



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ

ΜΠΕΛΕΡΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΤΙΤΛΟΣ:

**“ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ”**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί την διπλωματική μου εργασία και εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του οδηγού σπουδών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία αυτή είναι μια πειραματική μελέτη της χρήσης των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για την εισαγωγή τους σε κατασκευές με σκοπό την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας αυτών. Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά στις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου που χρησιμοποιούνται σήμερα και στο πώς αυτές οι μέθοδοι έχουν εξελιχθεί με αποτέλεσμα τη δημιουργία του κλάδου της Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας κατασκευών. Στο δεύτερο μέρος γίνεται μια εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο του ΜΚΕ με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα που εκπονήθηκαν.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Κύριο Τσαμασφύρο Γεώργιο για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της προσπάθειας μου αυτής καθώς και για την πρόσβαση που μου εξασφάλισε σε ακριβό και ευαίσθητο πειραματικό εξοπλισμό. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδιάς τον υποψήφιο διδάκτορα Κύριο Χριστόπουλο Άγγελο χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του οποίου δεν θα είχα ολοκληρώσει την εργασία μου, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Κύριο Κουλάλη Ηλία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή

A. Μη Καταστροφικός Έλεγχος και Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας

1. Μορφές Μη καταστρεπτικού ελέγχου

- 1.1 Ραδιογραφικές Μέθοδοι
- 1.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι
- 1.3 Μαγνητικές Μέθοδοι
- 1.4 Διεισδυτικά υγρά
- 1.5 Θερμογραφία
- 1.6 Υπέρηχοι
- 1.7 Ακουστική εκπομπή

2. Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας

- 2.1 Ορισμός Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας
- 2.2 Κίνητρο για την παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας
- 2.3 Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας ένας τρόπος να κάνουμε τα υλικά και τις κατασκευές πιο έξυπνες

B. Θεωρητικό υπόβαθρο και πειραματική μελέτη Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

3. Κύματα Lamb και εφαρμογές

- 3.1 Εισαγωγή στα κύματα Lamb
- 3.2 Βασικές αρχές και θεωρία κυμάτων Lamb
- 3.3 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

4. Κόπωση

5. Η συσκευή SMART της Acellent

6. Παρουσίαση πειραματική δεδομένων

- 6.1 Πειράματα οπής
- 6.2 Πείραμα διάδοσης ρωγμής
- 6.3 Πείραμα αποκόλλησης
- 6.4 Πείραμα πολυμερισμού
- 6.5 Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) ονομάζεται ο έλεγχος που δεν καταστρέφει το εξεταζόμενο αντικείμενο. Ο μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής.

Ο αντικειμενικός μας σκοπός είναι να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα των ΜΚΕ με τη θεωρία της Θραυστομηχανικής ώστε να προβλέψουμε τη επέκταση τυχόν ρωγμών και να υπολογίσουμε τον κίνδυνο αστοχίας του υλικού. Οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι θα χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος των ελαττωμάτων σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να τη καταστρέψουν ούτε να επηρεάσουν τη λειτουργικότητά της. Με τη συνδυασμένη χρήση των μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου και της Θραυστομηχανικής, μπορούμε να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την καλή «υγεία» μιας κατασκευής (Health Monitoring) και για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής και καλής λειτουργίας της (Residual Lifetime).

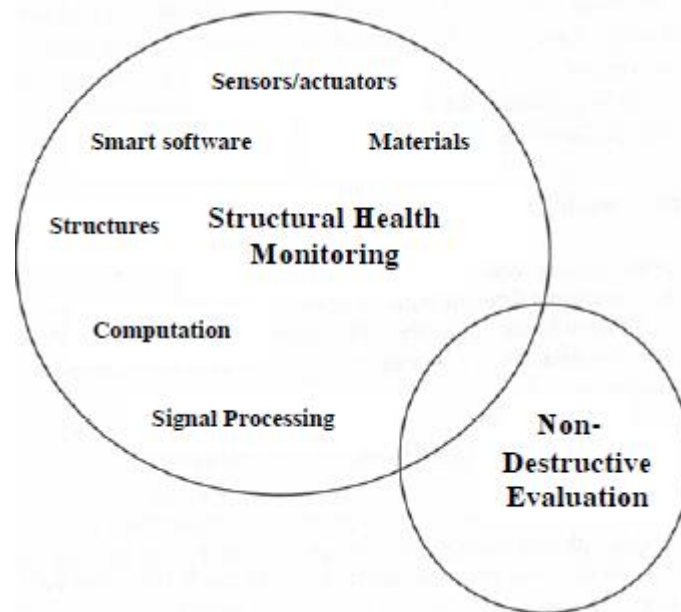
Οι ΜΚΕ δεν περιορίζονται στην ανίχνευση ρωγμών. Ο μη καταστροφικός χαρακτηρισμός υλικών είναι ένα αναπτυσσόμενο πεδίο που ασχολείται με τις ιδιότητες των υλικών, συμπεριλαμβανομένου του καθορισμού των χαρακτηριστικών μικροδομής όπως λ.χ. η σκλήρυνση ρητίνης που έχει άμεση επίδραση στη διάρκεια ζωής του αντικειμένου ελέγχου.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς Μη Καταστροφικούς Ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και στον οπλισμό τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα κατασκευαστικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

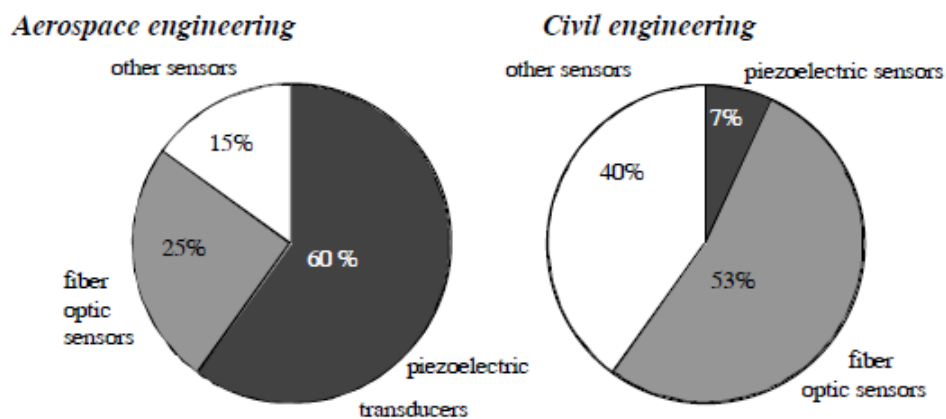
- στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο),
- στην αεροδιαστημική (Πλαίσια αεροπλάνων, διαστημοπλοίων, πυραύλων)
- στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες)
- σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις)
- στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες)
- σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς
- στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
- στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ.).

