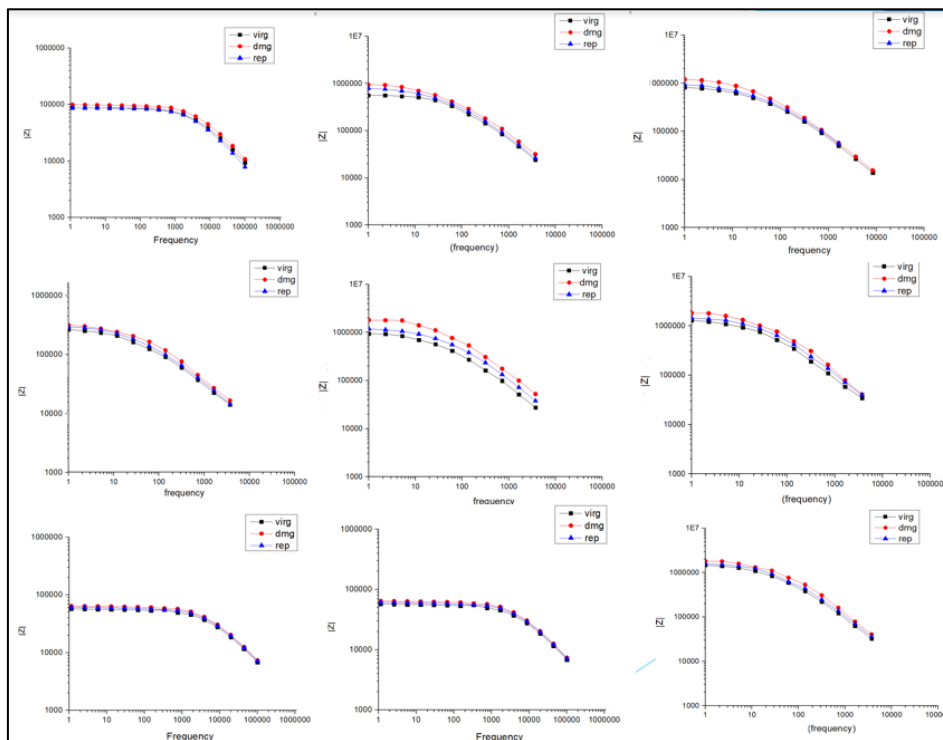
Στο σχήμα 8.9 όμως που τα δοκίμια μας είναι μακριάς δοκού Mode II και υπάρχει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων παρατηρούμε ότι η καμπύλη της σύνθετης αντίστασης του δοκιμίου όπου έχουν ενεργοποιηθεί οι κάψουλες repair, είναι ενδιάμεσα τις μετρήσεις των damage και το virgin και οι τιμές ηλεκτρικά είναι καλύτερες και όχι τόσο ψηλά όσο στα ILSS, όπου τα ηλεκτρόδια ήταν πολύ κοντά το ένα στο άλλο. Αυτό σημαίνει πως κατά την διαδικασία ενεργοποιήσε της ίασης , η σύνθετη αντίσταση μειώθηκε και υπήρχε σωστή επούλωση της βλάβης και ότι η ενεργοποίηση της ίασης ήταν επιτυχής. Και στα 5 δοκίμια οι τιμές virgin είναι της τάξης των 850 KOhm-1 MOhm. Στο δοκίμιο 4 όπου η ίαση έχει επιτευχθεί μέσω θέρμανσης, η καμπύλη repair είναι ακριβώς πάνω στην καμπύλη damage και όσο μεγαλώνει η συχνότητα φάσης τόσο μειώνεται και επανέρχεται στο ενδιάμεσο της καμπύλης virgin και repair. Η καμπύλη repair είναι της τάξης των 1,7 MOhm για θέρμανση μέσω πρέσας, ενώ για θέρμανση μέσω Joule heating φτάνει 8,8 MOhm και με ηλεκτρόδια από μελάνι τα 5.5 MOhm. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι κατά την θέρμανση κάποια σημεία γύρω από την βλάβη δεν έχουν επουλωθεί. Οι καμπύλες damage σε όλα τα διαγράμματα είναι της τάξης των 1,2 MOhm-8 MOhm. Οι μικρότερες τιμές αντιστάσεις για όλες τις καμπύλες είναι γύρω στα 16-60 KΩ για όλες τις καμπύλες με βάση την συχνότητα φάσης.

Διαγράμματα Bode σε επίπεδα πολυστρωματικής πλάκας (ίνες άνθρακα)- θέρμανση μέσω πρέσας

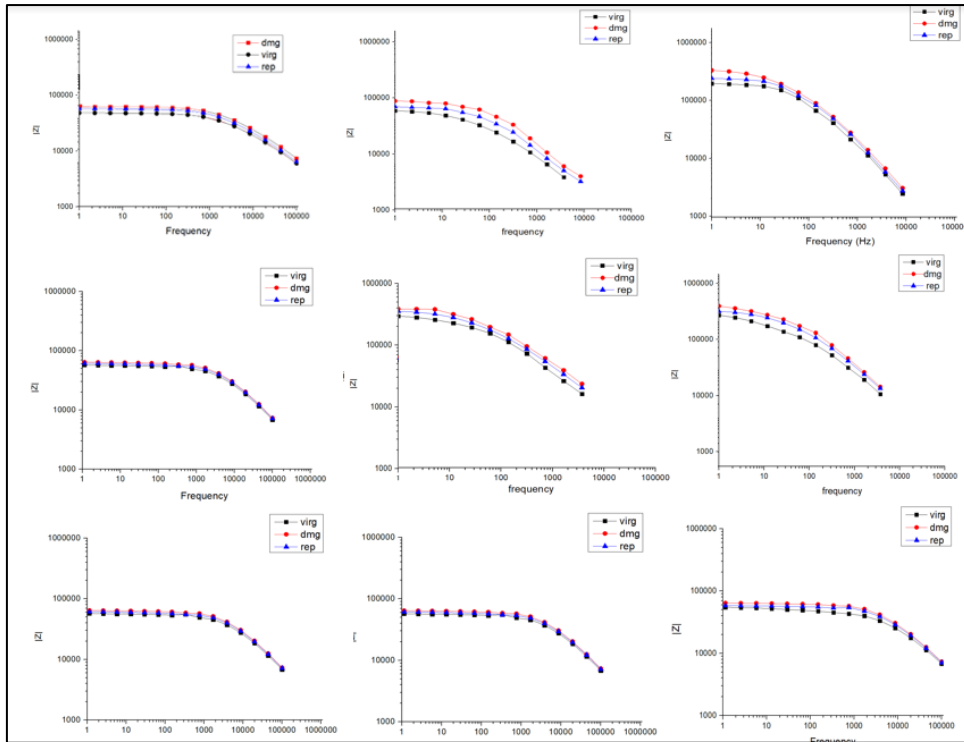
Όπως είδαμε κατά την διάρκεια των πειραμάτων για την μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων δημιουργήθηκαν εντός των πολύστρωτων υλικών αγωγικοί δρόμοι με σχήματα λωρίδας στα σημεία: 0,90 με φορά στο 90 ή στο 0 έτσι ώστε να δημιουργηθούν 3 επίπεδα από 27 σημεία ένωσης των ηλεκτροδίων (Σχήμα 8.10) Αυτό πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με τη χρήση δεσμών ινών άνθρακα, οι οποίες τοποθετούνται πάνω στα υφάσματα και ο δεύτερος είναι η εκτύπωση μέσω μελανιού με νανοσωλήνες άνθρακα CNTs.



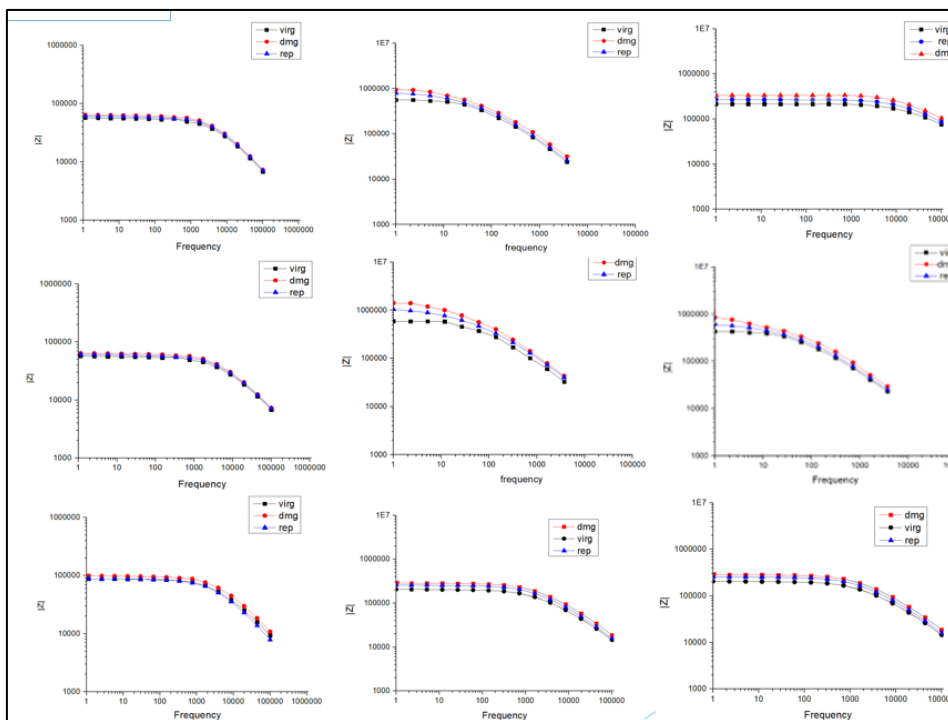
Σχήμα 8.10 Δημιουργία αγωγικών δρόμων σε 3 επίπεδα για μελέτη για εύρεση βλάβης



Σχήμα 8.11 Διάγραμμα Bode (Επίπεδο 1°)



Σχήμα 8.12 Διάγραμμα Bode (Επίπεδο 2^ο)



Σχήμα 8.13 Διάγραμμα Bode (Επίπεδο 3^ο)

Η ενεργοποίηση της ίασης των καουουλών έγινε επίσης με δυο τρόπους μέσω θερμοπρέσσας και μέσω φαινομένου αντίστασης Joule. Στο σχήμα 8.11 είναι το 1^ο επίπεδο, στο σχήμα 8.12 το 2^ο επίπεδο και στο σχήμα 8.13 είναι τα αποτελέσματα για

το 3^ο επίπεδο. Οι μετρήσεις για κάθε επίπεδο έχουν γίνει όπως φαίνεται στο σχήμα 8.10.

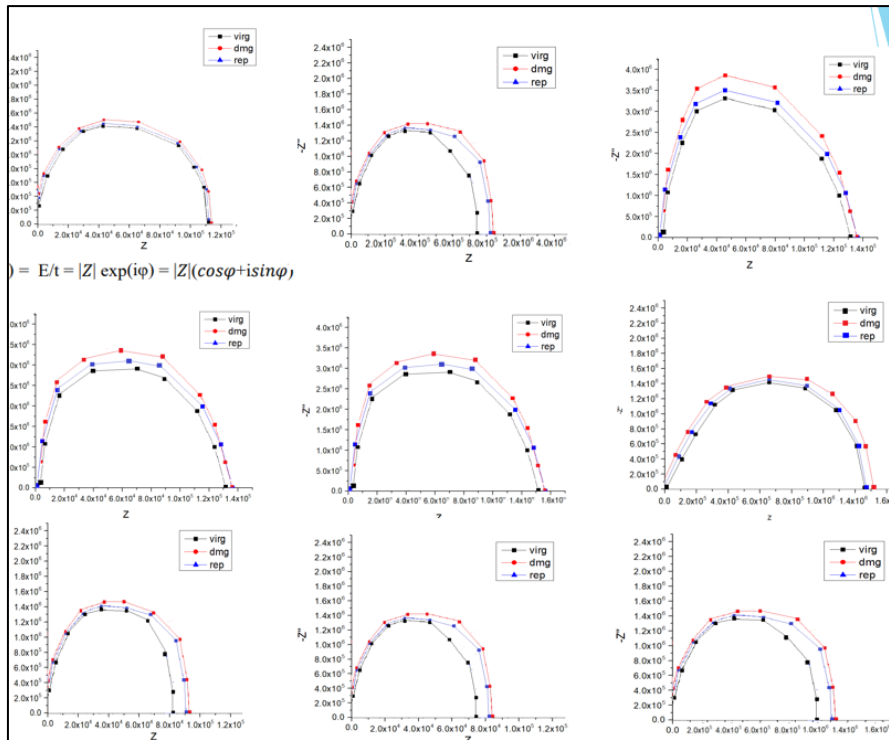
Στα σχήματα 8.11, 8.12 και 8.13 όπου παριστάνονται τα διαγράμματα Bode για την πλάκα Itoes που οι αγώγιμες σύνθετες διαδρομές που λαμβάνουμε τις τιμές της αντίστασης είναι από είναι από ίνες άνθρακα, παρατηρούμε ότι μετά την πρόσκρουση υψηλής ταχύτητας, το δοκίμιο μας Itoesvirgin παρουσιάζει μια εκτεταμένη αύξηση του μεγέθους της σύνθετης αντίστασης σε χαμηλές συχνότητες, στα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο επίπεδο και στο σημείο κοντά στο οποίο σημειώθηκε η πρόσκρουση. Η πρόσκρουση με βάση τα διαγράμματα ανα επίπεδο σημειώθηκε μεταξύ των περιοχών με συντεταγμένες (2.5) και (3.5) του 1^{ου} επιπέδου. Την αύξηση αυτή της σύνθετης αντίστασης, την καταλαβαίνουμε από τις τιμές στην κόκκινη καμπύλη (damage) που βρίσκεται πιο ψηλά. Οι μετρήσεις της κόκκινης καμπύλης έχουν γίνει πριν προλάβουν οι κάψουλες μας να πολυμεριστούν σε όλα τα δοκίμια.

Αυτή η αύξηση στις τιμές του μεγέθους της σύνθετης αντίστασης, μπορεί να αποδοθεί στη διακοπή του συνεχές αγώγιμου δικτύου των carbon toes (ινών άνθρακα) λόγω των αποκολλήσεων. Δηλαδή, γίνεται αντιληπτό ότι η βλάβη έχει πραγματοποιηθεί μεταξύ των σημείων και πολύ κοντά στα σημεία των επαφών των ηλεκτροδίων μας. Καθώς περνάμε στο 2^ο επίπεδο, εντοπίζεται η συνέχεια της οπής πρόσκρουσης που έχει ως αποτέλεσμα μια αποκόλληση στα επόμενα επίπεδα με μια μικρή αύξηση στην καμπύλη damage του υλικού. Το υλικό μας στα σημεία που εμφανίζει βλάβη έχει ως αποτέλεσμα, να μειώνεται η αγωγιμότητα του. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού, τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα θα ρεύσει εντός του αγώγιμου δρόμου. Στα σημεία όπου η αντίσταση είναι μέγιστη, γίνεται συσσώρευση του ρεύματος και για αυτό παρατηρούμε ότι είναι τα σημεία όπου οι αγώγιμες λωρίδες έχουν υποστεί βλάβη. Αυτή η συσσώρευση του ηλεκτρικού φορτίου έχει ως αποτέλεσμα και την ενίσχυση της διεπιφανειακής πόλωσης. Η διεπιφανειακή πόλωση είναι ένας μηχανισμός που προκύπτει ως αποτέλεσμα από την δημιουργία οπής στην περιοχή, που έχει ως αποτελέσματα διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τα πανιά από glass λειτουργούν ως πυκνωτής, αλλά με την προσθήκη της πολυμερικής νανοενισχυμένη μήτρας λειτουργεί ως αγωγός. Για αυτό και στα σημεία εκτός από την αύξηση της σύνθεσης αντίστασης, αυξάνεται μετά τη ζημιά η διεπιφανειακή πόλωση. Παρατηρούμε, ότι η πρόσκρουση επηρέασε το επίπεδο 2 με μια μικρή αύξηση της αντίστασης στην περιοχή (5.8) και (5.9) και καθώς πηγαίνουμε στο επίπεδο 3 στην ένωση (9.11) κάποιες μικρές ζημιές, αλλά όλη η υπόλοιπη περιοχή του υλικού έχει μείνει ανεπηρέαστη. Η κόκκινη καμπύλη επανέρχεται σε χαμηλότερες τιμές σε τιμές πιο κοντά σε αυτές του virgin δοκιμίου. Πάλι υπάρχουν ατέλειες στο επίπεδο αλλά αρκετά μικρές ώστε να επηρεάζουν τελείως το σύστημα. Η αντίσταση μπορεί να είναι αυξημένη επίσης σε σημεία μακριά από την οπή λόγω μικρό ατελειών που μπορεί να πραγματοποιήθηκαν κατά την σύνθεση του υλικού.

