



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών
Τομέας Φυσικής

Διπλωματική Εργασία
του
Ρουμπή Αθανάσιου

**Ηλεκτρικές Μετρήσεις για Αίσθηση Φθοράς
σε Πολυμερικά Δοκίμια ΡΕΕΚ
ενισχυμένα με Ανθρακονήματα,
υπό Εφελκυσμό**

Επιβλέπων:
Απόστολος Κυρίτσης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Ευχαριστώ,

τον κ. **Απόστολο Κυρίτση, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ**, για την επίβλεψη, τις συμβουλές και παροχή βοήθειας όπου χρειάστηκε.

τον **Χρήστο Πανδή, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή ΕΜΠ**, για την συνεχή παρότρυνση, καθοδήγηση και συμμετοχή του καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων και της προετοιμασίας της εργασίας.

τον **Γιώργο Γεωργούση, υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ**, για την τακτική παρουσία του στα πειράματα και για τη διαρκή βοήθεια του απ' την αρχή μέχρι το τέλος αυτής της εργασίας.

τον κ. **Πολύκαρπο Πίσση, Καθηγητή ΕΜΠ** και τον κ. **Βασίλειο Πέογλο, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ**, για το ενδιαφέρον τους για την εξέλιξη των πειραμάτων και τις χρήσιμες συμβουλές τους.

και τον **Παναγιώτη Γεωργιόπουλο, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ**, ο οποίος χειριζόταν την μηχανή εφελκυσμού και βοήθησε στο στήσιμο όλων των πειραμάτων, για το χρόνο, τον κόπο και την παρέα του.

Περιεχόμενα

Περίληψη-Abstract.....σελ.7

1-Εισαγωγή.....σελ.9

1.1 Health Monitoringσελ.9

1.2 CFRP.....σελ. 10

1.2.1 Ανθρακονήματα.....σελ.11

1.2.2 Πολυμερικές Μήτρες.....σελ.13

1.3 Health Monitoring σε CFRP.....σελ.15

2- Υλικά και Μέθοδος.....σελ.21

2.1 ΡΕΕΚ-CF.....σελ.21

2.2 Προετοιμασία Δοκιμίων.....σελ.22

2.3 Πειραματική Διάταξη.....σελ.24

2.4 Επεξεργασία των Μετρήσεων.....σελ.26

3- Αποτελέσματα και Σχολιασμός.....σελ.29

3.1 Απλός Εφελκυσμός μέχρι Θραύση.....σελ.29

3.1.1 Διαμήκης Εφαρμογή Ρεύματος.....σελ.29

3.1.2 Εγκάρσια Εφαρμογή Ρεύματος.....σελ.32

3.1.3 Διαγώνια Εφαρμογή Ρεύματος.....σελ.37

3.2 Κύκλοι Εφελκυσμού-Χαλάρωσης.....σελ.41

3.2.1 Διαμήκης Εφαρμογή Ρεύματοςσελ.41

3.2.2 Διαγώνια Εφαρμογή Ρεύματος.....σελ.45

4-Συμπεράσματα.....σελ.61

5-Βιβλιογραφία.....σελ.63

Περίληψη

Στην εργασία αυτή πειραματιστήκαμε με δοκίμια από PEEK-CF 38%. Το υλικό αυτό είναι σύνθετο αποτελούμενο από πολυμερική μήτρα PEEK, στην οποία είναι εμβαπτισμένα ομοαξονικά ανθρακονήματα σε ποσοστό 38% επί του συνολικού βάρους, διαμορφωμένο σε μονά φύλλα πάχους 0,15mm.

Τα δοκίμια τα υποβάλλαμε σε εφελκυσμούς κατά τον άξονα των ανθρακονημάτων, ενώ παράλληλα μετρούσαμε την ηλεκτρική τάση σε διάφορες ζώνες του υλικού, μέσω επαφών που είχαμε δημιουργήσει στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων.

Οι μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης έχει διαπιστωθεί πως σχετίζονται με τις μεταβολές στις διαστάσεις και τις προξενούμενες φθορές από μηχανικές καταπονήσεις. Συγκεκριμένα αυξομειώσεις στο μήκος προκαλούν σχεδόν γραμμικές αυξομειώσεις στην αντίσταση ινωδών υλικών όπως είναι το δικό μας.

Συνδυάζοντας διαφορετικά ζεύγη επαφών, είχαμε τη δυνατότητα να μετράμε την ηλεκτρική τάση κατά μήκος, εγκάρσια ή διαγώνια του δοκιμίου. Οι εγκάρσιες και διαγώνιες μετρήσεις παρέχουν καλύτερη εικόνα για την επιμήκυνση του δοκιμίου, μιας και μεταβάλλονται εντονότερα κατά τον εφελκυσμό απ' ότι οι διαμήκεις.

Σε κυκλικές φορτίσεις εφελκυσμού χαλάρωσης που πραγματοποιήσαμε, εμφανίστηκαν και μη γραμμικές αποκρίσεις της ηλεκτρικής αντίστασης στην ασκούμενη μηχανική τάση, την οποία αποδίδουμε στις φθορές και την παραμένουσα παραμόρφωση της πλαστικής μήτρας.

Γενικά, η μέθοδος της παρακολούθησης της ηλεκτρικής αντίστασης ως δείκτη των μεταβολών του μήκους του υλικού, αν και δεν παρέχει κάποια προειδοποίηση για την επερχόμενη αστοχία, είναι μια χρήσιμη, μη παρεμβατική τεχνοτροπία που μας επιτρέπει να αξιοποιούμε το ίδιο το υλικό ως αισθητήρα γλιτώνοντας το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: health monitoring, PEEK, πολυ-αιθερ αιθερ-κετόνη, μήτρα, CF, ανθρακονήματα, εφελκυσμός, χαλάρωση, φθορά, θραύση, σχετική επιμήκυνση, strain, σχετική μεταβολή της αντίστασης, $\Delta R/R_0$, κύκλος καταπόνησης, κόπωση, θραύση.

Abstract

In this project, samples made of PEEK-CF 38% were tested. This material is a composite of PEEK, polyetheretherketone, matrix reinforced with unidirectional Carbonfibers 38% of the total weight, modified in single plies of 0,15mm thickness.

The samples were subjected under tensile loading parallel to the carbonfiber direction, while simultameously voltage drop was measured in several zones, via electrical contacts which we made on the surface of the material.

There have been observed proportions between changes in the electrical resistance and changes in the dimensions and damages due to mechanical loading. Changes in longitudinal strain cause nearly proportional changes in the resistance of fibrous CFRP composites such us our material.

Combining different pears of contacts each time, we were able to measure longitudinal, throughthickness or diagonal resistance of the sample. Throuthickness and diagonal resistance measurements were better indicators of longitudinal strain than those in the longitudinal direction

During cyclic loading, tension - relaxation, non linear responses of the resistance to the applied stress occurred and were attributed to the damages and permanent deformation of the plastic matrix.

In general, health monitoring via electrical resistance measurements, besides the fact that doesn't warn about the upcoming failure of the material, is a useful and non interventional technique which uses the material itself as a sensor, avoiding that way the cost of constructing an extra network for this purpose.

Keywords: health monitoring, CFRP, PEEK, poly-ether-etherketone, matrix, CF, carbonfibers, strain, $\Delta R/R_0$, fractional change of resistance, stress, tensile loading, cyclic loading, fatigue, damage, breakage.

1-Εισαγωγή

1.1 Health Monitoring

Στην εργασία αυτή ασχοληθήκαμε με το health monitoring σε δοκίμια κατασκευασμένα από PEEK-CF 38%, πραγματοποιώντας μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης, ενόσω τους ασκούσαμε εφελκυστική τάση.

Το σκεπτικό βασίζεται στο γεγονός ότι υπάρχουν αναλογίες μεταξύ των μεταβολών στο σχήμα, τις διαστάσεις και τη δομή ενός αγώγιμου υλικού, όταν του ασκείται κάποια μηχανική καταπόνηση, και των αντίστοιχων μεταβολών της ηλεκτρικής του συμπεριφοράς.

Δημιουργώντας λοιπόν, αγώγιμες επαφές στην εξωτερική επιφάνεια των υλικών, ώστε να μην επηρεάζουμε την μηχανική συμπεριφορά τους και συνδέοντας τες με μετρητικές συσκευές, μπορούμε να παρακολουθούμε σε πραγματικό χρόνο τις μεταβολές της ηλεκτρικής τους αντίστασης και μέσω αυτών να πληροφορούμαστε για τη φυσική τους κατάσταση τους, καθώς αυτά υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση. Κατ' αυτόν τον τρόπο κατανοούμε καλύτερα τις αιτίες, τους μηχανισμούς και τη φύση των φθορών [1].

Αυτά τα χαρακτηριστικά, η διαρκής και μη παρεμβατική παρακολούθηση του υπό δοκιμή υλικού, κάνουν το health monitoring μια πολύ χρήσιμη και θελκτική μέθοδο, η οποία μας δίνει την δυνατότητα να αποφαινόμαστε ανά πάσα στιγμή για την κατάσταση, την λειτουργικότητα και την αξιοπιστία ενός εξαρτήματος και κατά συνέπεια για την ασφαλή λειτουργία οποιασδήποτε κατασκευής αποτελείται από αγώγιμα υλικά.

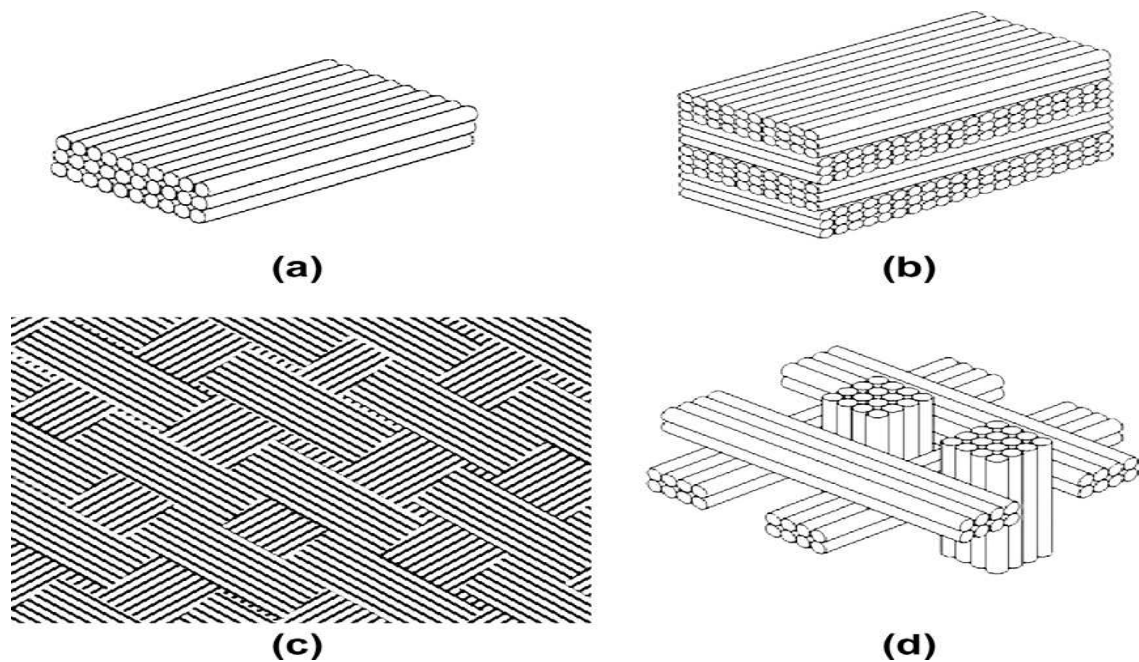
Το health monitoring, επίσης μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθούμε μεγάλο όγκο του υλικού και σε διάφορες διευθύνσεις τοποθετώντας τις ηλεκτρικές επαφές στα επιθυμητά σημεία, καθώς χρησιμοποιούμε το ίδιο το υλικό, την αγωγιμότητα του, ως πηγή πληροφοριών (self-sensing)[2] και δεν χρειάζεται να δημιουργήσουμε ένα πρόσθετο δίκτυο αισθητήρων, γλιτώνοντας έτσι τον κόπο και το κόστος μιας τέτοιας διαδικασίας.

1.2 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ανθρακονήματα, αποτελούν μια εξαιρετική πρώτη ύλη, μιας και συνδυάζουν χαμηλή πυκνότητα και μεγάλη μηχανική αντοχή με υψηλή χημική αδράνεια και μικρή θερμική διαστολή[3], ιδιότητες πολύ χρήσιμες για τεχνολογικές εφαρμογές όπως της αεροναυπηγικής.

Τα CFRP αποτελούνται από πολυμερική μήτρα, που συνήθως έχει πολύ μεγάλη αντίσταση και μπορεί να θεωρηθεί μονωτής, στην οποία, στη απλούστερη μορφή, είναι εμβαπτισμένα ομοαξονικά συνεχή ανθρακονήματα, διαμορφωμένα σε πλάκα. Τα ανθρακονήματα έχουν μεγάλη αγωγιμότητα, έτσι στη ιδεατή περίπτωση που είναι εντελώς παράλληλα και ομοιόμορφα μοιρασμένα μέσα στη μήτρα, θα είχαμε μια μεγάλη αγωγιμότητα κατά την διεύθυνση προσανατολισμού τους και μηδενική κάθετα σε αυτή. Όπως θα δούμε στη συνέχεια κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, οπότε υπάρχει αγωγιμότητα και προς άλλες διευθύνσεις, μικρότερες μεν, αλλά υπαρκτές και μετρήσιμες.

Τα CFRP, ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής που ακολουθείται και την διάταξη των ανθρακονημάτων εντός της μήτρας, λαμβάνουν τη μορφή (a) απλών φύλλων με παράλληλα ανθρακονήματα, (b) διαδοχικών φύλλων κολλημένων, με τα ανθρακονήματα κάθε φύλλου σε κάθετη διεύθυνση προς το προηγούμενο, (c) με τα ανθρακονήματα σε μορφή πλεκτού (d) με δεσμίδες ανθρακονημάτων κάθετες μεταξύ τους και οποιαδήποτε άλλη μορφή, ανάλογα με το σκοπό για τον οποία θα χρησιμοποιηθούν[4].

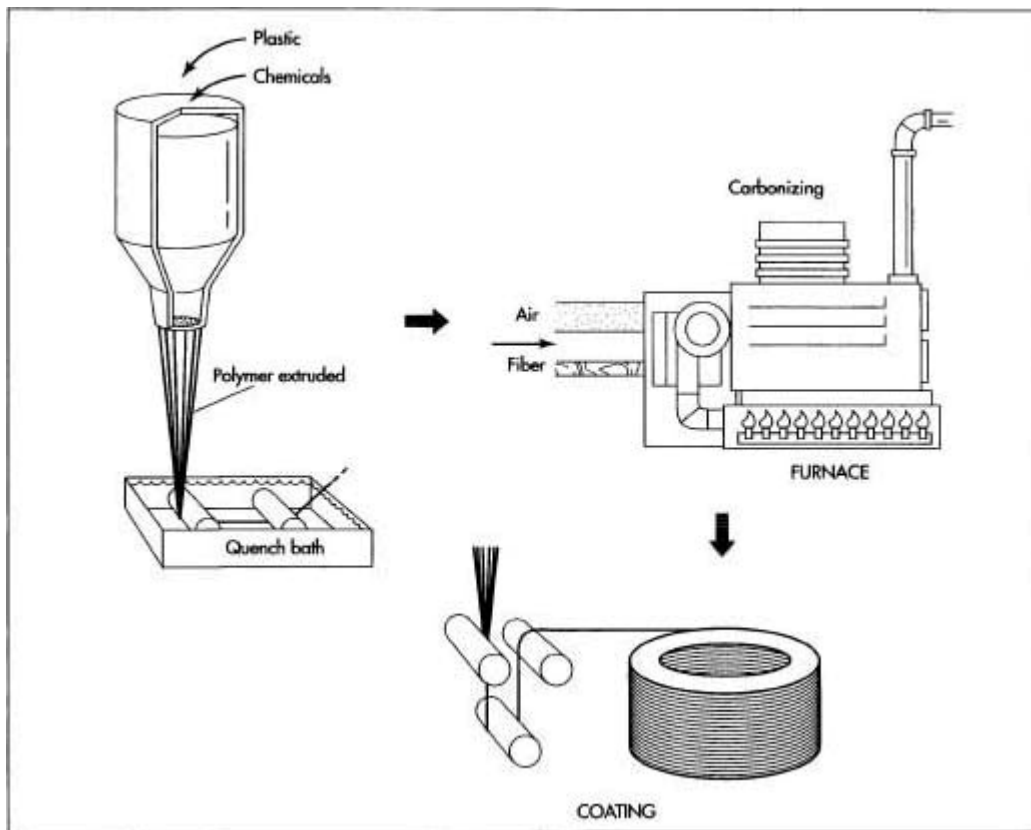


Εικ.1.2.1 Διαφορετικές διατάξεις των ανθρακονημάτων εντός της μήτρας, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται.[4]

1.2.1 Ανθρακονήματα

Τα ανθρακονήματα, carbon fibers, πρωτοχρησιμοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο, στις αρχές της δεκαετίας του 1960 από την Royal Aircraft Establishment, στο Χαμσάιρ, ως υλικό κατασκευής στην αεροναυπηγική, λόγω της αυξημένης σκληρότητας και μηχανικής αντοχής σε συνδυασμό με το χαμηλό ειδικό βάρος τους.

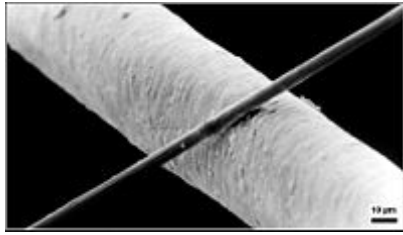
Τα ανθρακονήματα παρασκευάζονται, έχοντας ως πρώτη ύλη κάποιο οργανικό πολυμερές όπως το πολυακριλονιτρίλιο (PAN), την τεχνητή βισκόζη ή την πετρελαϊκή πίσσα. Στα πολυμερή αυτά τα μόρια είναι συνδεδεμένα μέσω των ατόμων του άνθρακα και με κατάλληλη επεξεργασία αποβάλλεται το μεγαλύτερο ποσοστό των μη ανθρακικών ατόμων, αφήνοντας πολυμερικές αλυσίδες άνθρακα. Η επεξεργασία που ακολουθείται, φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Εικ.1.2.2 Σχηματική απεικόνιση της παρασκευής ανθρακονημάτων.

Το πρωτογενές υλικό, που είναι κάποια απ' τις πολυμερικές ενώσεις που προαναφέραμε, μέσω χημικών και μηχανικών διεργασιών νηματοποιείται. Στη συνέχεια τα νήματα θερμαίνονται στους 200-300°C παρουσία αέρα για μισή έως δύο ώρες. Σ' αυτό το στάδιο τα πολυμερικά μόρια σταθεροποιούνται ακόμα περισσότερο. Έπειτα, τα νήματα εισέρχονται σε φούρνο χωρίς αέρα, όπου η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 3000°C για αρκετά λεπτά και προκαλείται απανθράκωση. Η απουσία οξυγόνου εντός του φούρνου σημαίνει ότι δεν έχουμε καύση. Τα μόρια λόγω της ψηλής θερμοκρασίας αυξάνουν την κινητικότητα τους και ταλαντώνονται έντονα με αποτέλεσμα να αποβάλλεται η πλειοψηφία των μη ανθρακικών ατόμων. Καταλήγουμε κατ' αυτόν τον τρόπο να έχουμε αλυσίδες πολυμερικών κρυστάλλων, αποτελούμενες κατά βάση από άνθρακα, με ποσοστό άνω του 90% να θεωρείται ικανοποιητικός. Ακολουθεί μια ελαφρά οξείδωση της επιφάνειας του ανθρακονήματος, που την σκληραίνει και την κάνει κατάλληλη να συνδυάζεται με άλλα υλικά. Τέλος τυλίγεται σε μπομπίνες για καλύτερη αποθήκευση και ασφαλή μεταφορά.

Τα ανθρακονήματα έχουν πολύ μικρό ειδικό βάρος, είναι εξαιρετικά σκληρά κι ανθεκτικά στις μηχανικές καταπονήσεις, έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, ελάχιστη θερμική διαστολή και μεγάλη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η διάμετρος ενός ανθρακονήματος κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10μm.



Εκκ.1.2.3 Μια ίνα άνθρακα (μαύρη) διαμέτρου 5μm, συγκρινόμενη με μια τρίχα .

1.2.2 Πολυμερικές Μήτρες

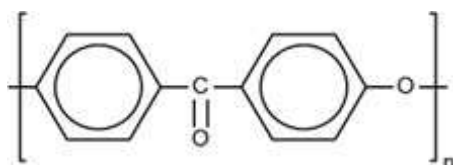
Οι πολυμερικές μήτρες απ' την άλλη έχουν πολύ μικρή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι σχετικά ελαφριές και αποτελούν το συνεκτικό στοιχείο των CFRP. Απορροφούν τους κραδασμούς και μοιράζουν το φορτίο στο όγκο του υλικού. Έχουν μεγάλη χημική αδράνεια και είναι λειτουργικές σε υδάτινο περιβάλλον ή περιβάλλον με υγρασία και για μεγάλες θερμοκρασίες. Οι πολυμερικές μήτρες λόγω της ρευστότητας που έχουν υπό συγκεκριμένες συνθήκες, έχουν το πλεονέκτημα να μορφοποιούνται σε ποικίλα σχέδια ανάλογα με τα καλούπια στα οποία εισέρχονται.