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών γεννήθηκε από το συνδυασμό διαφόρων τεχνικών και αποτελεί την εξέλιξη του Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Στην πραγματικότητα πολλές μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου μπορούν πολύ εύκολα να μετατραπούν σε μεθόδους παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας, εισάγοντας αισθητήρες μέσα στις εξεταζόμενες δομές. Για παράδειγμα η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής που αποτελεί μέθοδο ΜΚΕ μπορεί να μετατραπεί σε μέθοδο παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας αν στο στάδιο της υλοποίησης μιας κατασκευής εισάγουμε πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.



Εικόνα 1. Βασικά στοιχεία Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας και η σύνδεση με τον ΜΚΕ

Τα είδη αισθητήρων που εισάγονται για την παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας εξαρτώνται σημαντικά από το είδος της κατασκευής που προορίζονται να παρακολουθούν. Οι κυριότεροι τομείς που εισάγουν αισθητήρες σήμερα είναι η αεροναυπηγική και τα έργα υποδομών όπως γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι κλπ



Εικόνα 2. Ποσοστιαία χρήση της κάθε μεθόδου στην αεροναυπηγική και στα έργα υποδομών



ΜΕΡΟΣ Α

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

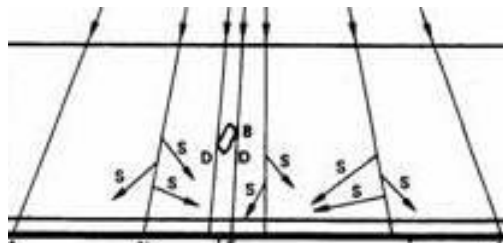
ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

1.1. ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

1.1.1. Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays)

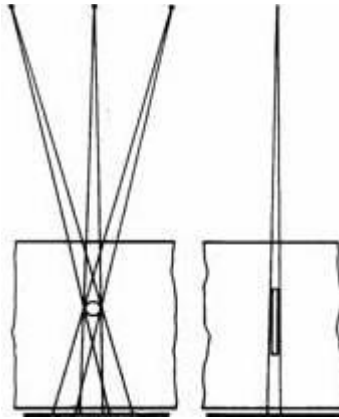
Από την ανακάλυψή τους το 1895 μέχρι σήμερα, οι ακτίνες-Χ χρησιμοποιούνται για τον ΜΚΕ ανθρώπων και υλικών. Οι ακτίνες-Χ έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-Χ) έως τα 10-4nm («σκληρές» ακτίνες-Χ) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και αστάλι πάχους μισού μέτρου.

Οι ακτίνες-Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος, είναι και αυτές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-Χ και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία. Οι ακτίνες-Χ και Γάμα ταξιδεύουν πάντα σε ευθείες γραμμές και δεν εστιάζονται γι' αυτό και η διάταξη λειτουργίας είναι πάντοτε: πηγή–εξεταζόμενο δείγμα–ραδιογραφική πλάκα.



Εικόνα 1.1. Ραδιογραφική απεικόνιση σε φιλμ.

Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι ότι η πηγή της ακτινοβολίας αν και μικρή δεν είναι σημειακή. Το αποτέλεσμα είναι μια ελαφρά θολή εικόνα στα όρια των ελαττωμάτων και ιδιαίτερα αυτών που είναι μικρότερα σε μέγεθος από την πηγή. Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί συχνά να βελτιωθεί με την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων. Οι ραδιογραφικές μέθοδοι, όπως και όλες οι αποτυπώσεις σε φιλμ, αποτελούν την 2-διάστατη προβολή 3-διάστατων αντικειμένων. Αυτό σημαίνει ότι το σχήμα που προκύπτει εξαρτάται από τη κατεύθυνση των ακτίνων και την θέση του ελαττώματος στο υλικό. Για να μπορέσουμε να έχουμε δεδομένα σχετικά με τη 3η διάσταση απαιτούνται δυο αποτυπώσεις από διαφορετική γωνία για να δημιουργηθεί μια στερεοσκοπική εικόνα του υλικού.



Εικόνα 1.2. Απλή (2-διάστατη) προβολή σε ραδιογραφία.

Όταν μελετάμε την παρουσία ατελειών σε ένα υλικό η μεγαλύτερη «ποιότητα» ή «ευαισθησία» μιας ραδιογραφικής μεθόδου σημαίνει την ικανότητα της να διακρίνει μια μικρότερων διαστάσεων ατέλεια.

Για να μετρηθεί αυτή η ικανότητα της μεθόδου χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες που είναι σύρματα ή ελάσματα, διαφορετικού πάχους και διαμέτρου, με συγκεκριμένη βαθμονόμηση και τυποποίηση. Η ραδιογραφίες αυτών των δεικτών μας δείχνει απ' ευθείας την ικανότητα κάθε μεθόδου ή συσκευής.



Εικόνα 1.3. Δείκτες μέτρησης της ευαισθησίας των Ραδιογραφικών μεθόδων.

1.1.2. Οι Ιονίζουσες Ακτινοβολίες

Οι ακτίνες-Χ δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι ακτίνες-Γάμα προέρχονται από τον πυρήνα ραδιενεργών στοιχείων. Και οι δυο ακτινοβολίες ταξιδεύουν με ταχύτητα φως, σε ευθείες γραμμές και είναι αόρατες.

Οι ηλεκτρομαγνητικές αυτές ακτινοβολίες δεν είναι συνεχείς (θεωρία Planck) αλλά εκπέμπονται σε μικρά πακέτα ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα (quanta). Η ενέργεια ενός quantum μετριέται σε eV (electron-Volts). Η ενέργεια των ακτίνων-Χ και των ακτίνων-Γάμα εξαρτάται από το μήκος κύματος και αναφέρεται σε keV και MeV.