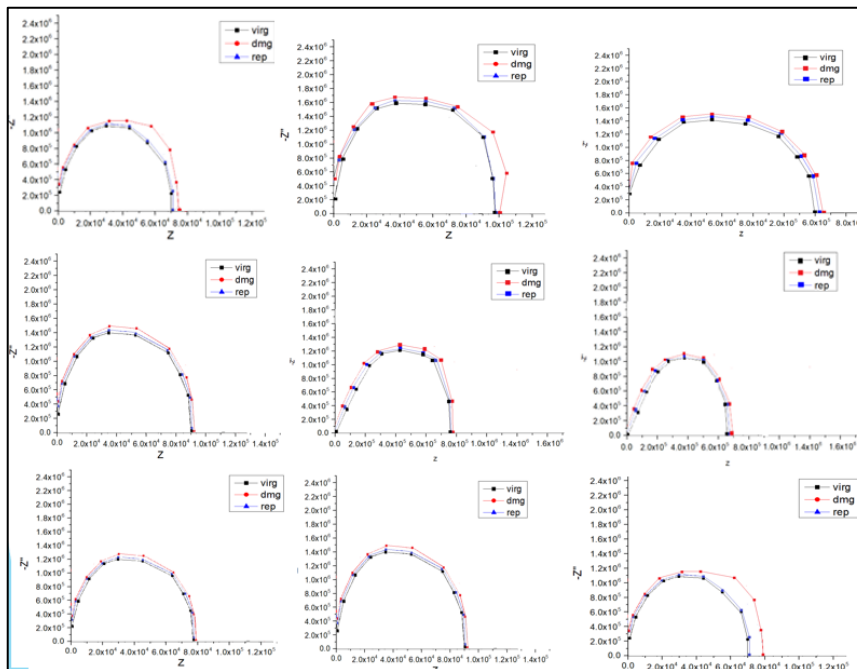
Στην διπλωματική αυτή (σε σχέση με προηγούμενη ερευνά) μετρήσαμε τις διηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού και μετά την ενεργοποίηση της ίασης του υλικού. Στο Itoes repair, η θέρμανση έγινε μέσω πρέσας και οι κάψουλες πολυμερίστηκαν μετά από 48 ώρες σε θερμοκρασία 85°C. Τα αποτελέσματα που δίνονται από την σύνθετη αντίσταση είναι πολύ ικανοποιητικά. Οι τιμές της σύνθετης αντίστασης στην μπλε καμπύλη repair, έχουν μετρηθεί μετά την ενεργοποίηση της ίασης του υλικού και είναι μεταξύ της καμπύλης virgin και της καμπύλης damage. Δηλαδή η αντίσταση αυξάνεται μετά την εισαγωγή βλάβης και μειώνεται μετά την ίαση του υλικού επιστρέφοντας το δοκίμιο κοντά στην αρχική του κατάσταση. Αυτό το βλέπουμε και μηχανικά στην προηγούμενη ενότητα αλλά και εδώ με βάση τις διηλεκτρικές ιδιότητες του δοκιμίου. Αυτό μας δείχνει ότι η ίαση του δοκιμίου έχει επιτευχθεί και το υλικό μας αποκτάει τις ηλεκτρικές του ιδιότητες.

Στα σημεία (2.5) και στα σημεία (3.5) η καμπύλη damage είναι στο 1,4 MOhm με 1,6 MOhm. Στα 890 KOhm- 1 MOhm είναι οι αρχικές τιμές των virgin μετρήσεων. Γύρω στο 1,2-1,3 MOhm βρίσκεται η repair καμπύλη ενδιάμεσα. Στα υπόλοιπα σημεία σύνδεσης είναι κάτω από 1 MOhm όλες οι καμπύλες για τις τιμές των αντιστάσεων. Στο σημείο ένωσης (5.8) και (5.9) η damage καμπύλη είναι στο 850 KOhm-1 MOhm ενώ στα υπόλοιπα διαγράμματα του 2^{ου} επιπέδου είναι κάτω από 100 KOhm. Η virgin είναι στο 750 KOhm. Γύρω στα 830 Ohm βρίσκεται η repair καμπύλη ενδιάμεσα. Στο σημείο ένωσης των ηλεκτροδίων του 3^{ου} επιπέδου (8.11) η καμπύλη virgin είναι στα 750 KOhm και φτάνει στην damage μέχρι 1,1 MOhm και η repair 1 MOhm. Προφανώς στο 3^ο επίπεδο να δημιουργήθηκε αυτή η αύξηση λόγω των ηλεκτροδίων.

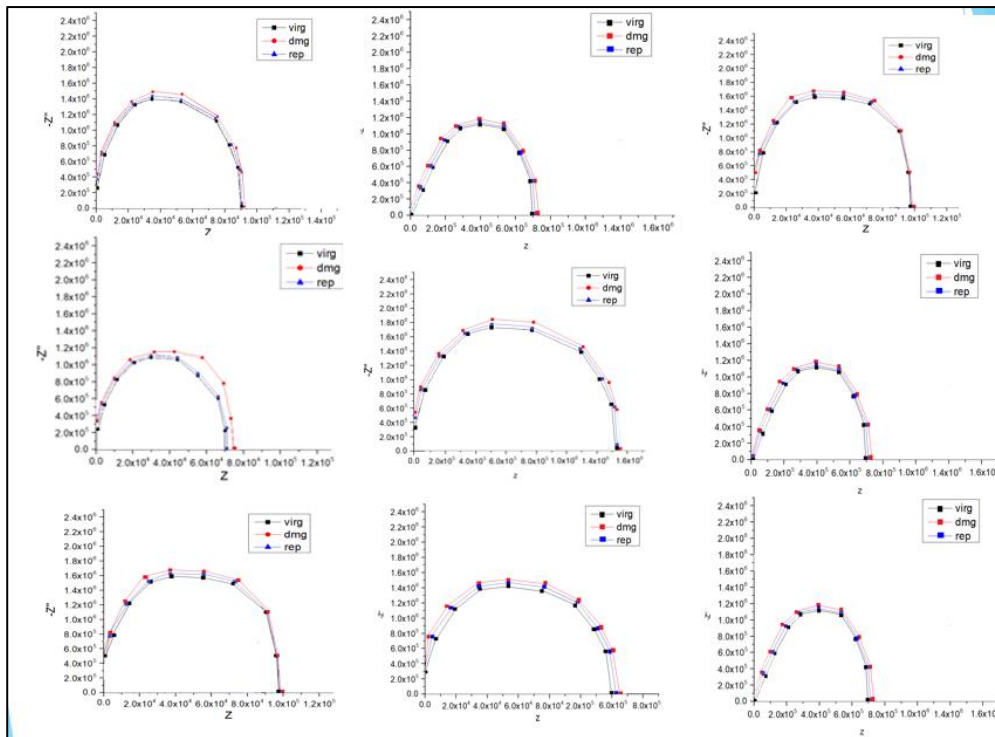
Διαγράμματα Nyquist σε επίπεδα πολυστρωματικής πλάκας (ίνες άνθρακα)-
θέρμανση μέσω πρέσας



Σχήμα 8.14 Επίπεδο 1^ο



Σχήμα 8.15 Επίπεδο 2^ο

Σχήμα 8.16 Επίπεδο 3^ο

Στο σχήμα 8.14, 8.15 και 8.16 απεικονίζονται διαγράμματα Nyquist. Οι τιμές σύνθετης αντίστασης απεικονίζονται και σε ένα παράλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα, για το φανταστικό μέρος $-Z''$, προς το πραγματικό μέρος Z' της σύνθετης αντίστασης. Με βάση του κατάλληλου ημιτονοειδούς όπου :

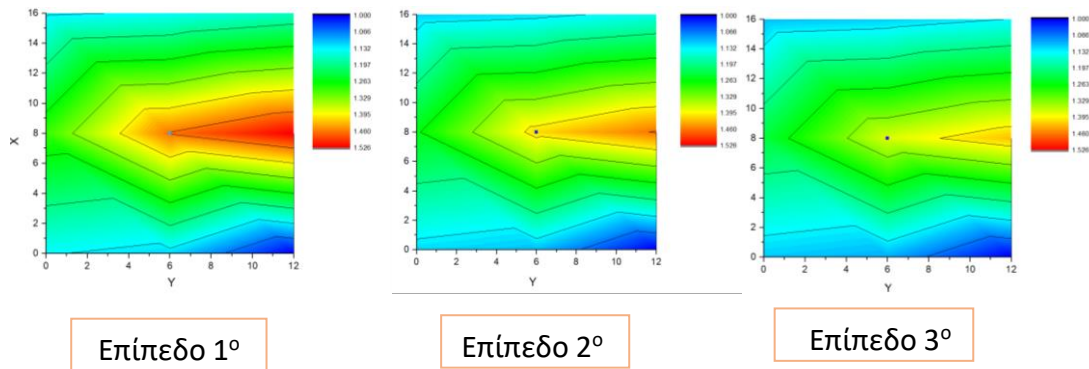
$$Z' = |Z|\cos(\theta),$$

$$\text{και } Z'' = |Z|\sin(\theta)$$

$$\text{όπου } Z = |Z|(\cos\theta + i\sin\theta)$$

κάνουμε fitting στο origin και παίρνουμε τα παραπάνω διαγράμματα και για τα 27 σημεία σύνδεσης των ανθρακονημάτων. Το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης είναι η αλλαγή στην σύνθετη αντίσταση με βάση την βλάβη που έχει υποστεί το υλικό και το φανταστικό μέρος αντιπροσωπεύει την αλλαγή λόγω της συχνότητας. Τα διαγράμματα Nyquist παρατηρούμε ότι είναι επίσης κατάλληλα για τον εντοπισμό ζημιών, ιδιαίτερα στις περιοχές που επλήγησαν λόγω πρόσκρουσης. Όπως παρατηρούμε, τόσο στις μετατοπίσεις στις τιμές στον άξονα Z' της αντίστασης στις τιμές από τις virgin τιμές στις damage τιμές, τόσο όσο και στις πραγματικές τιμές της σύνθετης αντίστασης στο 1^ο επίπεδο σε σχέση με τις αρχικές τιμές virgin, η βλάβη εμφανίζεται και εδώ στα σημεία ένωσης των λωρίδων (2.5),(3.5) αλλά και στα σημεία (3.4) και (3.6). Οι τιμές του πραγματικού και του φανταστικού μέρους είναι παρόμοιες με αυτές στο διάγραμμα Bode. Στο 2^ο επίπεδο η αύξηση των τιμών παρατηρείται στην περιοχή (5.8) και (5.9) και καθώς πηγαίνουμε στο 3^ο επίπεδο βλέπουμε αύξηση στα σημεία (8.11) και (9.11). Η υπόλοιπη πίσω πλευρά του

πολυστρωματικού μας υλικού, δεν εμφανίζει καμία απότομη αύξηση στην σύνθετη αντίσταση, όπως παρατηρήσαμε και στο διάγραμμα Bode. Η καμπύλη repair (μπλέ) είναι μεταξύ virgin και damage καμπύλης κάτι που μας επιτρέπει να πούμε με ασφάλεια ότι η ίαση του υλικού έχει επιτευχθεί.

