

Α.Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ
ΣΤΕΦ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Μελέτη της δομικής αρτιότητας
GFRP υλικών με ενσωματωμένη ίνα
CNT , μέσω της αγωγιμότητας της.*



▶▶▶ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΪΡΗΣ ΑΧΙΛΛΕΑΣ
ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΑΡΓΥΡΗΣ ΣΤΑΜΑΤΙΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Γενικά:

Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία

Εργαστήριο σύνθετων υλικών και διεργασιών

1. Εισαγωγή

1.1 Συνθετικά υλικά ενισχυμένα με ίνες.

1.2 Συνθετικά υλικά ενισχυμένα με ίνες υάλου;

2.

2.1 Υλικά κατασκευής.

2.2 Ίνα nanotube (νανοσωλήνα) άνθρακα (CNT).

2.3 Σύνθετα δοκίμια με ενσωματωμένη ίνα CNT .

3. Πειραματική διαδικασία

4. Αποτελέσματα και συζήτηση

4.1 Δοκιμές εφελκυσμού

4.2 Καμπτικές δοκιμές τριών σημείων

4.2.1 Ίνα CNT σε εφελκυσμό κατά την διάρκεια τριών σημείων καμπτικών δοκιμών

4.2.2 Ίνα CNT στην συμπίεση κατά την διάρκεια τριών σημείων καμπτικών δοκιμών

4.3 Μηχανισμός της ίνας CNT που λειτουργεί ως αισθητήρας

4.4 Αποτελέσματα από τις διαφορετικές φορτίσεις των ινών CNT.

5. Συμπεράσματα

6. Βιβλιογραφία

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία μου ανατέθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής μου εργασίας από το Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης. Η διάρκεια της ήταν ένας χρόνος και έγινε στο χώρο του εργοστασίου της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας. Το αντικείμενό της είναι η μελέτη της δομικής αρτιότητας GFRP υλικών με ενσωματωμένη ίνα CNT , μέσω της αγωγιμότητας της ίνας CNT.

Εκφράζω τις θερμές ευχαριστίες μου για την άριστη καθοδήγησή του στον υπεύθυνο της έρευνας, στο εργαστήριο της ΕΑΒ , Αλεξόπουλο Νικόλαο. Επίσης θέλω να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αχιλλέα Βαΐρη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και την άριστη συνεργασία μας.

Στην παρούσα εργασία , ίνες άνθρακα (nanotube) (CNT) έχουν ενσωματωθεί σε πολυμερή σώματα ενισχυμένα με ίνα υάλου (GFRP) για το δομικό έλεγχο του σύνθετου υλικού.

Η προσθήκη της αγώγιμης ίνας CNT στο μη αγώγιμο υλικό GFRP στοχεύει να ενισχύσει την πολλών χρήσεων δυνατότητά του , η δοκιμή του δείγματος που αφορά το μηχανικό φορτίο και οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας CNT συσχετίστηκαν με σκοπό την αντίληψη και την επίβλεψη κάθε πιθανής βλάβης .

Είναι η πρώτη φορά που αυτή η ίνα χρησιμοποιείται στα συνθετικά υλικά ως αισθητήρας. Η ίνα CNT είναι εύκολο να ενσωματωθεί και δεν υποβιβάζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τα διάφορα επαυξητικά βήματα φόρτισης-εκφόρτισης έχουν εφαρμοστεί στα κατασκευασμένα δείγματα καθώς επίσης και στις τριών σημείων καμπτικές δοκιμές.

Η ίνα CNT λειτούργησε ως αισθητήρας και κατά την θλίψη και κατά τον εφελκυσμό. Ένας άμεσος συσχετισμός μεταξύ της μηχανικής φόρτισης και της αλλαγής της ηλεκτρικής αντίστασης έχει καθιερωθεί για τα ερευνημένα δείγματα.

Για φόρτιση , υψηλής πίεσης, των δοκιμίων παρατηρήθηκαν παραμένουσες τιμές αντίστασης της ίνας CNT μετά από την αποφόρτιση .

Η ζημία “συσσώρευσης” στο σύνθετο υλικό έχει υπολογιστεί και συσχετίστηκε με τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης.

Γενικά



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε. (ΕΑΒ)

Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε. (ΕΑΒ) ιδρύθηκε το 1975 με κύρια αποστολή την παροχή υπηρεσιών και προϊόντων προς υποστήριξη των πτητικών μέσων των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων. Σήμερα η ΕΑΒ, η μεγαλύτερη αεροναυπηγική και αμυντική εταιρία της χώρας, δραστηριοποιείται με μεγάλη επιτυχία στην εγχώρια και στη διεθνή αγορά και διατηρεί πρωταγωνιστικό ρόλο.

Η ΕΑΒ διαθέτοντας πιστοποιημένες διαδικασίες παραγωγής και άριστα καταρτισμένο και έμπειρο ανθρώπινο δυναμικό, σε συνδυασμό με την αναβάθμιση των παραγωγικών εγκαταστάσεών της, προσφέρει, υψηλών ποιοτικών προδιαγραφών, προϊόντα και υπηρεσίες σε έναν μεγάλο αριθμό πελατών του εσωτερικού και του εξωτερικού στον οποίο συγκαταλέγονται:

Κατασκευαστές επιβατικών και μαχητικών αεροσκαφών.

Πολεμικές αεροπορίες άλλων χωρών.

Αεροπορικές εταιρείες , χρηστές επιχειρηματικών αεροσκαφών (Business jets operators

ΤΟΜΕΙΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Με την αξιοποίηση όλων των διεθνών προκλήσεων και ευκαιριών η ΕΑΒ διασφαλίζοντας πάντοτε το υψηλότερο δυνατό επίπεδο επαγγελματισμού και εξυπηρέτησης μέσω ολοκληρωμένων και ευέλικτων συνδυασμών υπηρεσιών και ανταγωνιστικών τιμών δραστηριοποιείται στους παρακάτω τομείς:

Συντήρηση, εκσυγχρονισμό, αναβάθμιση αεροσκαφών, κινητήρων, παρελκόμενων και ηλεκτρονικών συστημάτων τους, καθώς και συντήρηση αεροσκαφών πολιτικού νηολογίου

Ανάπτυξη, σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρονικών, οπτικοηλεκτρονικών και τηλεπικοινωνιακών προϊόντων για στρατιωτική και πολιτική χρήση καθώς και τμημάτων πυραυλικών οπλικών συστημάτων.

Σχεδίαση και κατασκευή μεταλλικών δομικών τμημάτων στρατιωτικών και πολιτικών αεροσκαφών και κινητήρων καθώς και κατασκευή τμημάτων αεροσκαφών και ελικοπτέρων από σύνθετα υλικά.

Δορυφορικά συστήματα και εφαρμογές (τηλεπικοινωνίες, τηλε-εκπαίδευση, κλπ)

Τεχνική εκπαίδευση και επαγγελματική κατάρτιση σε όλο το φάσμα των αεροπορικών ειδικοτήτων.

Έρευνα & Ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και προϊόντων σε τομείς όπως η αεροναυπηγική, τα ηλεκτρονικά, η εσωτερική ασφάλεια (homeland security), ευφυή συστήματα, κλπ.

Οι δραστηριότητες Μελετών και Έρευνας- Ανάπτυξης διαθέτουν απόλυτα κατηρτισμένο και έμπειρο επιστημονικό προσωπικό καθώς και εργαστήρια με τελευταίας τεχνολογίας εξοπλισμό.

Η δραστηριότητα Μελετών παρέχει υποστήριξη και συνδρομή στις παραγωγικές δραστηριότητες της εταιρείας για την επίλυση δύσκολων και σύνθετων τεχνικών προβλημάτων.

Η δραστηριότητα Έρευνας και Ανάπτυξης συμμετέχει στην σχεδίαση και ανάπτυξη ηλεκτρονικών και τηλεπικοινωνιακών προγραμμάτων καθώς και προγραμμάτων κατασκευής δομικών τμημάτων αεροσκαφών.

Διαθέτει εργαστήριο σύνθετων υλικών και διεργασιών το οποίο ασχολείται με την ανάπτυξη προϊόντων και μεθόδων ελέγχου για χρήση στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

Το Εργαστήριο Σύνθετων Υλικών και Διεργασιών ανήκει στον Τομέα Έρευνας & Τεχνολογίας που λειτουργεί κάτω από την Διεύθυνση Ανάπτυξης της ΕΑΒ .

Ο κύριος σκοπός του εργαστηρίου είναι η υλοποίηση προγραμμάτων Έρευνας & Ανάπτυξης που αφορούν τη σχεδίαση, κατασκευή, παραγωγή και δοκιμή αεροναυπηγικών δομικών κατασκευασμάτων/πρωτύπων.

Αυτές οι δομικές κατασκευές σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και αξιολογούνται εφαρμόζοντας εξελιγμένες μεθόδους, σύγχρονα υλικά και διαδικασίες, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στην Αεροναυπηγική Βιομηχανία και τις εφαρμογές της.

1.Εισαγωγή

1.1 Συνθετικά υλικά ενισχυμένα με ίνες.

Τα ενισχυμένα με ίνες συνθετικά υλικά είναι γνωστό ότι διαθέτουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες και οι εφαρμογές τους επεκτείνονται . Οι βλάβες που παθαίνουν είναι μικρής κλίμακας και είναι η διεπιφανειακή αποκόλληση , η ρηγμάτωση της μήτρας, η θραύση και η αποκόλληση των ινών .

Η έναρξη αυτής της μικρής κλίμακας ζημίας έχει σημαντικές επιπτώσεις σχετικά με την αντοχή και τις επιδώσεις των σύνθετων υλικών. Είναι γνωστό από την μελέτη των σύνθετων αυτών υλικών ότι οι ρωγμές που εμφανίζονται κάθετα ως προς την κατεύθυνση του φορτίου είναι ιδιαίτερα επιζήμιες για την αντοχή των υλικών.

Το εγκάρσιο ράγισμα εμφανίζεται σε επιμήκυνση πολύ μικρότερη από το τελικό σημείο αστοχίας . Η πυκνότητα των ρωγμών (ρωγμή ανά μονάδα μήκους) έχει χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος ζημιάς για τον προσδιορισμό της αντοχής της μήτρας του υλικού.

Η απόσταση μεταξύ των ρωγμών εξαρτάται από το πάχος της εγκάρσιας πτυχής σε σχέση με την εφαρμοζόμενη δύναμη.

Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των προαναφερθέντων βλαβών στα σύνθετα αυτά υλικά.

Ο Wang και ο Chang μέτρησαν την βλάβη από στατική κόπωση και την επιμήκυνση σε συνθετικά υλικά με διασταυρούμενες ίνες άνθρακα στην πολυμερή μήτρα , χρησιμοποιώντας συνεχές ρεύμα.

Η παράμετρος $\Delta R/R_0$ που υποδηλώνει την κλασματική μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο της επιμήκυνσης και της βλάβης για τις στατικές και δυναμικές φορτίσεις.

Ο Kurke κατά την διάρκεια των δοκίμων σε συνθετικά υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, μέτρησε την αντίσταση και με συνεχές και με εναλλασσόμενο ρεύμα για να προσδιορίσει την βλάβη των υλικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι δυνατόν να παρακολουθηθεί η επιμήκυνση και να προσδιοριστούν οι διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή.

Πρόσφατα η μέθοδος της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε από τον Todoroki για να εξεταστεί η συμπεριφορά των ανθρακονημάτων συνθετικών υλικών σε κρουγονική επεξεργασία.

Προσομοιώσεις και πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια μικροσκοπίων ώστε να συσχετιστούν οι μετρήσεις της αγωγιμότητας με την εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια των συνθετικών υλικών με ίνες άνθρακα. Έγινε προσπάθεια να προσδιοριστεί και η πυκνότητα των ρωγμών.

Αν και μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης έχει καθιερωθεί ως ένα αποτελεσματικό μέσο για την παρακολούθηση της δομικής αριότητας των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τα συνθετικά υλικά που είναι ενισχυμένα με μη αγωγιμες ίνες, όπως οι ίνες γυαλιού.

Επιπλέον η μέθοδος αυτή παρέχει λιγότερες πληροφορίες κατά την εξέλιξη της βλάβης της μήτρας όταν σπάσουν οι ίνες που φορτίζονται.

Τα nanotubes άνθρακα και οι μοναδικές ιδιότητες που έχουν, ώθησαν στην ανάπτυξη ενός πολυλειτουργικού σύνθετου υλικού αποτελούμενο από nanotubes ινών.

Ο Thosterson και ο Chou απέδειξαν ότι οι πληροφορίες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των nanotubes άνθρακα που συμπεριλαμβάνονται στα συνθετικά υλικά , όταν τα υποβάλουμε σε δόκιμες είναι μια αξιόλογη μέθοδος για τον προσδιορισμό της μικροδομικής βλάβης.

Οι nanotubes άνθρακα έχουν την ικανότητα λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων να έχουν παράλληλα ομοιόμορφη κατανομή μέσα στην μήτρα και να δημιουργούν ένα πολύ καλό αγωγίμο δίκτυο χωρίς να αλλοιώνουν την δομή των συνθετικών υλικών .

Επίσης αποδείχθηκε ότι μπορεί να γίνει παρακολούθηση και ποσοτικοποίηση της βλάβης σε πραγματικό χρόνο. Οι ηλεκτρικές αλλαγές που παρατηρούνται κατά την διάρκεια των κυκλικών φορτίσεων , λόγω του ανοίγματος-κλεισίματος των ρωγμών, μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την έκταση της ζημιάς.

Ο Boger και άλλοι πρόσφατα πρόσθεσαν nanotubes άνθρακα μέσα σε πολυμερή συνθετικά υλικά ενισχυμένα με ίνες , ώστε να μπορεί να γίνει ανίχνευση ζημιών στην μήτρα.

Τελικά η ικανότητα των nanotubes ως αισθητήρες για τον προσδιορισμό της βλάβης, εξαρτάται από τον συσχετισμό ενός συνεχόμενου δικτύου nanotubes που περιβάλουν τις ίνες.

Κατά συνέπεια το μέγεθος και η μορφολογία των nanotubes διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του δικτύου. Πρέπει να είναι αρκετά μικροί για να διεισδύσουν στην μήτρα , διατηρώντας παράλληλα τον κατάλληλο λόγο διαστάσεων (μήκος / διάμετρος) για να σχηματίσουν ένα αγωγίμο δίκτυο χαμηλής συγκέντρωσης σε nanotubes.

1.2 Συνθετικά υλικά ενισχυμένα με ίνες υάλου

Τα ενισχυμένα με ίνα υάλου πολυμερή σώματα (GFRP) χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική και στη αυτοκινητιστική βιομηχανία, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις υψηλές και συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητές τους. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η αεροδιαστημική βιομηχανία στρέφει την έρευνά της στην παραγωγή πολυσύνθετων υλικών, με γνώμονα τη μείωση βάρους και τις αυξανόμενες μηχανικές ιδιότητες καθώς επίσης και τον έλεγχο της δομικής αρτιότητας τους.

Οι δυνατότητα της ανίχνευσης της βλάβης των υλικών θα αυξήσει κυρίως την ασφάλεια και θα μειώσει δευτερευόντως τα διαστήματα της συντήρησης τέτοιων υλικών. Εντούτοις, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες οι οποίοι εποπτεύουν τη δομική υγεία των τέτοιων υλικών θα πρέπει να υπακούουν σε αρκετές υποχρεωτικές οδηγίες, όπως το μικρό μέγεθος, το μικρό βάρος τους, η συνεχής λειτουργία, και η ευαισθησία.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αλλαγής της αντίστασης ήταν υιοθετημένη αρχικά από τους Schulte και το Baron για την ανίχνευση και επιτήρηση της δομικής αρτιότητας. Πολλές ερευνητικές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει την ηλεκτρική αλλαγή της αντίστασης για τέτοιους στόχους στις σύνθετες ύλες. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται ακριβός εξοπλισμός.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των ινών του άνθρακα χρησιμοποιήθηκε αρχικά στο να εμποτεύσει βλάβες , σε ενισχυμένα με ίνα άνθρακα πολυμερή σώματα (CFRPs), οι οποίες αφορούν τη θραύση των ινών . Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν μελετηθεί εκτενώς και έχει γίνει προσπάθεια να μελετηθεί η ποικιλία των ζημιών όπως το ξεκόλλημα και το ράγισμα της μήτρας , υπό τους διάφορους τρόπους καταπόνησης.