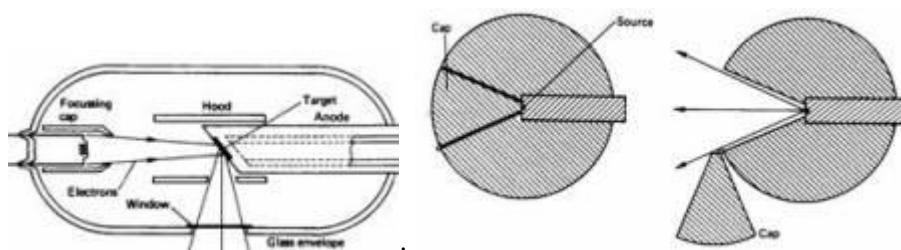
Σήμερα συνυπάρχουν ακόμα το παλιό με το μετρικό σύστημα μονάδων. Με το παλαιότερο σύστημα η ποσότητα ή «έκθεση» σε ακτινοβολία μετριέται σε Roentgens ή mR, η μονάδα «απορροφούμενης δόσης» είναι το rad, και η μονάδα

«ισοδύναμης απορροφούμενης δόσης» το rem. Στο μετρικό σύστημα η «έκθεση» σε ακτινοβολία σαν ενέργεια που είναι μετριέται σε Coulomb/kg ($1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$), η μονάδα «απορροφούμενης δόσης» είναι το gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$), και η μονάδα «ισοδύναμης απορροφούμενης δόσης» το sievert ($1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$).

Στη πρακτική ραδιογραφία η έξοδος μιας συσκευής ακτίνων-Χ αναφέρεται σε mA και μιας ακτίνων-Γάμα σε curie (Ci). Στο μετρικό σύστημα το Ci θεωρήθηκε πολύ μεγάλο και αντικαταστάθηκε από το Becquerel (Bq) ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$).

1.1.3. Οι Πηγές Ακτίνων-Χ & Γάμα

Οι ακτίνες-Χ δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι λυχνίες ακτίνων-Χ περιέχουν τη κάθοδο που παράγει τα ηλεκτρόνια και την μεταλλική άνοδο στην οποία προσπίπτουν τοποθετημένες μέσα σε κενό αέρος και τροφοδοτούνται με υψηλή τάση (kV-MV).



Εικόνα 1.4. Λυχνία ακτίνων-Χ. Εικόνα 1.5. Κάψουλα φύλαξης ραδιενεργών πηγών.

Οι πηγές των ακτίνων-Γάμα επιλέγονται μέσα από τα λίγα φυσικά ραδιενεργά υλικά και τις εκατοντάδες τεχνητά ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν συνδυασμούς από ακτίνες α , β , γ και νετρόνια. Μόνο λίγα από αυτά έχουν ιδιότητες που να τα κάνουν κατάλληλα για βιομηχανικές ραδιογραφικές εφαρμογές.

Μέχρι το 1955 χρησιμοποιούσαν φυσικές πηγές όπως το Ράδιο και το Ράδον τα οποία όμως ήταν επικίνδυνα και έχουν αντικατασταθεί σήμερα από ραδιοϊσότοπα όπως τα πλέον χρησιμοποιούμενα Cobalt-60, Iridium-192, ή, Ytterbium-169 και τα λιγότερο διαδεδομένα Caesium-137, Thulium-170, ή, Sodium-24. Ο αριθμός που ακολουθεί το όνομα είναι η ατομική μάζα του ισότοπου. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα κατασκευάζονται σε ατομικούς αντιδραστήρες ή εξάγονται από τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα. Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι όταν ένα τέτοιο υλικό αρχίσει να λειτουργεί δε μπορεί να σταματήσει ή να σβήσει. Το υλικό ακτινοβολεί συνέχεια μέχρι να εξαντληθεί. Τον ρυθμό εξάντλησης ενός ραδιενεργού υλικού τον μετράμε με το «χρόνο ημιζωής» που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί στο μισό η ακτινοβολία του. Άλλα υλικά έχουν ημιζωή μερικές ώρες και άλλα μερικές εκατοντάδες χρόνια.

Οι πηγές ακτινών-Γάμα απαιτούν αυστηρά προσεκτικό και ασφαλή χειρισμό. Αφού ενεργοποιηθούν σφραγίζονται σε ειδικές κάψουλες, οι κάψουλες περιβάλλονται από απορροφητικό υλικό, τηρούνται αποστάσεις ασφαλείας, και, όλες οι ενέργειες πρέπει να είναι σύντομες και ταχύτατες.

1.1.4. Κίνδυνοι και Προφύλαξη

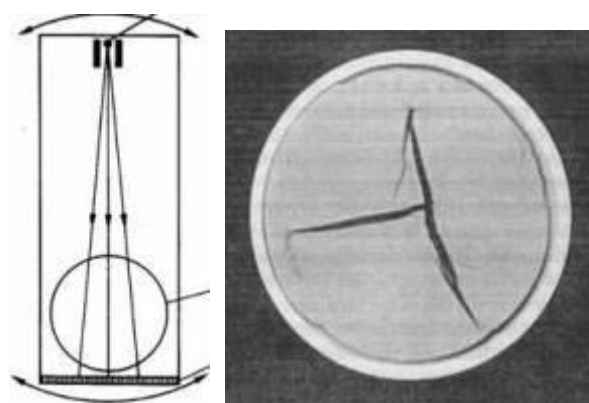
Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και καταστρέφει τους ζωντανούς ιστούς, γι' αυτό απαιτεί τη λήψη κατάλληλων μέτρων προφύλαξης και ειδικές εγκαταστάσεις. Η ετήσια δόση ακτινοβολίας σε ολόκληρο το σώμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 mSv (= 0.5 rem) για το κοινό και τα 15 mSv για τους εργαζόμενους σε σχετικές εγκαταστάσεις.

Η κυριότερη αρχή που πρέπει να τηρείται είναι αυτή της ελάχιστης δυνατής έκθεσης (ALARP – As Low As Reasonably Possible). Οι οδηγίες προφύλαξης γίνονται όλο και πιο αυστηρές με τη πάροδο του χρόνου καθώς διαπιστώνεται το πραγματικό επίπεδο βλάβης που μπορούν να προξενήσουν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες ακόμη και σε χαμηλές δόσεις.

1.1.5. Ψηφιακή Ραδιογραφία – Τομογραφία (Computed Tomography)

Η τομογραφία είναι ένα σύνολο από ραδιογραφίες που αποτυπώνονται ψηφιακά και τις επεξεργαζόμαστε με Η/Υ. Αντί του ραδιογραφικού φιλμ, κάθε ραδιογραφία αποτυπώνεται σαν ψηφιακή πληροφορία μετατρέποντας τη φωτεινότητα κάθε κόκκου του φιλμ σε bytes.