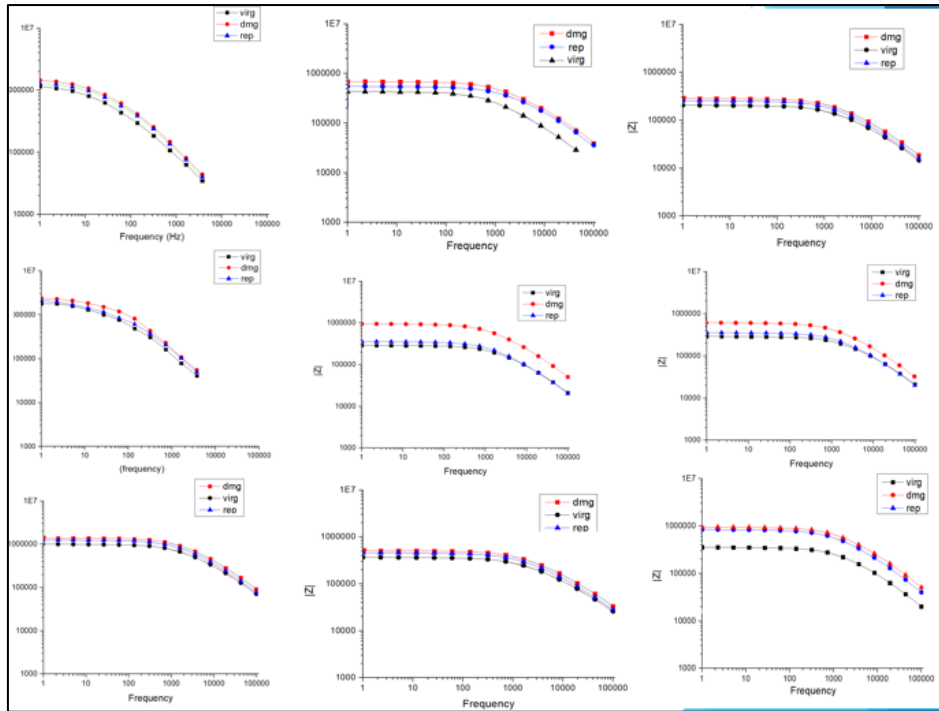


Σχήμα 8.17 3D Χαρτογράφηση βλάβης ανα επίπεδο

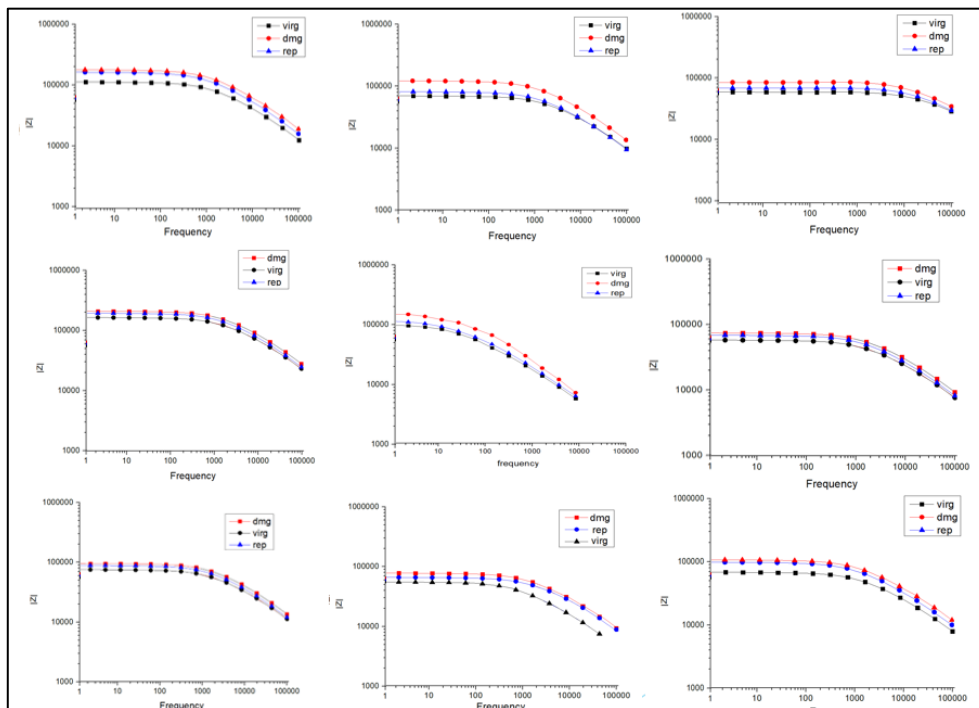
Στο σχήμα 8.17 παριστάνεται η χαρτογράφηση βλάβης του 1toes με 3D damage contour μέσω του origin. Η χαρτογράφηση για τον δομική ακεραιότητα του υλικού, αποτελεί μια προσομοίωση που έγινε μέσω όλου του πάχους του δοκιμίου, των τιμών, του Z" πριν και του Z" μετά την πρόσκρουση σε άξονες z,x,y αντίστοιχα. Η αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζεται με εντονότερο κόκκινο χρώμα στο κάθε επίπεδο, ανάλογα με το σημείο που βρίσκεται η οπή και το κατά πόσο επηρέασε ανα επίπεδο το υλικό μας. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της αντίστασής, τόσο εντονότερα τα χρώματα για τις ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί από την πρόσκρουση. Η εικόνα στο σχήμα 8.17 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων για τις μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης στις εικόνες 8.10-8.16 διαγράμματα Bode και Nyquist. Η περιοχή με το έντονο κόκκινο χρώμα στο κέντρο και προς τα δεξιά στο επίπεδο 1 και επίπεδο 2 είναι η περιοχή που αντιστοιχεί μεταξύ των ενώσεων στα σημεία (2.5), (3.5) και στο 2° επίπεδο στα σημεία (5.8) και (5.9). Όσο περνάμε στο επόμενο επίπεδο κάθε φορά, παίρνουμε τιμές λιγότερο έντονες. Άρα επιβεβαιώνεται ότι πρόσκρουση έγινε στο 1° επίπεδο. Το γαλάζιο-μπλε χρώμα στις γύρω περιοχές δείχνει ότι δεν έχει υποστεί καμία ζημιά το υλικό σε αυτά τα σημεία

Διαγράμματα Bode σε επίπεδα πολυστρωματικής πλάκας (ίνες άνθρακα)-1 χρόνο μετά

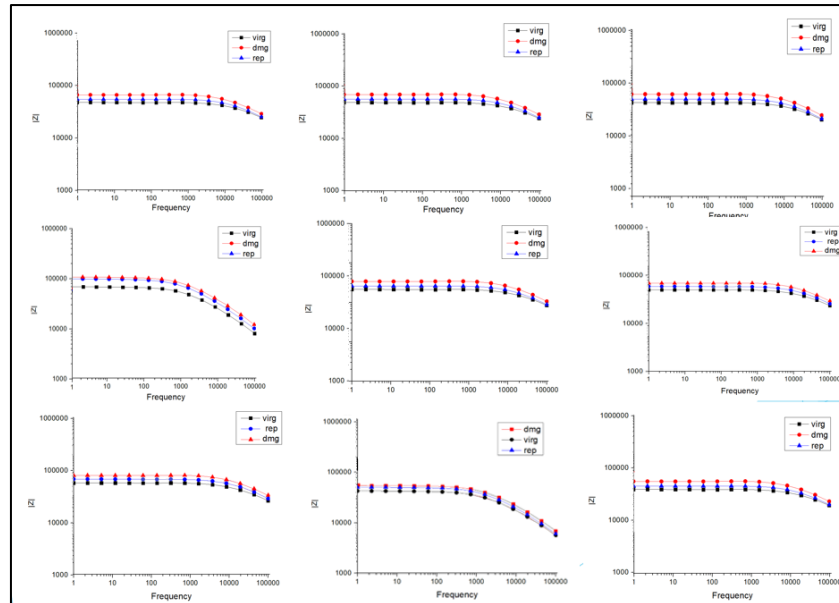
Στα σχήματα 8.18, 8.19 και 8.20 παριστάνονται τα διαγράμματα Bode για την πλάκα όπου η ενεργοποίηση της ίασης και η δοκιμή πρόσκρουσης πραγματοποιήθηκε 365 μέρες μετά την δημιουργία της.



Σχήμα 8.18 Διάγραμμα Bode (Επίπεδο 1^ο)



Σχήμα 8.19 Διάγραμμα Bode (Επίπεδο 2^ο)



Σχήμα 8.20 Διάγραμμα Bode (Επίπεδο 3^ο)

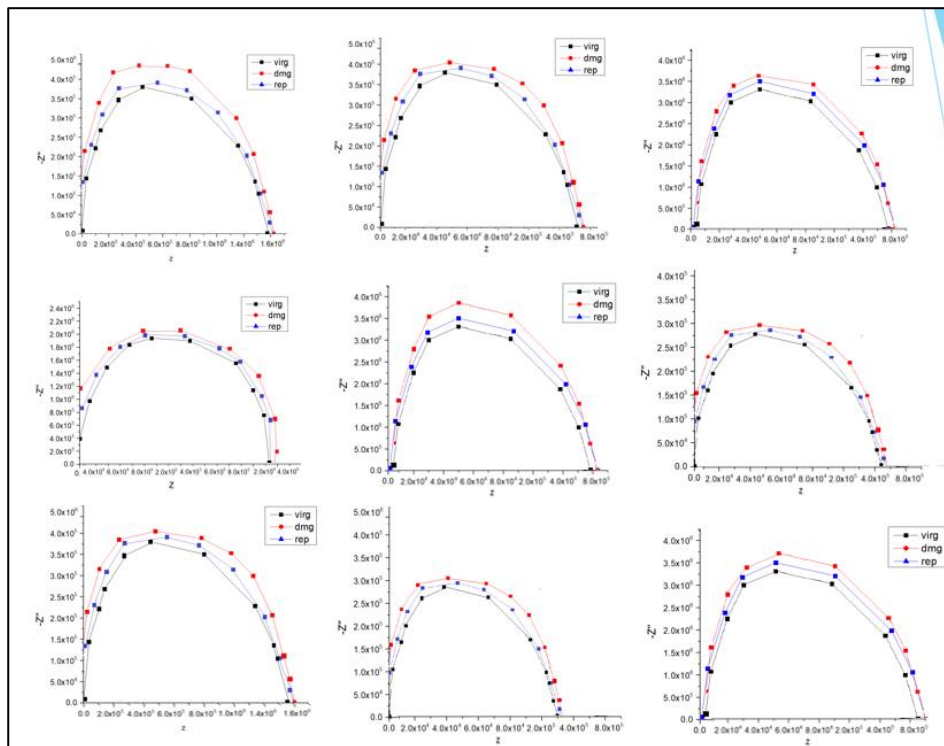
Αυτό έγινε, έτσι ώστε να μελετήσουμε την καταλληλότητα των κάψουλων ίασης, αλλά και τις δυνατότητες που μας δίνει η διηλεκτρική φασματοσκοπία για την μελέτη των διηλεκτρικών ιδιοτήτων ενός υλικού μετά από μακρά διάρκεια. Οι αγώγιμες διαδρομές είναι επίσης από ίνες άνθρακα. Παρατηρούμε ότι μετά την πρόσκρουση υψηλής ταχύτητας, το δοκίμιο μας στην virgin καμπύλη παρουσιάζει μια εκτεταμένη αύξηση του μεγέθους της σύνθετης αντίστασης σε χαμηλές συχνότητες, στα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο επίπεδο κοντά στο σημείο στο οποίο σημειώθηκε η πρόσκρουση. Η πρόσκρουση με βάση τα διαγράμματα ανά επίπεδο σημειώθηκε μεταξύ των περιοχών με συντεταγμένες (1.5), (1.6) και (1.4) του 1^{ου} επιπέδου. Την αύξηση αυτή της σύνθετης αντίστασης, την καταλαβαίνουμε από τις τιμές στην κόκκινη καμπύλη (damage). Αυτή η αύξηση στις τιμές του μεγέθους της σύνθετης αντίστασης, μπορεί να αποδοθεί στη διακοπή του συνεχές δικτύου MWCNTs λόγω της πρόσκρουσης. Στο 2^ο επίπεδο, εντοπίζεται η συνέχεια της βλάβης λόγω αποκόλλησης με μια μικρή αύξηση στην καμπύλη damage του υλικού. Επίσης στα σημεία της βλάβης μειώνεται η αγωγιμότητα του λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης. Η αύξηση της αντίστασης παρατηρείτε στην περιοχή (5.7),(5.8) ενώ καθώς πηγαίνουμε στο 3^ο επίπεδο η περιοχή του υλικού έχει μείνει ανεπηρέαστη. Η καμπύλη damage επανέρχεται σε χαμηλότερες τιμές και όλο και περισσότερο σε τιμές πιο κοντά σε αυτές του virgin δοκιμίου στο 2^ο και 3^ο επίπεδο. Τα αποτελέσματα που δίνονται στις τιμές της σύνθετης αντίστασης μετά την ενεργοποίηση της ίασης είναι μεταξύ της καμπύλης virgin και damage. Δηλαδή η αντίσταση αυξάνεται μετά την εισαγωγή βλάβης και μειώνεται μετά την ίαση του υλικού, επιστρέφοντας το δοκίμιο κοντά στην αρχική του κατάσταση.

Στο 1^ο επίπεδο στα σημεία (1.4),(1.5),(1.6) η καμπύλη damage είναι 1,8 MOhm με 3,6 MOhm. Οι αρχικές τιμές των virgin μετρήσεων είναι γύρω στο 1,2 MOhm σε

αυτά τα σημεία, αλλά σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του 1^{ου} επιπέδου είναι μικρότερη από 1 MOhm . Η repair καμπύλη είναι γύρω στα 1,3 MOhm-2,4 MOhm . Στα υπόλοιπα σημεία σε όλες τις καμπύλες οι τιμές των αντιστάσεων του 1^{ου} επιπέδου είναι κάτω από 1 MOhm. Στο σημείο ένωσης (5.7), (5.8) η damage καμπύλη είναι στο 150 KOhm ενώ στα υπόλοιπα διαγράμματα του 2^{ου} επιπέδου είναι κάτω από 1 100 Ohm. Το ίδιο ισχύει και για τις virgin και repair . Στο 3^{ου} επίπεδο μένει παρόμοια σε όλα τα επίπεδα, δεν φαίνεται κάποια απότομη αλλαγή.

Διαγράμματα Nyquist σε επίπεδα πολυστρωματικής πλάκας (ίνες άνθρακα)- 1 χρόνο μετά

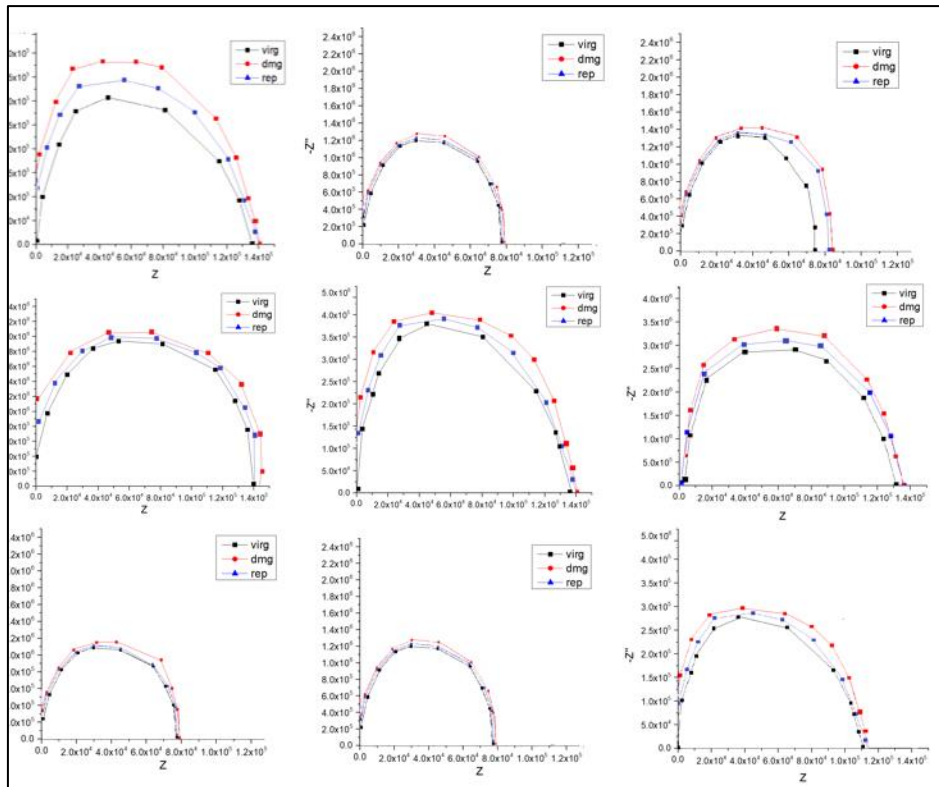
Στο σχήμα 8.13, 8.14 και 8.15 απεικονίζονται διαγράμματα Nyquist για το δοκίμιο μας όπου η ενεργοποίηση της ίασης έγινε ένα χρόνο μετά.