Συνεπώς, αν εκμεταλλευτούμε την έμφυτη αγωγιμότητα της ίνας του άνθρακα, η επιτήρηση της δομικής υγείας των υλικών CFRP με βοήθεια την ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι εφικτή.

Η παραγωγή του άνθρακα (nanotubes) ενίσχυσε την παραγωγή από τροποποιημένα συνθετικά υλικά που θα εξυπηρετούσαν τους πολυσύνθετους σκοπούς. Εκμεταλλευόμενος την ηλεκτρική αγωγιμότητά τους θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα μη αγώγιμα σύνθετα υλικά προκειμένου να ενισχυθεί η ικανότητα ελέγχου τους.

Η προσθήκη διάφορων ποσοστών άνθρακα σε μορφή nanotubes (CNT) στην πολυμερή μήτρα CFRPs , ονομάζεται "doped resin" , οδήγησε σε μια σημαντική αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της εποξικής μήτρας. Αυτό επέτρεψε να ελεγχθεί πλήρως η δομική υγεία CFRPs και καθιερώνει τους συσχετισμούς μεταξύ της εσωτερικής ζημίας και της αύξησης της αντίστασης.

Για την παρακολούθηση των μη αγώγιμων σύνθετων υλικών όπως τον εξοπλισμό (GFRP), μπορεί να ακολουθηθεί η ίδια μέθοδος . Η μέθοδος "doped resin" (CNTs) θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί και να αυξήσει την ικανότητα της ανίχνευσης της βλάβης με βοήθεια την ηλεκτρική αλλαγή της αγωγιμότητας σε μη ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά όπως τα (GFRP) σύνθετα υλικά.

Οι Thostenson και Chou κατέδειξαν ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της αρχής και της εξέλιξης της μικροδομικής ζημίας και μπορεί έτσι να χρησιμοποιηθεί για το δομικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο.

Ο Muto και λοιποί αρχικά κατέδειξαν ότι η διασπορά της σκόνης άνθρακα στη μήτρα του υλικού (GFRP) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για λόγους διάγνωσης. Στην ίδια εργασία, μια ίνα άνθρακα χρησιμοποιήθηκε σε (GFRP) υλικό για τον έλεγχο ζημίας με τη μέτρηση της αλλαγής της ηλεκτρική αντίσταση.

Το τελευταίο υβριδικό σύνθετο υλικό δεν ήταν τόσο επιτυχημένο από την άποψη του ελέγχου της ζημίας όσο και το προηγούμενο, κυρίως λόγω της εύθραυστης φύσης της ίνας άνθρακα, όταν συγκρίνεται με το υλικό (GFRP).

Η ιδέα όμως για έλεγχο της ζημίας των μη αγώγιμων σύνθετων υλικών μέσω μιας αγώγιμης ίνας γεννήθηκε. Εντούτοις αυτή η έννοια είχε εφαρμοστεί ήδη σε συγκεκριμένες δομές στους ουρανοξύστες .

Για μια επιτυχημένη συνεργασία λειτουργίας , της αγώγιμη ίνας με το σύνθετο υλικό, για τον έλεγχο της συσσωρευμένης ζημίας, πρέπει να παρουσιάζει η ίνα τον ίδιο ή χαμηλότερο συντελεστή ελαστικότητας και υψηλότερη ολκιμότητα. Οι ίνες CNT έχουν πραγματικά το μέγεθος ανθρώπινα μαλλιών και προσφέρουν την δυνατότητα υψηλής αντοχής, την ολκιμότητα , το μικρό βάρος , είναι θερμικά και ηλεκτρικά αγώγιμες με χαμηλότερο κόστος από άλλες μορφές nanotube.

Στις παρούσες ίνες (CNT) η ολκιμότητα υπερβαίνει τα 100% επιμήκυνσης και έχουν συντελεστή της ελαστικότητας του ίδιου μεγέθους με το υλικό GFRP. Είναι η πρώτη φορά που μια ίνα (CNT) χρησιμοποιείται για να ελέγξει βλάβες σε μη αγώγιμα σύνθετα υλικά. Οι μικρές διαστάσεις τους δεν επιβάλλουν γεωμετρικά ελαττώματα στην παραγωγή του σύνθετου υλικού . Αυτό είναι μεγάλης σημασίας, διότι παρόλο που ενσωματώνεται αισθητήρας μέσα στη δομή του υλικού δεν υποβιβάζει τις μηχανικές του ιδιότητες.

Μέσα στην παρούσα εργασία, οι ίνες CNT θα παρεμβληθούν στα δείγματα GFRP για να δώσουν απαντήσεις κατά την μηχανική φόρτιση μέσω της ικανότητάς τους ως αισθητήρας. Διάφορες φορτίσεις έχουν εφαρμοστεί στα κατασκευασμένα δοκίμια ώστε να τα δοκιμάσουν σε τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό.. Αυτό στοχεύει στο να καθιερώσει έναν άμεσο συσχετισμό ανάμεσα μηχανική πίεση και την ηλεκτρική αλλαγή της αντίστασης της ίνας CNT. Η έρευνα θα γίνει για να μελετηθεί εάν αυτός ο συσχετισμός αλλάζει ανάλογα με τις μηχανικές φορτίσεις .

2.1 Υλικά κατασκευής

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του επίπεδου σύνθετου δοκιμίου με τις ενσωματωμένες ίνες άνθρακα nanotube είναι (a) multi-wall carbon nanotube (CNT) fibers prepared using a coagulation process, (b) epoxy resin Araldite LY564/hardener Aradur 2954 supplied by Hunstman Advanced Materials, Bergkamen, Germany (ratio 100:35 parts by weight) and (c) glass fiber fabric PW, Style 6781 (S2-glass) by Fiber Glast Developments Corporation.

2.2 Ίνα άνθρακα nanotube

Η διαδικασία παραγωγής ινών CNT έχει ως εξής : εισάγεται με τη μέθοδο της διασποράς nanotube άνθρακα σε ομοιογενές ρεύμα πολυβινυλικού διαλύματος αλκοόλης (PVA) που βρίσκεται σε διαδικασία πήξης. Οι παρούσες ίνες έγιναν στο χημικό διάλυμα που περιστρεφόταν με την έγχυση - διασπορά (nanotube) εφαπτόμενης στο περιστρεφόμενο δοχείο. Εγχύθηκε μέσω κωνικού εγχυτήρα διαμέτρου του 300μm. Ο ρυθμός εισαγωγής είναι 50 ml/h. Ο εγχυτήρας είναι τοποθετημένος σε απόσταση δύο εκατοστόμετρα από τον άξονα περιστροφής του δοχείου PVA.

Το τελευταίο περιστράφηκε σε 100 περιστροφές/λεπτό για να παρέχει ένα ομοιογενές μείγμα. Τα nanotubes πήζουν όταν έρθουν σε επαφή με το διάλυμα PVA και διαμορφώνεται gel ινών. Αυτές οι ίνες εξαγονται από το πήζον χημικό διάλυμα και στεγνώνουν κάθετα.

Αυτή η διαδικασία μας παράγει ένα σύνθετο μείγμα PVA με (nanotube) ίνες άνθρακα, με περιεκτικότητα περίπου 15% κατά βάρος άνθρακα. Αυτό το μέρος συνάγεται από τις μετρήσεις TGA που εκτελούνται με ένα Setaram όργανο TAG 16 κάτω από τη ροή "αργού" σε θέρμανση 5°C/min . Το πολυμερές σώμα PVA προμηθεύτηκε από την Γαλλίας. Είχε ένα μοριακό βάρος των 195.000 g/mol και ένα ποσοστό υδρόλυσης 98%.

Το πήζον διάλυμα προέρχεται από την διάλυση του συγκεκριμένου πολυμερούς σε αποσταγμένο νερό αποκτώντας περιεκτικότητα 5% κατά βάρος.

Το πολλαπλών τοιχωμάτων nanotubes (batch 4028) χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ινών και παράχθηκαν από τον Arkema και τον Lacq, στη Γαλλία.

Τα ακατέργαστα (nanotubes) διασκορπίστηκαν στο νερό σε περιεκτικότητα 0.9 % κατά βάρος. Η διάμετρος D των σωλήνων είναι περίπου 10nm και περιέχουν νάνο-σωματίδια σιδήρου που υποστηρίζεται από τα νάνο-σωματίδια αλουμίνιας. Η συνολική περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες είναι περίπου 15 % σε βάρος.

Τα nanotubes καθαρίστηκαν με την ακόλουθη επεξεργασία: 9 % σε βάρος MWNTs προστέθηκαν σε ένα διάλυμα θειικού οξέος 15 % κατά βάρος. Μετά από 5 ώρες σε θερμοκρασία ($T = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$), οι (MWNTs) πλένονται σε εξιοντισμένο νερό, φιλτράρονται και διατηρούνται μέσα στο νερό σε μια αναλογία 10 % κατά βάρος. Ακλούθησαν θερμικές και βαρυμετρικές αναλύσεις διενεργηθείσες με ένα όργανο (Setaram TAG 16) και έδειξαν ότι το ειδικό βάρος των μορίων σιδήρου μειώθηκε σε περίπου 3 % κατόπιν του καθαρισμού.

Τα nanotubes σταθεροποιήθηκαν μέσω θειικού άλατος νατρίου (SDS) σε μια αναλογία βάρους 1.0 % . Οι διασπορές τους ομογενοποιήθηκαν από μια ηχητική επεξεργασία (40 min, 20 Watt) χρησιμοποιώντας ένα Branson Sonifier 205A. Η διάμετρος των παραγομένων ξηρών ινών PVA είναι 80μm. Ένα χαρακτηριστικό οπτικό μικρογράφημα μιας τέτοιας ίνας CNT μπορεί να φανεί στην εικόνα 1.

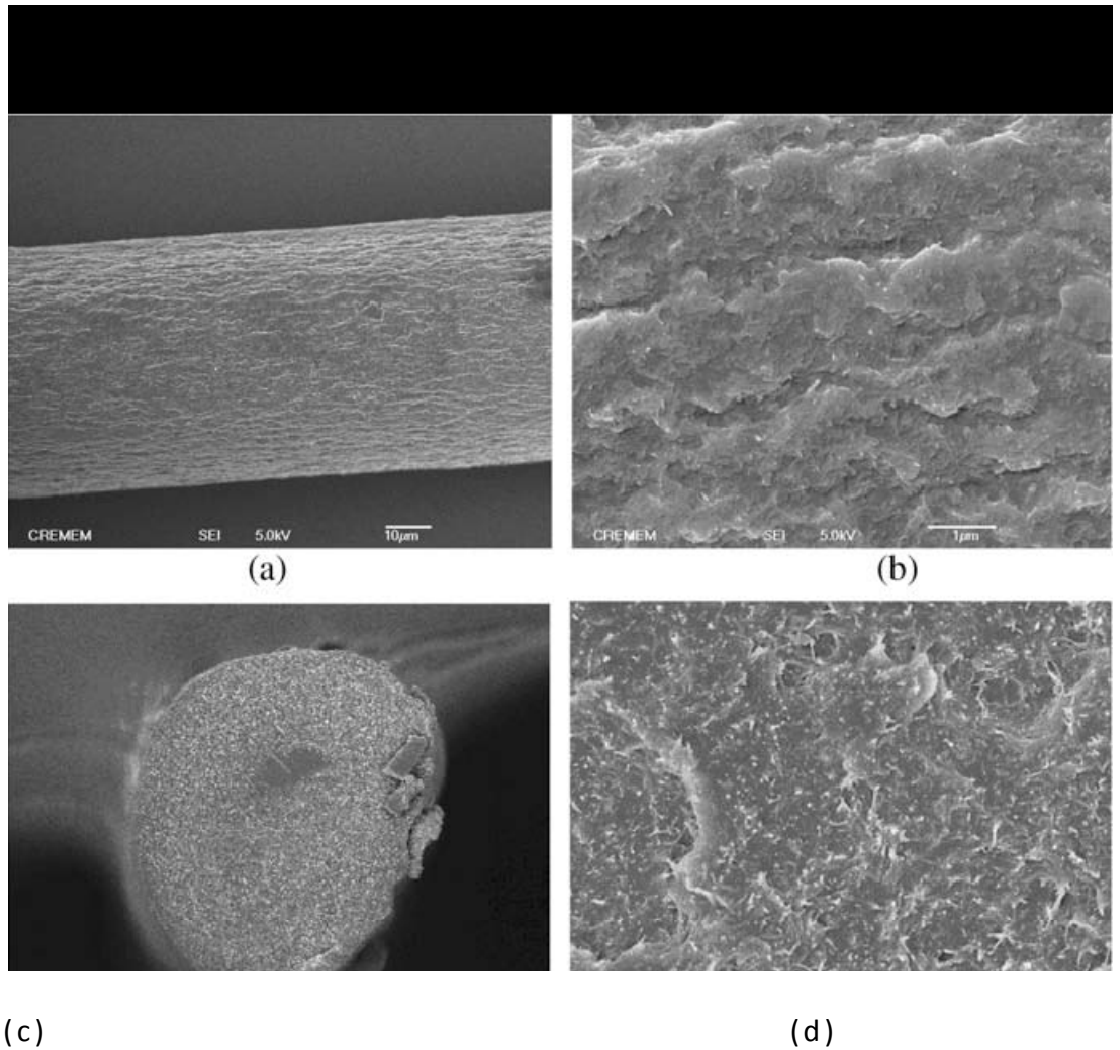
Η ειδική αντίσταση των ινών μετρήθηκε στη θερμοκρασία δωματίου με ένα πολύμετρο (Keithley 2000) και έχει εύρος 10-20 Ω/cm για τα διαφορετικά δείγματα. Για τη συγκεκριμένη γεωμετρική διαμόρφωση ινών (μήκος και διάμετρος) που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, αναμένεται μια αντίσταση της τάξης των 100 k Ω . Η εικόνα 2 παρουσιάζει χαρακτηριστικά μικρογραφήματα της ίνας CNT.

Η εικόνα 2a και το β δείχνουν ότι η ίνα έχει τραχύτητα στην επιφάνεια. Η εικόνα 2c και το d παρουσιάζουν ομοιογενή διανομή του CNTs μέσα στη διατομή της ίνας στις διαφορετικές ενισχύσεις.



Εικόνα 1.

Ελαφρό οπτικό μικρογράφιμα (εξισορρόπηση 200 μ m)
μιας ίνας (nanotube του άνθρακα (CNT)).
Η διάμετρος της ίνας είναι ομοιόμορφη.



Εικόνα 2.

Εικόνες ηλεκτρονικών μικροσκοπίων ανίχνευσης μιας ίνας άνθρακα nanotube (CNT) (α) και (β) εξωτερική σύσταση της ίνας, (γ) και (δ) διατομή της ίνας. Τα σωματίδια σκόνης φαίνονται στη δεξιά πλευρά της διατομής της ίνας σε (γ). Το CNTs διανέμεται ομοιογενώς στη διατομή και φαίνεται ως άσπρα σημεία/ σωματίδια στο (δ).