Για απαιτητικές εφαρμογές όσον αφορά την σκληρότητα και την αντοχή, καταλληλότερες είναι οι εποξειδικές ρητίνες. Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή καθώς υπό συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θέρμανσης, κρυσταλοποιούνται, χωρίς να έχουν την δυνατότητα να επαναρευστοποιηθούν θερμαίνοντας τις ξανά. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι ένα υλικό πολύ ανθεκτικό στην κόπωση, με πολύ μικρή θερμική διαστολή και με μεγάλη διάρκεια ζωής που είναι όμως πολύ δαπανηρό και απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια και αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες κατά την παρασκευή του καθώς η παρουσία υγρασίας ή η δημιουργία φυσαλίδων μπορεί να αλλοιώσει σημαντικά τις ιδιότητες του.

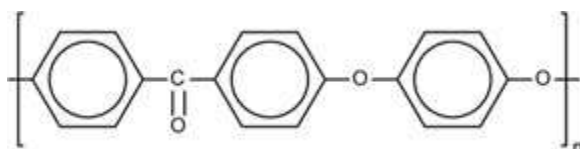
PEEK

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε μήτρα πολυαιθεραιθερκετόνης (PEEK). Η PEEK είναι τεχνητό, ημικρυσταλλικό, θερμοπλαστικό πολυμερές. Ρευστοποιείται στους 343°C και κρυσταλλοποιείται στους 143°C. Μπορούμε να το ρευστοποιούμε και να το κρυσταλλοποιούμε ξανά και ξανά θερμαίνοντας και ψύχοντας το αντίστοιχα. Έχει χαμηλή απορρόφηση στην υγρασία και μεγάλη χημική αδράνεια. Προβλέπεται διαρκής χρήση στους 250°C, σε καυτό νερό ή σε υδρατμούς χωρίς να υποστεί μόνιμες βλάβες στις φυσικές του ιδιότητες. Δεν διαδίδει τη θερμότητα, είναι σχεδόν άφλεκτο και εκπέμπει ελάχιστο καπνό και τοξικές ουσίες όταν είναι εκτεθειμένο σε φωτιά, γεγονός που το

καθιστά μια πολύ καλή πυρίμαχη πρώτη ύλη. Είναι επίσης, συμβατό με εφαρμογές υψηλού κενού χαρακτηριστικό που αξιοποιείται στη κατασκευή εξαρτημάτων για διαστημόπλοια. Τέλος, έχει διαπιστωθεί και συμβατότητα με τον ανθρώπινο οργανισμό, αφού όπως αναφέραμε είναι αρκετά αμετάβλητο σε υγρό περιβάλλον και χημικά αδρανές, γεγονός που το κάνει μια καλή επιλογή για κατασκευή εμφυτευμάτων.



Εικ.1.2.4 Μόριο πολυαιθερικής κετόνης.



Εικ.1.2.5 Μόριο πολυαιθεραιθερκετόνης (PEEK).

Γενικώς, ο συνδυασμός των πολυμερικών μητρών που προσφέρουν μόνωση και προστασία, με τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες των ανθρακονημάτων, κάνουν τα CFRP μια πολύ καλή επιλογή πρώτης ύλης σε πολλούς τομείς εφαρμογών, όπου απαιτείται μηχανική αντοχή, χαμηλό ειδικό βάρος, μικρή θερμική διαστολή και αυξημένη χημική αντίσταση. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά ικανοποιούν τόσο τις απαιτήσεις της αεροναυπηγικής και της κατασκευής διαστημοπλοίων, όσο και σε πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία πολλά αμαξώματα κατασκευάζονται από ανθρακονήματα για προστασία των επιβατών αλλά και σημαντική μείωση του συνολικού βάρους ενώ σταδιακά πολλά μεταλλικά μέρη αντικαθίστανται από CFRP υλικά. Αξιοποιούνται επίσης στη κατασκευή προϊόντων αθλητισμού και αναψυχής όπως ρόπαλα, καλάμια ψαρέματος, φιάλες καταδύσεων και πτερύγια για βατραχοπέδιλα, ηχεία μουσικών οργάνων, σκελετούς ποδηλάτων, σανίδες σερφ κ.ά. Εφαρμογή βρίσκουν και στη θωράκιση και ενίσχυση κτιρίων όπου τα ανθρακουφάσματα εφαρμόζονται σε ρηγματομένες κολώνες είτε σε γερές για βελτίωση της φέρουσας ικανότητάς τους

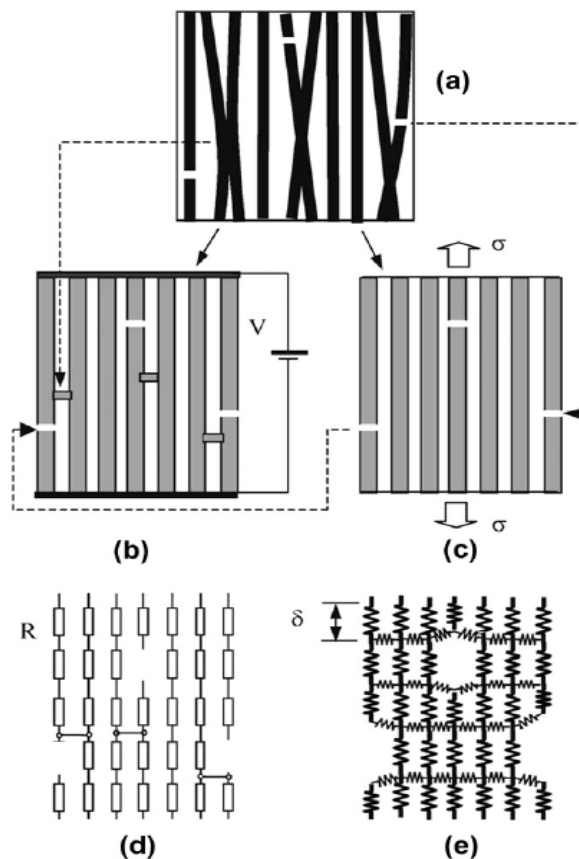
Χρησιμοποιούνται επίσης στην κατασκευή ανεμογεννητριών, όπου με τη χρήση CFRP πτερυγίων, έχουμε αύξηση 30-50% της ισχύος για ασθενείς ανέμους σε σχέση με τα μεταλλικά και θα εξαπλώνονται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές όσο η αυξανόμενη ζήτηση και παραγωγή θα μειώνει το κόστος τους.

1.3 Health Monitoring σε CFRP

Το health monitoring σε CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) υλικά είναι μια μέθοδος που μελετάται και αναπτύσσεται περισσότερο από είκοσι χρόνια, με πλήθος εργασιών και δημοσιεύσεων διεθνώς.

Σταχυολογούμε κάποια από τα στοιχεία που μέχρι τώρα έχουν προκύψει, τα οποία μας βοηθούν να κατανοήσουμε την δομή των CFRP, τον τρόπο που διαδίδεται το ρεύμα εντός τους, το πως αποκρίνονται στις καταπονήσεις και ποια είδη φθοράς προκαλούνται απ' αυτές.

Παραθέτουμε αρχικά ένα σχέδιο των Xia ZH, Okabe T, Park JB, Curtin WA, Takeda N. [12], το οποίο αποτελεί μια πολύ καλή αναπαράσταση των CFRP, και μοντελοποιεί τόσο τη μηχανική όσο και την ηλεκτρική συμπεριφορά τους:



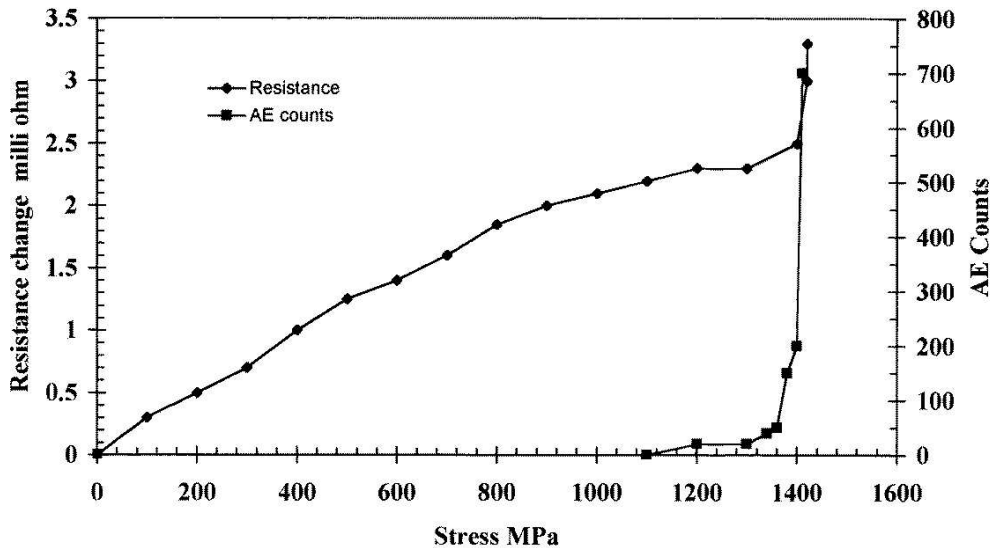
Σχ.1.1(a) Αναπαράσταση της «πραγματικής» μορφής του CFRP, αριστερά, (b) και (d) ηλεκτρικό ανάλογο αποτελούμενο από αντιστάτες, δεξιά, (d) και (e), μηχανικό ανάλογο από ελατήρια.

Στο προηγούμενο σχήμα βλέπουμε στο (a) τη δομή ενός CFRP όπως στην πραγματικότητα είναι, δηλαδή με τις ίνες άνθρακα ατελώς στοιχισμένες και κάποιες απ' αυτές ασυνεχείς-σπασμένες. Η ατελής στοιχίση έχει σαν αποτέλεσμα οι ίνες να έρχονται σε επαφή σε διάφορα σημεία εντός του υλικού. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται αγώγιμοι δρόμοι σε διευθύνσεις πέραν αυτής του προσανατολισμού των ανθρακονημάτων. Οι επαφές αναπαρίστανται στο ηλεκτρικό μοντέλο (d) ως ηλεκτρόδια που συνδέουν τις παράλληλες σειρές αντιστατών που είναι τα ανθρακονήματα. Οι ασυνέχειες των ανθρακονημάτων απεικονίζονται ως κενά και στα δύο μοντέλα. Στο μηχανικό ανάλογο (e), τα ανθρακονήματα είναι τα χοντρά ελατήρια σε σειρά και ενώνονται μεταξύ τους με ασθενέστερα ελατήρια, που συμβολίζουν τη μήτρα και την ιδιότητα της να κατανέμει το φορτίο στο όγκο του υλικού.

Καθώς εφελκούμε ένα δοκίμιο CFRP, συμβαίνουν οι εξής μεταβολές:

Ως προς τις φυσικές διαστάσεις, έχουμε αύξηση του μήκους κατά τη φορά της φόρτισης και βάσει του φαινομένου Poisson, στένεμα της διατομής κάθετα σ' αυτή. Αυτές οι μεταβολές μεταφράζονται σαν αύξηση της αντίστασης τόσο κατά μήκος, της R_{long} (longitudinal – διαμήκης αντίσταση) όπου είναι ανάλογη του μήκους και αντιστρόφως ανάλογη της διατομής, όσο και σαν αύξηση της R_{th} (through thickness), εγκάρσια κατά πάχος, λόγω της αυξανόμενης στοιχίσης των ανθρακονημάτων κατά το τέντωμα και της επαγόμενης μείωσης των επαφών μεταξύ τους. Η R_{th} μεταβάλλεται πολύ πιο έντονα απ' την R_{long} με την επιμήκυνση και είναι καλύτερος δείκτης της σχετικής μεταβολής του μήκους (strain). [2,4]

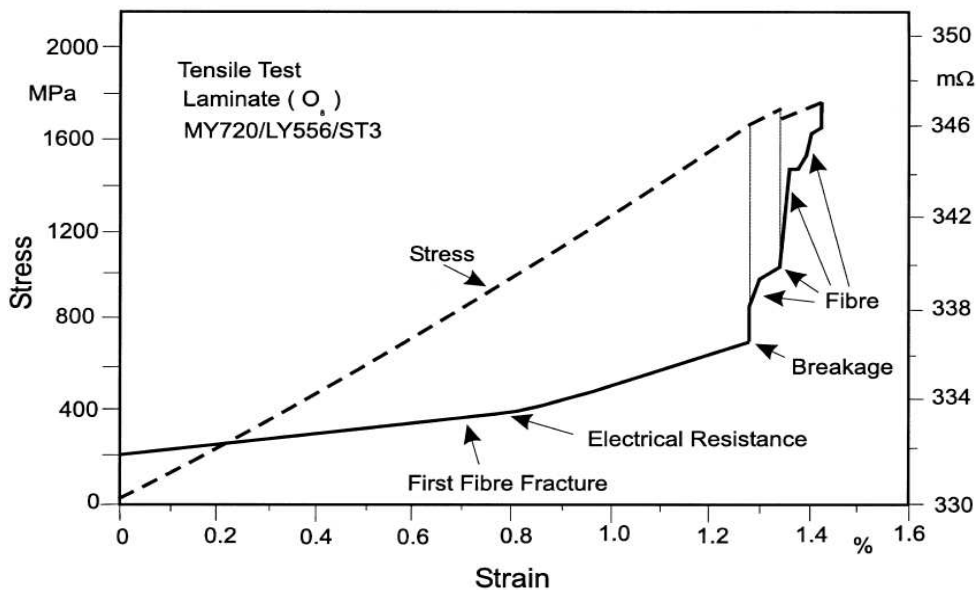
Πέρα απ' τις μεταβολές των διαστάσεων, από κάποιο σημείο και πάνω αρχίζουν να υπάρχουν και ζημιές στο υλικό. Το διάγραμμα που ακολουθεί, είναι από πείραμα εφελκυσμού που πραγματοποίησαν οι P.E.Irving και C.Thiagarajan [6] με ταυτόχρονη ηχητική καταγραφή.



Σχ.1.2 Ακουστικές καταγραφές κατά τη διάρκεια πειράματος εφελκυσμού σε υλικό με ανθρακονήματα και μεταβολή της αντίστασης ως προς τη μηχανική τάση (stress). [6]

Υπάρχει ησυχία μέχρι τα 1100 MPa, ενώ στη συνέχεια ξεκινάνε οι ηχητικές εκπομπές οι οποίες αυξάνονται εκθετικά για να καταλήξουν σχεδόν κατακόρυφες πριν τη θραύση. Τα ηχητικά σήματα είναι στη ουσία ανθρακονήματα που σπάνε. Έτσι βλέπουμε την R_{long} μεγαλώνει σχεδόν γραμμικά με το stress (μηχανική τάση) μέχρι κάποιο όριο και στη συνέχεια να αυξάνεται απότομα καθώς τα ανθρακονήματα ξεκινούν να σπάνε. Η R_{long} είναι ευαίσθητη στο σπάσιμο CF, και για αυτό είναι μια καλή ένδειξη γι' αυτό το είδος φθοράς.

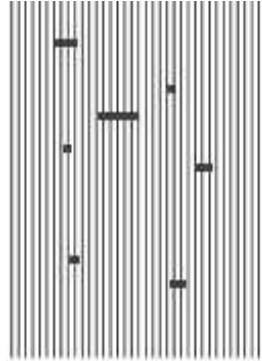
Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι M.Kurke, K.Schulte και R.Schüler [7] πραγματοποιώντας εφελκυσμούς σε CFRP .



Σχ.1.3 Διάγραμμα τάσης και ηλεκτρικής αντίστασης ως προς τη σχετική επιμήκυνση του δοκιμίου [7].

Και σ' αυτό το διάγραμμα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η R_{long} με το strain καθώς και τις απότομες μεταβολές που συμβαίνουν κάθε φορά που κάποιο ανθρακόνημα σπάει.

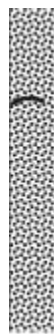
Πέρα απ' το σπάσιμο των ανθρακονημάτων:



Σχ.1.4 Άνω όψη του CFRP
Έντονο μαύρο τα σπασίματα.[3]

που είναι ούτως ή άλλως πολύ ανθεκτικά, υπάρχουν φθορές που συμβαίνουν στη πολυμερική μήτρα ακόμα και για μικρές φορτίσεις.

- Τριβή μεταξύ μήτρας και ανθρακονήματος, που οδηγεί σε μείωση της μόνωσης των νημάτων και άρα αύξηση της R_{th} .
- Η cross-ply crack, ρωγμή στη μήτρα κάθετα στις ίνες, που προκαλεί αύξηση στην εγκάρσια αντίσταση.



Σχ.1.5 Διατομή ενός φύλλου CFRP.
Με έντονο μαύρο η ρωγμή [3]

- Και οι intraply cracks, ρωγμές παράλληλα στα ανθρακονήματα-αποκόλληση των νημάτων απ' τη μήτρα, που επίσης εκδηλώνεται ως αύξηση της αντίστασης,



**Σχ.1.6 Πλάγια όψη φύλλου CFRP.
Με έντονο μαύρο η ρωγμή [3]**

2 – Υλικά και Μέθοδος

2.1 PEEK-CF

Το PEEK-CF 38%, που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα μας, είναι σύνθετο υλικό, αποτελούμενο από πολυμερική θερμοπλαστική μήτρα PEEK, πολύ-αιθερ-αιθερ-κετονής, ενισχυμένη με 38% κατά βάρος ομοαξονικά ανθρακονήματα, διαμορφωμένο σε μονά φύλλα πάχους 0,15mm.

Η μηχανική συμπεριφορά του είναι ψαθυρή, αφού το μηχανική τάση (stress) και η σχετική μεταβολή του μήκους (strain) μεταβάλλονται γραμμικά μέχρι και το σημείο θραύσης. Έχει πολύ ψηλή αντοχή σε φορτίσεις παράλληλα στα ανθρακονήματα (1,5GPa κατά μέσο όρο για εφελκυσμό), ενώ καταρρέει πολύ εύκολα για φορτίσεις κάθετα σ' αυτά. Η μεγάλη αντοχή του προέρχεται κυρίως από τις ίνες άνθρακα, οι οποίες έχουν πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας κατά το μήκος τους, αλλά συμβάλει και η πολυμερική μήτρα μοιράζοντας τα φορτία σε μεγάλο όγκο του υλικού.

Αντίστοιχη ανισοτροπικότητα παρουσιάζει και η ηλεκτρική του συμπεριφορά. Η μήτρα PEEK είναι μονωτική, ενώ τα CF αγωγίμα. Έχουμε κατ' αυτόν τον τρόπο μεγάλη αγωγιμότητα κατά τη διεύθυνση των ανθρακονημάτων και σε διευθύνσεις μη παράλληλες προς αυτά, μικρότερη. Η δεύτερη αγωγιμότητα οφείλεται στις επαφές μεταξύ ανθρακονημάτων λόγω κακής στοίχισης τους είτε σε κενά της μήτρας από κατασκευής ή λόγω φθοράς.

Η διαδικασία παραγωγής έχει ως εξής: Το PEEK είναι σε μορφή διαλύματος. Στο διάλυμα αυτό εμβαπτίζονται τα ανθρακονήματα, στην περίπτωση μας παράλληλα μεταξύ τους και στη συνέχεια αφαιρείται ο διαλύτης. Ακολουθεί πέρασμα του υλικού από πιεστήριο σε θερμοκρασία 390°C και διαμορφώνεται κατ' αυτόν τον τρόπο σε φύλλα[8].

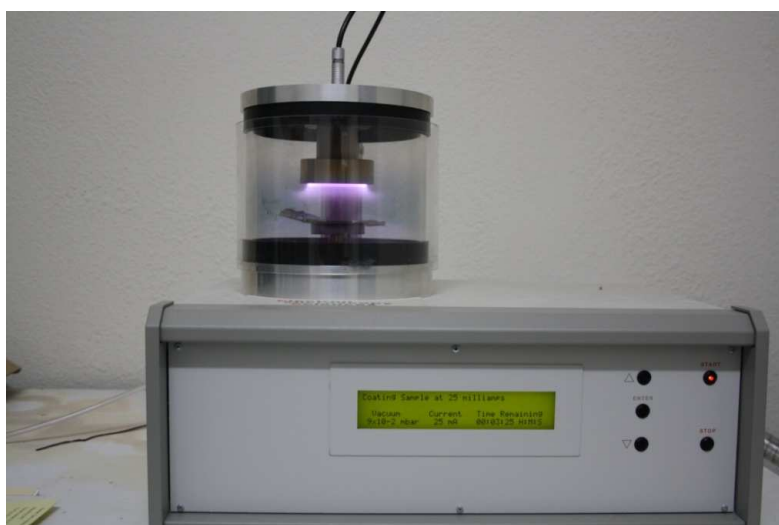
2.2 Προετοιμασία των δοκιμίων

Το PEEK-CF 38%, το υπό δοκιμή υλικό των πειραμάτων μας, έρχεται από την εταιρία που το παρασκευάζει, σε μορφή λωρίδων πάχους 0,15mm, απ' τις οποίες αποκόπτουμε κομμάτια μήκους 60mm παράλληλα στα ανθρακονήματα και 6mm πλάτους, τα οποία μετά από κάποια προετοιμασία, θα χρησιμοποιηθούν ως δοκίμια για τα πειράματα. Τα δοκίμια με αυτές τις διαστάσεις έχουν διατομή 0,9 mm² και το βάρος τους είναι κατά μέσο όρο 0,0788gr [9].

Για να είναι κατάλληλα για τα πειράματα, πρέπει να διαθέτουν ηλεκτρικές επαφές μέσω των οποίων θα διοχετεύουμε ρεύμα και θα μετράμε την ηλεκτρική τάση σε διάφορες ζώνες και να έχουν ανθεκτικά και μονωμένα τελειώματα ώστε να μην «τραυματίζονται» απ' το πιάσιμο της μηχανής εφελκυσμού και να μη δημιουργούν κύκλωμα με τις αρπάγες της.