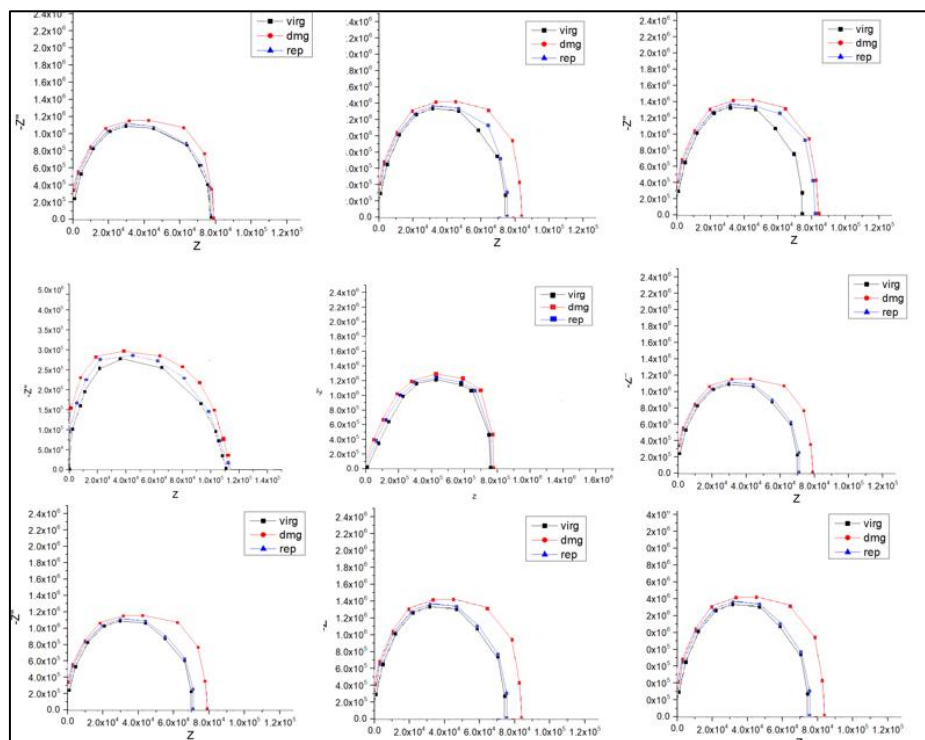
Σχήμα 8.21 Επίπεδο 1^ο

Όπως παρατηρούμε τόσο στις μετατοπίσεις στις τιμές στον άξονα Z'' της αντίστασης στις τιμές από τις virgin τιμές στις damage τιμές, τόσο όσο και στις πραγματικές τιμές της σύνθετης αντίστασης στο 1^ο επίπεδο σε σχέση με τις αρχικές τιμές virgin, η βλάβη εμφανίζεται και εδώ στα σημεία ένωσης των λωρίδων (1.4), (1.5) αλλά και στο σημείο (1.6). Στο 2^ο επίπεδο η αύξηση των τιμών παρατηρείται στην περιοχή (5.8) και (5.7). καθώς πηγαίνουμε στο επίπεδο 3 μόνο στην ένωση (8.11). Η υπόλοιπη πίσω πλευρά του πολυστρωματικού μας υλικού, δεν εμφανίζει καμία απότομη αύξηση στην σύνθετη αντίσταση, όπως παρατηρήσαμε και στο

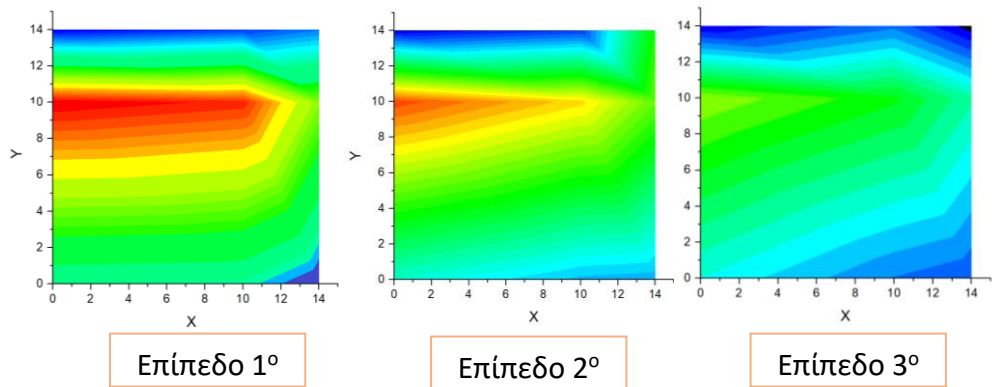
διάγραμμα Bode. Η καμπύλη repair (μπλέ) είναι μεταξύ virgin και damage καμπύλης κάτι που μας επιτρέπει να πούμε με ασφάλεια ότι η ίαση του υλικού έχει επιτευχθεί.



Σχήμα 8.22 Επίπεδο 2°



Σχήμα 8.23 Επίπεδο 3°

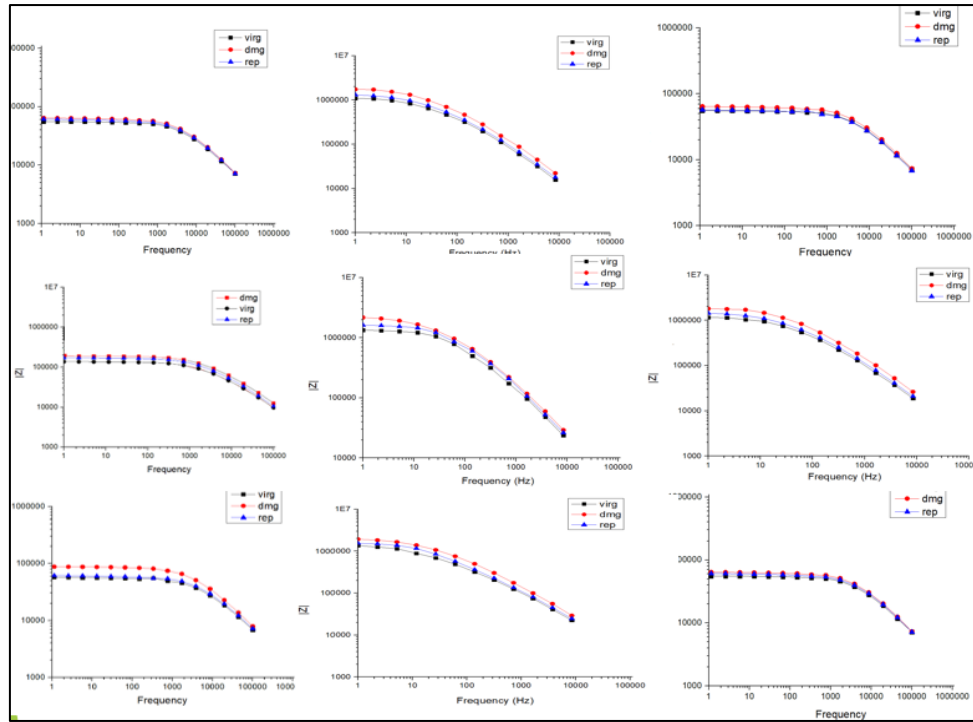


Σχήμα 8.24 Χαρτογράφηση βλάβης με 3D damage contour

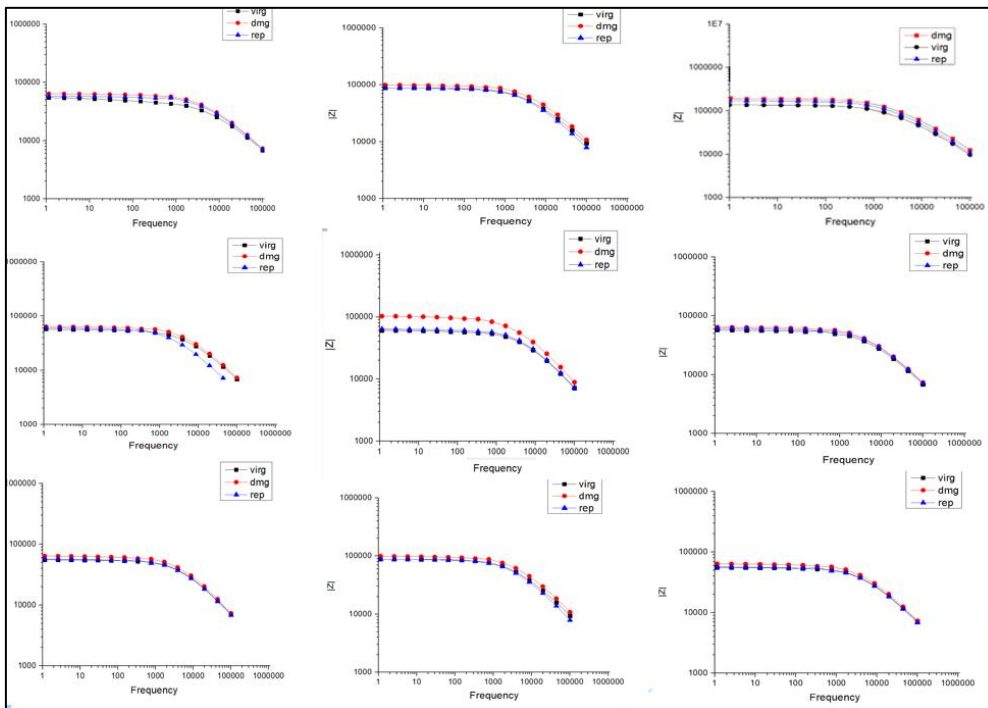
Όπως και με την προηγούμενη πλάκα έτσι και εδώ, με βάση τα φανταστικά μέρη της σύνθετης αντίστασης και το πάχος πραγματοποιείται η χαρτογράφηση βλάβης με 3D damage contour όπου η εικόνα στο σχήμα 8.24 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων για τις μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης για τα διαγράμματα Bode και Nyquist. Η αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζεται με εντονότερο κόκκινο χρώμα στην περιοχή του κέντρου προς τα αριστερά. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της αντίστασης, τόσο εντονότερα φαίνονται οι ρωγμές. Στο επίπεδο 2 είναι η περιοχή που αντιστοιχεί μεταξύ των ενώσεων στα σημεία φαίνεται η βλάβη στα σημεία (5.8) και (5.7) Όσο περνάμε στο επόμενο επίπεδο κάθε φορά, παίρνουμε τιμές λιγότερο έντονες. Το πράσινο-μπλε χρώμα δείχνει ότι δεν έχει υποστεί καμία ζημιά το υλικό στο 3^ο επίπεδο.

Διαγράμματα Bode πολυστρωματικής πλάκας (αγώγιμες διαδρομές από ψεκασμένες ίνες μελανιού CNTs)

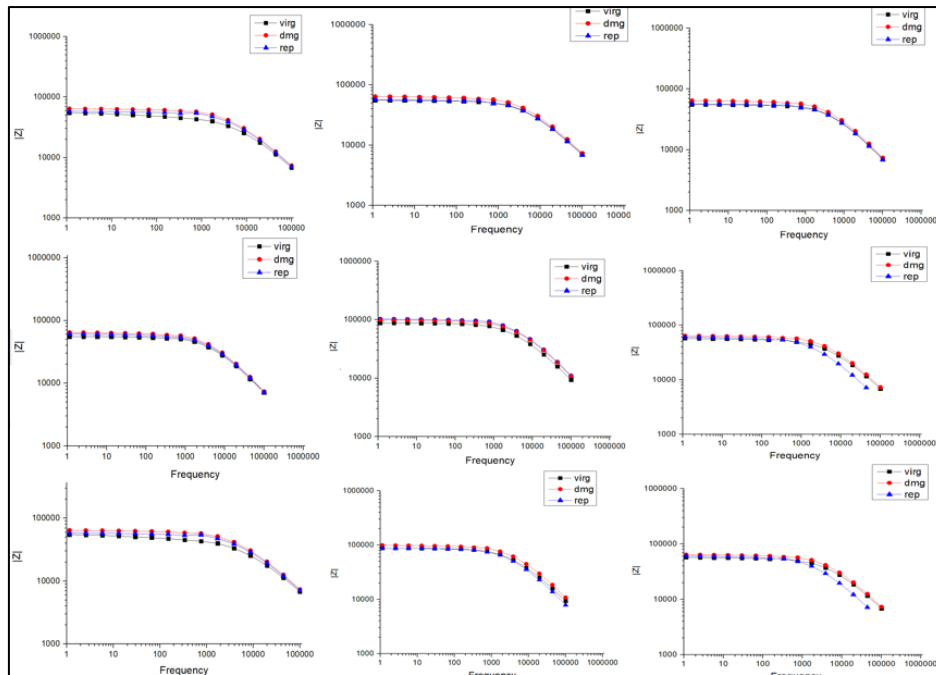
Στα σχήματα 8.25, 8.26 και 8.27 παριστάνονται τα διαγράμματα Bode για την πλάκα που οι αγώγιμες διαδρομές είναι από ίνες από ψεκασμένες με μελάνι, Η βλάβη εμφανίζεται στα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο επίπεδο και στο σημείο κοντά στο οποίο σημειώθηκε η πρόσκρουση. Η πρόσκρουση με βάση τα διαγράμματα παρατηρείται μεταξύ των περιοχών με συντεταγμένες (2.4), (2.5) και (3.5) του 1^{ου} επιπέδου. Την αύξηση αυτή της σύνθετης αντίστασης, την καταλαβαίνουμε από τις τιμές στην κόκκινη καμπύλη (damage) που βρίσκεται πιο ψηλά. Το πανιά από glass fiber λειτουργεί ως πυκνωτής, αλλά με την προσθήκη του SCNTs μελανιού λειτουργεί ως αγωγός και έτσι εμφανίζει καλές ηλεκτρικές ιδιότητες. Καθώς περνάμε στο 2^ο επίπεδο, εντοπίζεται η συνέχεια της οπής πρόσκρουσης που έχει ως αποτέλεσμα μια αποκόλληση μια μικρή αύξηση στην καμπύλη damage του υλικού και ότι επηρέασε το επίπεδο 2 με μια μικρή αύξηση της αντίστασης στην περιοχή (5.8) και καθώς πηγαίνουμε στο επίπεδο 3 η υπόλοιπη περιοχή του υλικού έχει μείνει ανεπηρέαστη χωρίς καμία απότομη αύξηση.



Σχήμα 8.25 Διάγραμμα Bode Επίπεδο 1^ο



Σχήμα 8.26 Διάγραμμα Bode Επίπεδο 2^ο

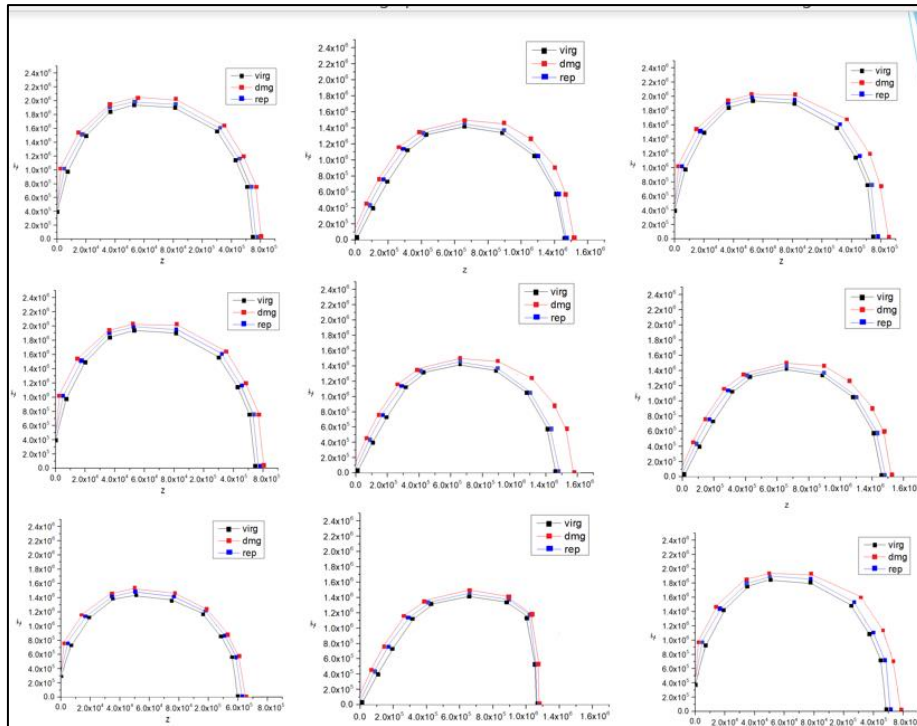


Σχήμα 8.27 Διάγραμμα Bode Επίπεδο 3^ο

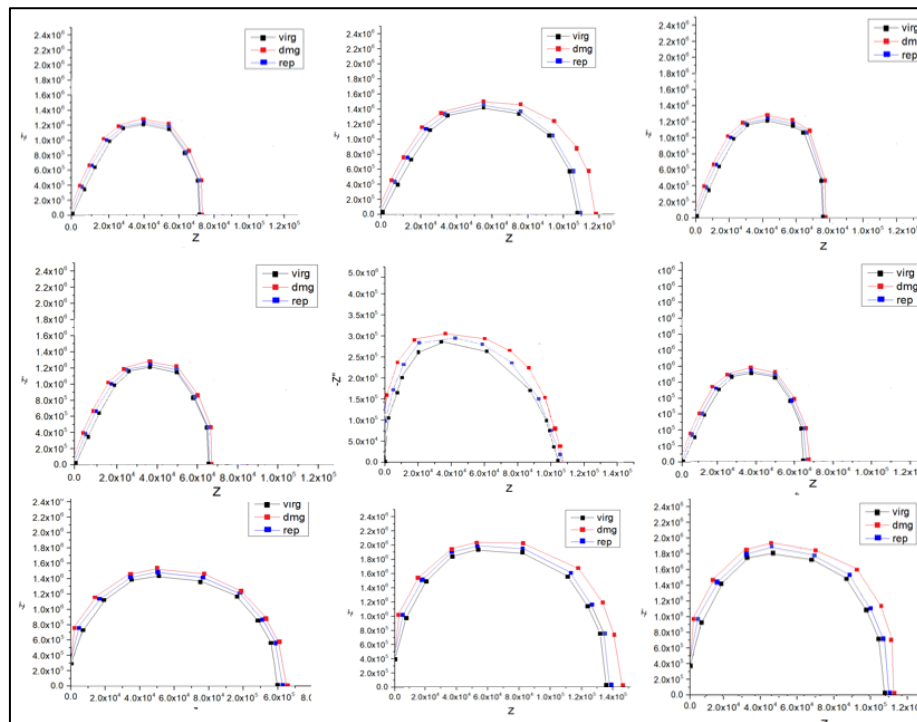
Όπως παρατηρούμε η αντίσταση αυξάνεται μετά την εισαγωγή βλάβης και μετά την ίαση του υλικού επιστρέφει κοντά στις αρχικές τιμές. Στα σημεία του 1^{ου} επιπέδου (2.4), (2.5), (3.5) η καμπύλη damage είναι στα 1,5-1,6 MOhm, οι τιμές virgin είναι 1,3 και η repair καμπύλη είναι στο 1,4 MOhm. Στα υπόλοιπα σημεία είναι κάτω από 1 MOhm όλες οι καμπύλες για τις τιμές των αντιστάσεων. Στο σημείο ένωσης (5.8) η damage καμπύλη είναι στα 120 KOhm ενώ στα υπόλοιπα είναι κάτω από αυτή την τιμή. Η virgin είναι στο 80 KOhm. Γύρω στα 90 KOhm βρίσκεται η repair καμπύλη ενδιάμεσα.