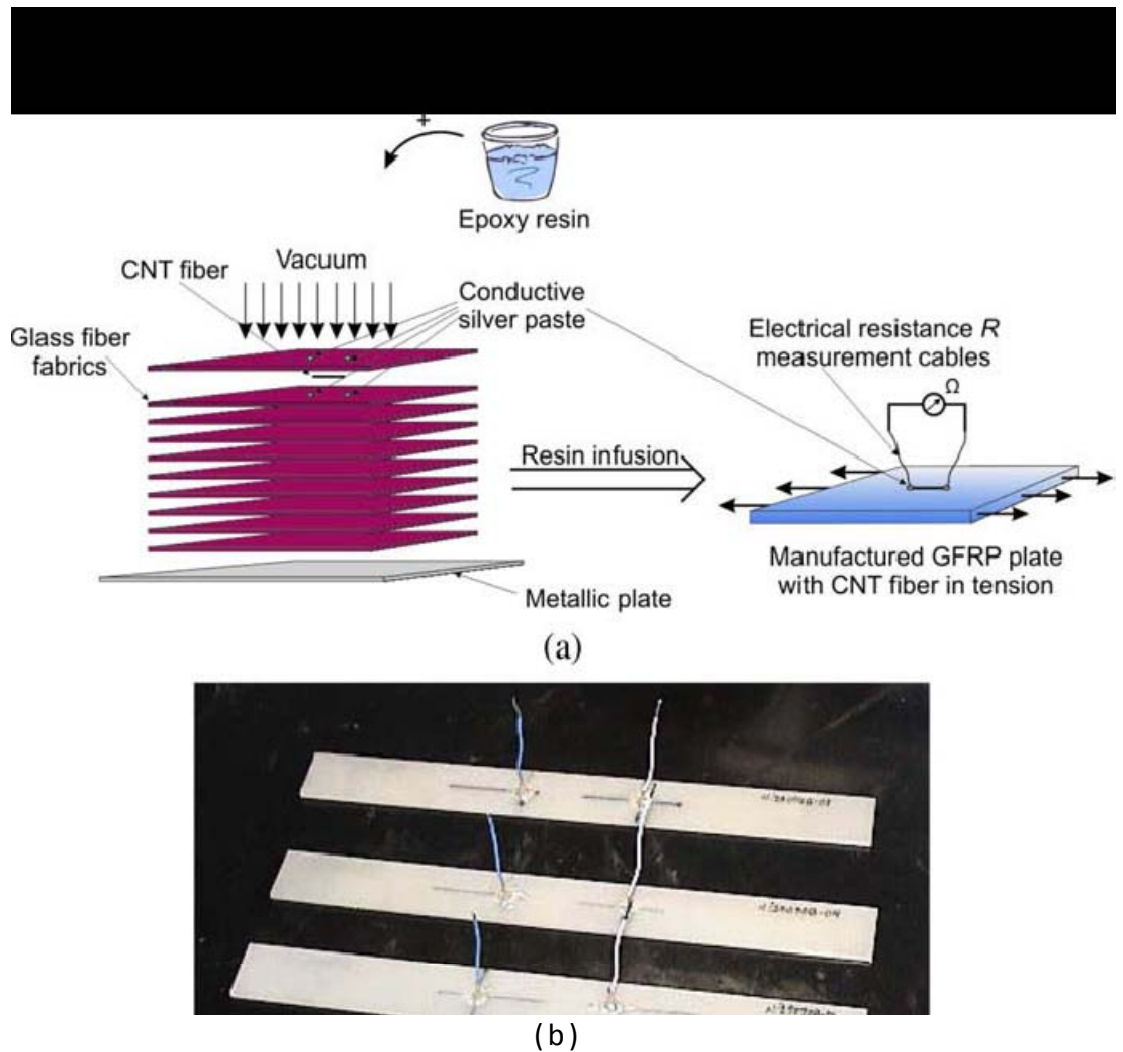
2.2 Σύνθετα δοκίμια με ενσωματωμένες ίνες CNT

Για την κατασκευή του δοκιμίου με ίνες CNT ακολουθήθηκε η ακόλουθη διαδικασία :

Κόπηκαν 10 πτυχές του υφάσματος προσανατολισμένος στο $0^{\circ}/90^{\circ}$, στις απαραίτητες διαστάσεις (300 X 300 χιλ). Τοποθετήθηκαν οι πρώτες 9 πτυχές. Οι ίνες CNT τοποθετήθηκαν (μεταξύ η 9η και τελευταίας πτυχής) σύμφωνα με την εικόνα 3a.

Στο σύνολο έξι ίνες CNT χρησιμοποιήθηκαν ανά κατασκευασμένο σύνθετο πιάτο , αυτό επέτρεψε κατασκευή έξι δειγμάτων δοκιμής με μια ενσωματωμένη ίνα ανά δείγμα. Χρησιμοποιήθηκε κάποια κόλλα ψεκασμού προκειμένου να κρατηθούν οι ίνες CNT στη θέση τους κατά την τοποθέτηση της τελευταίας πτυχής.

Οι ίνες CNT τοποθετήθηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι στη μέση κάθε δείγματος που θα κοπεί από το πιάτο. Στη συνέχεια σημαδεύουμε σε απόσταση 50mm από το κέντρο και καλύπτουμε με κόλλα από ασήμι (αγώγιμη) και τελικά η δέκατη πτυχή τοποθετήθηκε στην κορυφή για να ολοκληρωθεί το δοκίμιο , εικόνα 3a.



Εικόνα 3.

(α) κατασκευασμένο δοκίμιο GFRP με την ενσωματωμένη ίνα CNT και την καλωδίωση για τις μετρήσεις της αντίστασης και

(β) φωτογραφία των κατασκευασμένων δειγμάτων με τα ενσωματωμένα καλώδια στις ίνες CNT.

Τα σημάδια καλυμμένα με την κόλλα από ασήμι χρησιμεύουν για να συνδεθούν τα καλώδια για την καταγραφή των μετρήσεων της αντίστασης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Μικρές ποσότητες κόλλας από ασήμι χρησιμοποιήθηκε επίσης στην εξωτερική επιφάνεια του δέκατου στρώματος των υφασμάτων και επάνω από τα σημάδια που έγιναν στο προηγούμενο στρώμα.

Οι μικρές ποσότητες χρησιμοποιήθηκαν για να μην παραμορφώσουν το δοκίμιο, πράγμα που θα μείωνε τη μηχανική απόδοσή του. Στην ΕΑΒ εφαρμόστηκε μια μέθοδος έγχυσης σε κενό αέρος για να κατασκευαστούν τα δοκίμια. Τοποθετήθηκε το υλικό σε ειδικό σάκο , εφαρμόστηκε κενό αέρος και στη συνέχεια έγινε η έγχυση της ρητίνης. Το δοκίμιο έκτοτε παρέμεινε για 2 ώρες στους 60 °C και στη συνέχεια για 4 ώρες στους 120 °C , όπως συστήνεται από το φύλλο στοιχείων του κατασκευαστή ρητίνης.

Μετά από αυτήν την διαδικασία , η αντίσταση μεταξύ των δύο ακρών κάθε ίνας CNT ξανάμετρήθηκε και καταγράφηκε για κάθε δείγμα χωριστά. Παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση των ενσωματωμένων ινών μειώθηκε. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο θερμικό κύκλο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Οι ίνες θερμάνθηκαν αρκετά παραπάνω από τη μετάβαση γυαλιού του ΡVΑ. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να συμβεί κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών.

Επιπλέον, ο Wichmann και άλλοι επίσης παρατήρησαν ότι η θερμική επεξεργασία επηρεάζει θετικά το σχηματισμό δικτύων CNT στα doped resin σύνθετα υλικά. Αυτό άσκησε άμεση επίδραση στην αγωγιμότητα του υλικού και επηρέασε επίσης και τα μηχανολογικά του χαρακτηριστικά. Για αυτήν την αιτία, η αρχική αντίσταση της ίνας δεν χρησιμοποιήθηκε άμεσα , αλλά η διαφορά ΔR της αντίστασης της ίνας CNT. Όταν είναι μηχανικά φορτισμένο η διαφορά της αντίστασης διαιρείται με την αρχική αντίσταση της ίνας R_0 .

Ο λόγος της αντίστασης $\Delta R/R_0$ δούλεψε με επιτυχία και με τον ίδιο τρόπο για όλες τις ίνες που δοκιμάστηκαν στην παρούσα εργασία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των ινών χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική αρχική R_0 τιμή.

Τα δείγματα με την ίνα CNT είχαν κοπεί από τα αρχικά πιάτα σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D3039 και οι διαστάσεις των δειγμάτων δοκιμής ήταν: πλάτος X μήκος = 25mm X 250mm. Στα δύο μαρκαρισμένα σημεία του κάθε δοκιμίου έχουν προστεθεί δυο καλώδια για να συνδεθεί το πολύμετρο και να πάρουμε τις μετρήσεις . Εικόνα 3b

3. Πειραματική διαδικασία

Δύο διαφορετικές μηχανικές δοκιμές έγιναν και αξιολογήθηκαν από τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για το δομικό έλεγχο: η δοκιμή σε αξονική φόρτιση και η τριών σημείων καμπτική δοκιμή. Ένα σερβο-υδραυλικό μηχάνημα (Instron 100KN) χρησιμοποιήθηκε για να καταγράψει τη δύναμη και την μετατόπιση , ενώ και ένα όργανο που επίσης μετρά την μετατόπιση (50mm) συνδέθηκε αξονικά με το δοκίμιο.

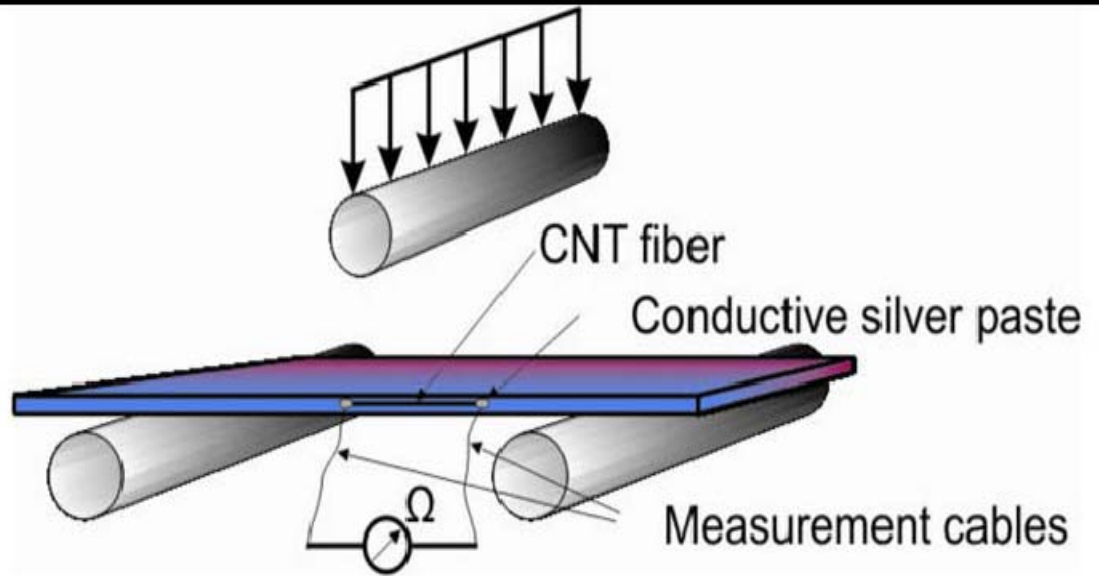
Επιπλέον ένα πολύμετρο Agilent χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της αντίστασης της ενσωματωμένης ίνας CNT του δείγματος κατά τη διάρκεια της μηχανικής φόρτωσης. Μια συνεχής τάση 10V εφαρμόστηκε στα καλώδια που συνδέθηκαν με την ίνα CNT των δειγμάτων (εικόνα 4), το ρεύμα μετρήθηκε και η αντίσταση υπολογίστηκε από αυτές τις τιμές. Οι μετρήσεις της αντίστασης στα δυο σημεία καταγράφηκαν σε πίνακα.

Η συχνότητα λήψεως των μετρήσεων είναι 1Hz και οι μετρήσεις καταγράφηκαν ταυτόχρονα στο PC . Ένα λάστιχο τοποθετήθηκε μεταξύ του δείγματος και του σημείου πιασίματος της μηχανής δοκιμής προκειμένου να μονωθεί το δείγμα από τη μηχανή δοκιμής.

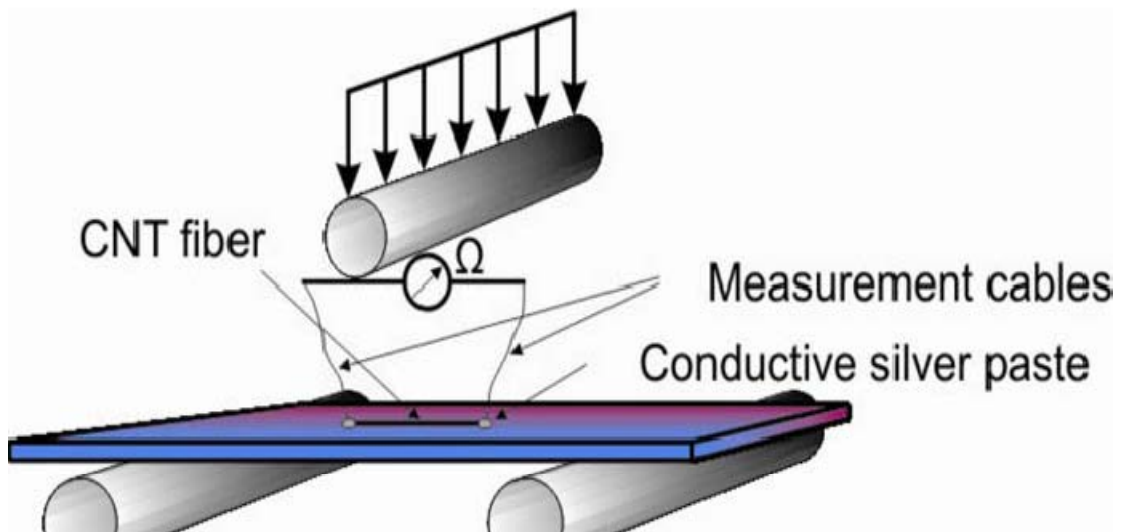
Δεδομένου ότι το υλικό που ερευνούμε ήταν μη αγώγιμο GFRP υλικό, καμία πρόσθετη μόνωση δεν απαιτήθηκε για να καταγραφεί η ηλεκτρική αντίσταση της ίνας CNT.

Δύο τύποι δοκιμών έγιναν στην παρούσα μελέτη μονοτονική φόρτιση μέχρι το σπάσιμο καθώς επίσης και επαυξητικά στάδια φόρτισης-εκφόρτισης στα διαφορετικά δείγματα για να πάρουμε όλες τις πληροφορίες. Δεδομένου ότι τα επαυξητικά βήματα φόρτισης είχαν γίνει στα συγκεκριμένα επίπεδα πίεσης σπασίματος του υλικού, η μηχανή δοκιμής ήταν ελεγχόμενη ως προς την φόρτιση.

Οι τριών σημείων καμπτικές δοκιμές εκτελέστηκαν στα δείγματα με ενσωματωμένη ίνα CNT στην περιοχή που εφελκύεται (ίνα στο χαμηλότερο σημείο του δείγματος) καθώς επίσης και στη περιοχή που συμπιέζεται (ίνα στο ανώτερο σημείο του δείγματος), εικόνα 4α και b, αντίστοιχα.



(a) CNT fiber in tension (lower surface)



(b) CNT fiber in compression (upper surface)

Εικόνα 4 Τριών σημείων καμπτικές δοκιμές στο υλικό GFRP με την ενσωματωμένη ίνα CNT: α. ίνα που εξετάζεται στην περιοχή εφελκυσμού και (β) ίνα που εξετάζεται στη περιοχή θλίψης .