Αφού λοιπόν τα κόψουμε, τα καλύπτουμε με μια μάσκα, η οποία έχει τρεις οπές διαμέτρου 2,35mm και την κεντράρουμε ώστε η μεσαία τρύπα να πέφτει στο κέντρο του δοκιμίου και οι άλλες δύο εκατέρωθεν κατά το μήκος.

Στη συνέχεια το τοποθετούμε σε μια συσκευή sputtering (Electron Microscopy Science - EMS) στην οποία γίνεται εναπόθεση χρυσού, δημιουργώντας δίσκους, πάχους 60nm με απόσταση 16mm μεταξύ τους, στα σημεία που βρίσκονταν οι οπές της μάσκας. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία και για την άλλη πλευρά και καταλήγουμε να έχουμε 3 χρυσούς δίσκους σε κάθε όψη, οι οποίοι θα αποτελέσουν τη βάση για την παροχή του ρεύματος και τις ηλεκτρικές μετρήσεις.



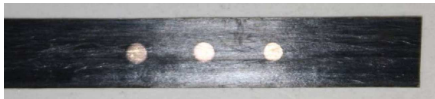
Εικ.2.2.1 Η συσκευή EMS επί τω έργω.[9]



Εικ.2.2.2 Εντός του θαλάμου της EMS αφού δημιουργηθεί κενό, διοχετεύεται αργό, ως βοηθητικό αέριο στη διαδικασία εναπόθεσης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται κατακόρυφη τάση και απ' την «πηγή» χρυσού -πάνω- αποκόλλονται σωματίδια χρυσού τα οποία καταλήγουν στο κάτω μέρος. Ενδιάμεσα παρεμβάλεται το δοκίμιο με τη μάσκα πάνω στο οποίο στρώνεται ο χρυσός.[9]



Εικ.2.2.3 Το δοκίμιο καλυμμένο με μάσκα.[9]



Εικ.2.2.4 Μετά την εναπόθεση των επαφών.[9]

Έπειτα φτιάχνουμε τα τελειώματα, τα οποία είναι κι αυτά από PEEK-CF (4 κομμάτια 10mm x 6mm), και τα κολλάμε στις άκρες του δοκιμίου με εποξειδική κόλλα. Η κόλλα αυτή δημιουργεί μια μονωτική στρώση, η οποία θα απομονώσει το δοκίμιο απ' το κύκλωμα του εφελκυστή.

Σειρά έχουν τα καλώδια χαλκού, τα οποία στερεώνουμε με αγωγίμη κόλλα πάνω στους δίσκους χρυσού και θα είναι τα μέσα για τη σύνδεση του δοκιμίου με τη πηγή ρεύματος και τα μετρητικά της ηλεκτρικής τάσης.

Στη συνέχεια τοποθετούμε το δοκίμιο σε μία βάση για να αποφευχθούν ατυχήματα μέχρι την ώρα του πειράματος και αφού το θερμάνουμε για 45 min στους 80 βαθμούς για να σταθεροποιηθεί η αγωγίμη κόλλα, είναι πλέον έτοιμο για το πείραμα.



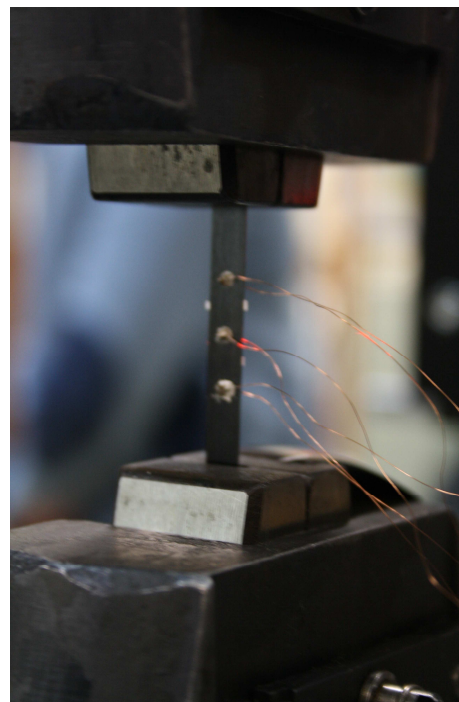
Εικ.2.2.5 Το δοκίμιο στερεωμένο στη βάση του, για ασφαλή μεταφορά. [9]

2.3 Η πειραματική διάταξη

Στο χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων υπάρχει μια μηχανή εφελκυσμού (Instron 1121), στην οποία μπορούμε να ορίσουμε την ταχύτητα απομάκρυνσης των αρπάγων, τα όρια της δύναμης μεταξύ των οποίων θα λειτουργεί και μέγιστη και ελάχιστη απομάκρυνση των αρπάγων.

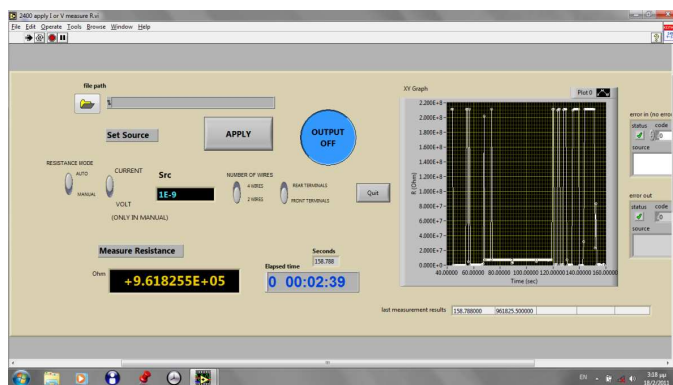
Η Instron μοιράζεται την ίδια βάση με ένα οπτικό μηκυνσιόμετρο (K-100 Fielder Optoelectronics) το οποίο εκπέμπει δέσμη laser στο διάστημα μεταξύ των αρπάγων και απ' την αντανάκλαση που επιστρέφει και την επεξεργασία της δίνει μεταβολές μήκους με πολύ υψηλή ακρίβεια.

Και η Instron και το K-100 στέλνουν συνεχώς τις μετρήσεις τους σε έναν κοινό υπολογιστή, ο οποίος κρατά αρχεία σχετικής επιμήκυνσης-χρόνου(strain-time), πίεσης-χρόνου(stress-time) και σχετικής επιμήκυνσης-πίεσης(strain-stress).

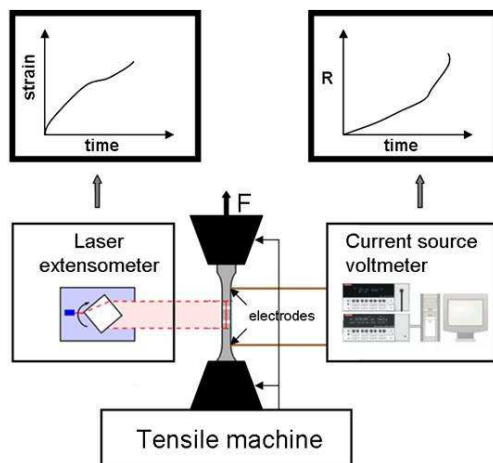


Εικ.2.3.1 και 2.3.2 Αριστερά, η Instron και το K-100 στην κοινή τους βάση. Δεξιά, το δοκίμιο πιασμένο στις αρπάγες του εφελκυστή. [9]

Τα παραπάνω αφορούν τα μηχανικά μεγέθη του πειράματος. Για τις ηλεκτρικές χρησιμοποιήσαμε μια πηγή-μετρητικό ρεύματος-τάσης (Keithley 2400) και δύο μετρητικά ρεύματος-τάσης (Keithley 2182, Keithley 6517). Οι συσκευές Keithley συνδέονταν με τα χαλκοκαλώδια που κατέληγαν στο δοκίμιο, εφαρμόζοντας σε δυο επαφές σταθερό ρεύμα 10mA και μετρώντας την τάση μεταξύ αυτών (2-wire sensing). Ταυτόχρονα μετρούσαν και τις διαφορές τάσης και μεταξύ των υπολοίπων επαφών. Μέσω μιας εξόδου οι μετρήσεις στέλνονταν σ' έναν υπολογιστή, ο οποίος με το πρόγραμμα LabView παρείχε άμεσα εικόνα της εξέλιξης του πειράματος ενώ παράλληλα κρατούσε αρχεία των ηλεκτρικών μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου.



Εικ.2.3.3 Η επιφάνεια εργασίας του LabView.[9]



Εικ.2.3.4 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του πειράματος.[8]

2.4 Επεξεργασία των μετρήσεων:

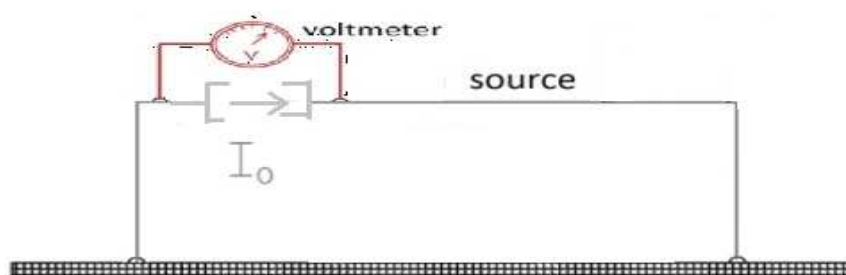
Τα αρχεία με τις μετρήσεις των μηχανικών μεγεθών από την Instron και το K-100 και ηλεκτρικών μεγεθών από το LabView, τα εισάγουμε στη συνέχεια σε ένα κοινό φύλλο εργασίας στο πρόγραμμα Origin Pro 8.5.0, όπου, αφού τα συντονίσουμε βάσει του χρόνου, μετατρέπουμε τις μετρήσεις της ηλεκτρικής τάσης σε σχετικής μεταβολής της τάσης. Μιας και το υλικό μας είναι ωμικό, ισχύει

δηλαδή ο τύπος $R = \frac{V}{I}$ και επίσης το ρεύμα I που εφαρμόσαμε

διατηρείται σταθερό στα 10mA καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, η σχετική μεταβολή της τάσης, $\Delta V/V_0$ ισοδυναμεί με τη σχετική μεταβολή της αντίστασης, $\Delta R/R_0$ όπως προκύπτει απ' τον παρακάτω συλλογισμό:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} = \frac{\frac{V}{I_0} - \frac{V_0}{I_0}}{\frac{V_0}{I_0}} = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Ο τελευταίος τύπος, αν και βολικός, δεν είναι ακριβής αφού στην πράξη στο R_0 έχουν συμψηφιστεί, εκτός από την καθαρή αντίσταση του αφόρτιστου δοκιμίου, που είναι 0,5 Ω παράλληλα στα ανθρακονήματα και 8 Ω κάθετα κατά πάχος σ' αυτά [9], οι R_c του κυκλώματος, δηλαδή, οι αντιστάσεις των καλωδίων και οι αντιστάσεις των ενώσεων των επαφών του δοκιμίου με τα καλώδια, ανεβάζοντας τα μετρούμενα R_0 κατά τα πειράματα σε 10-30 Ω για τη διαμήκη αντίσταση και 30-90 Ω για την εγκάρσια.



$$\Delta R_{\text{σχετικό μετρούμενο}} = \frac{R + R_c - (R_0 + R_c)}{R_0 + R_c} = \frac{R - R_0}{R_0 + R_c} \neq \frac{R - R_0}{R_0} = \Delta R_{\text{πραγματικό σχ}}$$

Το $\Delta R/R_{\text{μετρούμενο}}$ είναι, εν τέλει, πολύ διαφορετικό απ' το $\Delta R/R_{\text{πραγματικό}}$, κάνοντας τις σχετικές μεταβολές της αντίστασης που υπολογίζουμε πολύ μικρότερες απ' ότι στη πραγματικότητα είναι. Ο λόγος για αυτή την μεγάλη ανακρίβεια είναι η 2-wire sensing

μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για τη μέτρηση της τάσης. Από τα ίδια, δηλαδή, καλώδια να γίνεται η παροχή ρεύματος και η μέτρηση της τάσης, μην μπορώντας έτσι να αφήσουμε εκτός τις κυκλωματικές αντιστάσεις απ' τις μετρήσεις μας.

Προτιμήσαμε τη σχετική μεταβολή της αντίστασης απ' αυτή της τάσης, για τον λόγο ότι η αντίσταση είναι ιδιότητα του υλικού και επίσης γιατί αυτή μετράται διεθνώς σε ανάλογα πειράματα. Υπολογίζεται, γενικώς, ο gauge factor [10],

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} = \frac{\delta R}{\varepsilon},$$

η ποσοστιαία δηλαδή, μεταβολή της αντίστασης, δR , προς την αντίστοιχη του μήκους, ε .

Καταλήγουμε, λοιπόν, να έχουμε έναν πίνακα με ισοϋψείς στήλες για τον χρόνο, την σχετική μεταβολή του μήκους, την εφελκυστική τάση και τις σχετικές μεταβολές της αντίστασης απ' της διάφορες ζώνες μετρήσεις, απ' τον οποίο έπειτα μπορούμε να σχεδιάσουμε διαγράμματα, μιας και μας παρέχει αυτή τη δυνατότητα το Origin Pro.

3 - Αποτελέσματα και σχολιασμός:

Στα πειράματα χρησιμοποιήσαμε παροχή ρεύματος σε διαφορετικές διευθύνσεις και μετρήσαμε αντίστοιχα την τάση σε αυτές. Επίσης τα δοκίμια καταπονήθηκαν είτε με έναν εφελκυσμό μέχρι θραύση είτε με κύκλους εφελκυσμού χαλάρωσης.

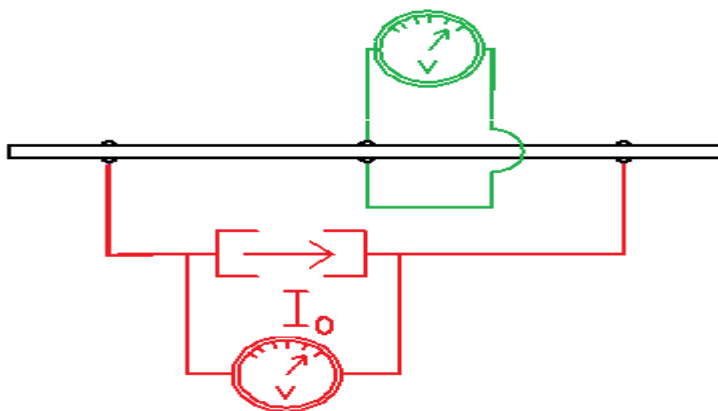
Θα παρουσιαστούν στις παρακάτω ομάδες:

1. Απλός εφελκυσμός μέχρι αστοχία, με:
 - διαμήκη εφαρμογή ρεύματος
 - εγκάρσια εφαρμογή ρεύματος
 - διαγώνια εφαρμογή ρεύματος
2. Κύκλοι εφελκυσμού – χαλάρωσης, με:
 - διαμήκη εφαρμογή ρεύματος
 - διαγώνια εφαρμογή ρεύματος

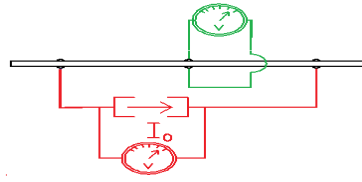
3.1 Απλός εφελκυσμός μέχρι θραύση

3.1.1 Διαμήκης εφαρμογή ρεύματος

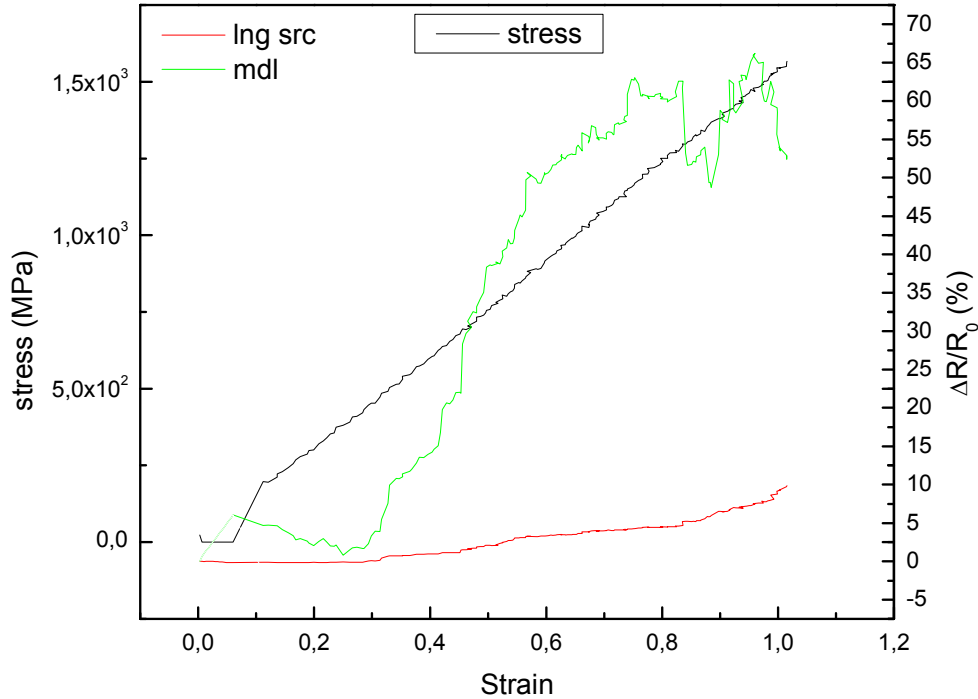
Στην κατηγορία αυτή πειραματιστήκαμε με ένα δοκίμιο μόνο. Όπως και στα υπόλοιπα πειράματα η ταχύτητα απομάκρυνσης των αρπάγων ήταν 4mm/min, ταχύτητα για τη οποία θεωρούμε ότι οι μεταβολές είναι στατικές και δεν εμφανίζονται δυναμικά φαινόμενα. Επίσης το ρεύμα είχε σταθερή παροχή στα 10mA και η συνδεσμολογία του ηλεκτρικού κυκλώματος είναι η εξής:



Σχ.3.1 Κοινά ηλεκτρόδια για εφαρμογή σταθερού ρεύματος και για την μέτρηση της τάσης, στα άκρα της ίδιας πλευράς του δοκιμίου. Ένα δεύτερο βολτόμετρο καταγράφει τις μεταβολές της τάσης στο μέσο του δικιμίου.

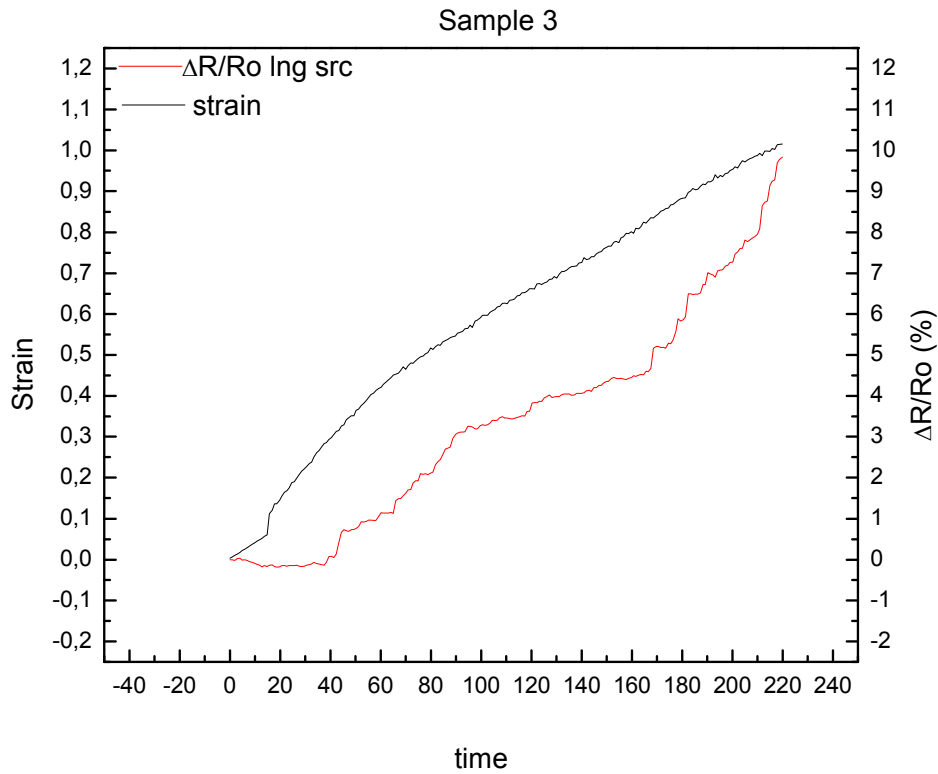
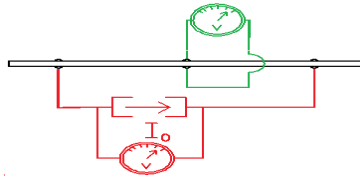


sample3



Γρ.3.1.1 Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στη σχετική μεταβολή της αντίστασης που μετριέται απ' τα ηλεκτρόδια απ' τα οποία περνάει και το ρεύμα. Η πράσινη στο $\Delta R/R_0$ εγκάρσια στο μέσο του δοκιμίου.