Για να δημιουργηθεί η 3-διάστατη τομογραφία συνθέτουμε δεκάδες ψηφιακές ραδιογραφίες. Κάθε ραδιογραφία έχει ληφθεί από διαφορετικό σημείο, είτε περιστρέφοντας το αντικείμενο είτε περιστρέφοντας τη συσκευή ραδιογραφίας. Η σύνθεση γίνεται από τα πρόγραμμα του Η/Υ που ελέγχει τη συσκευή και γνωρίζει ακριβώς τις θέσεις και τις γωνίες λήψης των εικόνων.



Εικόνα 1.6. Τομογραφία με περιστροφή της πηγής. Εικόνα1.7. Τομογραφία υλικού με ρωγμή.

1.1.6. Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια, κλπ.)

(Neutron radiography)

Νετρόνια κατάλληλης ενέργειας παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες απορρόφησης από τα υλικά, παρ' όλο που είναι ατομικά σωματίδια και όχι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η χρήση υποατομικών σωματιδίων (νετρονίων ή πρωτονίων) έχει καθιερωθεί ευρέως σαν τεχνική και συνήθως αναφέρεται με το όνομα «νετρονική ραδιογραφία».

Η αξία της μεθόδου οφείλεται στο ότι η απορρόφηση των νετρονίων από τα υλικά δεν είναι ίδια με την απορρόφηση των ακτίνων-Χ που αυξάνει ομαλά με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου. Υλικά όπως το Υδρογόνο και το Λίθιο έχουν πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ενώ υλικά όπως το Αλουμίνιο και ο Σίδηρος έχουν 500-2000 φορές μικρότερο συντελεστή απορρόφησης. Η ιδιότητα αυτή κάνει τη μέθοδο πολύ αποτελεσματική στον εντοπισμό ατελειών, ειδικά όσων περιέχουν υδρογόνο όπως το νερό, λάδι, πλαστικό, κλπ., ακόμα και σε πολύ παχιές πλάκες μετάλλου ή άλλων υλικών.

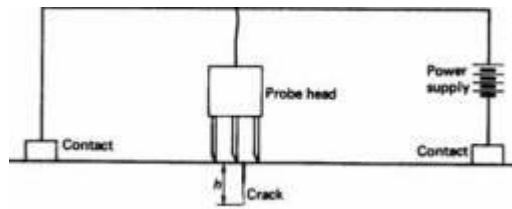
Στη πράξη οι κύρια πηγή νετρονίων είναι ο πυρηνικός αντιδραστήρας. Άλλες πηγές που χρησιμοποιούνται είναι το ραδιοϊσότοπο Californium-252, ή, συνδυασμός ακτίνων-Χ με Uranium ή Beryllium.

1.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Υπάρχουν πολλές ηλεκτρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον ΜΚΕ όπως για παράδειγμα, η μέτρηση της αντίστασης του υλικού, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, και η χρήση του τριβοηλεκτρικού, του θερμοηλεκτρικού ή του εξωηλεκτρονίου φαινομένου. Όμως, οι δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων είναι η μέθοδος πτώσης δυναμικού για εντοπισμό ρωγμών, και, ο έλεγχος ρευμάτων eddy (Foucault).

1.2.1. Μέθοδος της Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop)

Η μέθοδος λειτουργεί με τη μέτρηση της τάσης στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο διαρρέεται από σταθερό DC ή εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Η παρουσία ρωγμών, ή άλλων ατελειών, προκαλεί μεταβολές στη αγωγιμότητα του υλικού και αντίστοιχα στη μετρούμενη τάση.

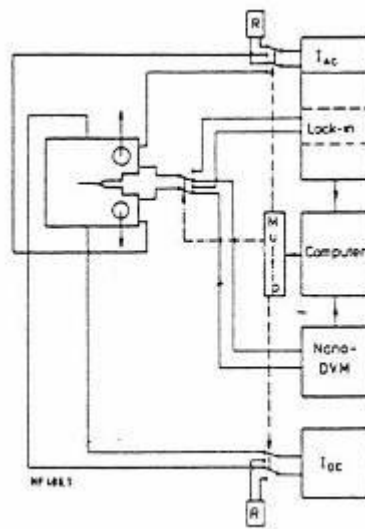


Εικόνα 1.8. Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού

Η ίδια συσκευή που χρησιμοποιείται για την παροχή του ρεύματος και τη μέτρηση της τάσης μπορεί να μετατρέπει τις μεταβολές της πτώσης δυναμικού σε μεταβολές του μήκους της ρωγμής, εφόσον φυσικά έχει προηγηθεί η κατάλληλη ρύθμιση.

Η χρήση DC ρεύματος προσφέρει ευκολότερη τοποθέτηση και ρύθμιση, καθώς και μεγαλύτερη συσχέτιση τάσης και μήκους ρωγμής. Από την άλλη η χρήση AC ρεύματος απαιτεί πολύ μικρότερη ισχύ, διότι χάρις στο επιδερμικό φαινόμενο το ρεύμα κυκλοφορεί μόνο στην επιφάνεια του μετάλλου, έτσι δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του δοκιμίου και επιπλέον επιτρέπει τη χρήση μιας πληθώρας τεχνικών για τη μείωση του θορύβου.

Οι δύο τεχνικές των DC και AC ρευμάτων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ταυτόχρονα ώστε να συνδυάζονται τα προτερήματά τους και να βελτιώνονται τα αποτελέσματα.



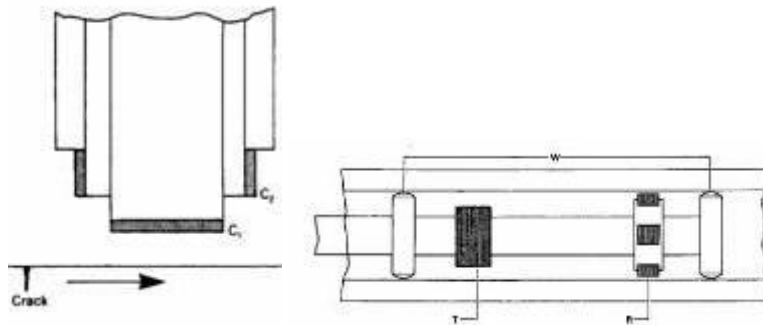
Εικόνα 1.9. Χοντρικό διάγραμμα συνδεσμολογίας της μεθόδου πτώσης δυναμικού

1.2.2. Δινορεύματα (Eddy-Current)

Στην μέθοδο δινορευμάτων χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πηνίων που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας. Όταν αυτά βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού παράγουν σε αυτήν δινορεύματα τα οποία

με τη σειρά τους δημιουργούν πεδίο που επιδρά στα πηνία και επηρεάζει το ρεύμα που τα διαρρέει. Οι αλλαγές αυτές μας πληροφορούν για την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού.