4. Αποτελέσματα και συζήτηση

4.1 Δοκιμές εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα για τους διάφορους επαυξητικούς βρόχους φόρτισης-εκφόρτισης στην δοκιμή εφελκυσμού φαίνονται στον πίνακα 1. και γραφικά στην εικόνα 5a.

Τέσσερα επαυξητικά βήματα φόρτισης-εκφόρτισης έχουν γίνει και αντιστοιχούν στα 20%, τα 35%, τα 45% και τα 100% της μέγιστης πίεσης (σπασίματος) (δύναμη εφελκυσμού R_m), αντίστοιχα. Μέσα στο σχήμα, φαίνεται η αλλαγή της πίεσης και η αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης $\Delta R/R_0$ της ίνας CNT. Μετά από τις τρεις φορτίσεις – εκφορτίσεις, ο λόγος $\Delta R/R_0$ της τέταρτης φόρτισης φαίνεται να ακλουθεί την ίδια καμπύλη. Η εικόνα 5b παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τον άμεσο συσχετισμό μεταξύ της πίεσης και του λόγου $\Delta R/R_0$.

Σημειώστε ότι η ονομαστική επιμήκυνση αντί της ονομαστικής πίεσης θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για έναν τέτοιο συσχετισμό, δεδομένου ότι ο μεταξύ τους συσχετισμός είναι γραμμικός και συνδέονται μέσω του συντελεστή της ελαστικότητας E . Προτιμούμε την πίεση διότι είναι το μέγεθος που χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική. Οι τέσσερις περιπτώσεις φορτίσεως μπορούν να αποτυπωθούν με τη βοήθεια μιας παραβολικής καμπύλης ($R^2 = 0.98$), αλλά στην παρούσα περίπτωση μια εκθετική καμπύλη παρείχε τον καλύτερο συσχετισμό ($R^2 = 0.99$):

$$Y=A \cdot e^{x/t}$$

εξίσωση(1)

Οι υπολογισμοί των εκθετικών παραμέτρων A και t για κάθε περίπτωση φόρτισης μπορούν να βρεθούν στον πίνακα 1. Μετά από την τρίτη φόρτιση, 45% της πίεσης σπασίματος, από την τέταρτη φόρτιση μέχρι το σπάσιμο φαίνεται να μην ακολουθεί την ίδια εκθετική καμπύλη.

Άξιο αναφοράς είναι επίσης ότι η αντίσταση της ίνας CNT δεν αλλάζει με την εφαρμογή των διαδοχικών φορτίσεων παραμένοντας σταθερή. Οι φορτίσεις ενός άλλου δείγματος στόχευσαν να αυξηθεί βαθμιαία το ποσοστό της εφαρμοσμένης μηχανικής πίεσης. Πέντε επαυξητικά βήματα φόρτισης – εκφορτίσης έχουν γίνει (πίνακας 1) και τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να απεικονιστούν γραφικά στην εικόνα 6.

Οι μηχανικές φορτίσεις μέχρι το σημείο των 200 MPA (36% της μέγιστης πίεσης) ή λόγου αντίστασης $DR/R_0 = 1.5\%$ ή επιμήκυνση 1%, έδειξε ότι οι τιμές της αντίστασης ακολουθούν την ίδια καμπύλη εικόνα 7. Αυξάνοντας την πίεση φόρτισης στο 60% της μέγιστης πίεσης, παρατηρούμε ότι η εκθετική συσχέτιση της πίεσης και του λόγου $\Delta R/R_0$ άλλαξε όταν αυξήθηκε η πίεση στην τιμή περίπου των 220MPa. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί με δύο τρόπους : ή το υλικό παρουσίασε βλάβη είτε η ίνα.

Η πιθανότητα αστοχίας της ίνας δεν μπορεί να αποκλειστεί παρολαυτά είναι απίθανο γιατί η μέγιστη επιμήκυνση των CNT ινών υπερβαίνει το 200% και η μέγιστη επιμήκυνση του δοκιμίου δεν υπερέβη το 1%. Η πιθανότητα της αστοχίας του υλικού είναι πολύ ρεαλιστική, δεδομένου ότι συνήθως η ζημία σε τέτοιες περιπτώσεις φόρτισης αφορά κυρίως το ράγισμα της μήτρα ή αποκόλληση των ινών ενίσχυσης.

Η ζημία εμφανίστηκε στο τρίτο βήμα φόρτωσης (μέχρι 36%). Στο προηγούμενο δείγμα καμία μετατόπιση στην γραφική συσχέτιση δεν παρατηρήθηκε μετά από το τρίτο βήμα (μέχρι 45%).

Επομένως η αρχική ζημία που μετατοπίζει την αναλογία $\Delta R/R_0$ της CNT ίνας εμφανίζεται μεταξύ του 36% και του 45% της μέγιστης πίεσης του υλικού. Οι πρόσθετες φορτίσεις είχαν το ίδιο αντίκτυπο. Οι εκθετικές καμπύλες αύξησης είναι πάλι μετατοπισμένες. Όλες οι πειραματικές καμπύλες στην εικόνα 7 έγιναν από εκθετικές καμπύλες της εξίσωσης (1).

Περισσότερες φορτίσει- εκφορτίσεις έγιναν σε ένα άλλο δείγμα μέχρι να σπάσει (εικόνα 8). Μετά τις τρεις πρώτες φορτίσεις, η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού παρέμεινε ίδια (655 K Ω). Μια ηλεκτρική υστέρηση της αντίστασης εμφανίστηκε στην τρίτη φόρτωση. Η φόρτιση και η εκφόρτιση μπορούν να φανούν στο σχήμα. Μετά την τρίτη εκφόρτιση, μια παραμένουσα αντίσταση μετρήθηκε (658 K Ω), η οποία μπορεί να ερμηνευθεί ως πιθανές βλάβες μέσα στο υλικό ή μέσα την ίνα.

Όλες φορτίσεις σε μεγαλύτερα επίπεδα πίεσης έδειξαν παρόμοια ηλεκτρική συμπεριφορά. Μια ηλεκτρική υστέρηση της αντίστασης έχει σημειωθεί όπως επίσης μια αυξάνουσα παραμένουσα αντίσταση μετά από κάθε βήμα εκφόρτωσης.

Η παραμένουσα ηλεκτρική αντίσταση της ίνας CNT μετά από κάθε επαυξητικό βήμα φόρτισης-εκφόρτισης μπορεί να αποδοθεί στη φύση της κατασκευασμένης ίνας. Δεδομένου ότι το ελαστικό όριο της ίνας CNT αντιστοιχεί σε επιμήκυνση μεγέθους 1-1.25%, είναι προφανές ότι δεν υπάρχει καμία ζημία συσσώρευσης κατά τη διάρκεια των βημάτων φόρτισης-εκφόρτισης της ίνας κάτω από αυτές τα όρια τιμών.

Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε παρατηρηθείσα παραμένουσα αντίσταση όταν φορτίζεται το σύνθετο υλικό κάτω από αυτές τις τιμές μπορεί να αποδοθεί άμεσα στη ζημία του σύνθετου υλικού.

Δεν είναι σαφές εάν η παραμένουσα αντίσταση της ίνας για τις υψηλότερες φορτίσεις αποδίδεται στη ζημία του σύνθετου υλικού ή της ίνας. Χρειάζεται περαιτέρω εργασία για να επιβεβαιωθεί αυτή η υπόθεση και είναι ένα θέμα μιας τρέχουσας έρευνας.

Ένας άμεσος συσχετισμός μεταξύ της μηχανικής πίεσης και του λόγου $\Delta R/R_0$ μπορεί να φανεί στην εικόνα 9. Και οι επτά φορτίσεις θα μπορούσαν να αποτυπωθούν με τη βοήθεια μιας εκθετικής καμπύλης. Οι εκθετικές παράμετροι A και t αύξησης (εξίσωση) φαίνονται στον πίνακα 1 (και για τις επτά φορτίσεις). Στη τρίτη φόρτιση δεν έχει σημειωθεί ουσιαστική αλλαγή της εκθετικής καμπύλης.

Στις ακόλουθες φορτίσεις οι εκθετικές καμπύλες αρχίζουν να αλλάζουν, σε πίεση του επίπεδου των 200MPa και της τάξης του 2% για τον λόγο $\Delta R/R_0$. Για κάθε επιπλέον βήμα αύξησης της φόρτισης η καμπύλη μετατοπίζεται περισσότερο για άγνωστο μέχρι στιγμής λόγο.

Το επίπεδο της πίεσης των 200 MPa είναι υπερβολικό για την περίπτωση των αεροναυπηγικών υλικών. Σημειώνεται ότι η άτρακτος και τα υλικά της επιφάνειας σχεδιάζονται για εφελκυστική πίεση της τάξεως των 100MPa.

Συνεπώς, ως η πρώτη αξιολόγηση, η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας CNT μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τέτοια υλικά για να φανεί εάν μια δυσλειτουργία ή μια υπερφόρτιση κατά τη διάρκεια της λειτουργιάς έχει συμβεί.

Για όλα τα διενεργηθέντα πειράματα, το μέτρο ελαστικότητας E όπως και ο ομαλοποιημένος συντελεστής της ελαστικότητας E/E_0 έχει υπολογιστεί για κάθε επαυξητικό βήμα φόρτισης, πίνακας 1.

Η εικόνα 10 παρουσιάζει το συσχετισμό μεταξύ της αναλογίας E/E0 και του ποσοστού της πίεσης. Υπάρχει ένας ισχυρός γραμμικός συσχετισμός μεταξύ του ομαλοποιημένου συντελεστή της ελαστικότητας και ποσοστού της μηχανικής φόρτισης.

Αυτή η μείωση που παρατηρείται στο διάγραμμα είναι συσσωρευμένες βλάβες στα συνθετικά υλικά, οι οποίες είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ράγισμα της μήτρας και αποκόλληση.

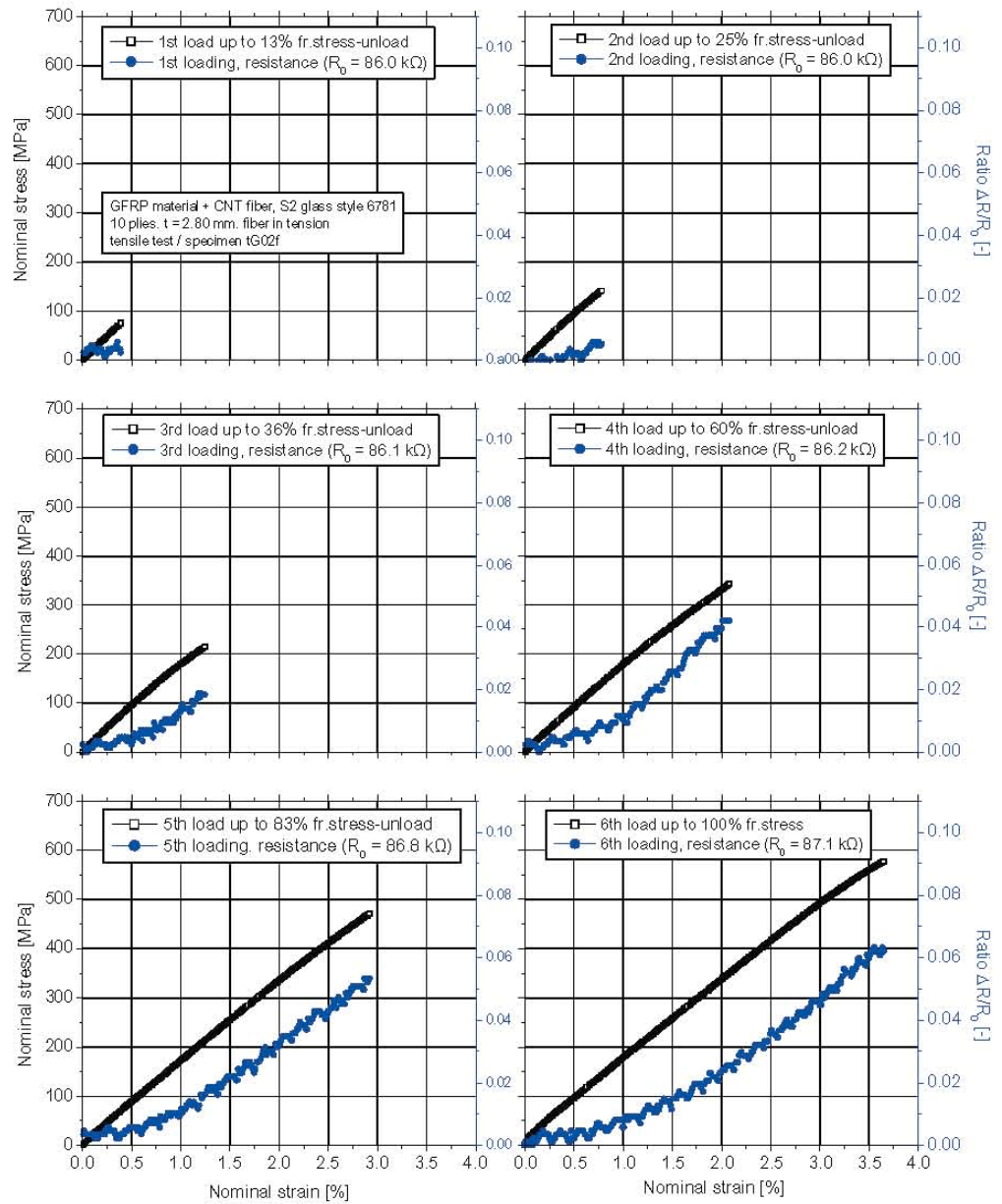
Συνεπώς, όσο η συσσώρευση των βλαβών της σύνθεσης GFRP υπάρχει, οι μετρήσεις, της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας CNT, μπορούν να υποστηρίξουν αυτό το φαινόμενο.

Με μια πρώτη προσέγγιση, έχει φανεί ότι η ίνα CNT μπορεί να υιοθετηθεί με σκοπό την ανίχνευση βλαβών, μέσω της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης στις μη αγώγιμες συνθετικές ύλες, παραδείγματος χάρη εξοπλισμός GFRP. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας CNT είναι ανάλογη με τη μηχανική φόρτιση (πίεση ή επιμήκυνση) κατά τη διάρκεια διαφορετικών βημάτων φόρτιση και εκφόρτισης.

Για διάφορα βήματα της φόρτισης-εκφόρτισης, η συσσώρευση των βλαβών έχει μειώσει το μέτρο ελαστικότητας των συνθετικών υλικών και ταυτόχρονα έχει μειωθεί η κλίση των τιμών της αντίστασης των ινών CNT με την εφαρμοζόμενη πίεση. Έτσι, η ίνα CNT μπορεί να βαθμονομείται για τον υπολογισμό της βλάβης του σύνθετου υλικού πραγματοποιώντας ένα απλό τεστ.