Μια πρώτη παρατήρηση είναι η διαφορά απόκρισης κατά τον εφελκυσμό, της εγκάρσιας στο μέσο $\Delta R/R_0$, σε σχέση με αυτές που μετρηθήκαν κατά μήκος του δοκιμίου. Η πράσινη γραμμή, που απεικονίζει την μεταβολή της αντίστασης κάθετα στο μέσο του δοκιμίου, αν και αρκετά ακανόνιστη, μας φανερώνει πως υπάρχει ροή ηλεκτρισμού και σε διευθύνσεις κάθετες στα ανθρακονήματα και ότι αυτή επηρεάζεται από τη μηχανική καταπόνηση. Το PEEK-CF παρουσιάζει μεγάλη ανισοτροπία τόσο μηχανική όσο και ηλεκτρική, παράλληλα και κάθετα στη διεύθυνση των ανθρακονημάτων. Ακολουθεί το διάγραμμα μόνο της $\Delta R/R_0$ συγγραμμικά της ηλεκτρικής πηγής σε καταλληλότερη κλίμακα:

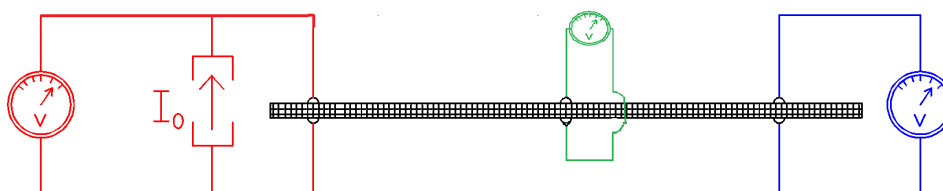


Γρ.3.1.2 Η καμπύλη $\Delta R/R_0$ κατά μήκος του δοκιμίου και συγγραμμικά με το ρεύμα.

Στο Γρ.3.1.2 παρατηρούμε ότι η σχετική αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με το strain. Έχουμε δηλαδή αύξηση της αντίστασης που οφείλεται στην αύξηση του μήκους, αλλά δεν βλέπουμε κάποια προειδοποίηση πριν το δοκίμιο σπάσει για **strain 1,02% (αντίστοιχο $\Delta R/R_0$ 9,84%)**. Κάποια απότομα αλματάκια στην καμπύλη της αντίστασης υποδηλώνουν σπασίματα ινών. Ένα ανθρακόνημα που σπάει, είναι ένας αγωγίμος δρόμος λιγότερος κατά μήκος του δοκιμίου και οδηγεί σε μικρή, απότομη αύξηση της διαμήκους αντίστασης.

3.1.2 Εγκάρσια εφαρμογή ρεύματος

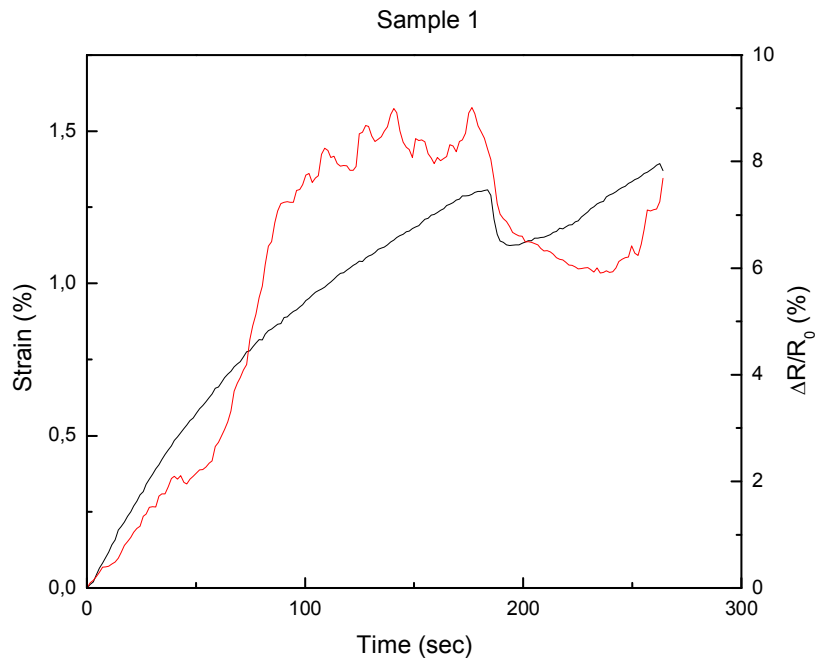
Στην κατηγορία αυτή, η εφαρμογή του ρεύματος έγινε κατά πάχος στο ένα άκρο των δοκιμίων στο οποίο μετρήσαμε και την αντίστοιχη πτώση τάσης απ' τα ίδια ηλεκτρόδια απ' τα οποία πέρασε και το ρεύμα.



Σχ.3.2 Εφαρμογή ρεύματος στο ένα άκρο. Παρακολούθηση της αντίστασης σε τρεις ζώνες εγκάρσια κατά πάχος στο δοκίμιο.

Κοινά ηλεκτρόδια (2-wire sensing) για εφαρμογή ρεύματος και μέτρηση ηλεκτρικής τάσης χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα πειράματα. Επίσης στα πιο πολλά δοκίμια υπήρχαν ηλεκτρόδια κάθετα στο άλλο άκρο καθώς και στο μέσο των δοκιμίων απ' τα οποία παρακολουθούσαμε τις μεταβολές της τάσης και σ' αυτές τις ζώνες. Κόκκινο έχει χρησιμοποιηθεί για τα $\Delta R/R_0$ συγγραμμικά με το ρεύμα. Πράσινο για τις σχετικές μεταβολές τάσης στο μέσο και μπλε για το άλλο άκρο. Η αρίθμηση των δοκιμίων έγινε βάσει της σειράς με την οποία προετοιμάστηκαν.

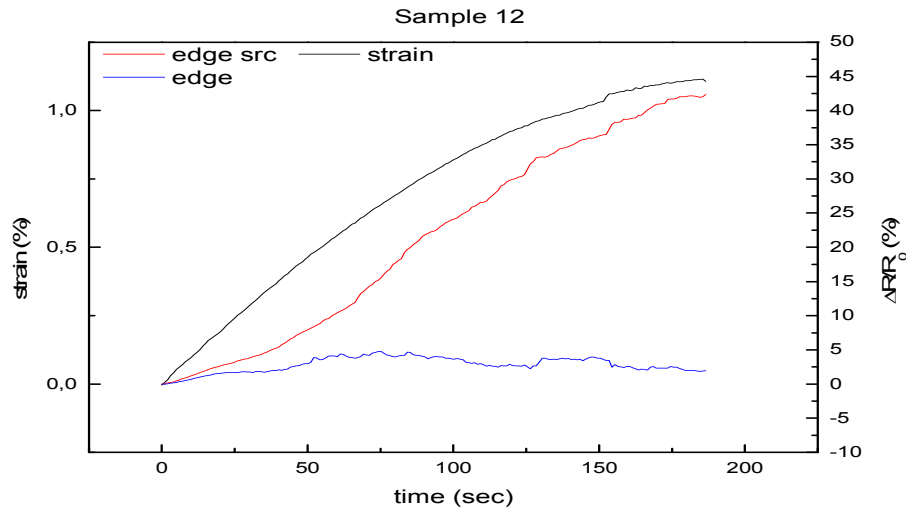
Καθότι τα R_0 παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις τόσο μεταξύ δοκιμίων, όσο και μεταξύ διαφορετικών σημείων εντός του ίδιου δοκιμίου ($27\Omega \sim 59\Omega$), δίνουμε βάση περισσότερο στην γενική εικόνα των $\Delta R/R_0$ και όχι στις ακριβείς τιμές που αυτή λαμβάνει.



Γρ.3.1.3 Το δοκίμιο κάποια στιγμή γλίστρησε. Η $\Delta R/R_0$ είναι κατά πάχος του δοκιμίου και παράλληλα στο ρεύμα. Strain κατά τη θραύση 1,40%.

Το δοκίμιο 1 «γλίστρησε» για λίγο απ' τις αρπάγες της Instron κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού αλλά βλέπουμε πως η αντίσταση αποκρίθηκε στη απότομη σμίκρυνση του υλικού και ακολούθησε την πορεία του strain.

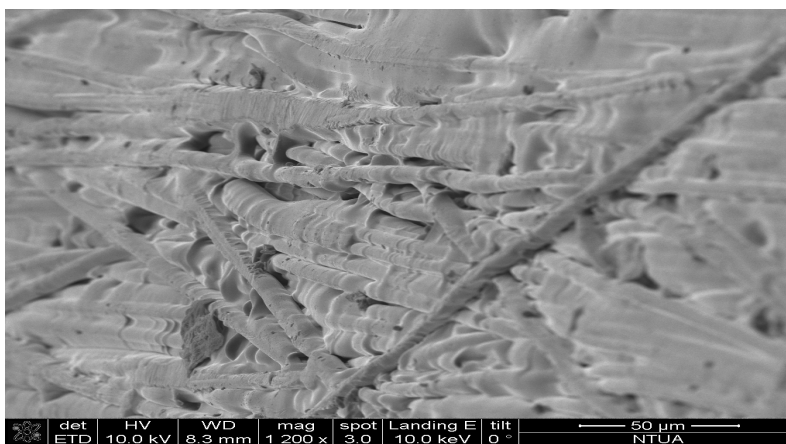
Τις απότομες αυξομειώσεις της $\Delta R/R_0$, που εμφανίζονται μετά τα 100 sec, δεν τις αναλύουμε γιατί μπορεί να οφείλονται στο κακό πιάσιμο στον εφελκυστή. Γενικώς, υπάρχει κάποια επιρροή απ' τον τρόπο που σφίγγει η μηχανή εφελκυσμού το δοκίμιο στην ηλεκτρική του αντίσταση, την οποία όμως δεν έχουμε ορίσει και έχουμε περιοριστεί απλώς να συνυπολογίζουμε τον παράγοντα αυτό, στην αρχική αντίσταση, R_0 , του κάθε δοκιμίου.



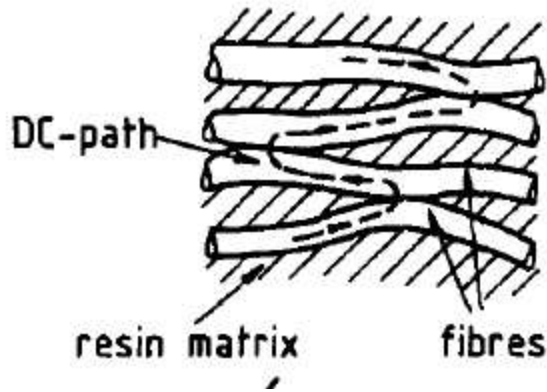
Γρ.3.1.4 Η $\Delta R/R_0$ στα άκρα της πηγής ρεύματος ακολουθεί το strain και απειρίζεται κατά τη θραύση (strain: 1,10%) χωρίς να προειδοποιεί.

Το δοκίμιο 12, όπως και τα τρία δοκίμια που ακολουθούν, έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Η αντίσταση, συγγραμμικά του ρεύματος, αυξάνεται καθώς το δοκίμιο επιμηκύνεται χωρίς να παρουσιάζει κάποια απότομη μεταβολή, που να μπορεί να θεωρηθεί προειδοποίηση για την επερχόμενη αστοχία.

Οι δύο εικόνες που ακολουθούν είναι διαφωτιστικές για το που οφείλεται η αγωγιμότητα εντός των PEEK-CF, σε διευθύνσεις άλλες απ' αυτή που είναι προσανατολισμένα τα ανθρακονήματα.[8]

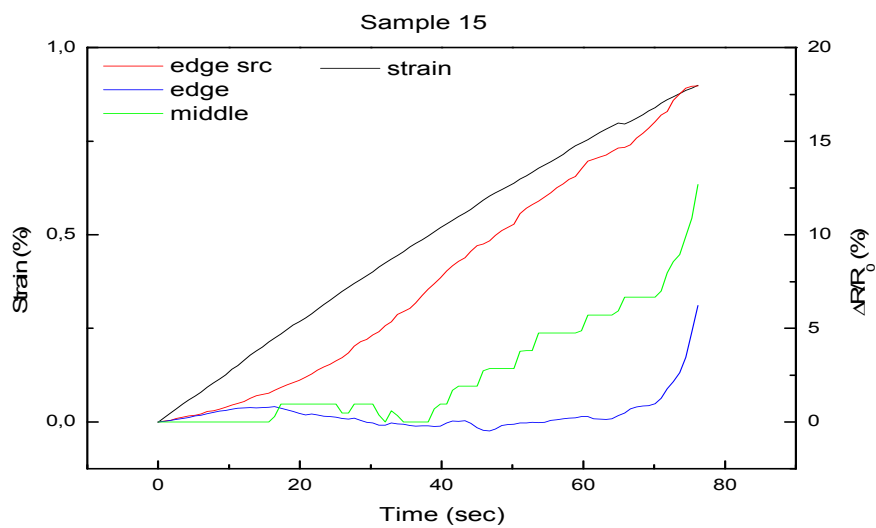
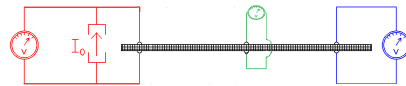


Εικ.3.1.1 Η εικόνα αυτή είναι παρμένη μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM). Είναι εμφανές ότι τα ανθρακονήματα δεν είναι σε καμιά περίπτωση ούτε απόλυτα ίσια, ούτε απολύτως στοιχισμένα. [8]

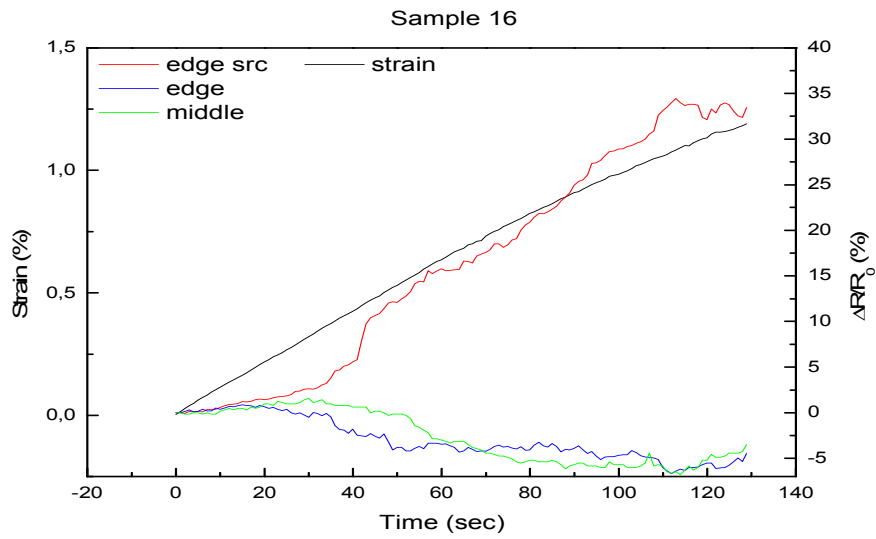
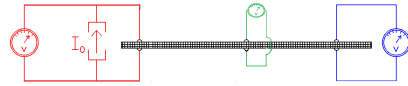


Εικ.3.1.2 Στο σχέδιο αυτό, βλέπουμε ένα αγώγιμο μονοπάτι κάθετα στα ανθρακονήματα.[11]

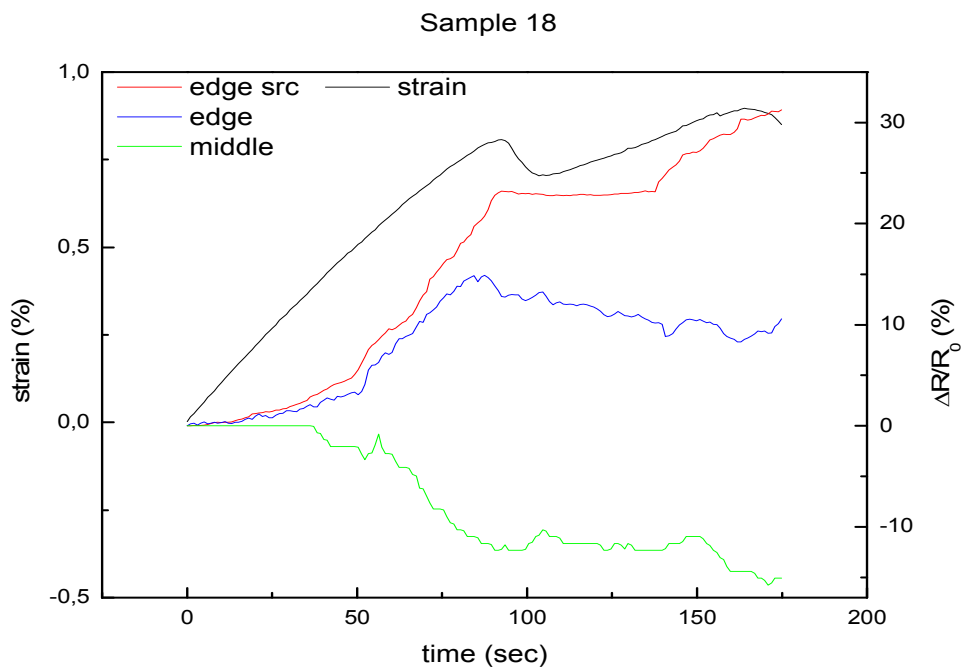
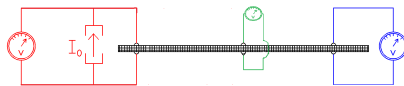
Κάθετα στη διεύθυνση των ανθρακονημάτων, η αύξηση της αντίστασης οφείλεται στην αύξηση του βαθμού της στοίχισης των ινών καθώς τα δοκίμια εφελκύνονται και στην επαγόμενη μείωση των σημείων που έρχονται σε επαφή. Οι επαφές αυτές ευθύνονται για την αγωγιμότητα σε διευθύνσεις πέραν αυτής των ανθρακονημάτων αφού το PEEK είναι μονωτικό υλικό.



Γρ.3.1.5 Το $\Delta R/R_0$ στη διεύθυνση του ρεύματος ακολουθεί το strain όπως συμβαίνει και στα περισσότερα δοκίμια. Strain κατά τη θραύση: 0,90%



Γρ.3.1.6 Αναμενόμενη συμπεριφορά της αντίστασης. Το δοκίμιο αστοχεί για strain 1,20%.



Γρ.3.1.7 Κι εδώ είχαμε γλίστρημα απ' τις αρπάγες τις Instron και πάλι βλέπουμε την (κόκκινη) να ακολουθεί την πορεία του strain μέχρι τη θραύση στο 0,89%.

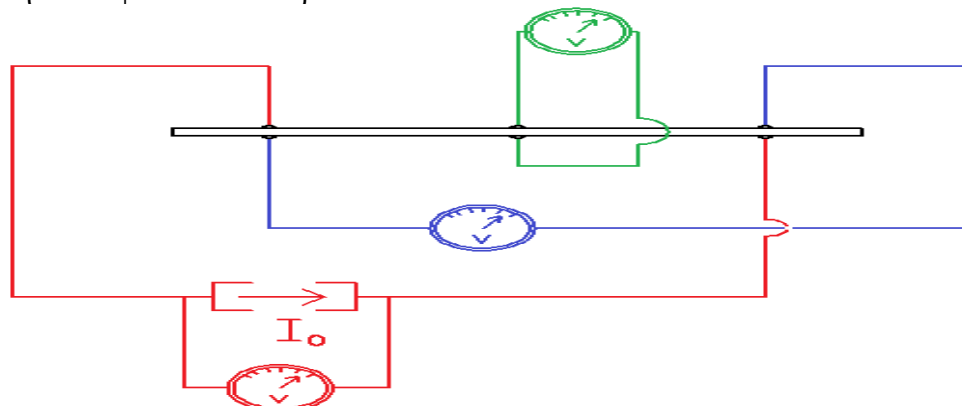
Ακολουθεί μια παράθεση των τιμών της σχετικής μεταβολής του μήκους με αυτές της αντίστασης κατά τη στιγμή της θραύσης:

	Strain	$\Delta R/R_0$
• sample_01:	1,40%	9%
• sample_12:	1,10%	42%
• sample_15:	0,90%	18%
• sample_16:	1,20%	32%
• sample_18:	0,89%	31%

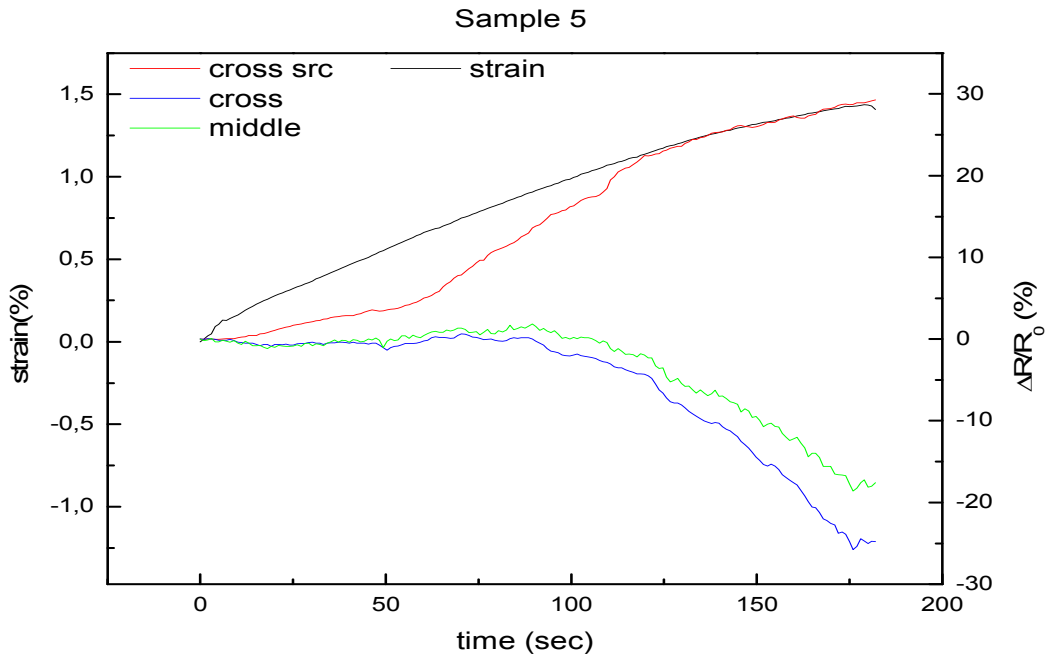
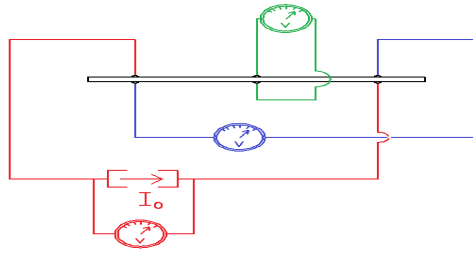
Οι όποιες παρατηρήσεις στα προηγούμενα διαγράμματα έγιναν πάνω στις μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης στη διεύθυνση εφαρμογής του σταθερού ρεύματος, ενώ έμειναν ασχολίαστες οι καμπύλες που προέκυψαν απ' τις μετρήσεις της τάσης στο μέσο και το άλλο άκρο, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία, όπως επίσης είναι περίπλοκος και αδιευκρίνιστος ο τρόπος που διαδίδεται το ρεύμα εντός του PEEK-CF σε διεύθυνση άλλη απ' αυτή της εφαρμογής του.