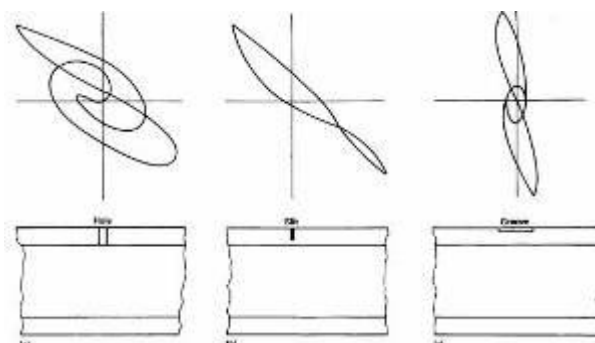
Η βασική τεχνική είναι να μετακινείται η κεφαλή με τα πηνία πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και να καταγράφεται κάθε αλλαγή στο ρεύμα και τη τάση των πηνίων. Όταν στην επιφάνεια υπάρχουν ατέλειες, τα πεδία των δινορευμάτων αλλοιώνονται και επηρεάζουν διαφορετικά το ρεύμα των πηνίων.



Εικόνα 1.10. Μέθοδος δινορευμάτων. Εικόνα 1.11. Έλεγχος σωλήνα με δινορεύματα μακρινού πεδίου.

1.2.3. Μακρινό πεδίο δινορευμάτων (Remote field testing - RFT)

Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η μέτρηση του μακρινού πεδίου των δινορευμάτων που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο μικρών μεταλλικών σωλήνων με εσωτερικό καθετήρα. Η τεχνική παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς εντοπίζει με την ίδια ευαισθησία εσωτερικά και εξωτερικά ελαττώματα του τοιχώματος του σωλήνα. Χαρακτηριστικό της τεχνικής είναι ότι τα δύο πηνία είναι απομακρυσμένα, και, το ένα χρησιμοποιείται σαν πομπός και το άλλο σαν δέκτης.



Εικόνα 1.12. Σήματα δινορευμάτων από εσωτερικό καθετήρα στα 250 kHz: (α) διαμετρής σπή 2 mm, (β) λεπτή επιφανειακή σχισμή, (γ) επιφανειακή διαμήκης εγκοπή.

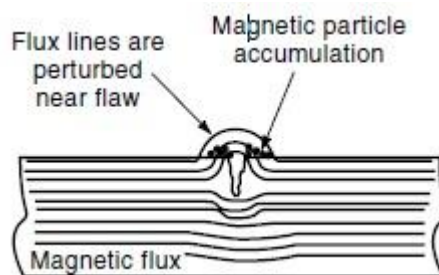
1.3. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών του υλικού. Όταν ένα δοκίμιο μαγνητιστεί και περιέχει μια ασυνέχεια στην επιφάνειά του ή κάτω από αυτήν, δημιουργείται μια παραμόρφωση στη μαγνητική ροή η οποία προκαλεί ένα τοπικό πεδίο απώλειας μαγνητικής ροής. Οι μέθοδοι βασίζονται στους νόμους του Maxwell (1873) και χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και πολύ ισχυρούς υπολογιστές.

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που μαγνητίζονται. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μαγνητική μέθοδος ελέγχου είναι η τεχνική των μαγνητικών ρινιδίων σε μελάνι ή σκόνη.

1.3.1. Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια (Magnetic Particles)

Ο έλεγχος με μαγνητικά ρινίδια αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1930 από την εταιρία Magnaflix. Η μέθοδος βασίστηκε στην τυχαία ανακάλυψη ότι τα ρινίδια έτειναν να συσσωρεύονται κοντά στις ασυνέχειες κατά τη διαδικασία της άλεσης. Η εταιρία Magnaflix μετέτρεψε αυτήν την παρατήρηση σε επιτυχή εμπορική μέθοδο ανίχνευσης ασυνεχειών στο χάλυβα. Ο έλεγχος με ρινίδια εξαρτάται από τη διαρροή της μαγνητικής ροής στην επιφάνεια σιδηρομαγνητικών υλικών σε περιοχές ασυνεχειών. Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος, το μαγνητικό υλικό πρέπει να μαγνητιστεί σε μια γειτονική περιοχή της ατέλειας.



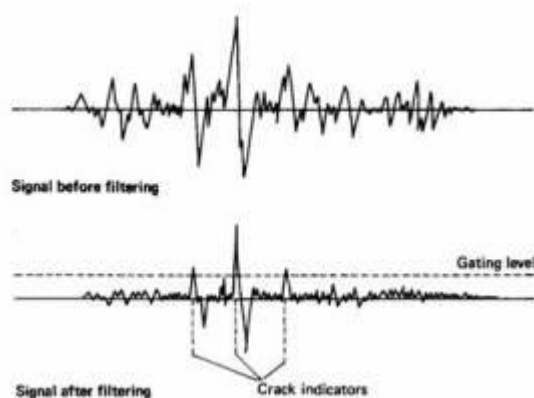
Εικόνα 1.13. Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια

Ο έλεγχος με ρινίδια είναι αξιόπιστος, εάν χρησιμοποιηθεί σωστά, για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών, ή ατελειών οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού, επαρκούς μακροσκοπικού μεγέθους και δίνει μια ένδειξη της τοποθεσίας και του μήκους της ατέλειας. Το πεδίο πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να κρατάει τα σωματίδια. Σε αντίθετη περίπτωση οι πολύ ρηχές ρωγμές μπορεί να μην ανιχνευθούν.

Η μέθοδος έχει και περιορισμούς. Για το βέλτιστο αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο πρέπει να βρίσκεται κάθετα στην κατεύθυνση της ασυνέχειας. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην ανιχνευθεί η ατέλεια. Επιπλέον ενώ είναι δυνατή η γνωστοποίηση του μήκους της ατέλειας, το βάθος αυτής πρέπει να υποτεθεί.

1.3.2. Μαγνητογραφία (Magnetography)

Εναλλακτικά η μέτρηση της μαγνητικής ροής μπορεί να γίνει με ένα είδος μαγνητοταινίας η οποία πιέζεται στην επιφάνεια του μαγνητισμένου υλικού. Στη συνέχεια η ταινία αφαιρείται για επεξεργασία και ανάλυση των ενδείξεων. Η διαδικασία αυτή λέγεται μαγνητογραφία αλλά δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη.