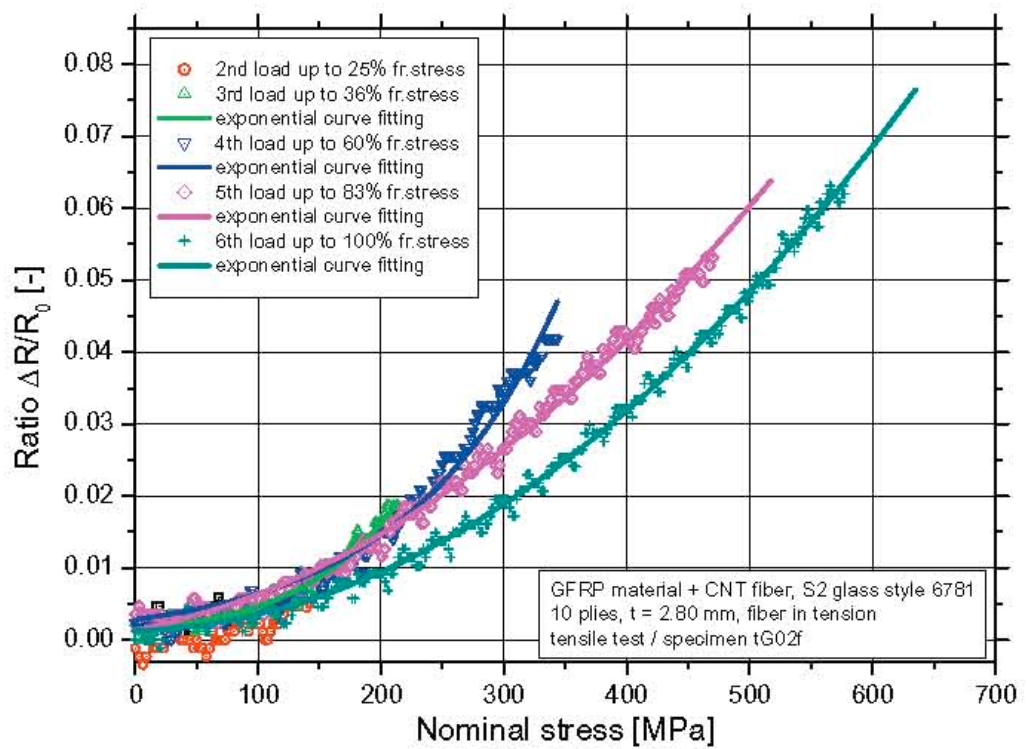
Specimen	Loading No.	Loading step from 0 up to (%) of fracture stress	A [-]	t [-]	E/E_0 (%)
Specimen tG01f	1st	20	0.00125	60.25	100.00
	2nd	35	0.00138	73.61	96.07
	3rd	45	0.00178	101.75	92.17
	4th	100	0.00762	237.98	88.97
Specimen tG02f	1st	13	0.00111	50.84	100.00
	2nd	25	0.00135	80.33	98.46
	3rd	36	0.00184	89.64	96.50
	4th	60	0.00285	122.63	93.66
	5th	83	0.00541	198.11	89.08
	6th	100	0.00433	209.42	85.24
Specimen tG03f	1st	17	0.00121	77.03	100.00
	2nd	33	0.00181	81.29	97.71
	3rd	50	0.00264	104.18	94.29
	4th	66	0.00476	149.74	89.07
	5th	83	0.00714	199.11	85.35
	6th	95	0.00749	227.44	82.17
	7th	100	0.00456	204.56	80.65
Specimen bG11f	1st	100	0.00638	214.39	-
Specimen bG12f	1st	17	0.00169	69.56	-
	2nd	33	0.00175	98.82	-
	3rd	50	0.00223	111.48	-
	4th	66	0.00268	144.77	-
	5th	83	0.00398	175.35	-
	6th	100	0.00286	171.39	-

Πινάκας 1



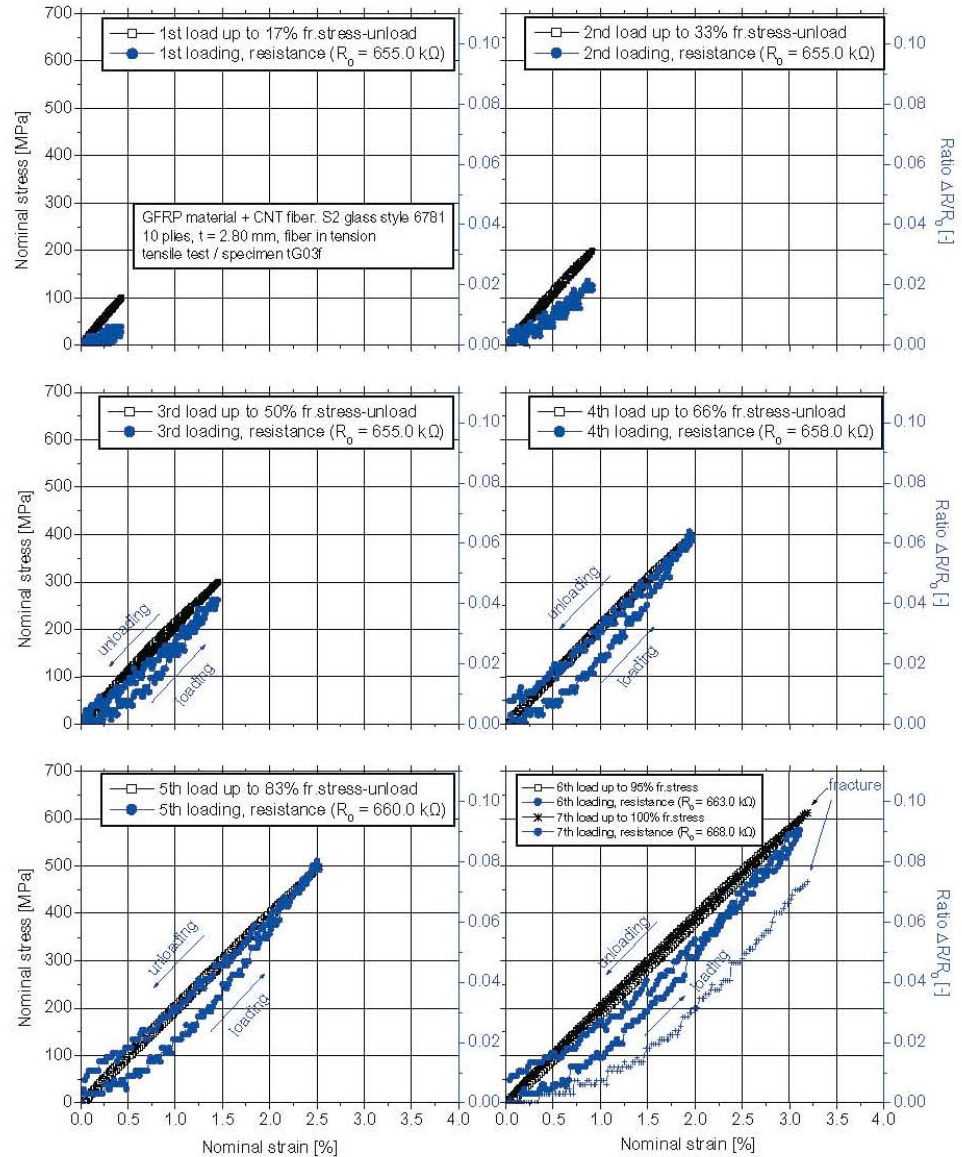
Εικόνα 6

Διαγράμματα , δοκιμών εφελκυσμού GFRP υλικού με ενσωματωμένη ίνα CNT (tG02f) μεταξύ μηχανικής πίεσης - επιμήκυνσης και του λόγου $\Delta R/R_0$ για 6 φορτίσεις – εκφορτίσεις.



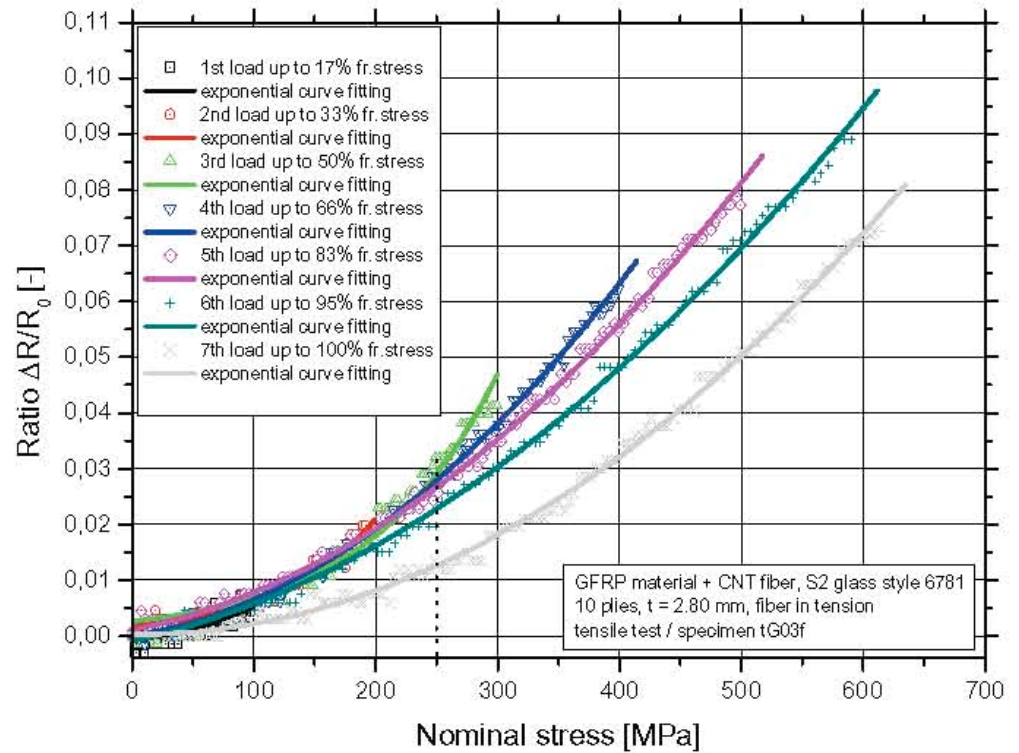
Εικόνα 7

Συσχετισμός μεταξύ μηχανικής πίεσης και ηλεκτρικής αντίστασης $\Delta R/R_0$ για το tG02f



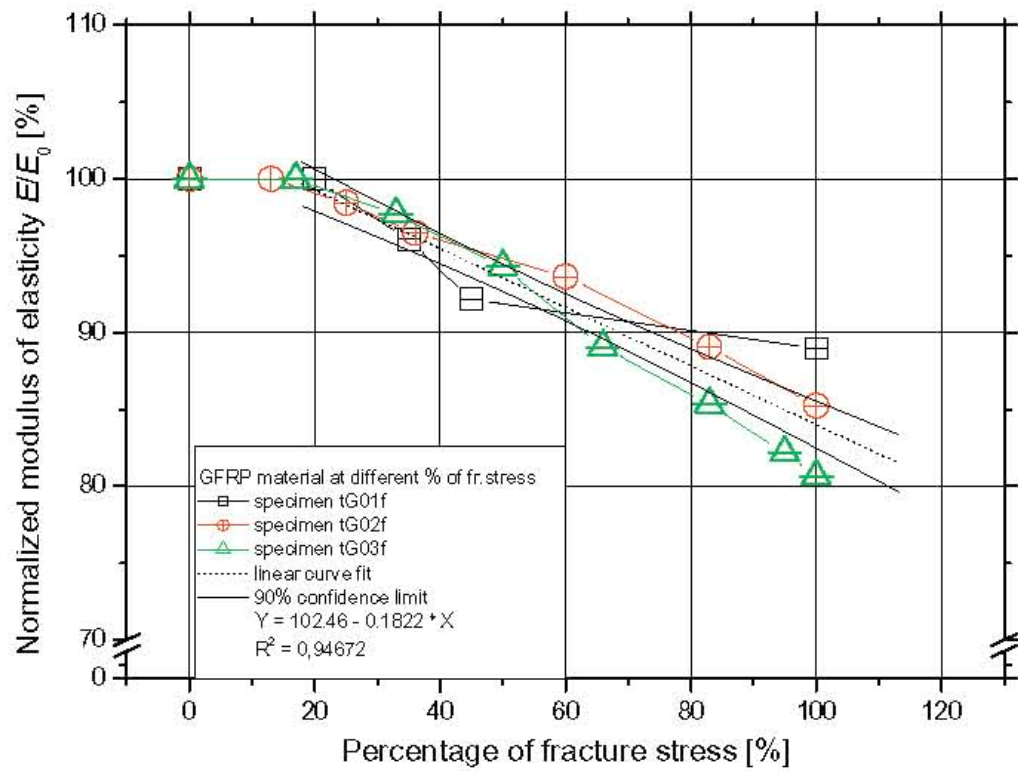
Εικόνα 8

Διαγράμματα , δοκιμών εφελκυσμού GFRP υλικού με ενσωματωμένη ίνα CNT (tG03f) μεταξύ μηχανικής πίεσης ,επιμήκυνσης και του λόγου $\Delta R/R_0$ για 7 φορτίσεις – εκφορτίσεις.



Εικόνα 9

Συσχετισμός μεταξύ μηχανική πίεσης και του λόγου της ηλεκτρικής αντίστασης $\Delta R/R_0$ στο tG03f



Εικόνα 10.

Συσχετισμός μεταξύ της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας και του ποσοστού της επιμήκυνσης για όλα τα GFRP δοκίμια.

4.2 Καμπτικές δοκιμές τριών σημείων

Δείγματα με την ενσωματώμενη ίνα CNT έχουν εξεταστεί με την διαδικασία των τριών σημείων κάμψης για δύο διαφορετικές περιπτώσεις:

Η ίνα στην πρώτη περίπτωση έχει τοποθετηθεί στην κάτω πλευρά του δείγματος ώστε να δημιουργείται εφελκυσμός στην περιοχή της ίνας, εικόνα 4a.

Στη δεύτερη περίπτωση τοποθετήθηκε στην πάνω πλευρά του δείγματος, ώστε να δημιουργείται θλίψη στην περιοχή της ίνας, εικόνα 4b. το μηχανικό φορτίο έχει μετατραπεί σε μηχανική πίεση λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές διαστάσεις όπως και την ροπή αδράνειας.

Η ονομαστική πίεση της ίνας σ_{fib} έχει υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\sigma_{fib} = [M_b / I_z] * Y_{fib} \quad \text{εξίσωση (2)}$$

όπου το M_b είναι η μέγιστη καμπτική τάση στο δείγμα, I_z η ροπή αδράνειας και Y_{fib} η απόσταση της ίνας CNT από το μέσο πάχος του δείγματος.

4.2.1 Ίνα CNT στον εφελκυσμό

Τα αποτελέσματα της μηχανικής πίεσης - επιμήκυνσης καθώς επίσης και οι μετρήσεις του λόγου $\Delta R/R_0$ για τη μονοτονική φόρτωση μέχρι το σημείο θραύσης μπορούν να φανούν στη εικόνα 11a. Ο άμεσος συσχετισμός μεταξύ της μηχανικών πίεσης και του λόγου $\Delta R/R_0$ μπορεί να φανεί στην εικόνα 11b. Μια γραμμική καμπύλη είχε ως αποτέλεσμα τον κακό συσχετισμό ($R^2 = 0.94$), ενώ με την εκθετική καμπύλη το αποτέλεσμα ήταν ($R^2 = 0.98$).