3.1.3 Διαγώνια εφαρμογή ρεύματος

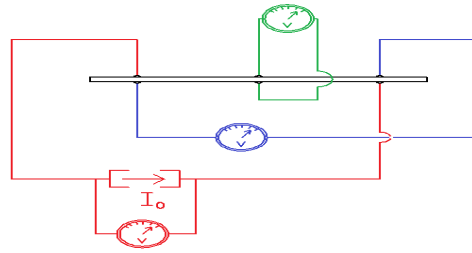
Όπως και στα προηγούμενα, το ρεύμα διατηρείται σταθερό στα 10mA μόνο που εδώ τα ηλεκτρόδια απ' τα οποία περνά το ρεύμα βρίσκονται σε διαφορετικά άκρα των δύο πλευρών. Η συνδεσμολογία είναι αυτή που φαίνεται παρακάτω:



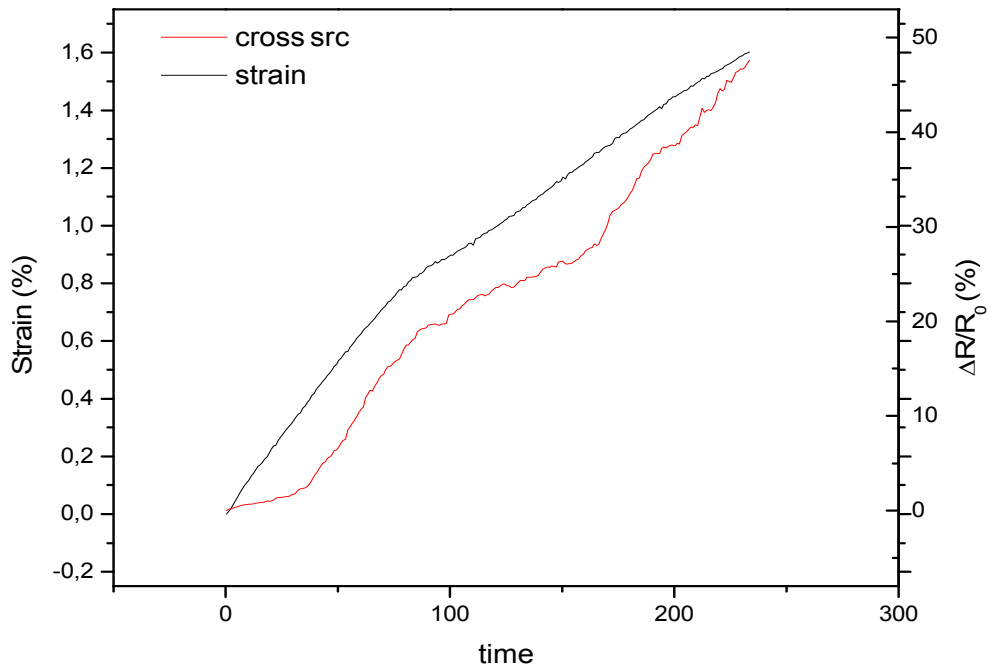
Σχ.3.3 Τρία βολτόμετρα καταγράφουν τις μεταβολές της τάσης στο δοκίμιο ενώ αυτό εφελκείται. Ένα παράλληλα με το ρεύμα, ένα κάθετα στο μέσο του δοκιμίου και ένα διαγώνια στα δύο άλλα άκρα.



Γρ.3.1.8 Η αντίσταση παράλληλα στο ρεύμα (κόκκινο) αυξάνεται κατά την επιμήκυνση του δοκιμίου και απειρίζεται όταν αυτό αστοχεί για strain 1,4%.



Sample 22



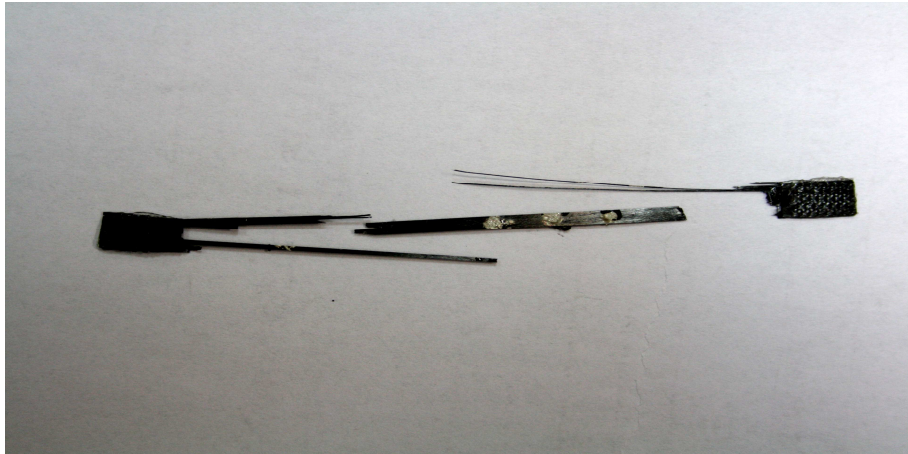
Γρ.3.1.9 Το δοκίμιο εφελκύεται μέχρι strain 1,60% όπου και αστοχεί.

Παράθεση των μέγιστων τιμών του strain με της $\Delta R/R_0$:

	maxStrain	max $\Delta R/R$
Sample_05:	1,40%	30,55%
Sample_22:	1,60%	47,59%

Μια παρατήρηση που δεν είναι εμφανής στα διαγράμματα, είναι η εξής:

Ενώ σπάνε αρκετά ανθρακονήματα κατά τον εφελκυσμό, τα οποία και ακούμε κατά τη διάρκεια του πειράματος και απεικονίζονται στην καμπύλη της αντίστασης, η θραύση επέρχεται πάντα εξ' αιτίας της εκτεταμένης αποκόλλησης των νημάτων απ' τη μήτρα σε διάφορα επίπεδα κάθετα στην πλατιά πλευρά και παράλληλα στον μηχανική τάση. Αντιπροσωπευτική φωτογραφία δοκιμίου μετά τη θραύση φαίνεται στην εικόνα 3.1.3.



Εικ.3.1.3 Δοκίμιο μετά τη θραύση.[9]

Παρακολούθηση της αντίστασης στη διάσταση της λεπτής πλευράς του δοκιμίου θα ήταν μάλλον πιο διαφωτιστική για τις διεργασίες που οδηγούν στην αστοχία, αφού είναι φανερό ότι οι ζημιές είναι εκτεταμένες στο επίπεδο αυτό και είναι αυτές στις οποίες οφείλεται η κατάρρευση του υλικού.

Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει συγκεντρωτικά στοιχεία που προέκυψαν από τους μονούς εφελκυσμούς:

Δοκίμιο	Strain %	Stress MPa	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Max ΔR/Ro (%)	
				είδος	
1	1,4	1550	125	εγκάρσια	9
3	1,02	1560	162	διαμήκης	10
5	1,4	1880	138	διαγώνια	31
12	1,1	1600	146	εγκάρσια	42
15	0,9	1000	114	εγκάρσια	18
16	1,2	1600	146	εγκάρσια	34
18	0,89	1200	132	εγκάρσια	31
22	1,6	1910	119	διαγώνια	48
M.O	1,19	1538	135		

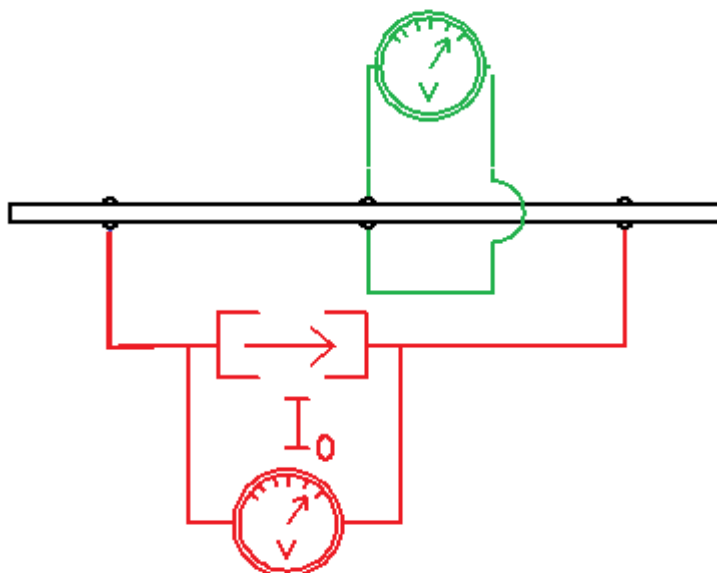
Τις τιμές της αντίστασης τις παραθέτουμε αλλά υπενθυμίζουμε ότι δεν πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη, καθώς εφαρμόσαμε 2-wire sensing και οι R₀ είχαν μεγάλες διακυμάνσεις από δοκίμιο σε δοκίμιο.

3.2 Κύκλοι εφελκυσμού-χαλάρωσης

Στα πειράματα που ακολουθούν τα δοκίμια έχουν υποστεί πολλαπλούς κύκλους εφελκυσμού και χαλάρωσης προτού οδηγηθούν στη θραύση. Οι ηλεκτρικές συνδεσμολογίες είναι ίδιες με τα προηγούμενα. Επίσης το ρεύμα κι εδώ είναι συνεχές και διατηρείται σταθερό στα 10mA. Η ταχύτητα των αρπάγων είναι σταθερά στα 4mm/min.

3.2.1 Διαμήκης εφαρμογή ρεύματος

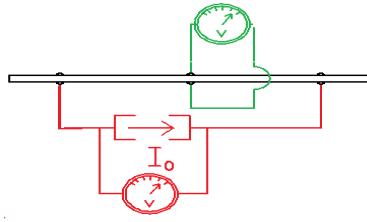
Η συνδεσμολογία του πειράματος:



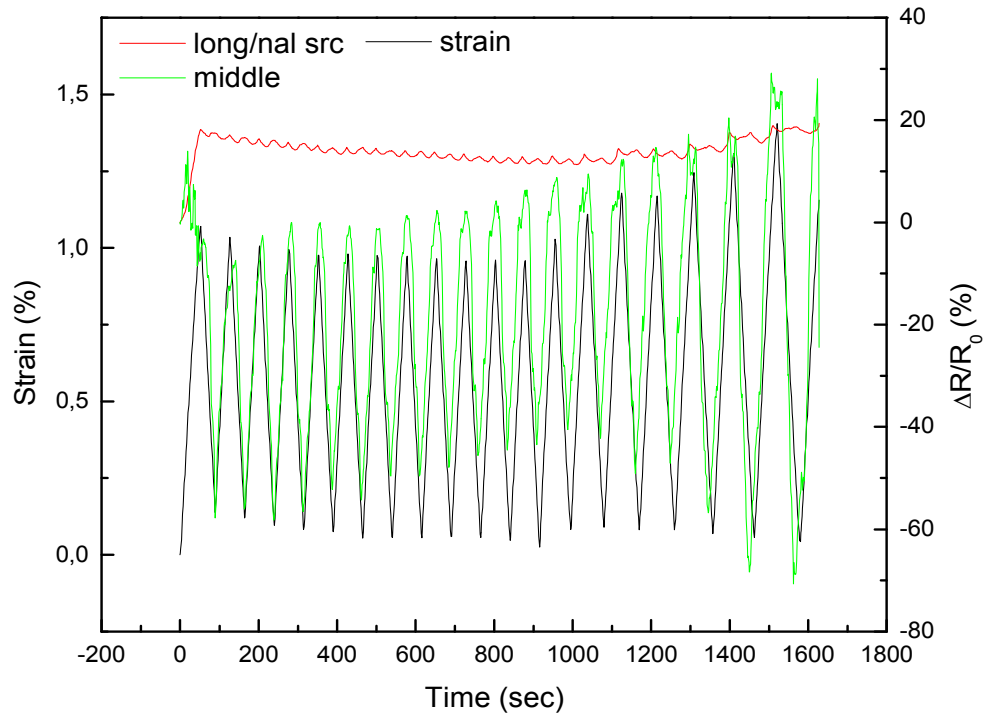
Κοινά ηλεκτρόδια για εφαρμογή σταθερού ρεύματος και για την μέτρηση της τάσης, στα άκρα της ίδιας πλευράς του δοκιμίου. Ένα δεύτερο βολτόμετρο καταγράφει τις μεταβολές της τάσης, εγκάρσια κατά πάχος στο μέσο του δοκιμίου.

Στην κατηγορία αυτή καταπονήσαμε ένα μόνο δοκίμιο. Οι πρώτοι 12 κύκλοι γίνανε με strain μεταξύ 0,10% και 0,98%. Στη συνέχεια αυξάναμε σε κάθε κύκλο το strain μέχρι που τελικά, το δοκίμιο έσπασε στον 20ό κύκλο για **strain 1,46%** και **stress 1430MPa**.

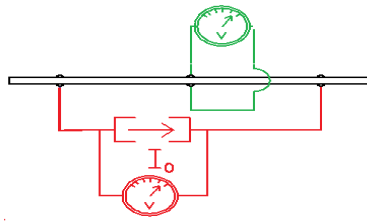
Στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζονται και η διαμήκης αντίσταση και η κάθετη στο μέσο του δοκιμίου. Γίνεται πάλι εμφανές ότι η εγκάρσια αντίσταση επηρεάζεται πολύ εντονότερα από τις μεταβολές του μήκους σε σχέση με τη διαμήκη.



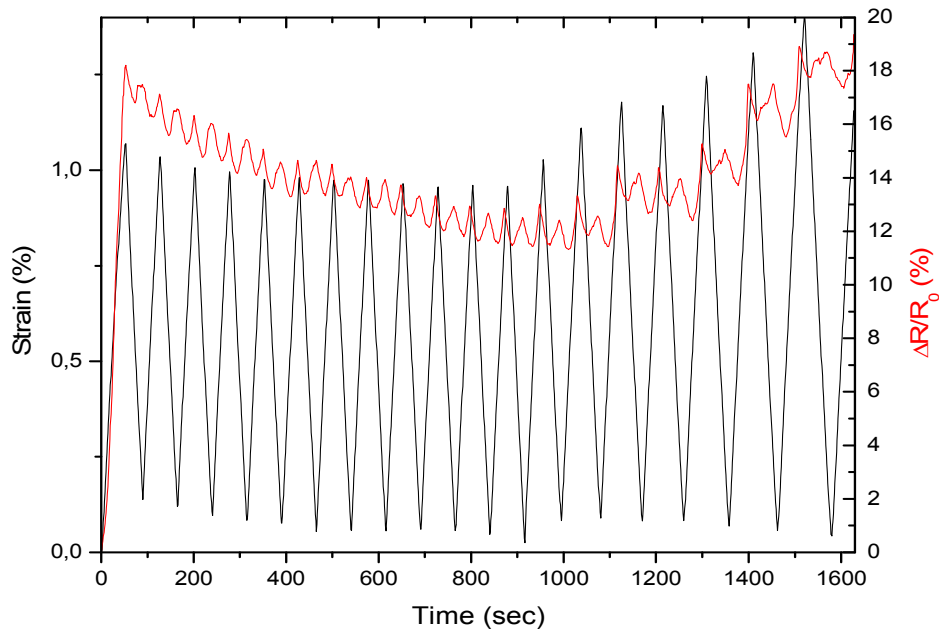
Sample 14



Γρ.3.2.1 Σχετικές μεταβολές του μήκους (μαύρο) και της αντίστασης κατά μήκος (κόκκινο) και καθέτως στο μέσο (πράσινο) του δοκιμίου ως προς τον χρόνο.



Sample 14



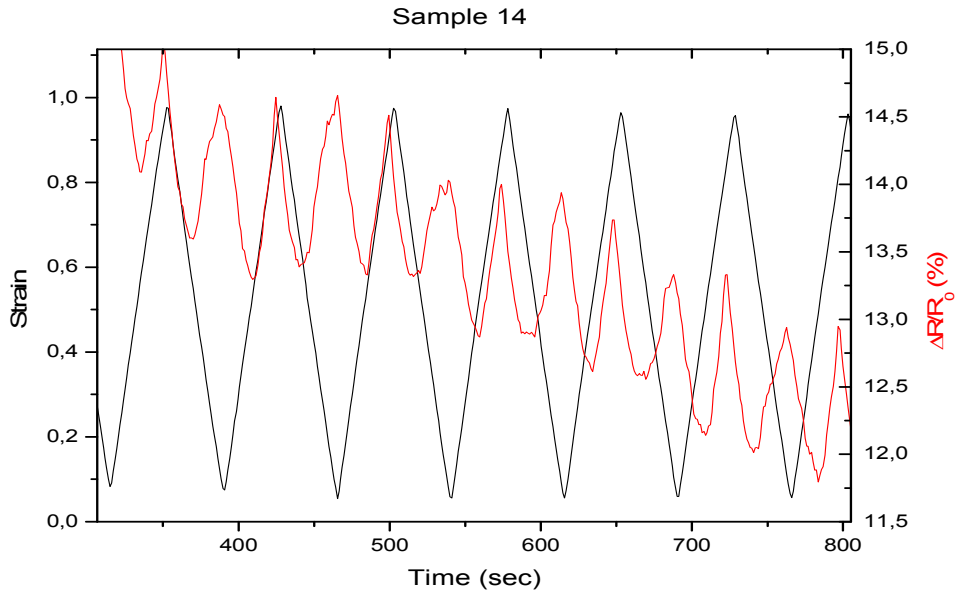
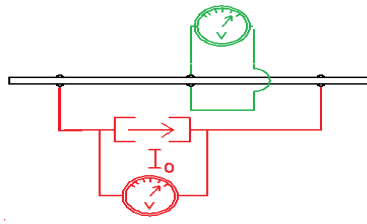
Γρ.3.2.2 Strain και σχετική μεταβολή της αντίστασης κατά μήκος του δοκιμίου και κατά τη φορά του ρεύματος ως προς τον χρόνο.

Κατά τον πρώτο εφελκυσμό επέρχεται μια μεγάλη αύξηση της αντίστασης η οποία δεν είναι αναστρέψιμη. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πλαστική παραμόρφωση της μήτρας και την αποκόλληση κάποιων ινών απ' αυτή [1] και στην απώλεια πολλών επαφών μεταξύ των νημάτων κατά το τέντωμα αφού όπως είδαμε και νωρίτερα δεν υπάρχει απόλυτη στοίχιση, πέρα βέβαια από το σπάσιμο κάποιου αριθμού ανθρακονημάτων.

Μετά το πρώτο τράβηγμα και για τους επόμενους κύκλους όπου έχουμε σταθερή διακύμανση του strain, παρατηρούμε μια πτωτική πορεία της καμπύλης αναφοράς (baseline) της $\Delta R/R_0$, με τάση να εξομαλυνθεί. Ενώ, δηλαδή, κάθε κύκλος εφελκυσμού χαλάρωσης προξενεί όμοια διακύμανση, σταθερού σχεδόν εύρους, στη $\Delta R/R_0$, αυτή πέφτει κατά ένα σκαλοπατάκι το οποίο μειώνεται με την πάροδο των κύκλων.

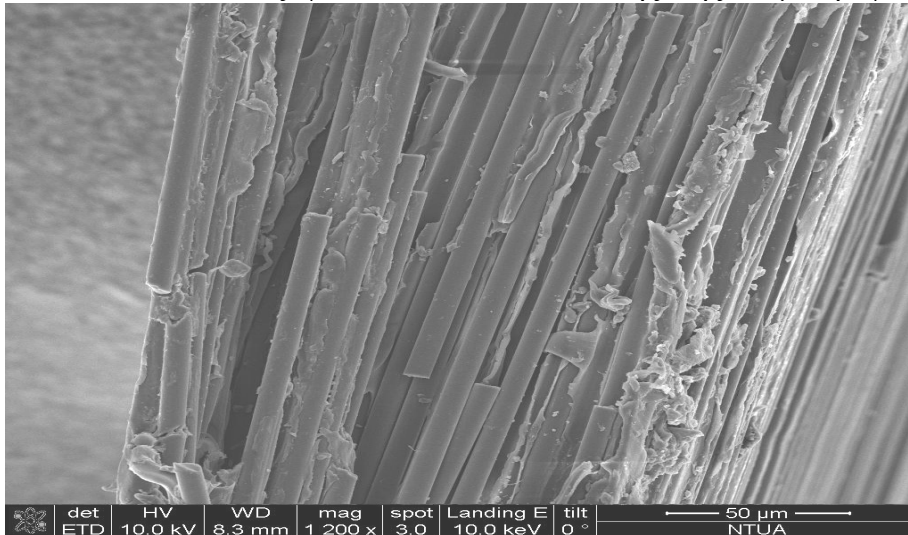
Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στο σταδιακό τρίψιμο της μήτρας και στη επαγόμενη μείωση της μόνωσης μεταξύ των ανθρακονημάτων.