Διαγράμματα Nyquist πολυστρωματικής πλάκας (αγώγιμες διαδρομές από ψεκασμένες ίνες μελανιού CNTs)

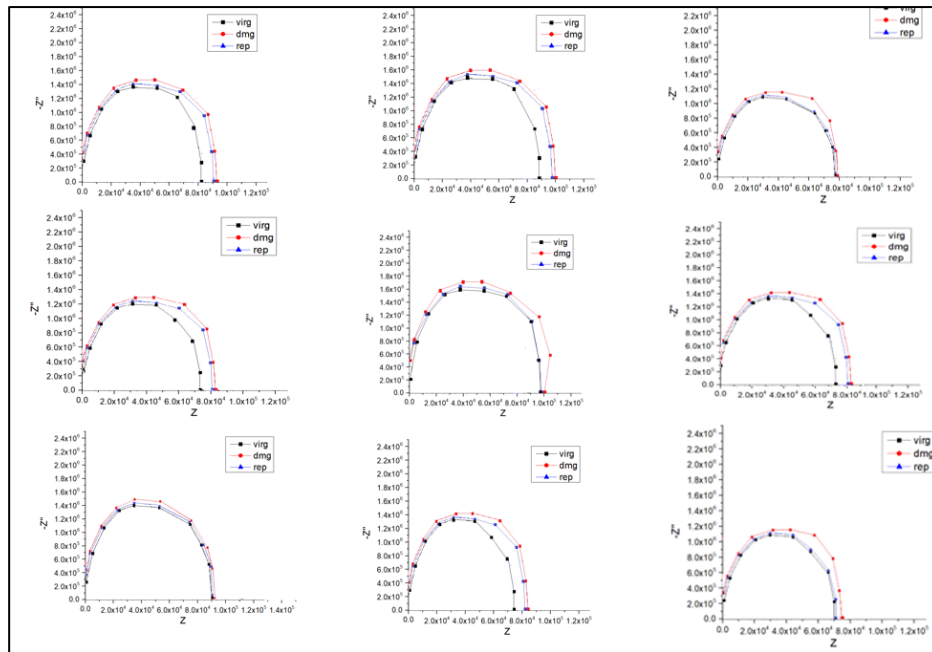
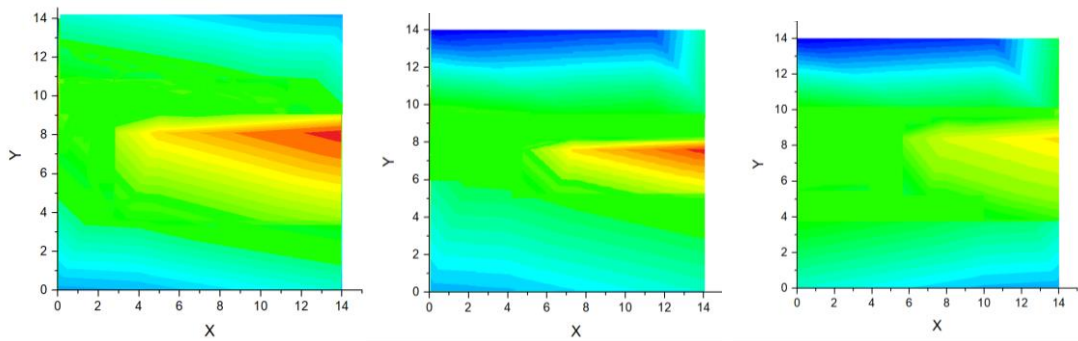
Στο σχήμα 8.28, 8.29 και 8.30 απεικονίζονται διαγράμματα Nyquist για το φανταστικό μέρος $-Z''$ προς το πραγματικό μέρος Z' της σύνθετης αντίστασης. Όπως παρατηρούμε, τόσο στις μετατοπίσεις στις τιμές στον άξονα Z' της αντίστασης στις τιμές από τις virgin τιμές στις damage τιμές, τόσο όσο και στις πραγματικές τιμές της σύνθετης αντίστασης στο 1^ο επίπεδο σε σχέση με τις αρχικές τιμές virgin, η βλάβη εμφανίζεται και εδώ στα ίδια σημεία ένωσης των λωρίδων με αυτά του διαγράμματος Bode. Η καμπύλη repair (μπλε) είναι μεταξύ virgin και damage καμπύλης, κάτι που μας επιτρέπει να πούμε με ασφάλεια ότι η ίαση του υλικού έχει επιτευχθεί.



Σχήμα 8.28 Επίπεδο 1°



Σχήμα 8.29 Επίπεδο 2°

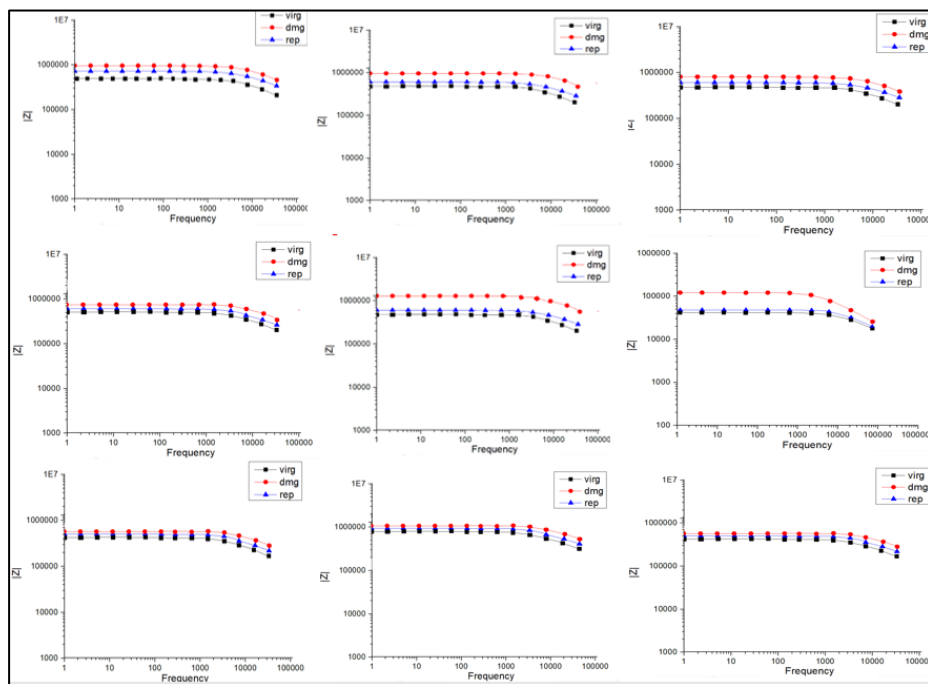
Σχήμα 8.30 Επίπεδο 3^ο

Σχήμα 8.31 3D damage contour μέσω origin

Στο σχήμα 8.31 παριστάνεται η χαρτογράφηση βλάβης. Η χαρτογράφηση για τον δομική ακεραιότητα του υλικού, αποτελεί μια προσομοίωση που έγινε μέσω όλου του πάχους του δοκιμίου, των τιμών και του Z'' μετά την πρόσκρουση σε άξονες z, x, y αντίστοιχα. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της αντίστασης, τόσο εντονότερα τα χρώματα για τις ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί από την πρόσκρουση. Η εικόνα στο σχήμα 8.31 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων για τις μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης στις εικόνες 8.25-8.30. Όσο περνάμε στο επόμενο επίπεδο κάθε φορά, παίρνουμε τιμές λιγότερο πιο κοντά στο πράσινο-μπλε χρώμα που επιβεβαιώνει ότι έχει υποστεί ζημιά το υλικό στο 1^ο επίπεδο.

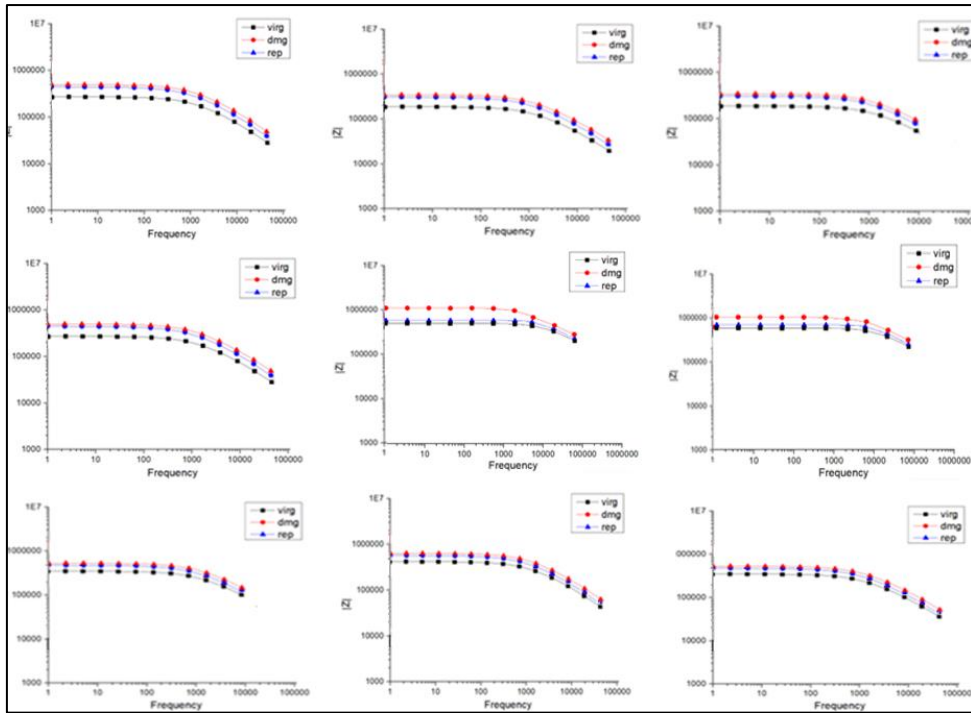
Διαγράμματα Bode σε επίπεδα πολυστρωματικής πλάκας (ίνες άνθρακα) – θέρμανση μέσω φαινομένου Joule

Η πλάκα τοποθετήθηκε για 48 ώρες με εξωτερική θέρμανση στα σημεία σύνδεσης στα οποία θέλουμε να επιτευχθεί η μέγιστη θερμοκρασία, με ισχύ 12 W η κάθε γεννήτρια, ώστε να πολυμεριστούν οι κάψουλες και να επιτευχθεί η ίαση. Αφού μετρήσαμε τις διηλεκτρικές ιδιότητες μετά την πρόσκρουση και μετά την ίαση πήραμε τα γραφήματα 8.32, 8.33 και 8.34 όπου παριστάνονται τα διαγράμματα Bode. Παρατηρούμε ότι μετά την πρόσκρουση υψηλής ταχύτητας, το δοκίμιο μας παρουσιάζει αύξηση της σύνθετης αντίστασης σε χαμηλές συχνότητες, στα διαγράμματα του 1^{ου} επιπέδου. μεταξύ των περιοχών με συντεταγμένες (2,5) που βρίσκεται στο 1,7 MOhm. Οι μετρήσεις της κόκκινης καμπύλης έχουν γίνει πριν προλάβουν οι κάψουλες μας να πολυμεριστούν σε όλα τα δοκίμια. Από αυτή την αύξηση στις τιμές του μεγέθους της σύνθετης αντίστασης λόγω της διακοπής του συνεχές αγωγίμου δικτύου των carbon toes, γίνεται αντιληπτό ότι η βλάβη έχει πραγματοποιηθεί μεταξύ των σημείων επαφών των ηλεκτροδίων μας. Καθώς περνάμε στο 2^ο επίπεδο, εντοπίζεται η συνέχεια της οπής πρόσκρουσης που έχει ως αποτέλεσμα μια αποκόλληση στα επόμενα επίπεδα με τιμές 1,4 MOhm καμπύλη damage του υλικού στο σημείο (5.8) .

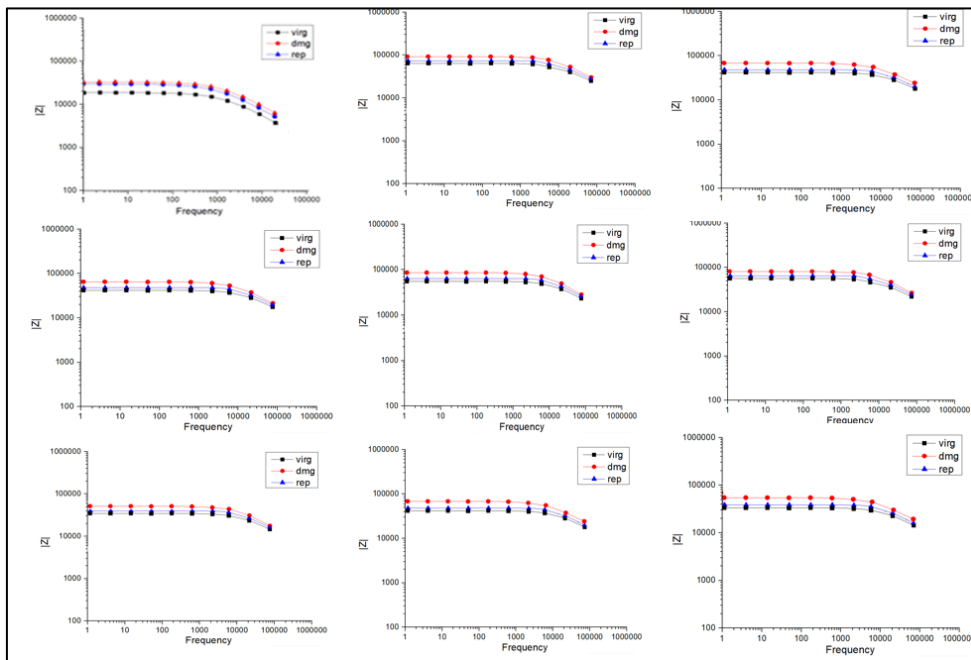


Σχήμα 8.32 Επίπεδο 1^ο

Καθώς πηγαίνουμε στο επίπεδο 3, στην ένωση (8.11) κάποιες μικρές ζημιές με τιμές της τάξης των 10 KOhm, αλλά όλη η υπόλοιπη περιοχή του υλικού έχει μείνει ανεπηρέαστη σε αυτό το επίπεδο.