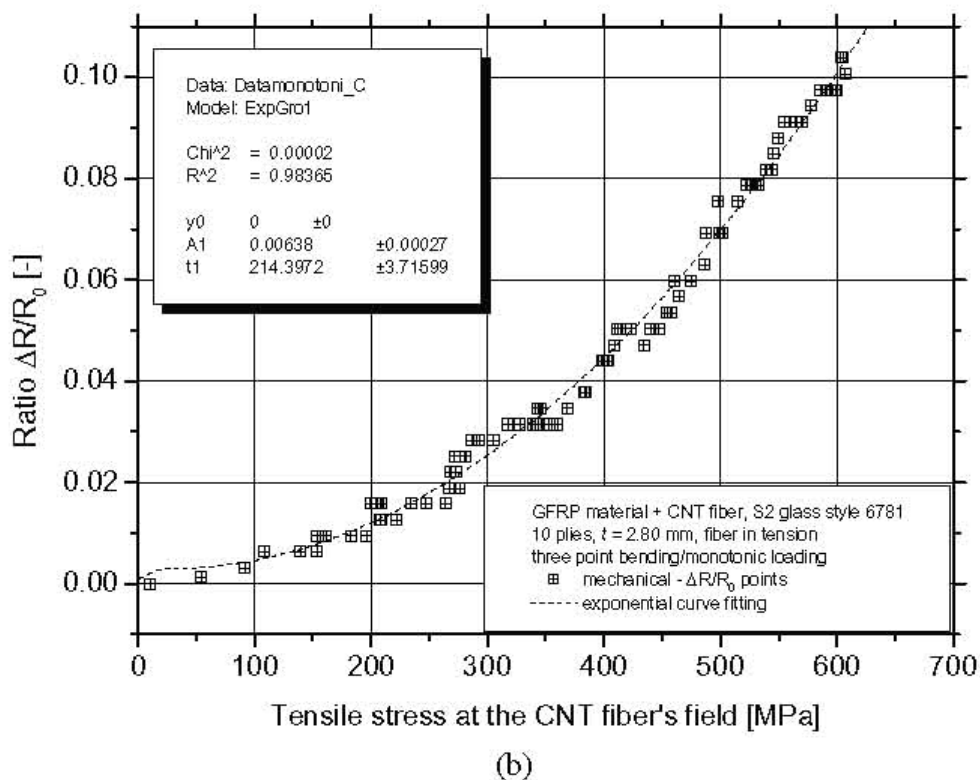
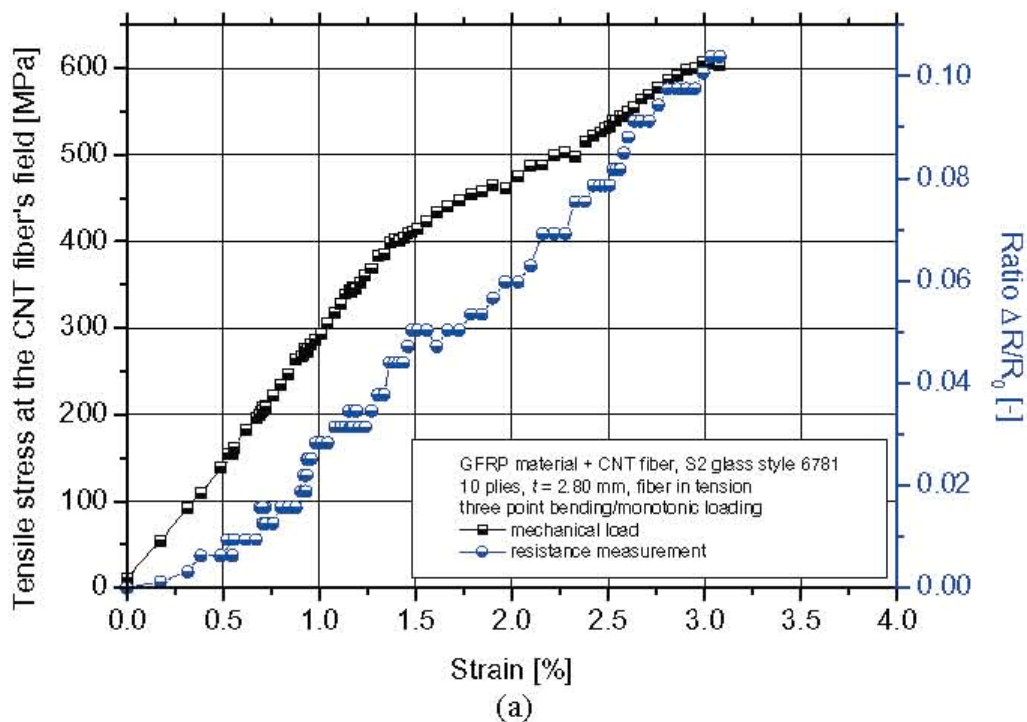
Πραγματοποιήθηκε άλλο ένα πείραμα με διαφορετικά στάδια φόρτισης-εκφόρτισης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να φανούν στην εικόνα 12 για τα συνολικά έξι επαυξητικά βήματα φόρτισης-εκφόρτισης. Για τα πρώτα τρία (17%, 33% και 50% της πίεσης θραύσης) οι τιμές του λόγου $\Delta R/R_0$ είναι πολύ μικρές και εμπεριέχουν "θόρυβο".

Το τέταρτο βήμα φόρτισης-εκφόρτισης έγινε μέχρι 400 MPA (66% της πίεσης θραύσης). Παρατηρήθηκε ένας βρόχος υστέρησης στο διάγραμμα κατά την εκφόρτιση που οφείλεται στις τιμές του $\Delta R/R_0$. Είναι επίσης σαφές ότι μετά την εκφόρτιση, η τιμή της αντίστασης δεν επιστρέφει στην αρχική τιμή, παρατηρείται δηλαδή μια παραμένουσα αντίσταση. Είναι προφανές ότι στο πέμπτο βήμα φόρτισης-εκφόρτισης (83%), έχει εμφανιστεί μια ουσιαστική ζημία στο υλικό.

Στο επόμενο βήμα φόρτισης και εκφόρτισης της ίνας CNT (χαμηλότερος και ανώτερος κλάδος του βρόχου υστέρησης, αντίστοιχα) παρατηρούμε μια παραμένουσα τιμή του λόγου $\Delta R/R_0$, σχεδόν 0.01 ή περίπου 6 kΩ (505 -512 kΩ). Τέλος, για την τελευταία φόρτιση μέχρι τη θραύση, παρατηρείται μια αύξηση της καμπύλης του διαγράμματος.

Ο άμεσος συσχετισμός ανάμεσα στην πίεση και τον λόγο $\Delta R/R_0$ έχει δείξει ακριβώς τα ίδια ποσοτικά αποτελέσματα με της δοκιμής εφελκυσμού. Όταν υπάρχει ουσιώδης ζημία εξαιτίας των αυξημένων φορτίσεων, η καμπύλη την πίεσης με τον λόγο $\Delta R/R_0$ μετατοπίζεται

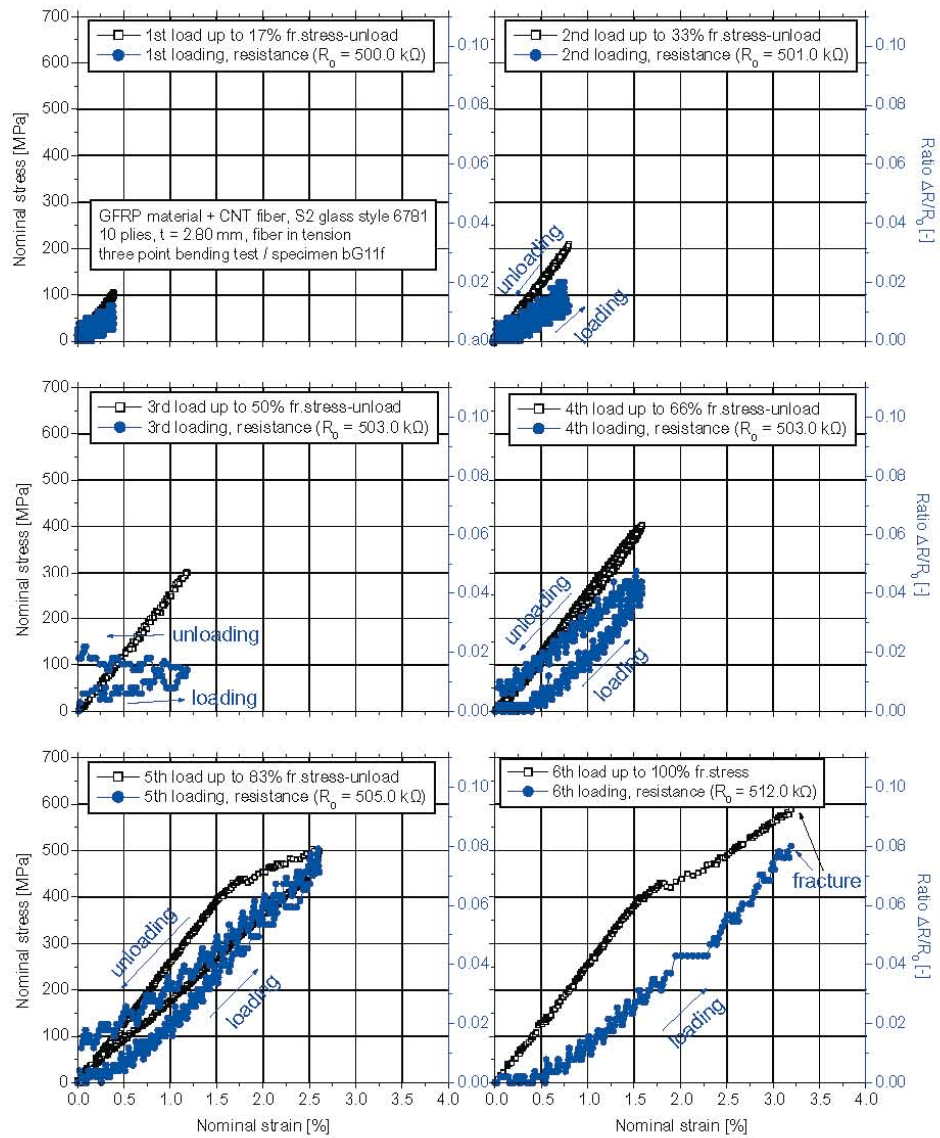
συναρτήσει της ζημιάς που έχει υποστεί από τις προηγούμενες φορτίσεις .



Εικόνα 11

(a) Διάγραμμα , τριών σημείων καμπτικών δοκιμών GFRP υλικών με ενσωματωμένη ίνα CNT

στην εφελκυστική περιοχή (b) συσχετισμός μεταξύ της μηχανικής πίεσης και του λόγου $\Delta R/R_0$



Εικόνα 12

Διαγράμματα , τριών σημείων καμπτικών δοκιμών GFRP υλικών με ενσωματωμένη ίνα CNT στην εφελκυστική περιοχή για 6 φορτίσεις – εκφορτίσεις.

4.2.2 Ίνα CNT στη συμπίεση

Τα αποτελέσματα της μηχανικής πίεσης-επιμηκυνσης όπως και ο λόγος $\Delta R/R_0$ που αφορούν την μονοτονική φόρτιση μέχρι το σημείο θραύσης φαίνονται στην εικόνα 13a. Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια της συνεχώς αυξανόμενης πίεσης στην περιοχή του δείγματος με την ίνα CNT, τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας είναι αρνητικές.

Μια μεγέθυνση του διαγράμματος που αφορά τις χαμηλές πιέσεις φαίνεται στην εικόνα 13b. Καθώς εφαρμόστηκε πίεση της τάξεως των 220MPa το οποίο προκάλεσε επιβράχυνση 0,85% παρατηρήθηκε μια τοπική ελάχιστη τιμή για τον λόγο $\Delta R/R_0$ στο διάγραμμα. Λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης της διατομής του υλικού, η φόρτιση του τμήματος αυτού άλλαξε σε αυτήν την συγκεκριμένη περιοχή σε εφελκυστική και αυτό είναι ο λόγος του τοπικού ελάχιστου που παρατηρήθηκε.

Αυξάνοντας το μηχανικό φορτίο, η περιοχή της ίνας εφελκύεται και αρχίζει να αυξάνει η ηλεκτρική αντίστασή της. Όταν οι τιμές της ίνας είναι μηδέν, το επίπεδο της πίεσης είναι μηδέν και δεν είναι συμπιεστικό όπως φαίνεται στο διάγραμμα 13. Η αντίσταση της ίνας αυξάνει μέχρι το σπάσιμο καθώς η περιοχή της ίνας εφελκύεται.

Τα αποτελέσματα της διαφορετικής επαυξητικής φόρτιση-εκφόρτισης στη μηχανική και ηλεκτρική αντίδραση του υλικού για ένα άλλο δοκίμιο φαίνεται στο διάγραμμα 14. Τα ίδια ποσοστά της μηχανικής φόρτισης μέχρι το σημείο σπάσιματος εφαρμοστήκαν σε αυτό το δοκίμιο (πίνακας 1) με σκοπό τη σύγκρισης με τα δείγματα που εφελκύνονται.

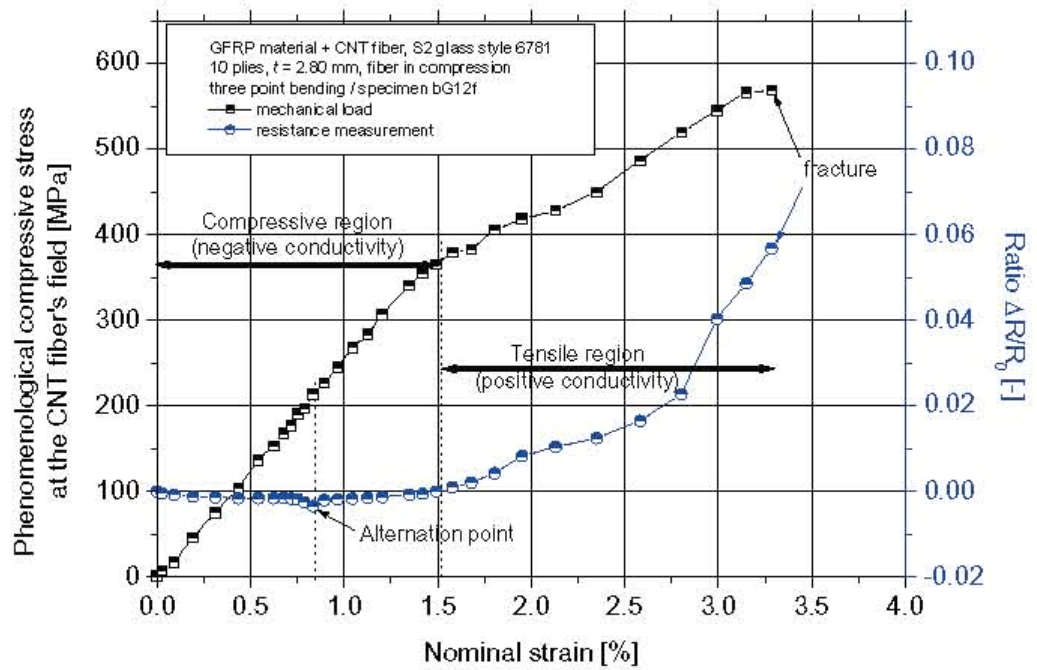
Όσον αφορά στη μονοτονική φόρτιση, επίσης εδώ και για τις χαμηλές φορτίσεις – επιμηκύνσεις, η ίνα CNT καταγράφει τις αρνητικές τιμές που είναι ένα σημάδι για τη φόρτιση συμπίεσης.

Για όλες τις φορτίσεις, παρατηρείται ένα τοπικό ελάχιστο στις τιμές αντίστασης στο 0.85% της επιμήκυνσης, όπου οι μέγιστες συμπιεστικές πιέσεις εφαρμόζονται.