Ένα ζουμάρισμα στο παραπάνω γράφημα αποκαλύπτει κι άλλες μη γραμμικές αποκρίσεις της αντίστασης του PEEK-CF στις μεταβολές του μήκους.



Γρ.3.2.3 Αύξηση της R ενώ το δοκίμιο επανέρχεται στο αρχικό του μήκος και αντίστροφα μείωση κατά την έναρξη της επιμήκυνσης. Διπλός κύκλος του $\Delta R/R_0$ σε έναν κύκλο εφελκυσμού χαλάρωσης.

Παραθέτουμε μια εικόνα του PEEK-CF, μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, που ίσως φωτίσει τα αίτια αυτής της συμπεριφοράς:



Εικ.3.2.1 Πλάγια όψη θραυσμένου δοκιμίου. Πολλά ανθρακονήματα δεν είναι συνεχή μέσα στο σύνθετο υλικό. Ακρες νημάτων βρίσκονται ανάμεσα σε άλλα νήματα. Η επιφάνεια της ρηγματωμένης μήτρας έχει εκτραχυνθεί και έχουν σχηματιστεί ινώματα και ογκίδια.[8]

Απ' τη μία έχουμε τον γεωμετρικό παράγοντα, για τη μεταβολή της αντίστασης που περιγράφεται απ' τον τύπο:

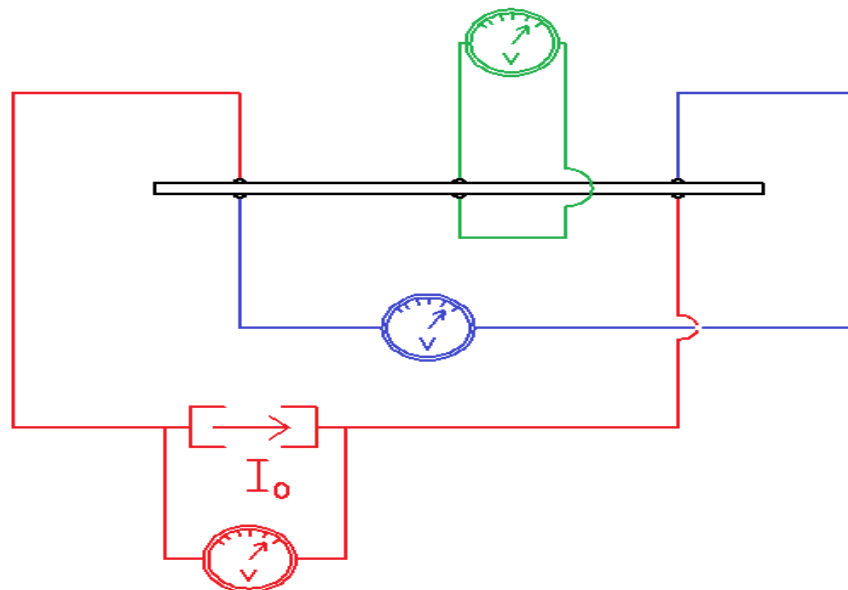
$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

Εφελκυσμός. Αύξηση του μήκους l και στένωση της διατομής A , βάσει του φαινομένου Poisson, προκαλούν αύξηση του R . Αντίστροφη διαδικασία κατά τη χαλάρωση.

Απ' την άλλη, το φθαρμένο ΡΕΕΚ, κατά τη χαλάρωση του δοκιμίου και την επαναφορά του στο αρχικό του μήκος, εισχωρεί ακανόνιστα ανάμεσα στα ανθρακονήματα προκαλώντας την αύξηση του R που παρατηρούμε κατά τη φάση της χαλάρωσης και στη συνέχεια το φαινόμενο υποχωρεί κατά το πρώτο στάδιο του εφελκυσμού, οπότε και επανερχόμαστε στη γραμμικότητα $\Delta R/R - \text{strain}$.

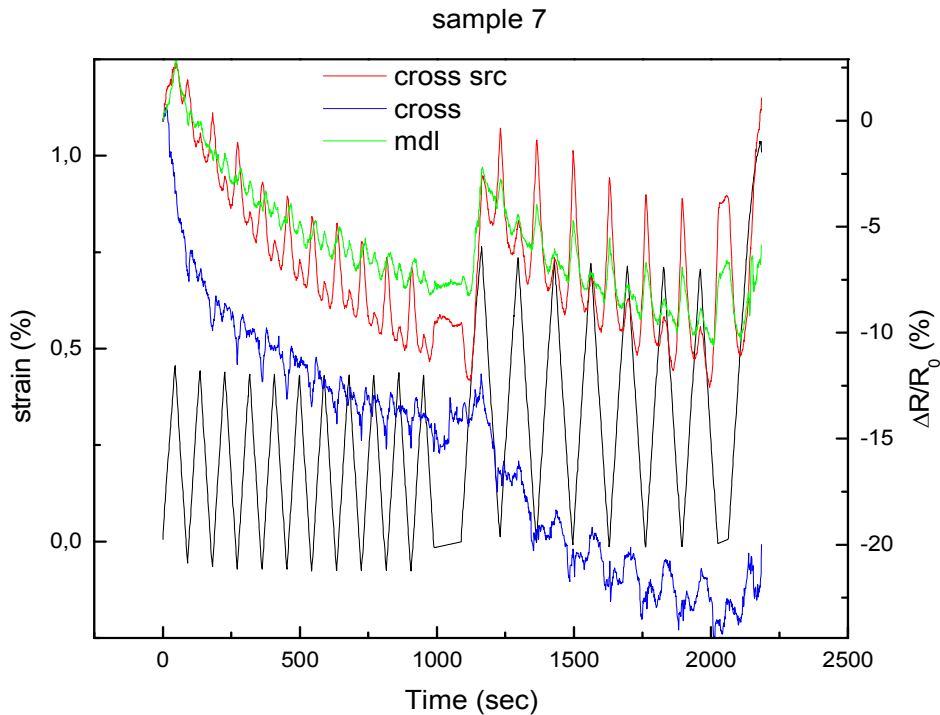
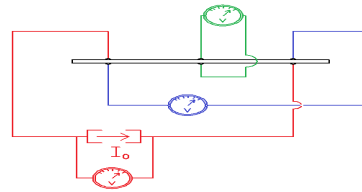
3.2.2 Διαγώνια εφαρμογή ρεύματος

Οι ηλεκτρική συνδεσμολογία που εφαρμόστηκε σ' αυτά τα πειράματα είναι η εξής:



Τρία βολτόμετρα καταγράφουν τις μεταβολές της τάσης στο δοκίμιο ενώ αυτό εφελκύεται. Ένα παράλληλα με το ρεύμα, ένα κάθετα στο μέσο του δοκιμίου και ένα διαγώνια στα δύο άλλα άκρα.

Με εφαρμογή ρεύματος διαγωνίως και αντίστοιχη μέτρηση τάσης, πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα κυκλικής φόρτισης. Παραθέτουμε κάποια απ' αυτά.



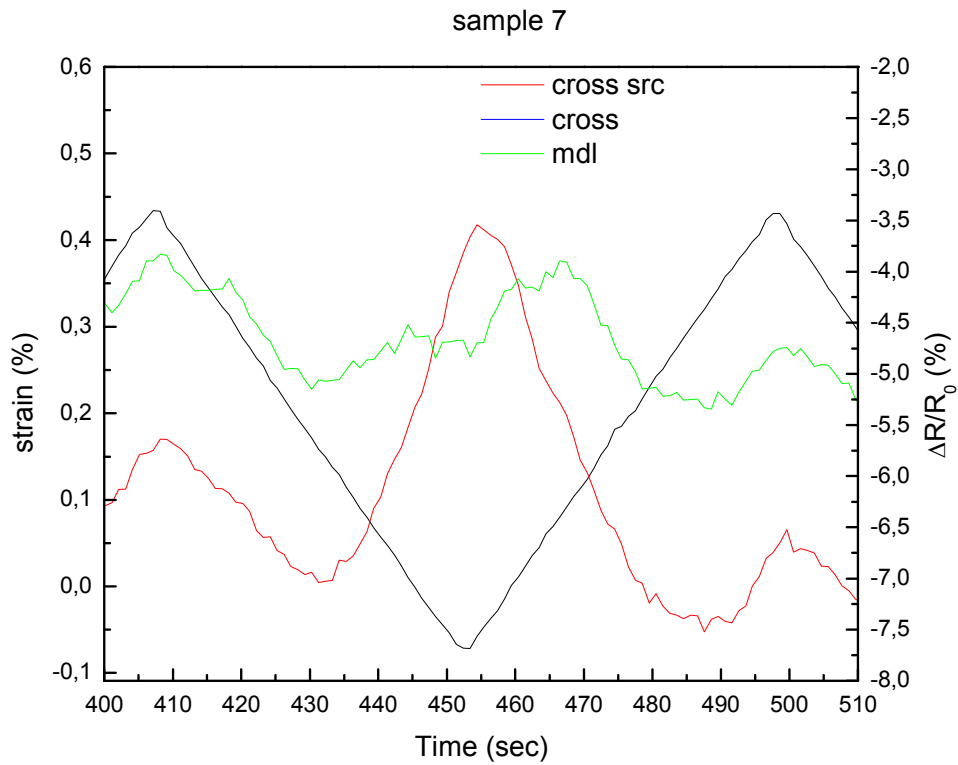
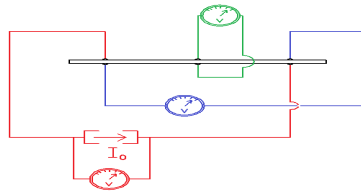
Γρ.3.2.4 Με μαύρο το strain. Για τις σχετικές μεταβολές της αντίστασης έχουμε κόκκινο για διαγώνια και παράλληλα στο ρεύμα, μπλε διαγώνια μεταξύ των άλλων άκρων και πράσινο κάθετα στο μέσο του δοκιμίου.

Στο δοκίμιο 7, ασκήσαμε την εξής καταπόνηση. 11 κύκλους εφελκυσμού - χαλάρωσης μεταξύ strain $-0,03\%$ και $0,44\%$, στη συνέχεια 7 κύκλους μεταξύ $-0,01\%$ και $0,73\%$ και τέλος το εφελκύσαμε μέχρι να σπάσει με σχετική επιμήκυνση $1,03\%$. Οι αρνητικές τιμές της $\Delta R/R_0$ οφείλονται στο γεγονός ότι η αντίσταση έπαιρνε μικρότερες τιμές από τη αρχική R_0 .

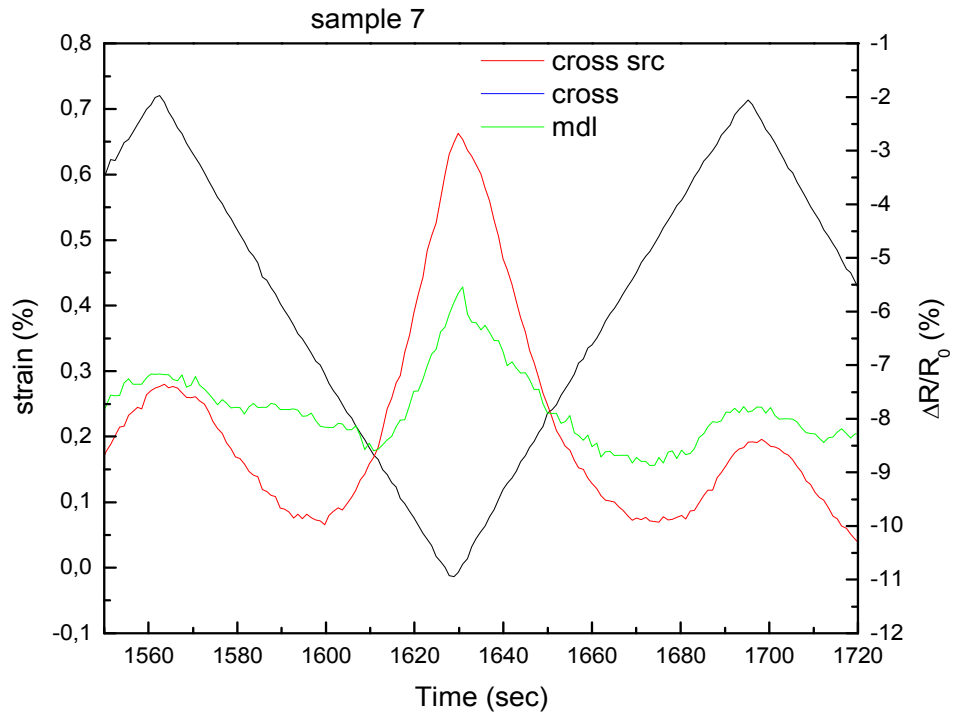
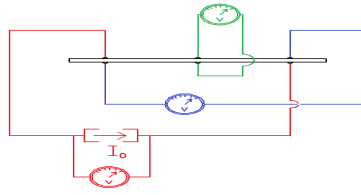
Παρατηρώντας τις baselines της σχετικής μεταβολής της τάσης και στις τρεις ζώνες διαπιστώνουμε, όπως και πριν, μια πτωτική πορεία με τάση να εξομαλυνθούν, που την αποδίδουμε στη κλιμακωτή φθορά (τρίψιμο, σκάσιμο) της μήτρας.

Οι αυξομειώσεις του μήκους φθείρουν τη μήτρα, έντονα κατά τους πρώτους κύκλους με σταδιακή μείωση όσο προχωρούν οι κύκλοι. Φθορά της μήτρας συνεπάγεται μειωμένη μόνωση για τα

ανθρακονήματα και επομένως φθίνουσα αντίσταση για το σύνθετο υλικό.

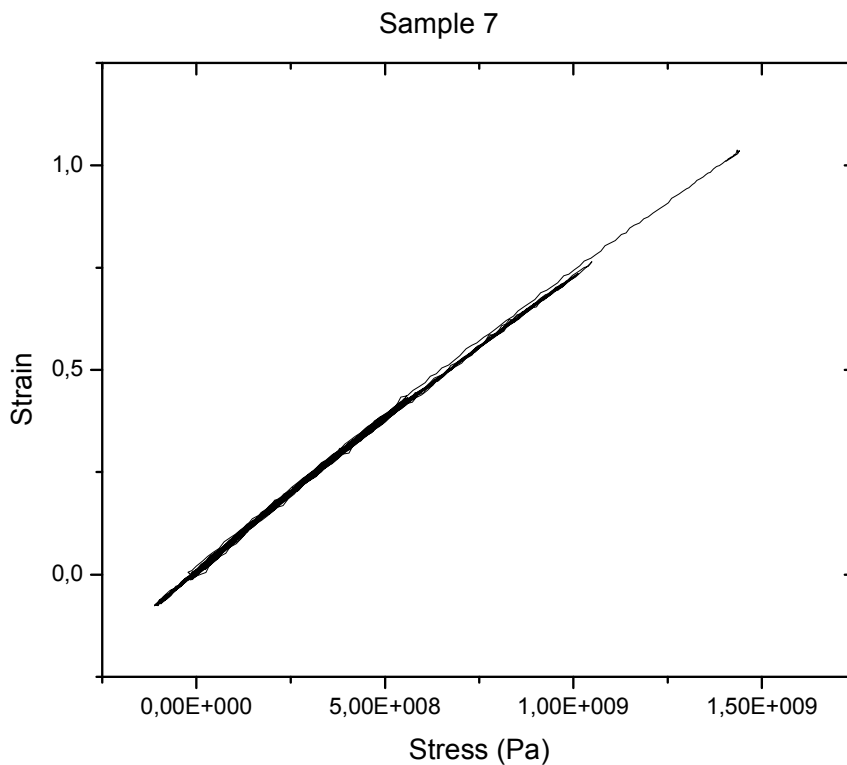


Γρ.3.2.5 Εμφάνιση δεύτερης κορυφής στη καμπύλη $\Delta R/R$ σε έναν κύκλο εφελκυσμού -χαλάρωσης. Δεν υπάρχει μονοτονικότητα μεταξύ επιμήκυνσης και ηλεκτρικής αντίστασης στα δοκίμια που έχουν υποστεί κόπωση.



Γρ.3.2.6 Η 2^η κορυφή μεγαλώνει για μεγαλύτερη διακύμανση του strain.

Απ' τα δύο προηγούμενα γραφήματα, διαπιστώνουμε και πάλι ότι η χαλάρωση μετά από έναν εφελκυσμό δεν διακρίνεται από γραμμική σχέση strain - $\Delta R/R$.

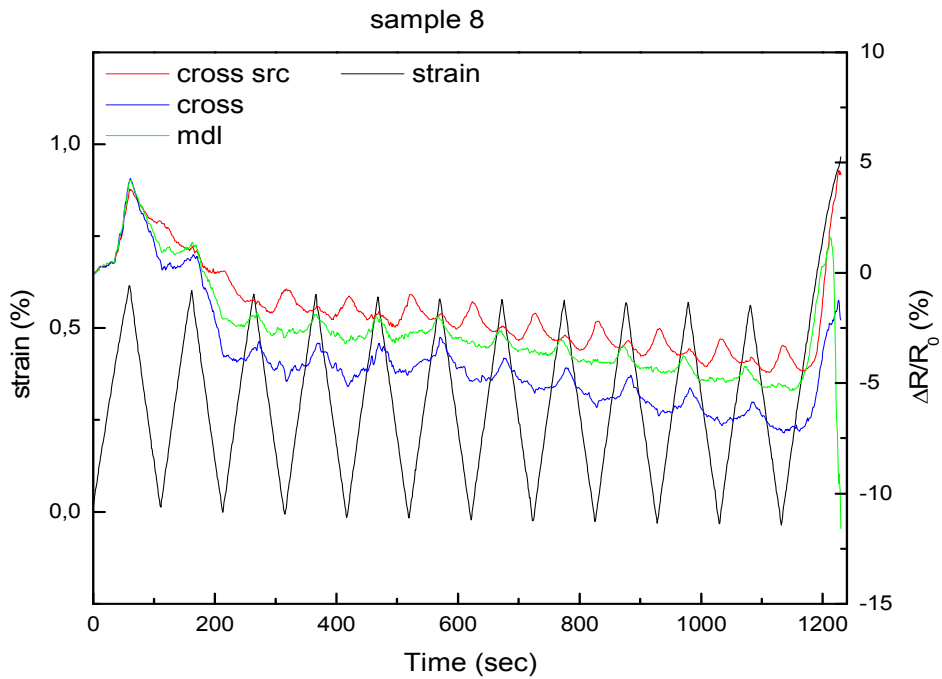
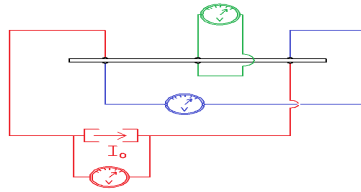


Γρ.3.2.7 Αντιπαράθεση strain – stress απ’ όλους του κύκλους. Κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος, το δοκίμιο, ακόμα και μέχρι τη θραύση, βρισκόταν στην ελαστική περιοχή.

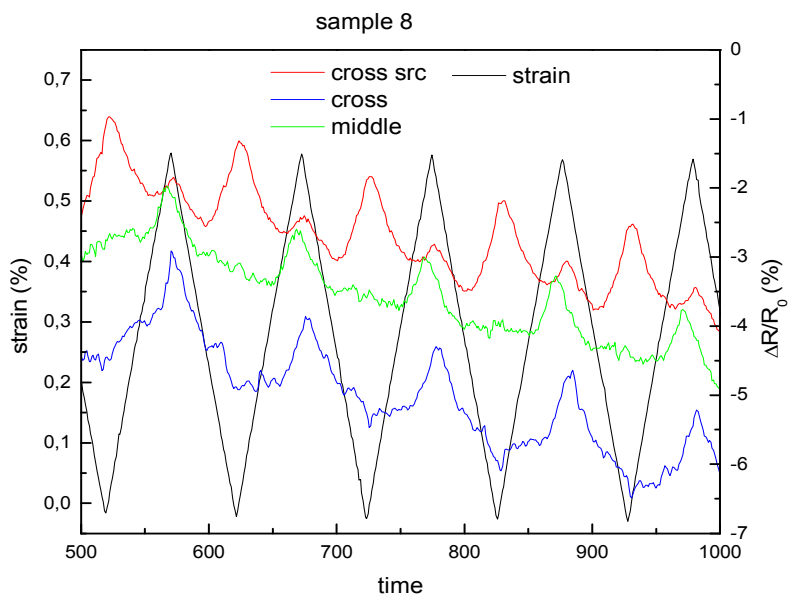
Ενώ μηχανικά – μακροσκοπικά το PEEK-CF συμπεριφέρεται ελαστικά, οι ηλεκτρικές μετρήσεις φανερώνουν μόνιμες παραμορφώσεις στο εσωτερικό του υλικού που οδηγούν στην αντιστροφή της αντίστασης κατά το τελικό στάδιο της χαλάρωσης και την έναρξη του εφελκυσμού.

Μετά το τράβηγμα, το PEEK-CF δεν επανέρχεται πλήρως στη αρχική του μορφή. Η μήτρα χαλαρώνει και φθείρεται. Καθώς το δοκίμιο επανέρχεται στο αρχικό του μήκος, η υποβαθμισμένη μήτρα εισχωρεί ακατάστατα στα κενά ανάμεσα στα ανθρακονήματα με συνέπεια να αυξάνεται η αντίσταση, ενώ στη συνέχεια το φαινόμενο αυτό υποχωρεί με την έναρξη της επιμήκυνσης, οπότε και επιστρέφουμε στη γραμμική σχέση αντίστασης-μηχανικής τάσης. Κατ’ αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι δύο κύκλοι ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε κύκλο έντασης-χαλάρωσης.