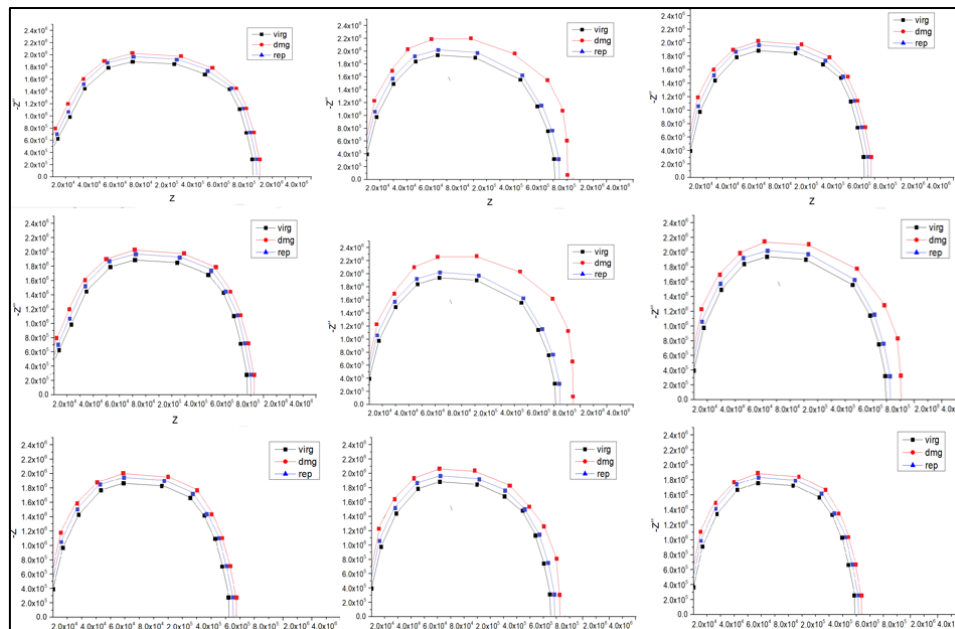
Σχήμα 8.33 Επίπεδο 2^ο



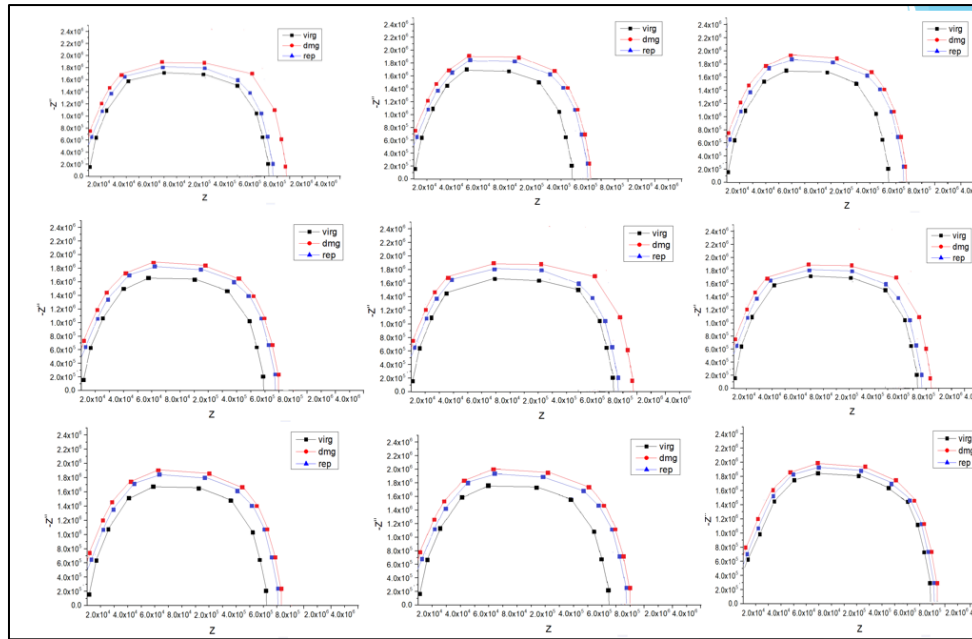
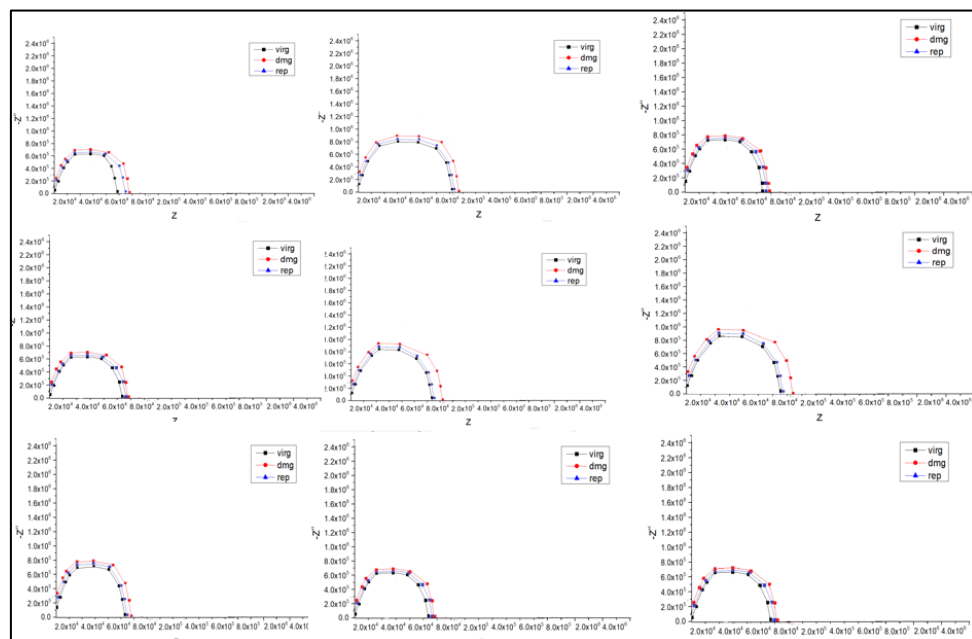
Σχήμα 8.34 Επίπεδο 3^ο

Διαγράμματα Nyquist σε επίπεδα πολυστρωματικής πλάκας (ίνες άνθρακα) - θέρμανση μέσω φαινομένου Joule

Στα σχήματα 8.35, 8.36 και 8.37 απεικονίζονται διαγράμματα Nyquist για το φανταστικό μέρος $-Z''$ προς το πραγματικό μέρος Z' της σύνθετης αντίστασης. Όπως παρατηρούμε, τόσο στις μετατοπίσεις στις τιμές στον άξονα Z' της αντίστασης στις τιμές από τις virgin τιμές στις damage τιμές, τόσο όσο και στις πραγματικές τιμές της σύνθετης αντίστασης στο 1^ο επίπεδο σε σχέση με τις αρχικές τιμές virgin, η βλάβη εμφανίζεται και εδώ στα σημεία ένωσης των λωρίδων (2.5),(3.5) αλλά και στο σημείο (5.8) του 2^{ου} επιπέδου. Καθώς πηγαίνουμε στο επίπεδο 3 μόνο στην ένωση (8.11). Η υπόλοιπη πίσω πλευρά του πολυστρωματικού μας υλικού, δεν εμφανίζει καμία απότομη αύξηση στην σύνθετη αντίσταση, Η καμπύλη repair (μπλέ) είναι μεταξύ virgin και damage καμπύλης κάτι που μας επιτρέπει να πούμε με ασφάλεια ότι η ίαση του υλικού έχει επιτευχθεί.

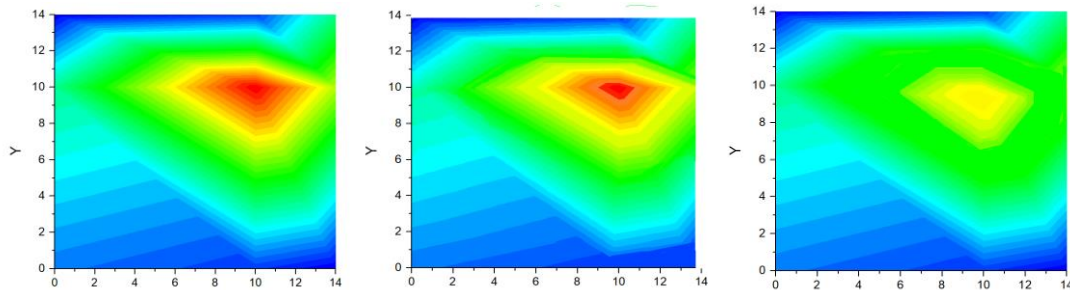


Σχήμα 8.35 Επίπεδο 1^ο

Σχήμα 8.36 Επίπεδο 2^οΣχήμα 8.37 Επίπεδο 3^ο

Στο σχήμα 8.38 παριστάνεται η χαρτογράφηση βλάβης με 3D damage contour μέσω του origin. Η χαρτογράφηση για τον δομική ακεραιότητα του υλικού, αποτελεί μια προσομοίωση που έγινε μέσω του πάχους του δοκιμίου και των τιμών Z' μετά την πρόσκρουση σε άξονες z, x, y αντίστοιχα. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της αντίστασης, τόσο εντονότερα τα χρώματα για τις ρωγμές που έχουν δημιουργηθεί από την πρόσκρουση. Η εικόνα στο σχήμα 8.38 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων για τις μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης στις εικόνες 8.32-8.37.

Όσο περνάμε στο επόμενο επίπεδο κάθε φορά, παίρνουμε τιμές πιο κοντά στο πράσινο-μπλε χρώμα που επιβεβαιώνει ότι έχει υποστεί ζημιά το υλικό στο 1^ο επίπεδο και αποκόλληση στο 2^ο.



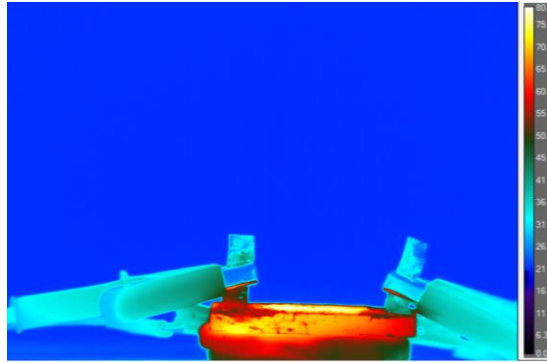
Σχήμα 8.32 3D contour μέσω χαρτογράφησης ανά επίπεδο 1,2,3

8.3 Ενεργητική παλμική θερμογραφία με εικόνες μέσω θερμοκάμερας

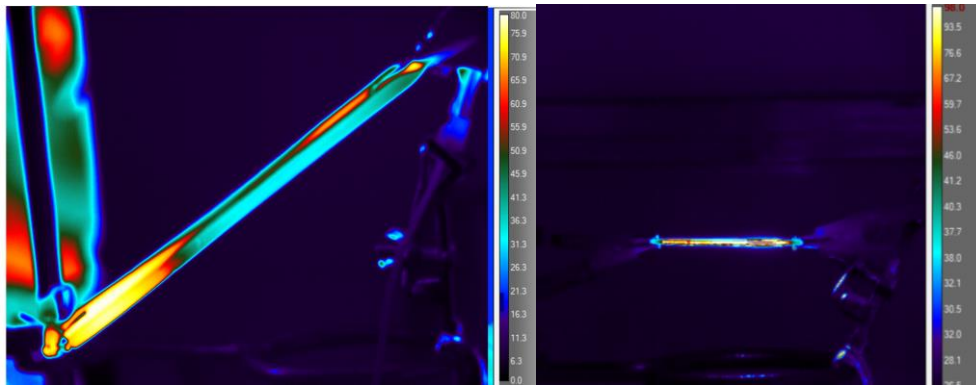
Αφού μετρήσαμε τις διηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες κάθε πλάκας, χρησιμοποιήσαμε dophicamera υπέρυθρης θερμογραφίας για να πάρουμε θερμικές εικόνες της κάθε πλάκας πριν το damage, μετά το damage και πριν repair ώστε να εντοπίσουμε την βλάβη μέσω παλμικής διέγερσης. Η θερμική διέγερση γίνεται με χρήση φλάς μικρής χρονικής διάρκειας κάποιων sec για υλικά μεγάλης ή μικρής θερμικής αγωγιμότητας. Η εφαρμογή ενός σύντομου θερμικού παλμού, έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά όσο διαχέεται η θερμότητα στο εσωτερικό του υλικού. Τα δεδομένα, λαμβάνονται μέσω θερμικών εικόνων. Η ανάλυση των δεδομένων που ακολουθεί βασίζεται στο γεγονός ότι η ύπαρξη ατελειών μεταβάλλει τις θερμικές ιδιότητες του υλικού, με αποτέλεσμα ο ρυθμός επιφανειακής ψύξης στις περιοχές χωρίς και στις περιοχές με ατέλειες να είναι διαφορετικός κατά το πέρασμα του χρόνου.

Οι θερμικές εικόνες στα σχήματα 8.39, 8.40, 8.41 και 8.42 έγιναν στα πλαίσια δοκιμής στις οποίες εφαρμόζουμε εξωτερική τάση σε δοκίμια ILS, mode II και πολυστρωματικής πλάκας στις οποίες δεν έχουμε εισάγει κανένα σύστημα ίασης, προκειμένου να δούμε το κατάλληλο πάχος και μήκος που θα πρέπει να έχει η πλάκα μας ώστε να επιτευχθεί η ίαση μέσω φαινομένου Joule στους 100° C. Εδώ η θερμογραφία είναι παθητική διότι δεν γίνεται η χρήση φλας για θέρμανση του υλικού. Με βάση τις τιμές της θερμοκρασίας και που παρατηρούμε στα δεξιά της οθόνης των εικόνων που έχουμε λάβει, η θερμοκρασία φτάνει τους 85° C κυρίως στα σημεία όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόδια ή ενώνονται μεταξύ τους ανά επίπεδο οι αγωγίμες διαδρομές. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος του δοκιμίου τόσο πιο μεγάλες θερμοκρασίες επιτυγχάνονται. Η μέγιστη ισχύς είναι τα 7 W που εφαρμόσαμε

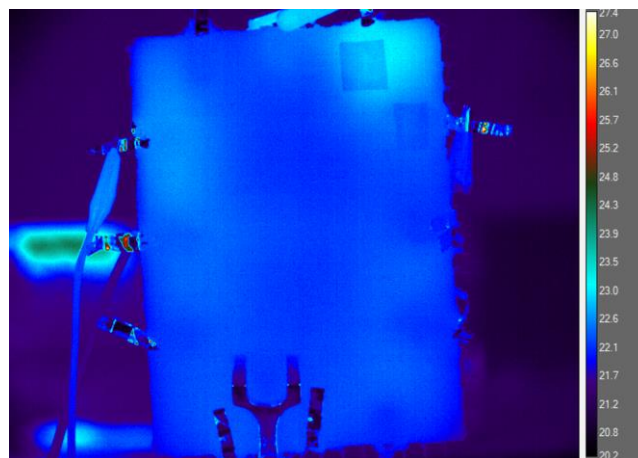
σταθερά στα ILS και στα mode II δοκίμια, ενώ για τις πολυστρωματικές πλάκες είναι τα 10 W ανά γεννήτρια. Άρα μπορούμε να πούμε ότι με σταθερή εφαρμογή τάσης, μπορεί να επιτευχθεί σταθερή θερμοκρασία μέσω φαινομένου θέρμανσης Joule.