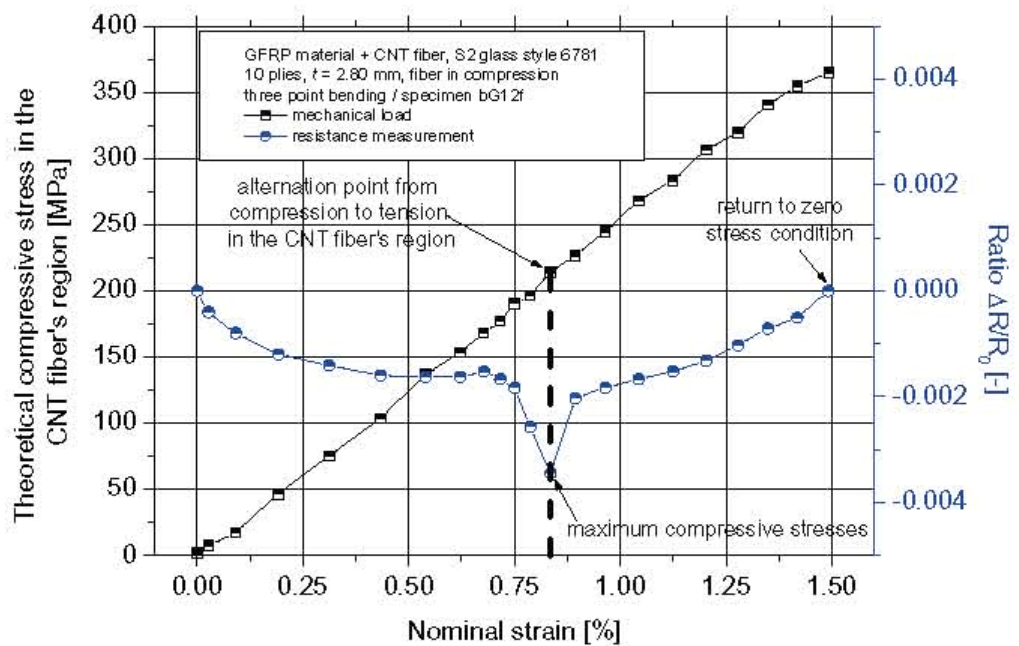
Στη συνέχεια οι ηλεκτρικές μετρήσεις αυξάνονται με το αυξανόμενο φορτίο δεδομένου ότι η ίνα στο σημείο αυτό καταπονείται εφελκυστικά. Επιπλέον, καμία μέτρηση παραμένουσας αντίστασης δεν παρατηρείται μετά από τα πρώτα τρία βήματα εκφόρτισης.

Για την περίπτωση των υψηλότερων πιέσεων φόρτισης (τέταρτος και πέμπτος) η ίδια ηλεκτρική υστέρηση αντίστασης παρατηρείται. Κατά την εκφόρτιση μετρήθηκε παραμένουσα αντίσταση στην ίνα CNT πράγμα το οποίο αντιστοιχεί πιθανώς σε ζημία. Η ίνα καταγράφει τις αρνητικές και θετικές τιμές όταν είναι η περιοχή της ίνας συμπιέζεται και εφελκύεται, αντίστοιχα.

Επιπλέον, σε κάθε διαφορετικό στάδιο φόρτισης, παρατηρήθηκε παράλληλα εκφόρτιση της ίνας, αποδεικνύοντας πως η ίνα μπορεί να λειτουργήσει σε τέτοιες φορτίσεις.



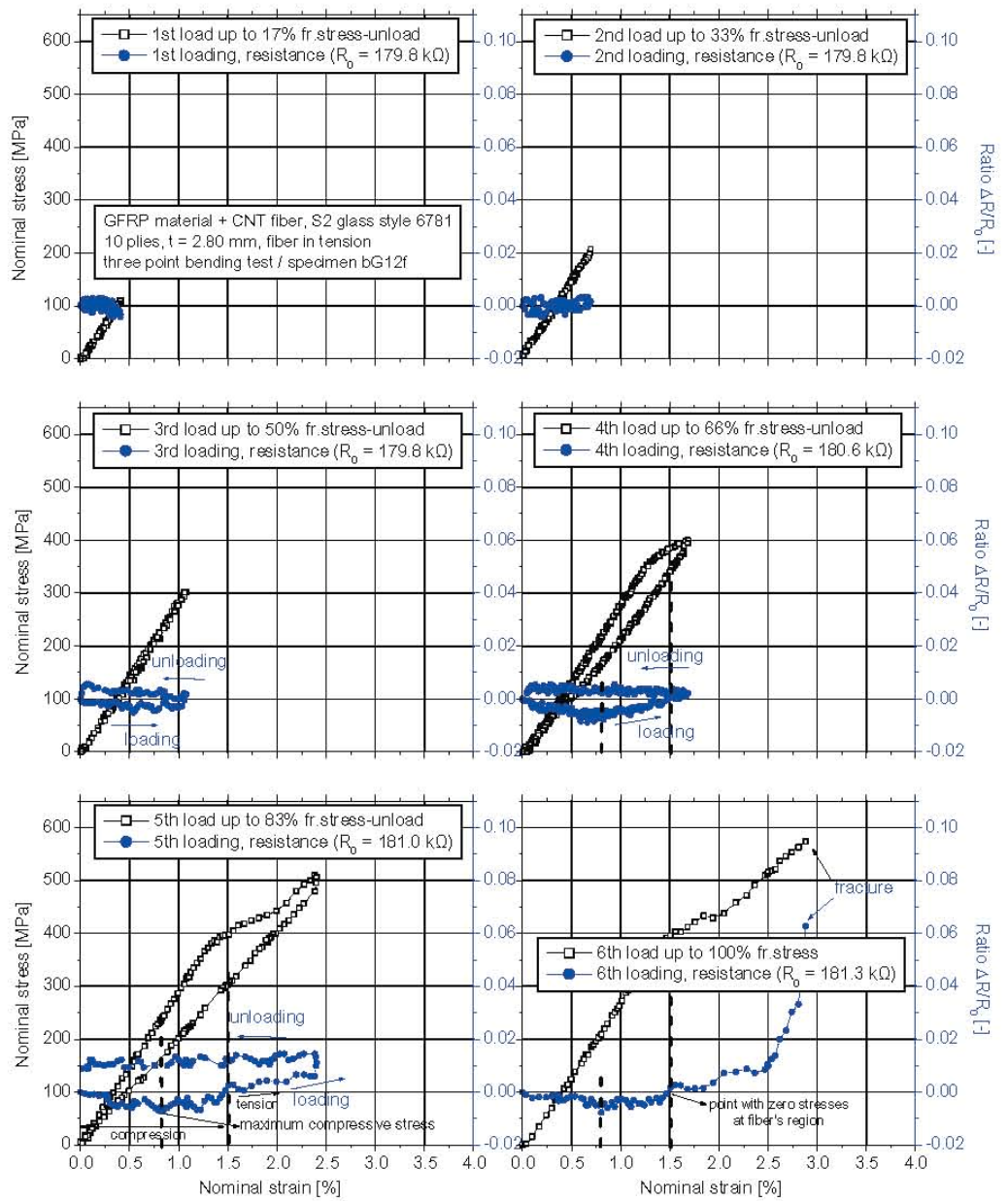
(a)



(b)

Εικόνα 13

(a) Διάγραμμα , τριών σημείων καμπικών δοκιμών GFRP υλικών με ενσωματωμένη ίνα CNT στην θλιπτική περιοχή (b) διερεύνηση της περιοχής φορτίσεως όπου η ίνα συμπιέζεται .



Εικόνα 14

Διαγράμματα , τριών σημείων καμπτικών δοκιμών GFRP υλικών με ενσωματωμένη ίνα CNT στην θλιπτική περιοχή για 6 φορτίσεις – εκφορτίσεις.

4.3 Μηχανισμός της ίνας CNT που λειτούργει ως αισθητήρας

Η χαρακτηριστική δομή μιας ίνας CNT αποτελείται από μια κυκλική μήτρα PVA με τον ενσωματωμένο άνθρακα nanotubes στον πυρήνα της ίνας, εικόνα 15. Στο νανο-επίπεδο, η δομή δικτύων άνθρακα nanotube είναι πολύ περίπλοκη. Τα CNTs είναι τυχαία προσανατολισμένες μέσα στη μήτρα. Δεδομένου ότι το χαρακτηριστικό μήκος των CNTs μπορεί να είναι μέχρι μερικά μικρόμετρα, αυτό σημαίνει ότι κάθε CNT μπορεί έχει πολλαπλές επαφές με άλλα CNTs στην ίδια νανοπεριοχή. Κατά συνέπεια, η αξονική αγωγή της CNT ίνας είναι πολύ περίπλοκη. Αυτό είναι ένα από τα πλεονεκτήματά τους προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες.

Πραγματικά, η ευκολία της ενσωμάτωσης της ίνας CNT στα σύνθετα υλικά είναι το μέγιστο πλεονέκτημά τους. Οι ανταγωνιστές της ίνας CNT είναι, η ενσωματωμένη ίνα άνθρακα καθώς επίσης και η "doped resin" είτε με nanotubes άνθρακα είτε με Μαύρα σωματίδια άνθρακα, που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν την αγωγιμότητα στα μη αγωγιμα σύνθετα υλικά όπως το GFRP. Η εύθραυστη ίνα άνθρακα παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή ελαστικότητας από το σύνθετο υλικό και οι καταγραφές της χρησιμοποιήθηκαν για την πρόγνωση των τελικών σταδίων του υλικού κατά τη διάρκεια μηχανικών φορτίων και πριν από την αστοχία.

Οι ίνες CNT είναι επίσης διασκορπισμένες στην εποξική μήτρα του σύνθετου υλικού με διαφορετικές μεθόδους διασποράς όπου δεν πέτυχαν πλήρως στη διασπορά των CNTs στη μήτρα. Εκτός αυτού, η διαπότιση των υφασμάτων με doped resin απαιτεί τις υψηλής τεχνολογίας μεθόδους κατασκευής δεδομένου ότι τα CNTs διεισδύονται σε συγκεκριμένους τομείς του σύνθετου υλικού.

Το ίδιο πράγμα παρατηρείται για την περίπτωση της διασποράς των σωματιδίων του μαύρου άνθρακα στη μήτρα. Επιπλέον παρουσιάζουν ένα μειονέκτημα όταν συγκρίνονται με CNT "doped resin". Λόγο της σφαιρικής τους γεωμετρίας τα αγώγιμα "μονοπάτια" μέσα σε αυτά τα σύνθετα υλικά είναι επαφές σημείου προς σημείο.

Κυρίως εξαιτίας των λιγότερων επαφών, των σφαιρικών δικτύων των μαύρων σωματιδίων του άνθρακα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για να ελέγξουν ένα σύνθετο υλικό σε υψηλές μηχανικές πιέσεις, αντίθετα με τα δίκτυα CNT.

Η αγωγιμότητα της ίνας CNT αλλάζει όταν υποβάλλεται η ίνα στο μηχανικό φορτίο. Όταν η ίνα PVA εφελκύεται, η μαλακή μήτρα του υλικού PVA (EPVA ~ 1 GPa) παραμορφώνεται, ενώ τα άκαμπτα nanotubes άνθρακα (ECNT = $800 \text{ GPa} - 1 \text{ TPa}$) είναι λίγο έως καθόλου παραμορφωμένα λόγω αυτής της φόρτισης.

Λόγω των λιγότερων nanotube επαφών και του διαφορετικού προσανατολισμού όσον αφορά την κατεύθυνση της εφελκυστικής φόρτωσης, η αντίσταση της ίνας αυξάνεται.

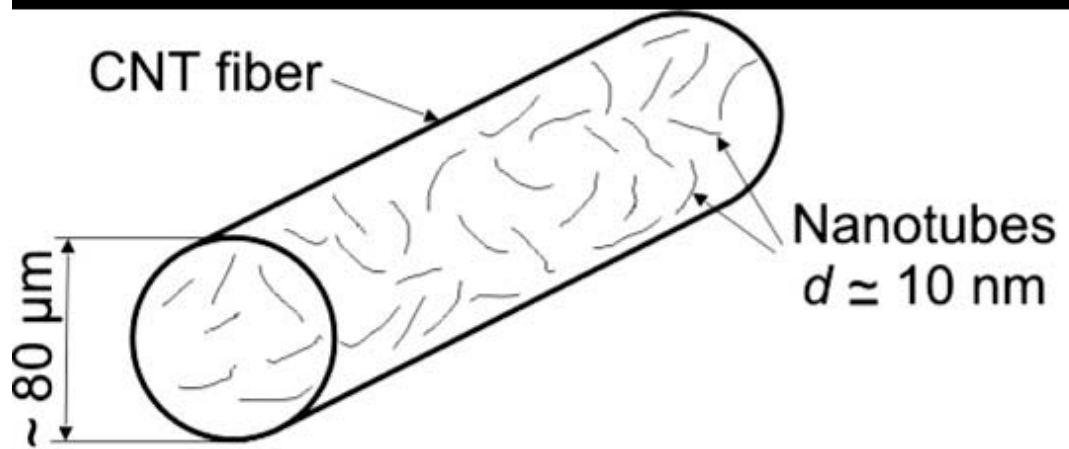
Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο εφαρμοσμένο ρεύμα, αυξάνεται η τιμή της συνολικής αντίστασης κατά μήκος της ίνας, προσφέροντας κατά συνέπεια υψηλότερες συνολικές τιμές αντίστασης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μήκος της ίνας αυξάνεται όταν παραμορφώνεται αξονικώς. Φυσικά, αυτό το συμπέρασμα είναι πολύ πιθανό, αλλά δεν υπάρχουν ακόμα άμεσα στοιχεία για την υποστήριξη του.

Στην περίπτωση της συμπίεσης μειώνεται το μήκος, εικόνα 15c. Επομένως, είναι λογικό μια μείωση στην αντίσταση της ίνας PVA για την συμπίεση.

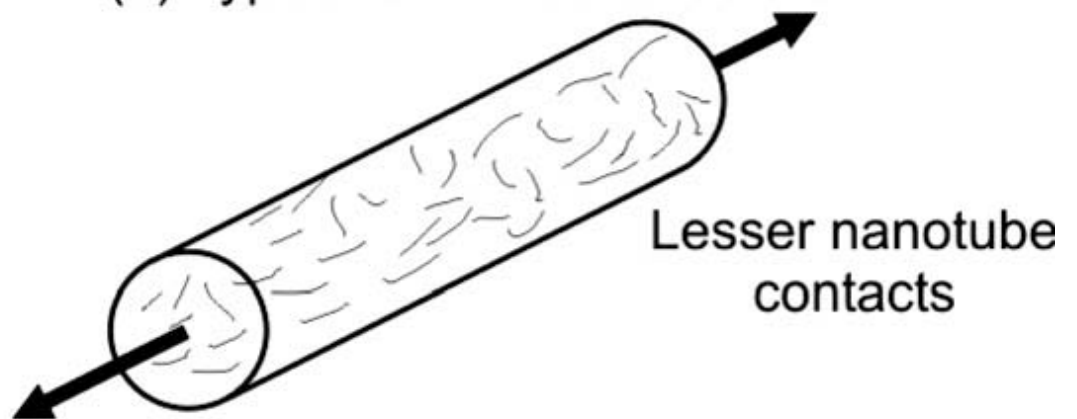
Αυτό συμβαίνει επίσης στην περίπτωση που η ίνα αποφορτίζεται. Καθώς το μήκος της ίνας μειώνεται, μειώνεται και η αντίσταση της ίνας. Έχοντας κατά νου ότι η ελαστικότητα της ίνας είναι της τάξεως των 1-1.25% οι μικρές επιμηκύνσεις στο σύνθετο υλικό παρουσίασαν επαναλαμβανόμενη αγωγιμότητα εικόνα 8.

Για το παρόν σύνθετο υλικό, αυτή η “επιμήκυνση” επιτυγχάνεται όταν είναι μηχανικά φορτισμένος στο 220-250 MPa . Επομένως, όταν το συνθετικό υλικό είναι φορτισμένο κάτω από ένα όριο επιμήκυνσης τότε κάθε παρατηρούμενη παραμένουσα αντίσταση αντιστοιχεί σε πιθανή βλάβη του υλικού.