Το δοκίμιο που ακολουθεί το υποβάλλαμε σε 11 όμοιους κύκλους strain από 0% μέχρι 0,60% και στη συνέχεια το εφελκύσαμε μέχρι που κατέρρευσε για strain 1,0%.

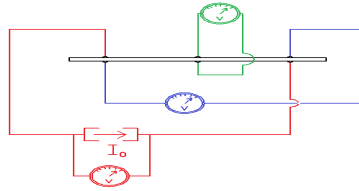


Γρ.3.2.8 Η baseline της $\Delta R/R$ μειώθηκε πολύ απότομα κατά τους δύο πρώτους κύκλους και συνέχισε με μια ελαφρά πτωτική πορεία.

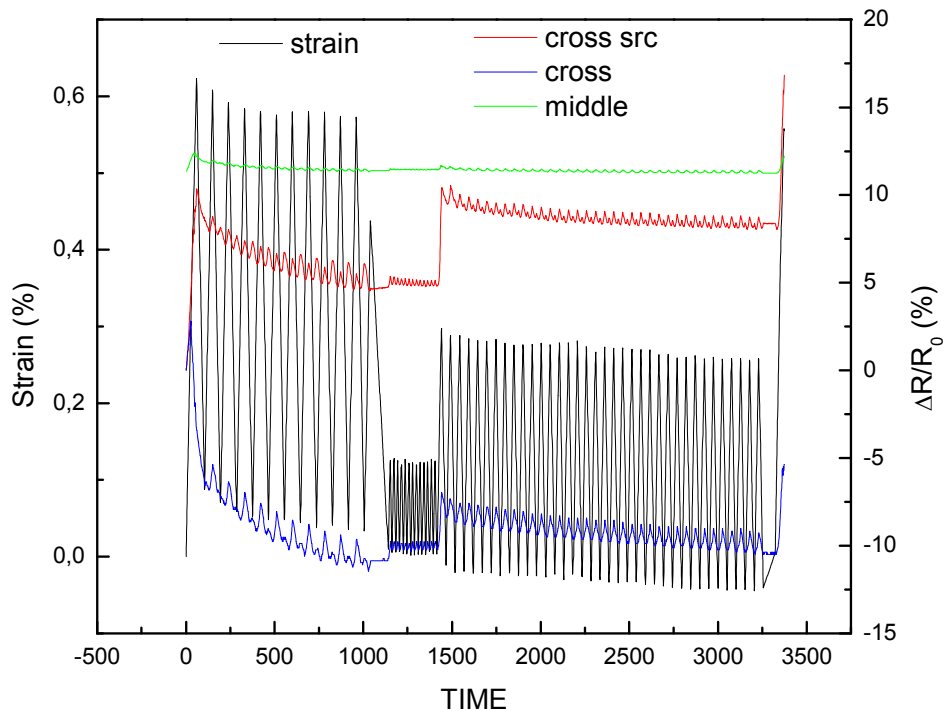


Γρ.3.2.9 Η παράλληλη στο ρεύμα $\Delta R/R$ (κόκκινη), είχε όμοια συμπεριφορά με το προηγούμενο δοκίμιο.

Το δοκίμιο 17, το υποβάλλαμε σε μία σειρά καταπονήσεων προτού το οδηγήσουμε σε θραύση, με σχετική επιμήκυνση 0,55%. Προηγήθηκαν 11 κύκλοι εφελκυσμού χαλάρωσης με strain μεταξύ 0,05% και 0,58%, 11 κύκλοι μεταξύ 0,01% και 0,13% και 33 κύκλοι μεταξύ -0,02 και 0,28%.



Sample 17

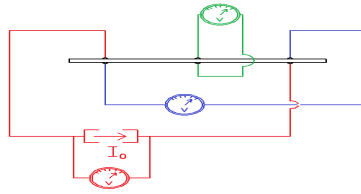


Γρ.3.2.10 Η συνολική καταπόνηση και τα αντίστοιχα ηλεκτρικά μεγέθη του πειράματος.

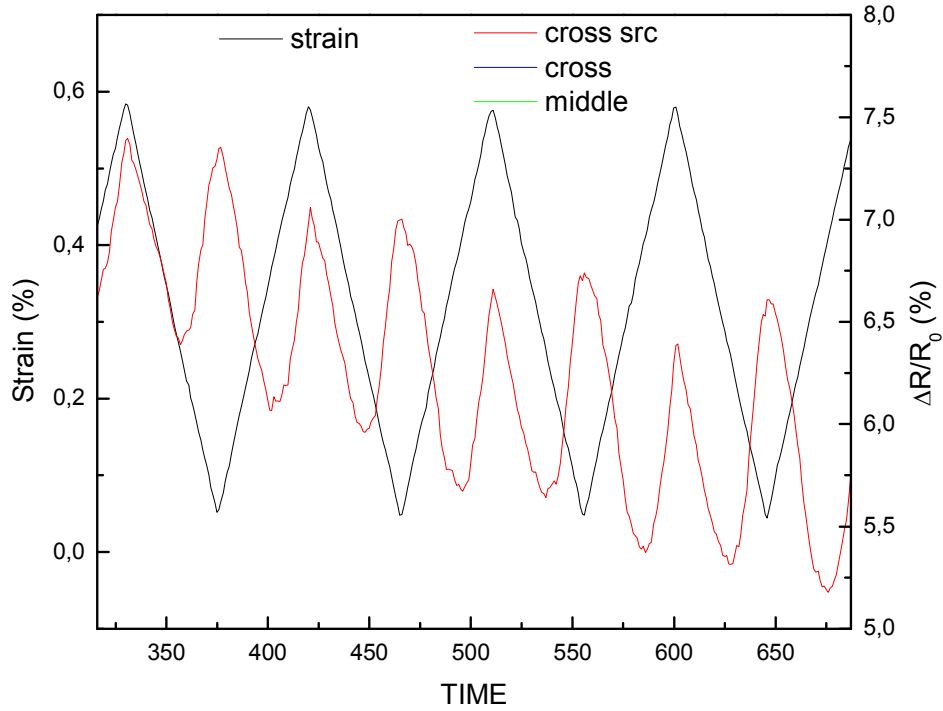
Το δοκίμιο έσπασε σε πολύ χαμηλό strain (0,55%), χαμηλότερο και απ' όσο είχε φτάσει στους εναρκτήριους εφελκυσμούς. Το γεγονός αυτό, μας καταδεικνύει πως το υλικό έχει υποστεί κόπωση απ' τις αλληπάλληλες αυξομειώσεις του μήκους και η αντοχή του έχει μειωθεί.

Μιας κι αυτό το δοκίμιο κατέρρευσε στο επίπεδο κάθετα στις φαρδιές πλευρές, παράλληλα στη μηχανική τάση, όπως έχουμε δείξει σε φωτογραφία προηγουμένως (εικ.2.1), είναι εμφανές ότι το υλικό, λόγω της φθοράς της μήτρας, χάνει τη συνοχή του σταδιακά με αποτέλεσμα να γίνεται πιο ευάλωτο στις μηχανικές καταπονήσεις.

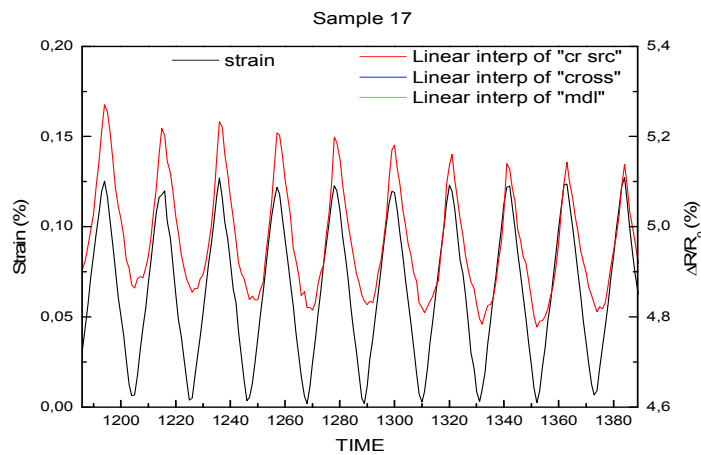
Ακολουθούν διαγράμματα του strain και του $\Delta R/R$ παράλληλα στο ρεύμα, ως προς τον χρόνο, απ' τις τρεις διαφορετικές φάσεις του πειράματος.



Sample 17

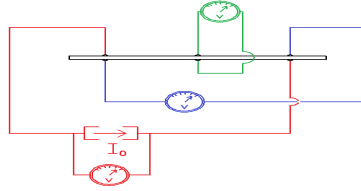


Γρ.3.2.11 Διακύμανση του strain μεταξύ 0,05% και 0,58%. Διπλός κύκλος για το $\Delta R/R$ σε έναν κύκλο εφελκυσμού-χαλάρωσης.

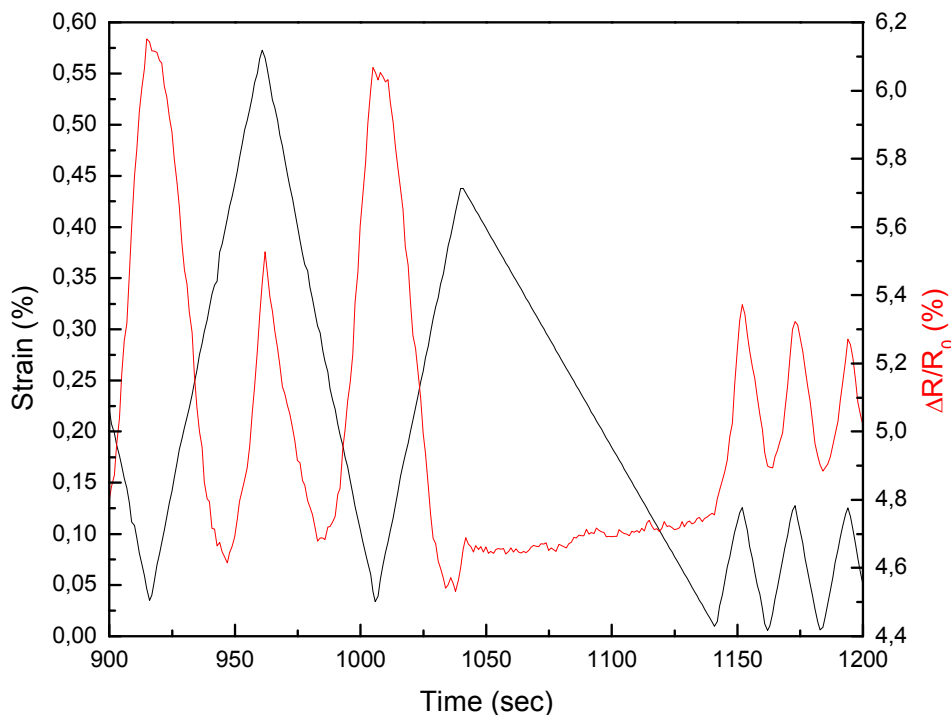


Γρ.3.2.12 Μικρό strain (0,01% - 0,13%). Αναλογία επιμήκυνσης και μεταβολής της αντίστασης.

Απ' το προηγούμενο διάγραμμα, βλέπουμε ότι παρ' όλο που στην προηγούμενη φάση του πειράματος είχε χαθεί η γραμμικότητα $\text{strain} - \Delta R/R$, για μικρότερη επιμήκυνση που ακολούθησε, η γραμμική σχέση επανήλθε, άρα τα φαινόμενα χαλάρωσης, που προκαλούν τις διπλές κορυφές της αντίστασης, υποχωρούν με το χρόνο.

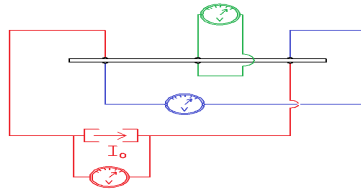


Sample 17

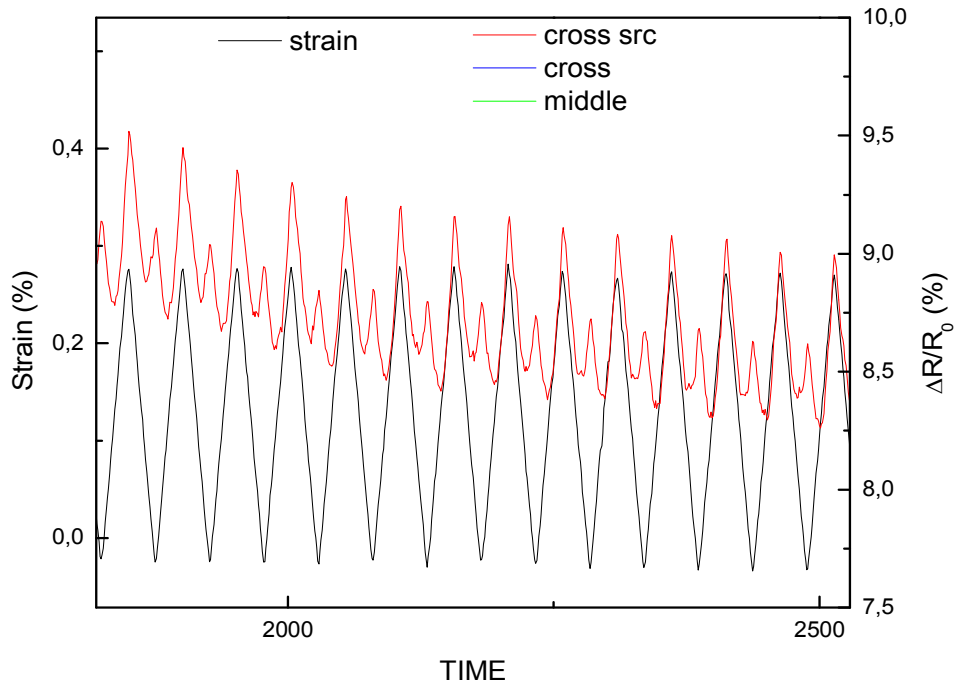


Γρ.3.2.13 Το πέρασμα απ' τους πρώτους 11 κύκλους στους επόμενους έγινε με αργό ρυθμό, έτσι υποχώρησαν τα φαινόμενα χαλάρωσης που δημιουργούσαν τις διπλές κορυφές της αντίστασης.

Στο παραπάνω γράφημα, βλέπουμε ότι ενώ στη δεύτερη φάση του πειράματος, κάθε κύκλος μηχανικής καταπόνησης ξεκινάει από χαμηλότερο strain σε σχέση με πριν, το κάτω όριο της ηλεκτρικής αντίστασης είναι ένα επίπεδο πιο ψηλά σε σύγκριση με αυτό της προηγούμενης φάσης. Απ' αυτό συμπεραίνουμε ότι υπάρχει μια παραμένουσα παραμόρφωση στο δοκίμιο, που εκδηλώνεται ως αύξηση στη στάθμη της αντίστασης.



Sample 17

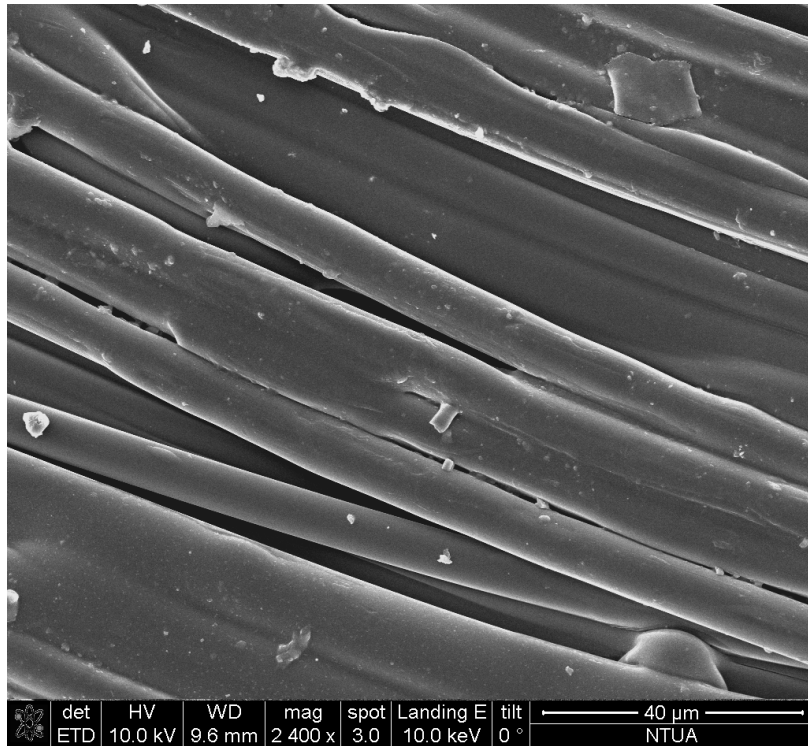


Γρ.3.2.14 Η τρίτη φάση του πειράματος με σχετική επιμήκυνση μεταξύ $-0,02\%$ και $0,28\%$.

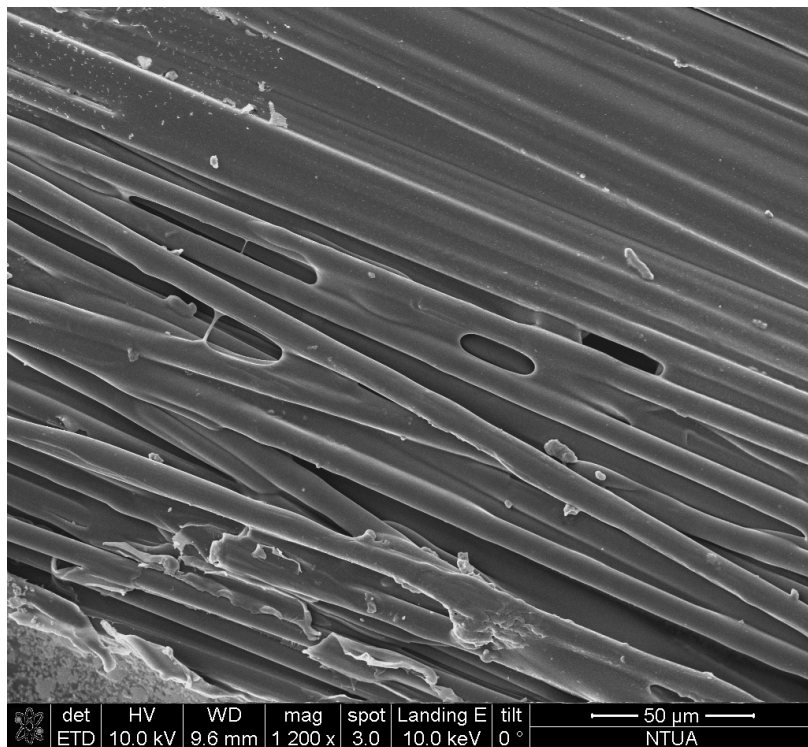
Κατά τους 33 τελευταίους κύκλους, όπου το strain έφτανε το $0,28\%$, επανεφανίστηκαν οι δεύτερες κορυφές στην καμπύλη της αντίστασης, οι οποίες βέβαια είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές τις πρώτης φάσης, που το strain έφτανε στο $0,58\%$. Όσο μεγαλύτερη δηλαδή η επιμήκυνση, τόσο εντονότερα τα φαινόμενα χαλάρωσης κατά την επαναφορά στο αρχικό μήκος.

Το δοκίμιο 19, το τελευταίο για το οποίο θα παρουσιάσουμε γραφήματα παρακάτω, το υποβάλαμε σε μια σειρά εφελκυσμών, 41 το σύνολο, με σταδιακά αυξανόμενο εύρος strain, $0,10\% - 0,36\%$ κατά τους 20 πρώτους κύκλους και $-0,04\% - 0,95\%$ κατά τους τελευταίους 8, χωρίς στο τέλος να το σπάσουμε, με σκοπό να το περάσουμε απ' το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και να πάρουμε εικόνες από ένα δοκίμιο που έχει υποστεί κόπωση χωρίς όμως να τερματίσουμε την αντοχή του.