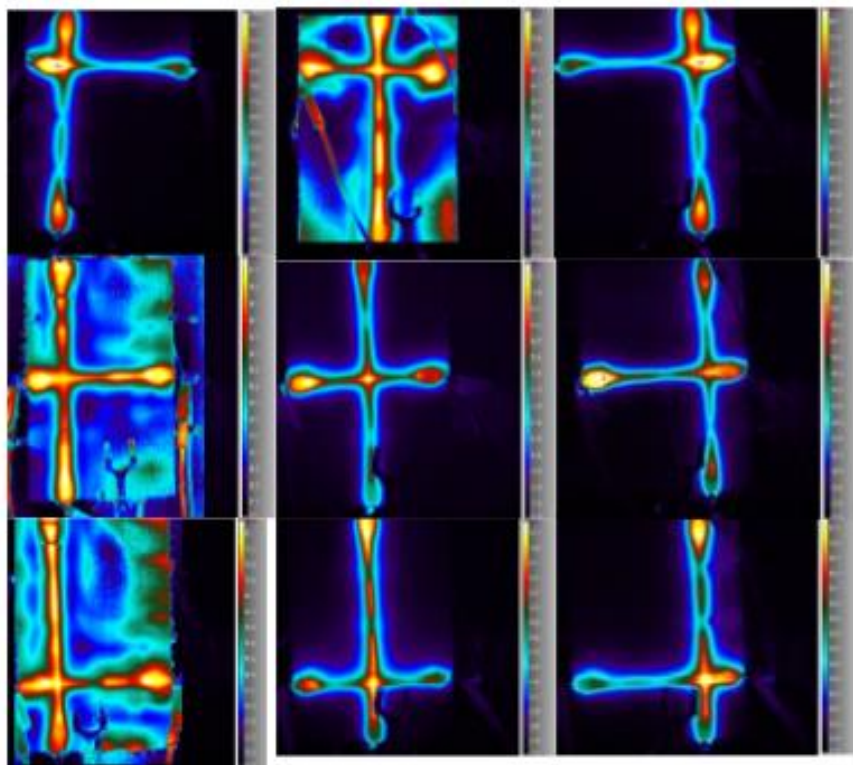
Σχήμα 8.39 Δοκίμιο ILSS – θερμική εικόνα



Σχήμα 8.40 Δοκίμιο mode II- Αριστερά θερμική εικόνα με άσκηση σταθερής θερμοκρασίας, Δεξιά εικόνα λίγο πριν το υλικό μας καταστραφεί λόγω υπερθέρμανσης

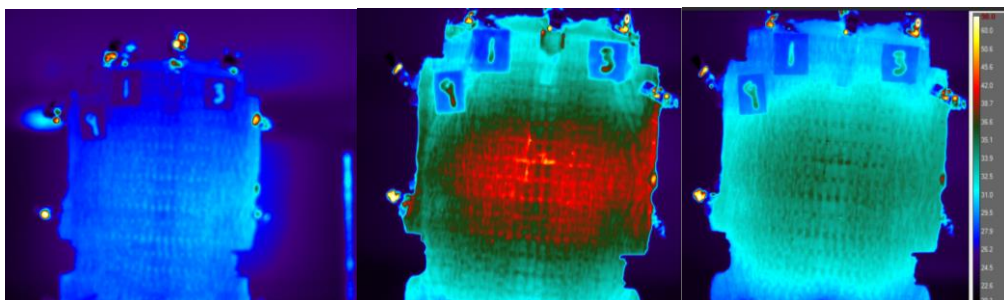


Σχήμα 8.41 Δοκίμιο πολυστρωματικής πλάκας με αγώγιμες διαδρομές στην οποία δεν έχει εφαρμοστεί ρεύμα

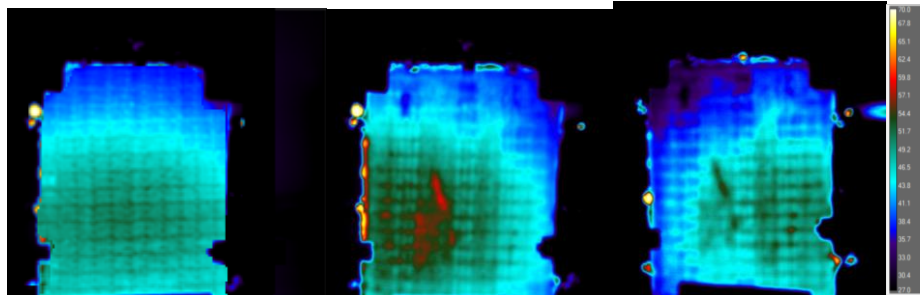


Σχήμα 8.42 Δοκίμιο πολυστρωματικής πλάκας με εφαρμογή εξωτερικής τάσης στα σημεία ένωσης των ανθρακονημάτων

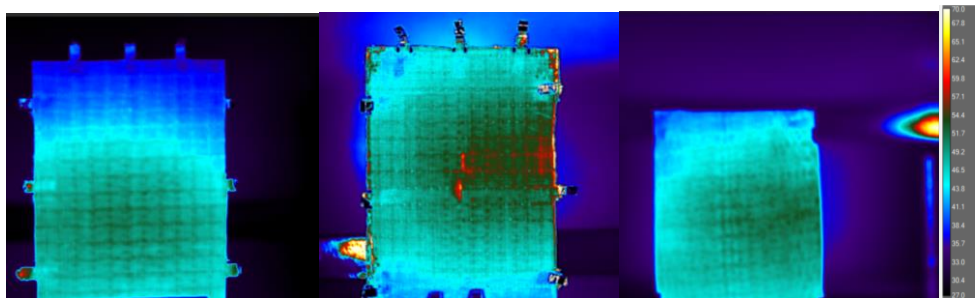
Στα επόμενα σχήματα που ακολουθούν είναι οι εικόνες που έχουμε λάβει μέσω ενεργητικής θερμογραφίας στις πολυστρωματικές μας πλάκες με ανθρακονήματα Itoes, στα δοκίμια όπου η ίαση έχει πραγματοποιηθεί μετά από ένα χρόνο, στις πολυστρωματικές πλάκες με ψεκασμένες αγωγίμες διαδρομές από μελάνι και δοκίμια όπου η ίαση έχει γίνει μέσω θέρμανσης Joule. Οι θερμοκρασίες που έχουμε ορίσει είναι από 25°C έως 100°C και χρησιμοποιούμε εξωτερικό φλάς. Αφού σταθεροποιήσουμε την κάμερα στο 1m απόσταση από τα δοκίμια ενεργοποιούμε τα φλάς και παίρνουμε τις παρακάτω εικόνες



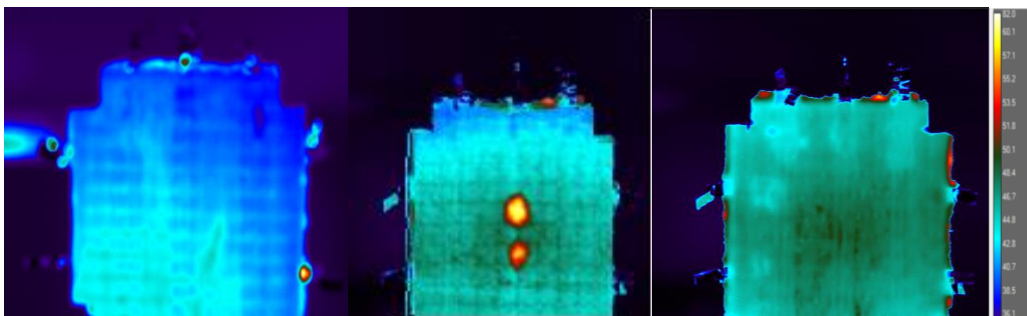
Σχήμα 8.43 Δοκίμιο πολυστρωματικής πλάκας Itoes virgin, damage, repair



Σχήμα 8.44 Δοκίμιο πολυστρωματικής πλάκας 1 χρόνο μετά virgin, damage, repair



Σχήμα 8.45 Δοκίμιο πολυστρωματικής πλάκας με μελάνι virgin, damage, repair



Σχήμα 8.46 Δοκίμιο πολυστρωματικής πλάκας με μελάνι virgin, damage, repair

Κεφάλαιο 9°.Συμπεράσματα

Η βλάβη στα πειράματα μας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα εξάρτημα κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια ILSS και Mode II και μέσω κρούσης υψηλών ταχυτήτων στις πολυστρωματικές μας πλάκες με νανοενισχυμένη πολυμερικής μήτρα. Αυτές οι βλάβες του κυκλώματος μειώνουν τη αντοχή του υλικού, απαιτώντας δαπανηρή αντικατάσταση ολόκληρου του στοιχείου.

Στην έρευνα μας αποδείχθηκε ότι η ύπαρξη ρωγμών επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα προκαλώντας καταστροφή στις αγώγιμες διαδρομές και αύξηση της σύνθετης αντίστασης. Όμως με την προσθήκη αυτό-ιάσιμων συστημάτων εντός του υλικού μας με χρήση κάψουλων, δίνεται η δυνατότητα για επαναφορά των

ηλεκτρικών ιδιοτήτων μέσω της έκθεσης του σε πολυμερισμό των καψουλών μέσω θέρμανσης. Το αποτέλεσμα φαίνονται στο ποσοστό αυτοίωσης σε αντίθεση με το ποσοστό υποβάθμισης που αυξάνεται. Επίσης οι μηχανικές δοκιμές με τον πολυμερισμό των καψουλών μετά από 1 χρόνο, έδειξαν ότι οι κάψουλες έχουν ως αποτέλεσμα να κάνουν το υλικό πιο άκαμπτο, άρα η ποιότητα τους παραμένει πολύ καλή.

Η ενθυλάκωση νανοενισχυμένης ρητίνης σε συνδυασμό με το carbon black αποδίδει πολύ καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Επίσης η διηλεκτρική φασματοσκοπία αποδεικνύεται καταλληλότερη για τη παρακολούθηση διαστρωματικών αποκολλήσεων, καθότι παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την ανάπτυξη βλαβών στη μήτρα ενός σύνθετου υλικού με διαγράμματα Nyquist και Bode. Οι αγωγίμες διαδρομές από μελάνι δίνουν εξίσου καλά ηλεκτρικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις ίνες από άνθρακα. Όπως και στην περίπτωση θέρμανσης μέσω φούρνου έτσι και στην περίπτωση Joule heating η επαναφορά στις αρχικές ηλεκτρικές ιδιότητες είναι σημείο ένδειξης ότι το πείραμα μας θεωρείται επιτυχημένο σε όλες τις περιπτώσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για περαιτέρω έρευνα

Βιβλιογραφία

1. **Παπανικολάου, Γ., Μουζάκης,** Σύνθετα υλικά. s.l. : Δ. . Εκδόσεις Κλειδάριθμος,, 2007.
2. **Hull, D. & Clyne, T.W.** “An Introduction to Composite Materials”. Cambridge University Press : s.n., 2003.
3. **Callister, W. D.** “An Introduction to Composite Materials”. 2006.
4. **J-KK& Y-WM.** ENGINEERED INTERFACES IN FIBER REINFORCED. 1998.
5. **Jones.R.** Mechanics Of Composite Materials. 1999.
6. **A.K. Kaw.** Mechanics of Composite Materials. s.l. : CRC Press, 2006.
7. **Bethune DS, Klang CH, De Vries MS, et al.** Bethune Cobalt-catalysed growth of carbonnanotubes with single-atomic-layer walls. . 1993.
8. **Chung, D.D.L. . ,** Composite Material Structure and Processing Composite Materials,. s.l. : Springer London, , 2010.
9. **Francesca Giulia Carozzi, Carlo Poggi.**)Mechanical properties and debonding. 2014.
10. **X., Τριανταφύλλου Αθανάσιος.** Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου. 2006.

11. Self-lubricating bidirectional carbon fiber reinforced smart aluminum composites by squeeze infiltration process. **K.M. Sree Manua, L. Ajay Raaga, T.P.D. Rajana, B.C. Paia, Vijay Petleyb, Shweta Namdeo Vermab.**
12. Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment. **Angela Daniela La Rosa, D.R. Banatao, S.J. Pastine** Show all 5 authors **Gianluca Cicala, Gianluca Cicala.** November 2016.
13. **Araldite LY 5052 Resin / Aradur® 5052 Hardener Datasheet T, Description P.** 2015.
14. **Μπέλτσιος, Κ.** Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών,. s.l. : Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, 2003.
15. **D.G. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis, A.S. Paipetis,.** Self-healing materials: a review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques, *Compos. Part B Eng.* 87 (2016) 92–119. s.l. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09>.
16. **Safdari M, Al-haik MS.** A Review on Polymeric Nanocomposites: Effect of Hybridization and Synergy on Electrical Properties. Elsevier Inc.; 2018. doi:10.1016/B978-0-12-813574-7.00005-8.
17. **D. N. Futaba, K. Mizuno, T. Namai, M. Yumura, S. Iijima.** Chemically Functionalized Carbon Nanotubes.
18. **Hernández-Pérez A, Avilés F, May-Pat A, Valadez-González A, Herrera-Franco PJ, Bartolo-Pérez P.** Effective properties of multiwalled carbon nanotube/epoxy composites using two different tubes. *Compos Sci Technol* 2008;68:1422–31. doi:10.1016/j.compscitech.2008.03.003.
19. **Makar, J.M. και Beaudoin, J.J.** Carbon nanotubes and their application in the construction Industry. [41] Makar, J.M.; Beaudoin, J.J., 2003, “Carbon nanotubes and their application in the construction Industry”, 1st InSymposium on Nanotechnology in Construction, Paisley, Scotland, June 22-25, : s.n., 2003, pp. 331-341.
20. **Burmistrov I, Gorshkov N, Ilinykh I, Muratov D, Kolesnikov E, Anshin S, et al.** Improvement of carbon black based polymer composite electrical conductivity with additions of MWCNT. . *Compos Sci Technol* 2016;129:79–85. doi:10.1016/j.compscitech.2016.03.003.
21. **Lu S, Chen D, Wang X, Shao J, Ma K, Zhang L, et al.** Real-time cure behaviour monitoring of polymer composites using a highly flexible and sensitive CNT buckypaper sensor. *Compos Sci Technol [Internet]. [Ηλεκτρονικό]* 2017;152-181.
22. **Siddiqui NA, Marom G, Kim JK.** Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2010;41:1345–67. doi:10.1016/j.compositesa.2010.07.003.
23. Young ’s modulus of multi-walled carbon nanotubes. **Kashyap KT, Patil RG.** 2008, Τόμ. 67-185.