Εικόνα 1.14. Μαγνητογραφικά σήματα πριν και μετά το φιλτράρισμά τους.

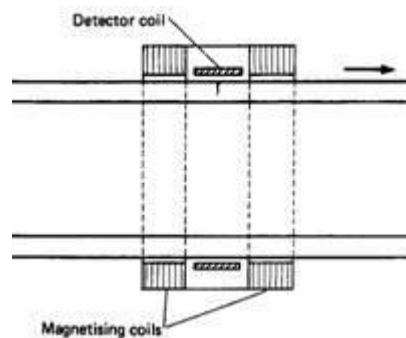
1.3.3. Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL)

Όπως και με τη μέθοδο μαγνητικών ρινιδίων, η μέθοδος απωλειών της μαγνητικής ροής εξαρτάται από την διατάραξη της μαγνητικής ροής που προκαλείται από ατέλειες στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή διαφέρει από τον έλεγχο με ρινίδια στο ότι χρησιμοποιεί μια συσκευή για την ανίχνευση των διαταραχών οι οποίες σχετίζονται με την ατέλεια.

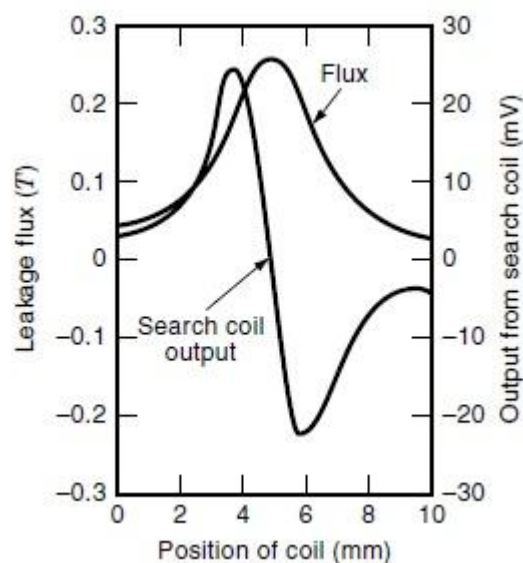
Η μέθοδος MFL προσφέρει επιπλέον πληροφορίες, επειδή μπορεί να μετρήσει την πυκνότητα ροής σε τρεις κατευθύνσεις, παράλληλα και κάθετα προς την κατεύθυνση της ατέλειας και κάθετα προς την επιφάνεια. Η μέθοδος είναι ικανή να ανιχνεύσει επιφανειακές και εσωτερικές ατέλειες στην εσωτερική επιφάνεια χαλύβδινων σωλήνων. Πλέον η μέθοδος είναι ακόμα πιο αναπτυγμένη

με την έννοια ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανίχνευση ατελειών αλλά και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών αυτών.

Ο αισθητήρας απωλειών είναι συνήθως ένα πηνίο επαγωγής, Ο αισθητήρας συνοδεύεται από έναν μαγνήτη ο οποίος μαγνητίζει το δείγμα σε μια γειτονική του περιοχή. Καθώς ο αισθητήρας διαπερνά την επιφάνεια του δείγματος, η ανίχνευση ανωμαλιών στην πυκνότητα της ροής υποδεικνύουν την τοποθεσία της ατέλειας.



Εικόνα 1.15. Μέτρηση μαγνητικών απωλειών κατά μήκος αγωγού.



Εικόνα 1.16. Απόκλιση της μαγνητικής ροής λόγω απώλειας

Το μειονέκτημα της μεθόδου απωλειών μαγνητικής ροής σε σύγκριση με αυτήν των μαγνητικών ρινιδίων, είναι ότι για την ανίχνευση απώλειας μαγνητικής ροής κατά μήκος ενός αντικειμένου απαιτείται πολύς χρόνος, σε αντίθεση με τη μέθοδο μαγνητικών ρινιδίων όπου μπορούν να ελεγχθούν μεγάλες επιφάνειες αντικειμένων πολύ γρήγορα.

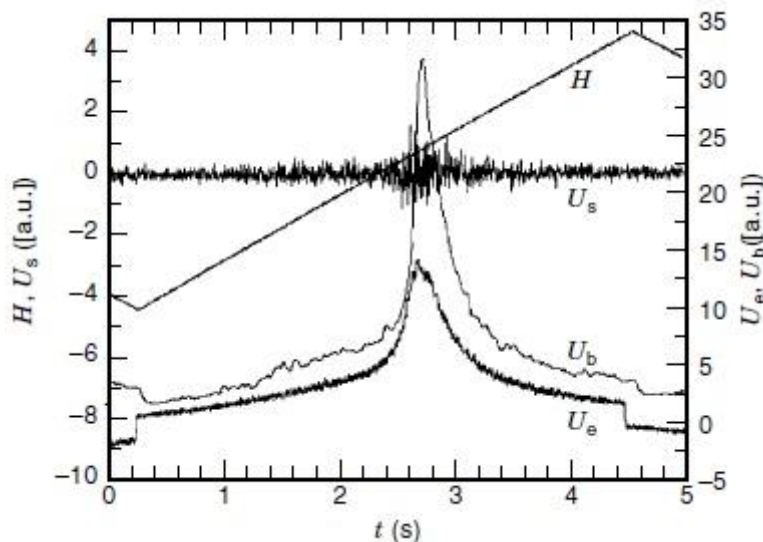
1.3.4. Έλεγχος Θορύβου Barkhausen (Barkhausen Noise)

Οι ατέλειες στη κρυσταλλική δομή ενός υλικού, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μηχανικές ιδιότητές του, είναι οι ίδιες που επηρεάζουν και τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η μεταξύ τους σχέση δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητή αλλά διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και των βημάτων Barkhausen παρέχουν πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες.

Ο μαγνητισμός των υλικών συμβαίνει με μια σειρά μικρών βημάτων από τον ένα κόκκο στον άλλο. Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα μεγάφωνο, τα βήματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν ένα θόρυβο (ένα ανάλογο φαινόμενο είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή). Ο θόρυβος Barkhausen είναι ευαίσθητος στη παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικρό-ατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης, και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους.

Το φαινόμενο Barkhausen είναι μια από τις πιο σημαντικές μαγνητικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου για την διερεύνηση των εγγενών ιδιοτήτων μαγνητικών υλικών.