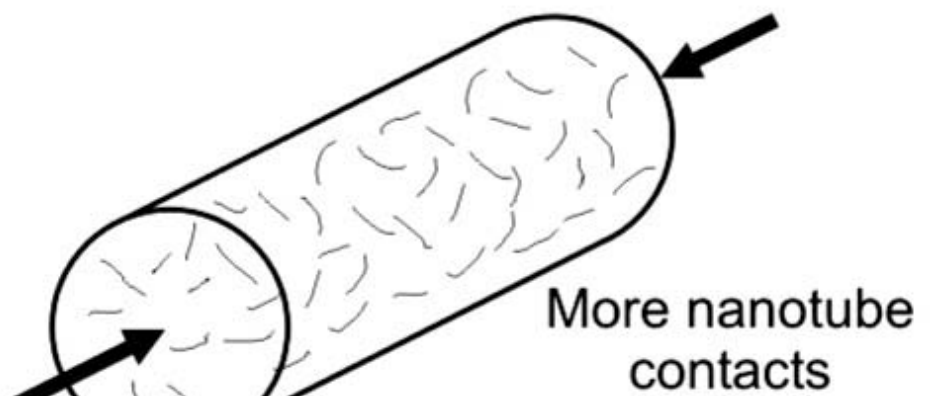
Εντούτοις, δεν υπάρχουν πειραματικά στοιχεία ώστε να υποστηριχτεί ο ακριβής μηχανισμός παραμόρφωσης της ίνας σε χαμηλές πιέσεις. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι θεωρητικοί και απαιτείται περισσότερη έρευνα. Επιπλέον η προέλευση των τιμών παραμένουσας αντίστασης όταν φορτίζεται μηχανικά το σύνθετο υλικό σε υψηλότερες επιμηκύνσεις είναι θέμα τρέχοντα έρευνας.



(a) Typical CNT fiber structure



(b) CNT fiber in tension



Εικόνα 15
Δομή των ινών CNT.

4.4 Αποτελέσματα από τις διαφορετικές φορτίσεις των ινών CNT

Όλοι συσχετισμοί ανάμεσα στις μηχανικές φορτίσεις σε κάποιο ποσοστό της μέγιστης πίεσης του δείγματος και η ηλεκτρική αλλαγή της αντίστασης της ίνας CNT είναι αποτελέσματα εμπειρικών εκθετικών καμπυλών της μορφής της εξίσωσης (1).

Οι εμπειρικές σταθερές A και t εξαρτώνται από το υλικό και το ιστορικό φόρτισης όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Αυτές οι τιμές είναι άμεσα συσχετισμένες με το ποσοστό της μέγιστης πίεσης των διαφορετικών συσσωρευτικών φορτίσεων του δείγματος και τα αποτελέσματα μπορούν να φανούν μέσα από την εικόνα 16α και Β, αντίστοιχα.

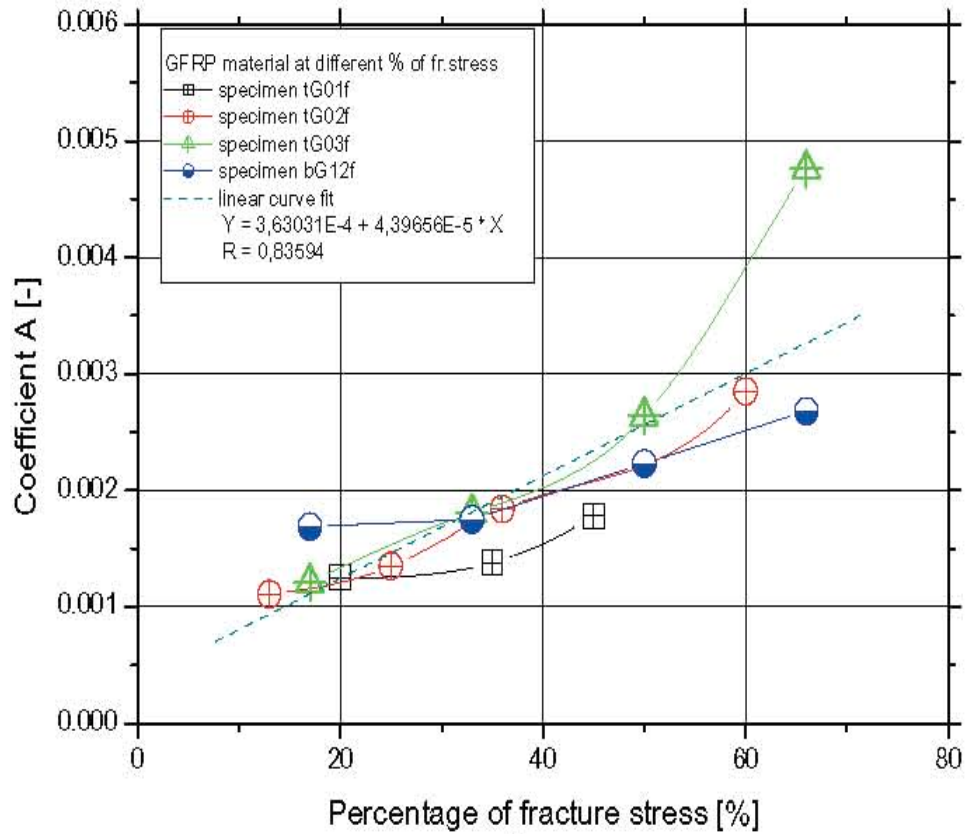
Οι τιμές των φορτίσεων πίεσης που είναι πολύ κοντά στις μέγιστες (από 80% έως 100%) παραλήφθηκαν.

Ο ρόλος της ίνας είναι η ενίσχυση της αισθητήριας ικανότητας κατά τις φορτίσεις λειτουργίας και όχι κατά τις μέγιστες φορτίσεις.

Τα δύο σχήματα δείχνουν τον ισχυρό ευθύγραμμο συσχετισμό ανάμεσα στις σταθερές και τα διαφορετικά ποσοστά των φορτίσεων. Οι σταθερές A και t της εκθετικής αύξησης μιας τυχαίας φόρτισης είναι συνάρτηση της προηγούμενης μέγιστης φόρτισης του υλικού. Παραδείγματος χάριν, εάν ένα δείγμα φορτώνεται κατά 26% της πίεσης σπασίματος, εκφορτίζεται και φορτίζεται έπειτα σε πιο υψηλό επίπεδο πίεσης, οι σταθερές A και t θα αυξηθούν.

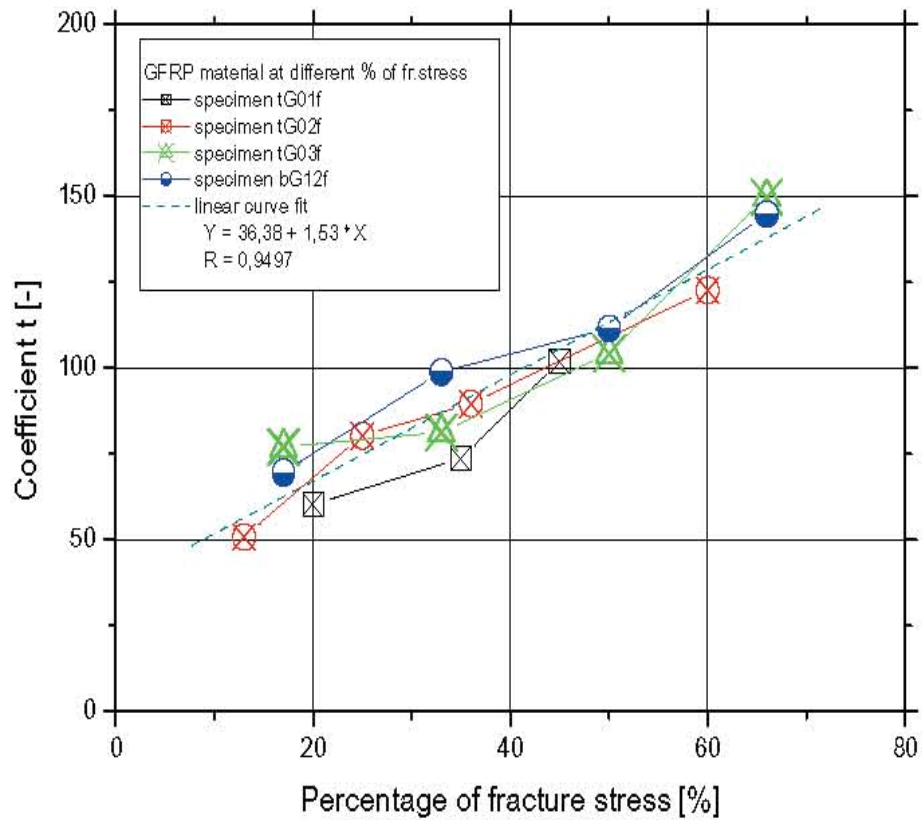
Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια μια εφελκυστικής δοκιμής, αυτές σταθερές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η προηγούμενη μέγιστη φόρτιση του δείγματος.

Για την παρούσα περίπτωση, η ίνα CNT μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης ως ανιχνευτής μέσα σε ένα συνθετικό υλικό καθώς υπερβαίνεται η μηχανική φόρτιση (παραδείγματος χάρη λόγω μιας αποτυχία ή μιας υπερφόρτισης) ο συσχετισμός ανάμεσα στην πίεση και την αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης, αλλάζει. Ο προσδιορισμός των βλαβών του υλικού είναι υπό έρευνα.



(a)

Εικόνα 16α



(b)

Εικόνα 16b

Εμπειρικές παράμετροι (α) A και (β) t για την εκθετική αύξηση της συσχέτισης της εξίσωσης (1) μεταξύ της μηχανικής καταπόνησης και της αλλαγής της ηλεκτρικής αντίστασης του GFRP υλικού με ενσωματωμένα ίνες CNT και για τα διάφορα βήματα φορτίσεων.

5. Συμπεράσματα

Πολυμερή ενισχυμένα με ίνα υάλου, με ενσωματωμένη ίνα nanotube άνθρακα κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο με σκοπό το δομικό έλεγχο τους, μέσω της μετρήσεως της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας CNT. Παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Η ίνα CNT έχει αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα στην ανίχνευση και την επιτήρηση των βλαβών των μη αγώγιμων συνθετικών υλικών, συγκρινόμενη με άλλα ανταγωνιστικά σκευάσματα όπως είναι για παράδειγμα οι ενσωματωμένες ίνες άνθρακα και η τροποποιημένη (doped resin) αγώγιμη μήτρα.

Τα κατασκευασμένα δοκίμια (GFRP) με τις ενσωματωμένες ίνες (CNT) παρουσίασαν τις ίδιες έντονες μηχανικές ιδιότητες με τα αντίστοιχα δοκίμια που δεν είχαν την ίνα CNT και επιπλέον η προσθήκη της ίνας δεν μείωσε την έντονη μηχανική τους απόδοση.

Τα διάφορα επαυξητικά βήματα φόρτισης-εκφόρτισης εφαρμόστηκαν στα διαφορετικά δοκίμια που είχαν ενσωματωμένες ίνες CNT. Η εφαρμοσμένη μηχανική πίεση του δοκιμίου και η ηλεκτρική αντίσταση της ίνας CNT συσχετίστηκαν για τις διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να συσχετιστούν με τη βοήθεια μιας παραβολικής ή μιας εκθετικής καμπύλης.

Αυξάνοντας το εφαρμοσμένο βήμα φόρτισης πάνω από τον συμβολικό περιορισμό του 12.5% ή πάνω από την συμβολική πίεση των 220MPa (που αντιστοιχεί σε περίπου 45% της πίεσης θραύσης του υλικού), ο συσχετισμός ανάμεσα στην πίεση και την ηλεκτρική αντίσταση αλλάζει.

Οι παραμένουσες τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης της ίνας CNT που παρατηρήθηκαν θα μπορούσαν να αποδοθούν σε περίπτωση βλάβης της ίνας CNT.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από κοινού με την συσσωρευμένη ζημιά του δοκιμίου όπως υπολογίστηκε από τη μείωση του ομαλοποιημένου συντελεστή της ελαστικότητας E του συνθετικού υλικού .

Επειδή ο σκελετός του αεροσκάφους και το υλικό κατασκευής της επιφάνειας των φτερών είναι σχεδιασμένα για πιέσεις επιπέδου 100 MPa (<220MPa), σαν πρώτη εκτίμηση οι ηλεκτρικές μετρήσεις της ίνας CNT θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια υλικά για να επισημάνουν το αν έχει προκληθεί κάποια ζημιά λόγω δυσλειτουργίας ή κάποια υπερφόρτιση. Σε αυτή τη περίπτωση η βλάβη του υλικού σίγουρα θα μετατοπίσει την καμπύλη της πίεσης με τον λόγο $\Delta R/R_0$.

Τα ίδια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν από την διεξαγωγή τριών σημείων καμπτικών δοκιμών σε δείγματα με CNT ίνα στην εφελκυστική περιοχή, καθώς επίσης και στην περιοχή που θλίπτεται.

Οι εκθετικές καμπύλες αύξησης μεταξύ των βημάτων μηχανικής φόρτωσης και της ηλεκτρικής αλλαγής της αντιστάσης της ίνας CNT συσχετίστηκαν με τα ποσοστά των φορτίσεων της πίεσης θραύσης. Οι σταθερές της εκθετικής αύξησης μιας τυχαίας φόρτισης είναι γραμμικά συνδεδεμένα και με το ιστορικό προηγούμενων φορτίσεων του υλικού, επιτρέπουν οι ίνες CNT να λειτουργήσουν ως αισθητήρες.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Schulte K, Baron Ch. Compos Sci Technol 1989.
- [2] Kaddour AS, Al-Salehi FAR, Al-Hassani STS, Hinton MJ. Compos Sci Technol 1994.
- [3] Irving PE, Thiagarajan C. Smart Mater Struct 1998.
- [4] Seo DC, Lee JJ. Compos Struct 1999.
- [5] Arby JC, Bochard S, Chateauminois A, Salvia M, Giraud G. Compos Sci Technol 1999.
- [6] Arby JC, Choi YK, Chateauminois A, Dalloz B, Giraud G. Compos Sci Technol 2001.
- [7] Kupke M, Schulte K, Schuler R. Compos Sci Technol 2001.
- [8] Todoroki A, Kobayashi H, Matuura K. JSME Int J 1995;38/4:524–30.
- [9] Todoroki A, Tanaka M. Compos Sci Technol 2002.
- [10] Todoroki A, Tanaka M, Shimamura Y, Kobayashi H. Adv Compos Mater 2004.
- [11] Todoroki A, Omagari K, Shimamura Y, Kobayashi H. Compos Sci Technol 2006.
- [12] Karapappas P, Vavouliotis A, Tsotra P, Paipetis A, Kostopoulos V. J Compos Mater 2009.
- [13] Vavouliotis A, Karapappas P, Loutas T, Voyatzi T, Paipetis A, Kostopoulos V. Plast Rubber Compos Macromol Eng 2009.
- [14] Thostenson ET, Chou T-W. Adv Mater 2006.

- [15] Thostenson ET, Chou T-W. Nanotechnology 2008.
- [16] Fernberg P, Nilsson G, Joffe R. In: Proceedings of COMP07, 6th international symposium on advanced composites. Corfu, Greece, 16–18 May 2007.
- [17] Boeger L, Wichman MHG, Meyer LO, Schulte K. Compos Sci Technol 2008.
- [18] Wichman MHG, Buschhorn ST, Boeger L, Adelung R, Schulte K. Nanotechnology 2008.
- [19] Muto N, Arai Y, Shin SG, Matsubara H, Yanagida H, Sugita M, et al. Compos Sci Technol 2001.
- [20] Vigolo B, Penicaud A, Coulon C, Sauder C, Pailler R, Journet C, et al. Science 2000.
- [21] Poulin P, Vigolo B, Launois P. Carbon 2002.
- [22] Miaudet P, Bartholome C, Derre A, Maugey M, Sigaud G, Zakri C, et al. Polymer 2007.
- [23] Badaire S, Pichot V, Zakri C, Poulin P, Launois P, Vavro J, et al. J Appl Phys 2004.
- [24] Bartholome C, Miaudet P, Derre A, Maugey M, Roubeau O, Zakri C, et al. Compos Sci Technol 2008.
- [25] Deliverable report No. 4.2 of the NOESIS research project. Conductivity study results and models governing the electromagnetical behaviour of organized CNTs structures. January 2007.
- [26] Parvisi A, Bailey JE. J Mater Sci 1978.
- [27] Highsmith AL, Reifsnider KL. ASTM STP 1982.
- [28] Gagel A, Lange D, Schulte K. Composites Part A .