24. **González C, Vilatela JJ, Molina-Aldareguía JM, Lopes CS, LLorca J.** Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. 2017. Τόμ. 89:194–251. 75.
25. **Bouchard J, Cayla A, Devaux E, Campagne C.** Electrical and thermal conductivities of multiwalled carbon nanotubes-reinforced high performance polymer nanocomposites. . *Compos Sci Technol* 2013;86:177–84. doi:10.1016/j.compscitech.2013.07.017.
26. Crystalline ropes of metallic carbonnanotubes. **Thess A, Lee R, Nikolaev P.** s.l. : Science, 1996.
27. **Mittal G, Dhand V, Rhee KY, Park SJ, Lee WR.** A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites. 2014.
28. **Allaoui A, Bai S, Cheng HM, Bai JB.** Mechanical and electrical properties of a MWNT / epoxy composite . 2002;62:1993–8.
29. **González C, Vilatela JJ, Molina-Aldareguía JM, Lopes CS, LLorca J.** Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. . *Mater Sci.*2017;89:194–251. : s.n.
30. **Chung DDL.** Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetics shielding and thermal interfacing. *Carbon N Y.* 2012;50(9):3342–56.
31. **Daniel M. Peairs, Benjamin Grisso, Daniel J. Inman, Kenneth R. Page, Robert Athman, Ravi N. Margasahayam,.** Proof-of-Concept Application of Impedance-Based Health Monitoring on Space Shuttle Ground Structures. s.l. : NASA-TM, 2003 .
32. **Daniel M. Peairs, Gyuhae Park, Daniel J. Inman.** Improving Accessibility of the Impedance-based Structural Health Monitoring Method, *Journal of Intelligent Materials and Structures.* Vol.15, 2004.
33. **Wang, X., et al.** "Tensile strain sensing of buckypaper and buckypaper composites.". s.l. : *Materials & Design* 88: 414-419., 2015.
34. **Gyuhae Park, Kazuhisa Kebaya, Harley H. Cudney, Daniel J. Inman.** Impedance-Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications, *JSME.* s.l. : *International Journal, Series A,* Vol. 42, No.2., 1999.
35. **Sandler J, Shaffer MSP, Prasse T, Bauhofer W, Schulte K, Windle AH,.** Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer.* Vol. 40, 1999, pages 5967–71.
36. **Verijenko, B. Verijenko and V.** : ‘Smart composite panels with embedded peak strain sensors’. *Compos. Struct.,* Vol 62, 2003, pages 461–465.
37. **Jerome P. Lynch and Kenneth J. Loh.** , A summary review of wireless sensors and sensor networks for Structural Health Monitoring, *The Shock and Vibration Digest,.* 2006, pages 38-91. .

38. **Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen, Alfredo Güemes.** Structural Health Monitoring, Chapter 1 - Introduction to Structural Health Monitoring. pp.13-43, Publisher: ISTE, January 2006. .
39. **Yung William Sasy Chan, Zhi Zhou,.** Advances of FRP-based smart components and structures, Pacific Science Review. s.l. : Volume 16, Issue 1,, June 2014, pages 1-7.
40. **A. Guemes, J.R. Casas.** Fibrous materials reinforced composites for structural health monitoring. s.l. : Woodhead Publishing Limited, 2011.
41. **Victor Giurgiutiu.** Polymer Composites in the Aerospace Industry, Chapter 16 - Structural health monitoring (SHM) of aerospace composites,, 2015, pages 449-507 .
42. https://en.wikipedia.org/wiki/Structural_health_monitoring, 2019.
43. **Uwe Zerbst, Victor Giurgiutiu, Frank J. Fahy, Bingen Yang, K. Ravi-Chandar.** Structures and Fracture ebook Collection: Ultimate CD 1st Edition,, s.l. : Book: Structural Health Monitoring, 2008, pages 1-10. .
44. **P.J. Schubel, R.J. Crossley, E.K.G. Boateng, J.R. Hutchinson.** Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades. : Renewable Energy 51,, 2013.
45. **Πανέτσος Παναγιώτης, Ρεντζεπέρης Ιωάννης, Λιόλιος Κωνσταντίνος.** Σύστημα ενόργανης παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος,. TEE, ETEK, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.
46. **Fuh-Gwo Yuan.** Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures. 2016.
47. **Hamza Boukabache, Christophe Escriba and Jean-Yves Fourniols.** Toward Smart Aerospace Structures: Design of a Piezoelectric Sensor and Its Analog Interface for Flaw Detection, Sensors, Vol. 14, 2014, pages 20543-20561. .
48. **D.G. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis, A.S. Paipetis.** Self-healing materials: a review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques, . Compos. Part B Eng. 87 (2016) 92–119, : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09>.
49. **Han Zhang, Emiliano Bilotti & Ton Peijs.** The use of carbon nanotubes for damage sensing and structural health monitoring in laminated composites: a review. s.l. : Nanocomposites, Volume 1 - Issue 4, 2015.
50. **Kandare E, Khatibi AA, Yoo S, Wang R, Ma J, Olivier P, et al.** Improving the through-thickness thermal and electrical conductivity of carbon fibre/epoxy laminates by exploiting synergy between graphene and silver nano-inclusions. . 2015.
51. **J. Macutkevic, P. Kuzhir, A. Paddubskaya, S. Maksimenko, J. Banys, A. Celzard, V. Fierro, E. Stefanutti, A. Cataldo, F. Micciulla, and S. Bellucci.** Epoxy Resin/Carbon Black Composites Below the Percolation Threshold, J Nanosci Nanotechnol, Vol. 13, No. 8.,

52. **Alexey Govorov, Daniel Wentzel, Sandi Miller, Ahmed Kanaan, Igor Sevostianov.** , Electrical conductivity of epoxy-graphene and epoxy-carbon nanofibers composites subjected to compressive loading, *International Journal of Engineering Science* 123. [21, 2018, pages 174–180. .
53. **Vavouliotis, A. Paipetis, V. Kostopoulos.** On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the Electrical Resistance Change method,. 71, 2011, pages 630–642.
54. **S.A. Grammatikos, A.S. Paipetis,.** On the electrical properties of multi scale reinforced composites for damage accumulation monitoring, *Composites: Part B* 43, 2012, pages 2687–2696. .
55. **Sung-JunJooa, Myeong-Hyeon Yu, aEun-Beom Jeon, Hak-Sung Kimab.** In situ fabrication of copper electrodes on carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) for damage monitoring by printing and flash light sintering.
56. **Limin Gao, Erik T. Thostenson, Zuoguang Zhang, and Tsu-Wei Chou.** Damage Mechanisms in Fiber-Reinforced Composites under Cyclic Loading .
57. **Vavouliotis, A. Paipetis, V. Kostopoulos.** On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the Electrical Resistance Change method. *Compos. Sci. Technol.* 71 : s.n., 2011, pages 630–642.
58. **Baltopoulos, N. Polydorides, L. Pambaguan, A. Vavouliotis, V. Kostopoulos .** Exploiting carbon nanotube networks for damage assessment of fiber reinforced composites. *Composites Part B* 76, 2015, pages 149-158.
59. **Daniel Wentzel, Sandi Miller, Igor Sevostianov.** Dependence of the electrical conductivity of graphene reinforced epoxy resin on the stress level. s.l. : *International Journal of Engineering Science* 120, 2017. pages 63–70.
60. **Xiaoran Chen, Morteza Khaleghi, Ivo Dobrev, Weiyuan Tie, and Cosme Furlong, Structural Health Monitoring by Laser Shearography,.** Experimental and Numerical Investigations, *Experimental and Applied Mechanics*,. Volume 6, : s.n., 2014. .
61. **K. Schulte, A.H. Windle.** Formation of percolating networks in multi-wall carbon-nanotube–epoxy composites,. s.l. : *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004, pages 2309–2316.
62. **Joung-Man Park, Dae-Sik Kim, Sung-Ju Kim, Pyung-Gee Kim, Dong-Jin Yoon, K. Lawrence DeVries.** , Inherent sensing and interfacial evaluation of carbon nanofiber and nanotube/epoxy composites using electrical resistance measurement and micromechanical techniques.
63. **González C, Vilatela JJ, Molina-Aldareguía JM, Lopes CS, LLorca J.** Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. . s.l. : *Prog Mater Sci.* 2017;89:194–251. 75 .

64. **Limin Gao, Erik T. Thostenson, Zuoguang Zhang, and Tsu-Wei Chou.** Sensing of Damage Mechanisms in Fiber-Reinforced Composites under Cyclic Loading using Carbon Nanotubes, *Advanced Functional Matter*. Vol 19 : pages 123-130, 2009.
65. **Jones, R M.** *Mechanics Of Composite Materials*.s.l.: CRC Press. 1998.
66. https://en.wikipedia.org/wiki/Micro-mechanics_of_failure.
67. *Introduction to Composites, Lecture Notes, University of Surrey*, **Guilford. M. Bader.** 2004.
68. **Serge Abrate.** *Impact on Laminated Composites: Recent Advances, Applied Mechanics Reviews*. Vol. 47, Issue 11, 1994, pages 517-544.
69. **Hyung Yun Choi, His-Yung T. Wu, Fu-Kuo Chang.** A New Approach toward Understanding Damage Mechanisms and Mechanics of Laminated Composites Due to Low-Velocity Impact: Part II—Analysis. Vol 25, Issue 8, 1991.
70. **G.A.O. Davies, X. Zhang,.** Impact damage prediction in carbon composite structures, *International Journal of Impact Engineering*. Volume 16, Issue 1, 1995, Pages 149-170. : s.n.
72. **Hyung Yun Choi, Fu-Kuo Chang.** A Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact. Vol 26, Issue 14, 1992.
73. D7136/D7136M Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event
74. **Abrate, Serge.** *Impact on composite structures*, Cambridge. Cambridge University Press, 1998.
75. **U. Polimeno, M. Meo.** Detecting barely visible impact damage detection on air craft composites structures. [συγγρ. βιβλίου] Vol. 91, Issue 4, 2009,
76. **Παϊπέτης Α., Μπάγκουλα Ν.-Μ.,** Δάσιος Κ., Γκίκας Γ., Γραμματικός Σ., Νάκας Ι., Τέλλογλου Ι. Εργαστήριο Υλικών VII, Σύνθετα Υλικά: Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες, Εργαστηριακό Φυλλάδιο. Φεβρουάριος 2017.
71. **R. Talreja.** *Damage mechanics of composite materials*, . Elsevier Science, . Amsterdam, : s.n., 1994.
78. **Daniel, I.M.** *Failure Criteria of Composite Materials Under Static and Dynamic Loading*, The Society for Experimental Mechanics, Inc. 2016.
79. *Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών*. s.l. : **Εκδόσεις Τζιόλα**, , 2004.
80. **Iijimas.** Helical microtubules of graphitic carbon. . *Nature* 1991.
81. Multiscale approach for three-phase CNT/polymer/fiber laminated nanocomposite structures. **Francesco Tornabene, Michele Baccocchi Nicholas Fantuzzi J.N. Reddy.** 2017.

82. "Self-sensing properties of smart composite based on embedded buckypaper layer." **Zhang, Z.**, et al. *Structural Health Monitoring* (2): 127-136, (2015).
83. Carbon nanotubes: basic concepts and physical properties. Reich S, Thomsen C, **Maultzsch J.** New York: Wiley : s.n., 2004.p. 31–40.
84. **William Roth, Victor Giurgiutiu.** Structural health monitoring of an adhesive disbond through electromechanical impedance spectroscopy, *International Journal of Adhesion and Adhesives* . Vol. 73, 2017, pages 109-117. : s.n.
85. **Bryan R. Loyola,** Timothy M. Briggs, Luciana Arronche, Kenneth J.Loh, Valeria La Saponara, Greg O’Bryan and JACk L. Skinner. Detection of spatially distributed damage in fiber-reinforced polymer composite. s.l. : *Structural Health Monitoring*, Vol., 12, No. 3, 2013, pages 225–239.
86. **Till Augustin,** Danny Grunert, Hauke H. Langner, VicoHaverkamp and Bodo Fiedler. Online monitoring of surface cracks and delaminations in carbon fiber/epoxy composites using silver nanoparticle based ink. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Vol. 3, No. 3, pages 110-119 : s.n., 2017.
87. **Till Augustin,** Julian Karsten and Bodo Fiedler., Detection and localization of impact damages in carbon nanotube–modified epoxy adhesive films with printed circuits. *Structural Health Monitoring* 00(0), 2017, pages 1–12. .
88. Autonomic healing of low-velocity impact damage in fiber-reinforced composites **Amit J. Patel a,b,** Nancy R. Sottos a,b, Eric D. Wetzel Scott R. White .
89. **D.G. Bekas, K. Tsirka,** D. Baltzis, A.S. Paipetis, Self-healing materials: a review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques, *Compos. Part B Eng.* 87 (2016) 92–119, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.057>
90. Silane-Modified 3D Graphene Foam with Improved Joule-heating Effects and High Hydrophobicity-Derived Anti-icing Properties **Qiangqiang Zhang Hr.**
91. **Kalista and Ward** (2007), “Thermal characteristics of the self-healing response in poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymers.” *J R Soc Interface*, Vol. 4, No. 13, pp. 405 – 411.
92. **Varley, R. J. and van der Zwaag, S.** (2008b), “Towards an understanding of thermally activated self-healing of an ionomer system during ballistic penetration,” *Acta Materialia*, Vol. 56, No. 19, pp. 5737 – 5750.
93. Nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced composites with infrared thermography and ultrasonic **Zwaag, S**

95. **Bekas, D.G.; Sharif-Khodaei, Z.**; Aliabadi, F.M.H. A smart multi-functional printed sensor for monitoring curing and damage of composite repair patch. *Smart Mater. Struct.* 2019, 28, 085029.
96. **Bekas, D.G.; Paipetis, A.S.** Damage monitoring in nanoenhanced composites using impedance spectroscopy. *Compos. Sci. Technol.* 2016
97. **Hayes, S.A.; Swait, T.J.**; Lafferty, A.D. *Self-Sensing and Self-Healing in Composites*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2015;
98. **Roh, H.D.; Lee, S.Y.**; Jo, E.; Kim, H.; Ji, W.; Park, Y. Bin Deformation and interlaminar crack propagation sensing in carbon fiber composites using electrical resistance measurement. *Compos. Struct.* 2019, 216, 142–150.
99. **Standard Test Method** for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
100. **Standard Test Method** for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites I
106. **Frias, C.; Faria, H.; Frazão, O.**; Vieira, P.; Marques, A.T. Manufacturing and testing composite overwrapped pressure vessels with embedded sensors. *Mater. Des.* 2010, 31, 4016–4022.
107. **Grammatikos, S.A.; Kordatos, E.Z.; Matikas, T.E.**; Paipetis, A.S. On the fatigue response of a bonded repaired aerospace composite using thermography. *Compos. Struct.* 2018, 188, 461–469.
108. “**APS NEWS**: December 1840: Joule’s abstract on converting mechanical power into heat.”
109. Estimation of Respiratory Rate from Thermography Using Respiratory Likelihood Index **Yudai Takahashi**^{1,2}, **Yi Gu**¹, Takaaki Nakada³, Ryuzo Abe³, Toshiya Nakaguchi⁴
110. **Usamentiaga, R.; Venegas, P.; Guerediaga, J.**; Vega, L.; López, I. Automatic detection of impact damage in carbon fiber composites using active thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2013, 58, 36–46.
111. A Novel Composite with Structural Health Monitoring Functionality via 2D and 3D Impedance Mapping Topography. **Georgios Foteinidis , Alkiviadis S. Paipetis**
112. Binary microcapsule architecture with UF-DBP capsules in the shell wall. UF-DBP, Urea formaldehyde-dibutylphthalate. **S.D. Mookhoek, B.J. Blaiszik, H.R. Fischer, N.R. Sottos, S.R. White, S. Van Der Zwaag**, Peripherally decorated binary microcapsules containing two liquids, *J. Mater.Chem.* 18 (2008) 53905394, DOI:10.1039/b810542a, copyright (2019), Royal Society of Chemistry.
115. Microcapsule-based self-healing materials: Healing efficiency and toughness reduction vs. capsule size **Maria Kosarli , Dimitrios G. Bekas b, Kyriaki Tsirka , Dimitrios Baltzis. Akiviadis Paipetis**