Το παραληφθέν Barkhausen σήμα επηρεάζεται από τις συνθήκες διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος στο υλικό καθώς και από τις ιδιότητες του αισθητήρα.



Εικόνα 1.17. Χρονική μεταβολή το εφαρμοσμένου πεδίου H , η ληφθείσα τάση πηνίου U_e , η Barkhausen τάση του στοιχείου U_s και η ενίσχυση U_b

Το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών με δύο τρόπους. Πρώτων με την αλλαγή της δομής του τομέα λόγω παράγωγης κλειστών τομέων στα σύνορα του κόκκου και δεύτερον με την αλλαγή των συνθηκών κίνησης

καθώς παρουσιάζονται εμπόδια στην κίνηση. Η αύξηση του μεγέθους των κόκκων λοιπόν προκαλεί αύξηση στον συνολικό αριθμό φαινομένων Barkhausen, στο πλάτος και της διάρκειας του παλμού.

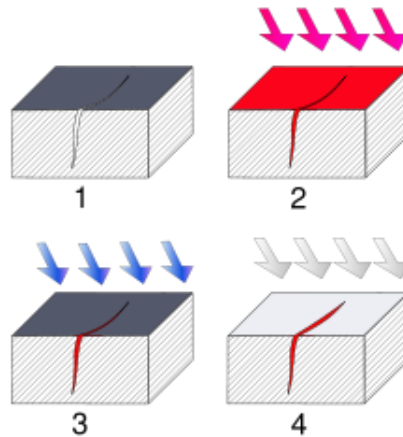
Το φαινόμενο Barkhausen και η μαγνητοακουστική εκπομπή έχουν εδραιωθεί ως μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου για αξιολόγηση αλλαγών μικροδομής. Οι φυσικοί μηχανισμοί των μικροδομικών επιρροών στο φαινόμενο αυτό πρέπει να διευκρινιστούν περεταίρω. Επιπλέον οι συνθήκες μετρήσεων και επεξεργασίας σημάτων πρέπει να οριοθετηθούν προσεκτικά ώστε να καθιερωθούν συγκεκριμένες διαδικασίες.

1.4. ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ (LIQUID PENETRANT FLAW)

Ο έλεγχος με διεισδυτικό υγρό ή χρωστική ουσία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών σε μη σιδηρούχα κράματα ή σε σιδηρούχα κράματα στα οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αντίστοιχη ηλεκτρική ή μαγνητική μέθοδος. Μερικές φορές εφαρμόζεται και σε μη μεταλλικά υλικά.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Το υπό εξέταση υλικό, το οποίο περιέχει ρωγμές, μη ορατές με γυμνό οφθαλμό, καθαρίζεται επιμελώς.
2. Το διεισδυτικό υγρό απλώνεται στην επιφάνειά του υλικού ώστε να εισχωρήσει μέσα στις ρωγμές. Μικρότερα αντικείμενα βυθίζονται και ολόκληρα μέσα στο υγρό.
3. Στη συνέχεια το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε στο υλικό να παραμείνει μόνο το υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές.
4. Τέλος, στην επιφάνεια του υλικού απλώνεται ένα υγρό ή σκόνη «εμφάνισης» (developer), η οποία όταν έρχεται σε επαφή με το διεισδυτικό υγρό δημιουργεί έντονη χρωματική αντίθεση. Η έντονη αλλαγή στο χρώμα κάνει τις επιφανειακές ρωγμές ορατές.



Εικόνα 1.18. Τα στάδια της μεθόδου: 1) Καθαρισμός επιφάνειας, 2) Εφαρμογή διεισδυτικού υγρού, 3) Καθαρισμός από το υγρό, 4) Εφαρμογή της ουσίας εμφάνισης (developer).

Η επιλογή του κατάλληλου διεισδυτικού υγρού καθορίζεται από την ευκολία διείσδυσής του στις ρωγμές και φυσικά την ευκολία εξαγωγής του από αυτές μετά τον έλεγχο. Η απλούστερη και παλαιότερη μέθοδος χρησιμοποιεί για διεισδυτικό λεπτόρρευστο λάδι και για την εμφάνιση λευκή σκόνη ανθρακικού ασβεστίου, η οποία χρωματίζεται έντονα από το λάδι των ρωγμών. Παραλλαγές της μεθόδου περιλαμβάνουν φωσφορίζουσες χρωστικές που γίνονται εύκολα ορατές με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας.

1.4.1. Συνδυασμός Διεισδυτικού υγρού και Ραδιογραφίας

Μια πιο ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι ο συνδυασμός διεισδυτικού υγρού και ραδιογραφίας. Στις ραδιογραφίες δεν εντοπίζονται εύκολα οι επιφανειακές ρωγμές και τα διεισδυτικά υγρά δεν μας πληροφορούν για το τι γίνεται κάτω από την επιφάνεια. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων αφ' ενός αυξάνει την ποιότητα των ραδιογραφιών (contrast) με την επιλογή του κατάλληλου υγρού, και εφ' ετέρου μας πληροφορεί για το βάθος της επιφανειακής ρωγμής. Στη τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται οι διεισδυτικές ουσίες: νιτρικός άργυρος (silver nitrate), ιωδιούχος ψευδάργυρος (zinc iodide), χλωροφόρμιο (chloroform), και κυρίως, διωδιούχο μεθάνιο (diiodomethane).

1.4.2. Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection)

Πολλές συσκευές σχεδιάζονται να λειτουργούν με υψηλή εσωτερική πίεση και κατά συνέπεια πρέπει να ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με τη μέθοδο εντοπισμού διαρροών διοχετεύεται αέριο ή υγρό υπό πίεση στη συσκευή και ελέγχουμε την

παρουσία του στην άλλη πλευρά του τοιχώματος καθώς και τυχόν μειώσεις στη πίεση του.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές, σε άλλες διοχετεύεται αέριο ενώ το σώμα είναι βυθισμένο σε υγρό οπότε δημιουργούνται φυσαλίδες (bubble testing), και σε άλλες διοχετεύεται χρωματιστό ή φωσφορίζον υγρό το οποίο εντοπίζεται στην άλλη πλευρά με ειδικό φωτισμό π.χ. υπέρυθρες λυχνίες. Το αέριο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το ήλιο, λόγω της αδρανούς του φύσης. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικές προδιαγραφές, ευαισθησία αλλά και κόστος. Ο επόμενος πίνακας παραθέτει μερικές από τις μεθόδους ελέγχου διαρροής.