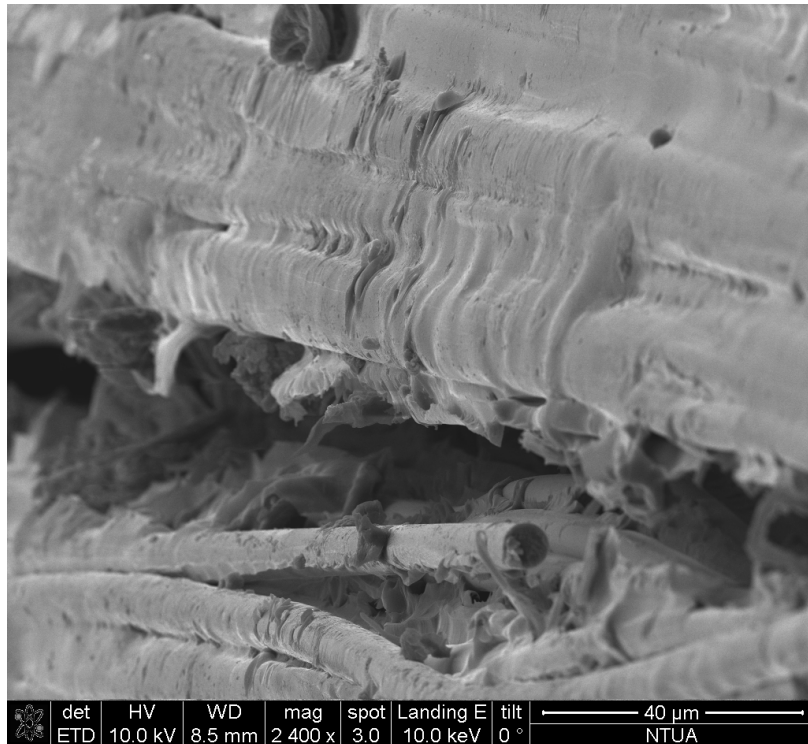
Ακολουθούν μερικές τέτοιες εικόνες που είναι διαφωτιστικές για τις εν γένει ανωμαλίες του σύνθετου υλικού, όσο και για τις φθορές που δημιουργούνται απ' τις αλληπάλληλες καταπονήσεις στην PEEK και στα ανθρακονήματα:



Εικ.3.3 Ογκίδια στη μήτρα. [8]

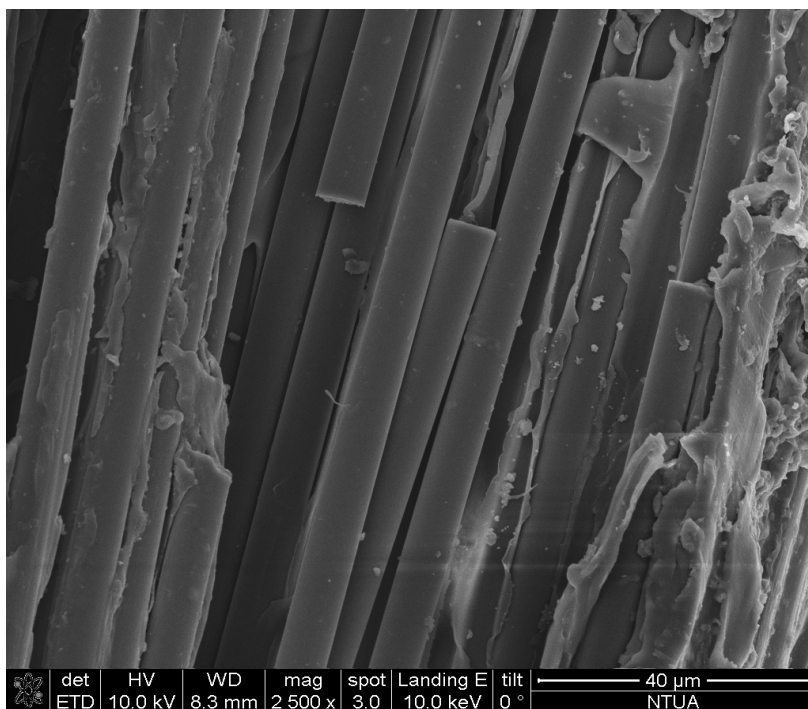


Εικ.3.4 Σκασίματα στη μήτρα. [8]



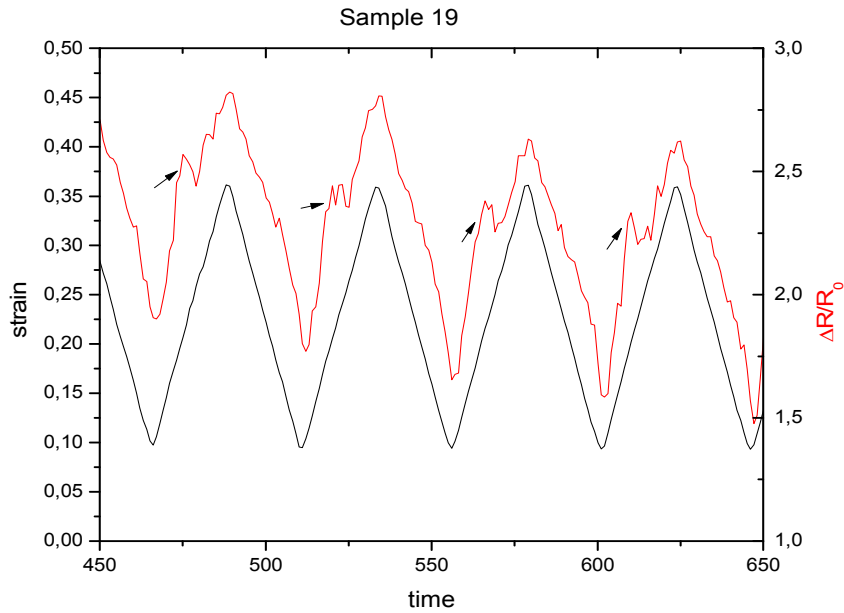
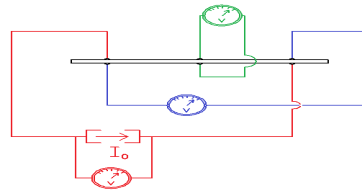
Εικ.3.5 Εκτεταμένη ρηγμάτωση της μήτρας παράλληλα στα ανθρακονήματα. [8]

Παρακολούθηση της αντίστασης κάθετα στη ρωγή, δηλαδή κατά πλάτος του δοκιμίου, θα ήταν σίγουρα πολύ χρήσιμη αφού οι ρωγμές και οι αποκολλήσεις νημάτων μήτρας, συνέβησαν πάντα κατά τη λεπτότερη διάσταση του δοκίμιο και παράλληλα στα ανθρακονήματα.

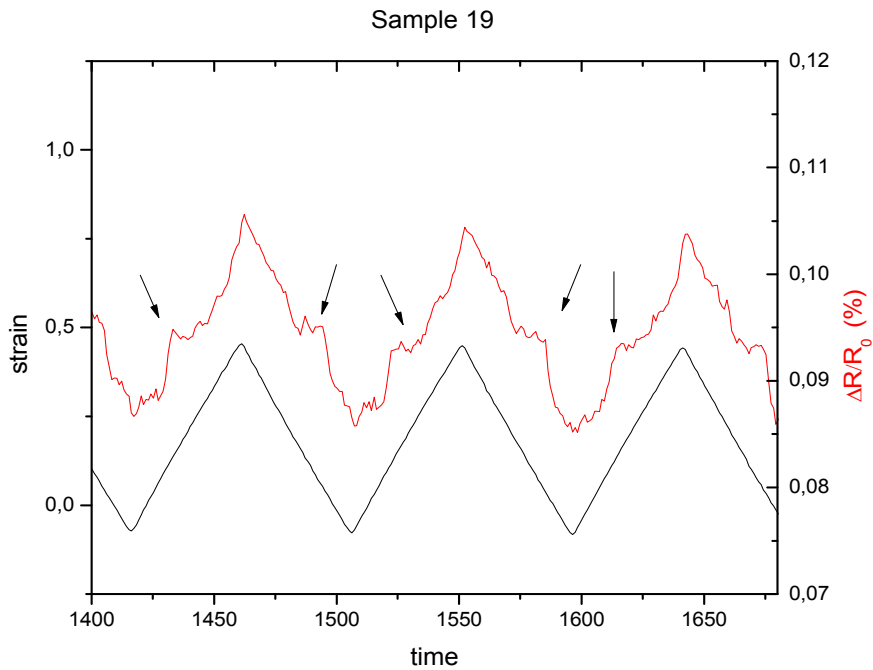


Εικ.3.6 Σπασμένα-ασυνεχή ανθρακονήματα. [8]

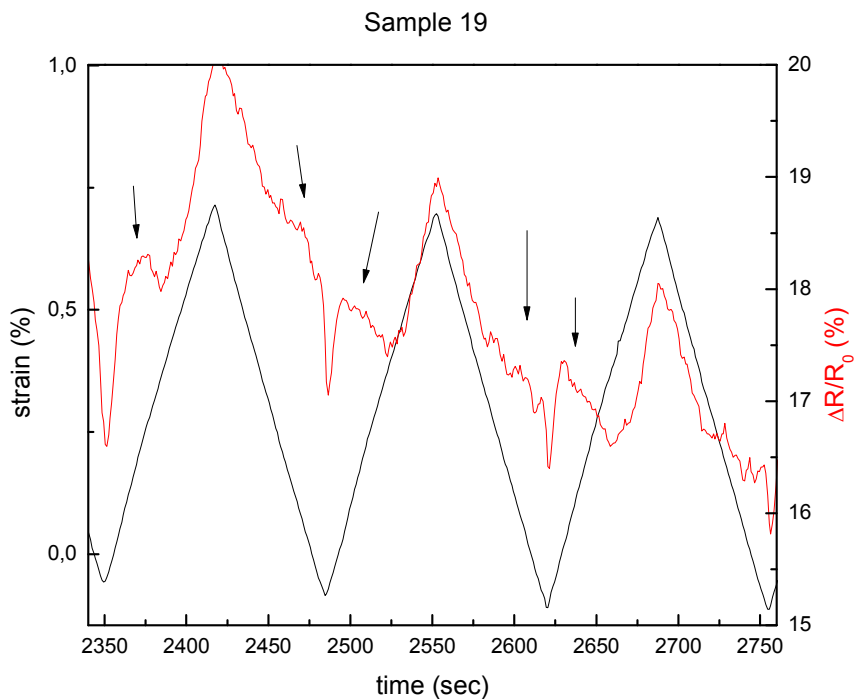
Μετά τις εικόνες απ' το SEM, παραθέτουμε ενδεικτικά κάποια γραφήματα απ' τις διάφορες φάσεις του πειράματος, όπου επισημαίνονται με βέλη οι μη γραμμικές προς το strain, μεταβολές της αντίστασης:



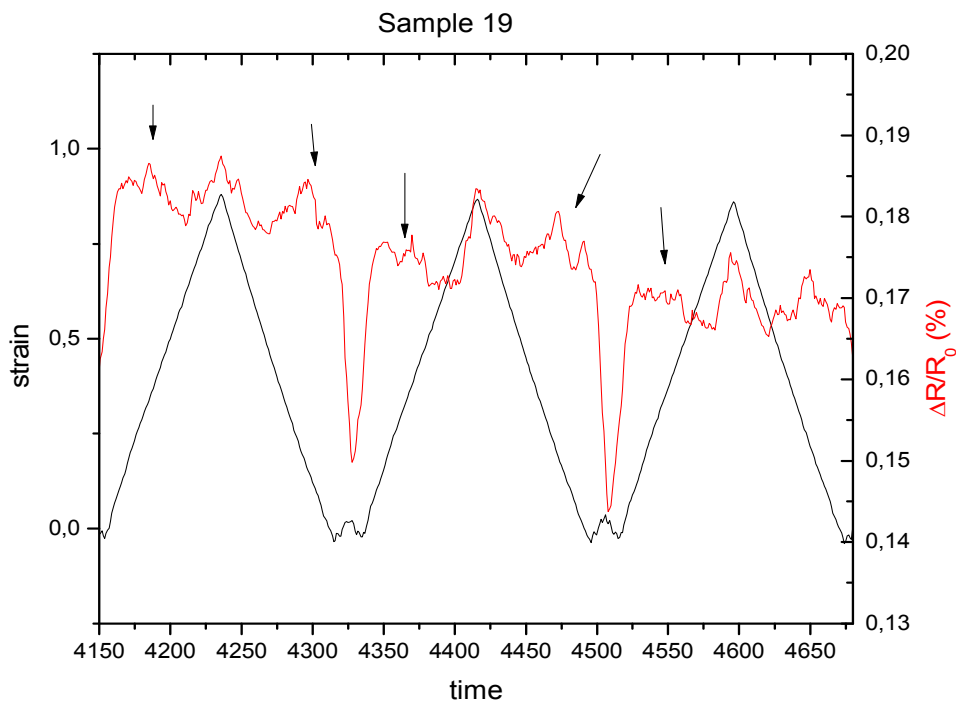
Γρ.3.2.15 Strain μεταξύ 0,10% και 0,36%. $\Delta R/R$ σταδιακή πτώση από κύκλο σε κύκλο αλλά με σταθερό σχεδόν εύρος περίπου 1,1%. Με βέλη επισημαίνονται οι μη γραμμικές προς την επιμήκυνση μεταβολές του $\Delta R/R$.



Γρ.3.2.16 Strain και $\Delta R/R$ ως προς το χρόνο κατά 2^η φάση του πειράματος με strain από -0,08% μέχρι 0,45%. Με βέλη επισημαίνονται οι μη γραμμικές προς την επιμήκυνση μεταβολές του $\Delta R/R$.



Γρ.3.2.17 Εφελκυσμό με strain από -0,11 μέχρι 0,69%, αντίστοιχη σχετική μεταβολή αντίστασης +1,96%. Με βέλη επισημαίνονται οι μη γραμμικές προς την επιμήκυνση μεταβολές του $\Delta R/R$.



Γρ.3.2.18 Κύκλοι απ' την τελευταία φάση του πειράματος με strain μεταξύ -0,04% και 0,95% και την αντίστοιχη καμπύλη της $\Delta R/R_0$. Με βέλη επισημαίνονται οι μη γραμμικές προς την επιμήκυνση μεταβολές του $\Delta R/R_0$.

Στα προηγούμενα σχεδιαγράμματα, βλέπουμε την εξέλιξη της σχετικής μεταβολής της αντίστασης για διαφορετικά strain και διαφορετικούς βαθμούς κόπωσης του δοκιμίου.

Πέραν της μικρής μη αναστρέψιμης πτώσης της αντίστασης που επέρχεται με κάθε κύκλο μηχανικής καταπόνησης λόγω της σταδιακής φθοράς της μήτρας, υπάρχουν και επαναλαμβανόμενες, μη γραμμικές προς την επιμήκυνση του δοκιμίου μεταβολές, που έχουν επισημανθεί με βελάκια στις διάφορες φάσεις του πειράματος και οι οποίες αποδίδονται στις αναδιατάξεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού κατά τον εφελκυσμό ή τη χαλάρωση, όπως έχουν αναφερθεί νωρίτερα (ξεστοίχισμα νημάτων, ακανόνιστη επαναφορά της χαλαρωμένης και φθαρμένης PEEK στο αρχικό της μήκος) χωρίς όμως να μπορούμε να αντιστοιχίσουμε επακριβώς κάθε διακύμανση της $\Delta R/R_0$ σε κάποια μεταβολή της διάταξης στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού.

Ακολουθεί πίνακας με τις σχετικές επιμηκύνσεις, τη στιγμή της θραύσης και τα αντίστοιχα $\Delta R/R_0$:

Δοκίμιο	strain	$\Delta R/R$	είδος
14	1,46%	20,38%	διαμήκης
7	1,03%	1,78%	διαγώνια
8	1,00%	4,70%	διαγώνια
9	1,42%	20,36%	διαγώνια
13	1,08%	13,94%	διαγώνια
17	0,55%	17,10%	διαγώνια
M.O.	1,09%		

Ο μέσος όρος του strain θραύσης είναι ελαφρά χαμηλότερος κατά 0,1% σε σχέση με εκείνον που προέκυψε από τους μονούς εφελκυσμούς, αν και οι πλειοψηφία των τιμών είναι στα ίδια περίπου επίπεδα. Μια μικρή πτώση της μηχανικής αντίστασης, παρ' όλ' αυτά, λόγω κόπωσης του υλικού είναι δικαιολογημένη και αναμενόμενη.

4 Συμπεράσματα

Το PEEK-CF 38%, σε όλα τα πειράματα, παρουσίασε τυπική ψαθυρή συμπεριφορά. Η παραμόρφωση και η μηχανική τάση αυξομειώνονταν γραμμικά μέχρι τη θραύση, η οποία συνέβαινε ξαφνικά.

Απ' την εικόνα που είχαν όλα τα δοκίμια μετά την κατάρρευση τους, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η αιτία αστοχίας του υλικού μας, κάτω από εφελκυστική τάση, είναι η ανάπτυξη ρωγμών στη μήτρα, κατά μήκος των ανθρακονημάτων, παράλληλα στη λεπτή πλευρά των δοκιμίων. Η επερχόμενη αστοχία δεν γινόταν αντιληπτή με τις μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε.

Ως προς την ηλεκτρική συμπεριφορά, παρατηρήσαμε τα εξής:

Κατά τους μονούς εφελκυσμούς μέχρι θραύση, η σχετική μεταβολή της αντίστασης κατά τη φορά εφαρμογής του ρεύματος, διαμήκης, εγκάρσια ή διαγώνια, αυξανόταν παράλληλα με το strain, χωρίς παρ' όλ' αυτά να υπάρχει κάποια προειδοποίηση πριν τη θραύση.

Λόγω, κατά πρώτον, των πολύ μεγάλων αρχικών αντιστάσεων, R_0 , μιας και στα πειράματα η παροχή ρεύματος και η μέτρηση της τάσης γινόταν από τα ίδια καλώδια, οπότε περιείχαν τις αντιστάσεις συνδεσμολογίας, και κατά δεύτερον, των μεγάλων διαφοροποιήσεων της R_0 από δοκίμιο σε δοκίμιο (το καθαρό R_0 του αφόρτιστου δοκιμίου είναι $0,5\Omega$ και 8Ω , παράλληλα και κάθετα στα ανθρακονήματα [9], ενώ στα πειράματα λαμβάναμε για R_0 10 έως 60Ω και 30 ως 90Ω αντίστοιχα), δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποιο συμπέρασμα πάνω στις αναλογίες της σχετικής μεταβολής τη αντίστασης και της παραμόρφωσης (gauge factor). Παρ' όλα αυτά, οι καμπύλες της $\Delta R/R$, ανεξαρτήτως κλίμακας, είναι ενδεικτικές των διαδικασιών που συμβαίνουν στο υλικό καθώς καταπονείται.

Οι καμπύλες $\Delta R/R$ σε διευθύνσεις άλλες απ' αυτή της εφαρμογής του ρεύματος, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία από δοκίμιο σε δοκίμιο και δεν εμφανίζουν επαναληψιμότητα. Καθώς ο τρόπος που διαχέεται το ρεύμα στο σύνθετο υλικό είναι πολύπλοκος, η ερμηνεία τους είναι μια διαδικασία που ξεπερνά το σκοπό αυτής της εργασίας, αλλά μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο για επόμενες.

Οι καμπύλες αναφοράς (baselines) της $\Delta R/R$, τόσο οι διαμήκεις όσο και οι διαγώνιες, είχαν πτωτική πορεία, απότομη κατά τους πρώτους κύκλους και σταδιακά πιο ομαλή.

Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στη μη αναστρέψιμη, σταδιακή φθορά της μήτρας, η οποία οδηγεί σε μείωση της μόνωσης μεταξύ των αγώγιμων ανθρακονημάτων.

Κατά τον πρώτο εφελκυσμό σε κάθε πείραμα, είχαμε πολύ μεγάλη αύξηση της $\Delta R/R$, η οποία δεν επανερχόταν στο αρχικό επίπεδο μετά το πέρας του κύκλου, γεγονός που υποδεικνύει πλαστική παραμόρφωση της μήτρας [12] καθώς και αποκόλληση νημάτων απ' αυτή.

Τέλος, κατά τους κύκλους εφελκυσμού χαλάρωσης, ενώ για πολύ μικρά strain, $0 - 0,15\%$, η $\Delta R/R_0$ ήταν γραμμική προς το strain, για μεγαλύτερες επιμηκύνσεις, ανέπτυξε μια δεύτερη κορυφή στην αντίστοιχη κοιλάδα του strain. Αποδίδουμε τη συμπεριφορά αυτή, στις φθορές και τη παραμένουσα παραμόρφωση της μήτρας, η οποία δεν μπορεί να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση, δημιουργώντας έτσι αυτά τα φαινόμενα.

5 Βιβλιογραφία

1. Z.Mei, V.H.Guerrero, D.P.Kowalik and D.D.L.Chung - Mechanical Damage and Strain in Carbon Fiber Thermoplastic-Matrix Composite, Sensed by Electrical Resistivity Measurement, POLYMER COMPOSITES, JUNE 2W2, Vol. 23, No. 3 (425 -432)
2. D.D.L.Chung, S.Wang, Self-sensing of damage and strain in carbon fiber polymer- matrix structural composites by electrical resistance measurement. Polymer & Polymer Composites Vol.11, No 7, 2003 (515 - 525)
3. Wen J et al. Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement. Composites: Part B (2010) doi:10.1016/j.compositesb.2010.08.005
4. K. Schulte & Ch. Baron - Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements. Composites Science and Technology 36 (1989) 63-76
5. Xia ZH, Okabe T, Park JB, Curtin WA, Takeda N. Quantitative damage detection in CFRP composites: coupled mechanical and electrical models. Compos Sci Technol 2003;63:1411–22
6. P E Irving and C Thiagarajan, Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique, (1998) 456–466, PII: S0964-1726(98)91534-8, <http://iopscience.iop.org/0964-1726/7/4/004>.
7. M. Kupke, K. Schulte, R. Schüler, Non-Destructive Testing of FRP by D.C. and A.C. Electrical Methods, Composites Science and Technology, 61 (2001) 837-847.
8. C.Pandis et al. - Strain and damage sensing in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement, 5th Conference on Emerging Technologies in NDT (2011)
9. Γ.Δ.Γεωργούσης - Μετρήσεις Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας για αίσθηση Φθοράς σε Σύνθετα Υλικά. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ (2011).

10. A.S. Kaddour, F. A. R. Al-Salehi, S. T. S. Al-Hassani, M. J. Hinton, ELECTRICAL RESISTANCE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR DETECTING FAILURE IN CFRP MATERIALS AT HIGH STRAIN RATES, *Composites Science and Technology* 51, 1994, 377-385.
11. Balta CaUeja, F. J., Bayer, R. K. & Ezquerro, T. A., Electrical conductivity of polyethylene--carbon-fibre composites mixed with carbon black. *J. Mater. Sei.*, 23 (1988) 1411-15.
12. D.D.L Chung - Damage detection using self-sensing concepts JAERO203 © IMechE 2007 Proc. IMechE Vol. 221 Part G: J. Aerospace Engineering