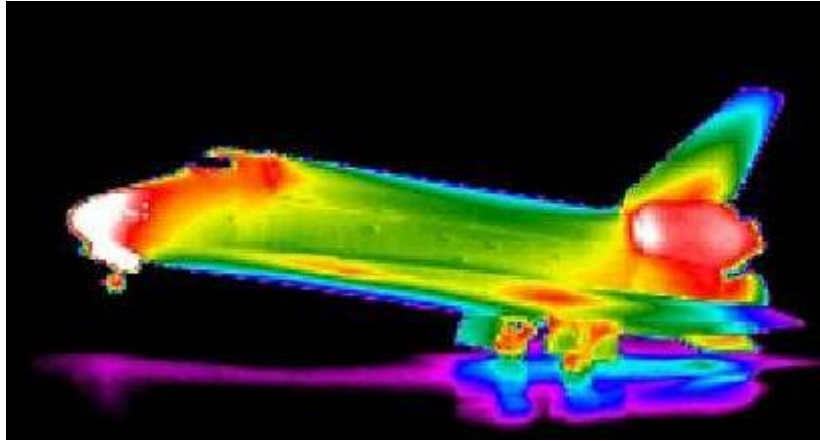
Method	Probe	Minimum detectable leak (cm ³ /s)	Comment
Water immersion	air/He	10 ⁻³	low cost
Dye penetrant	—	10 ⁻⁴	low cost
Pressure changes	—	10 ⁻⁵	low cost
Ionisation gauge	H, He, O	10 ⁻⁷	—
Ultrasonic	air	10 ⁻²	—
Radioisotope K-85	counter	10 ⁻¹⁰	special safety precautions needed
Mass spectrometer	He	10 ⁻¹⁰	versatile; very costly
Sniffer	He	10 ⁻⁶	versatile; costly

Εικόνα 1.19. Μέθοδοι ελέγχου διαρροής

1.5. ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

Οι θερμικές μέθοδοι ΜΚΕ αφορούν τη μέτρηση και χαρτογράφηση των επιφανειακών θερμοκρασιών καθώς η θερμότητα ρέει από ή και διαμέσου ενός αντικειμένου. Οι απλούστερες θερμικές μετρήσεις αφορούν τις μετρήσεις σημείων με ένα θερμοστοιχείο. Αυτό το είδος μέτρησης μπορεί να είναι χρήσιμο στον εντοπισμό θερμών σημείων.

Σε μια πιο προχωρημένη μορφή, η χρήση της θερμικής απεικόνισης συστημάτων επιτρέπει θερμικές πληροφορίες να συλλέγονται πολύ γρήγορα σε μια ευρεία περιοχή χωρίς την ανάγκη επαφής. Τα συστήματα θερμικής απεικόνισης είναι εργαλεία που δημιουργούν εικόνες θερμικής ροής και όχι φωτός. Η θερμική απεικόνιση είναι ένας γρήγορος, οικονομικός τρόπος υλοποίησης λεπτομερούς θερμικής ανάλυσης.



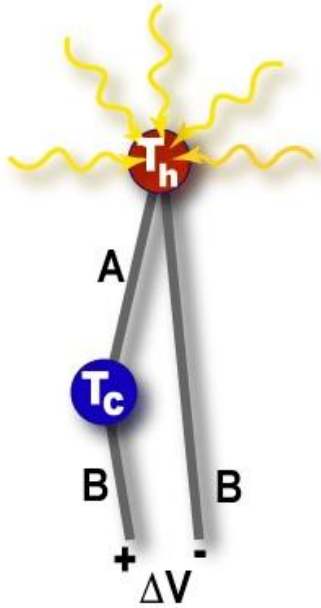
Εικόνα 1.20. Θερμικός χάρτης ενός διαστημικού λεωφορείου κατά την προσγείωση

Η βασική αρχή της θερμογραφίας ως μέθοδος ΜΚΕ είναι ότι η ροή της θερμότητας από την επιφάνεια ενός στερεού επηρεάζεται από εσωτερικές ασυνέχειες, όπως κενά, τρύπες και ρωγμές.

1.5.1. Το Φαινόμενο Seebeck

Το 1821, ο Thomas Johann Seebeck διαπίστωσε ότι ένα κύκλωμα κατασκευασμένο από δύο διαφορετικά μέταλλα, με τους κόμβους του να βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλούσε εκτροπή της βελόνας των πυξίδων. Αρχικά πίστευε ότι αυτό οφείλεται στο μαγνητισμό που προκαλείται από την διαφορά θερμοκρασίας αλλά σύντομα συνειδητοποίησε ότι δημιουργούταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά θερμοκρασίας παράγει ένα ηλεκτρικό δυναμικό (τάση) το οποίο μπορεί να οδηγηθεί μέσω ενός κλειστού κυκλώματος. Σήμερα, αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Seebeck.

Η διαφορά τάσης, DV , που παράγεται στους ακροδέκτες ενός ανοικτού κυκλώματος το οποίο δημιουργείται από ένα ζευγάρι διαφορετικών μετάλλων, Α και Β, των οποίων τα άκρα βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, είναι ευθέως ανάλογη προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πιο θερμού και του πιο ψυχρού άκρου, $T_h - T_c$. Η τάση Seebeck δεν εξαρτάται από την κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος των μετάλλων μεταξύ των άκρων. Αυτή είναι η φυσική βάση για ένα θερμοστοιχείο, η οποία εφευρέθηκε από τον Nobili το 1829.



Εικόνα 1.21. Θερμοστοιχείο

1.5.2. Θερμικός Ανιχνευτής

Ο Melloni χρησιμοποίησε την τεχνολογία του θερμοστοιχείου για την παραγωγή ενός θερμικού ανιχνευτή. Η συσκευή αυτή είναι κατασκευασμένη από θερμοστοιχεία τα οποία συνδέονται σε σειρά. Η απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από έναν από τα θερμοστοιχεία, το οποίο ονομάζεται ενεργός κόμβος, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του. Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ενεργού κόμβου και ενός κόμβου αναφοράς, ο οποίος διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία, παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας που δημιουργήθηκε. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμοηλεκτρική επίδραση. Ο Melloni ήταν σε θέση να αποδείξει ότι ένα άτομο 10 μέτρα μακριά μπορούσε να ανιχνευθεί με την εστίαση της θερμικής του ενέργειας στον ανιχνευτή.

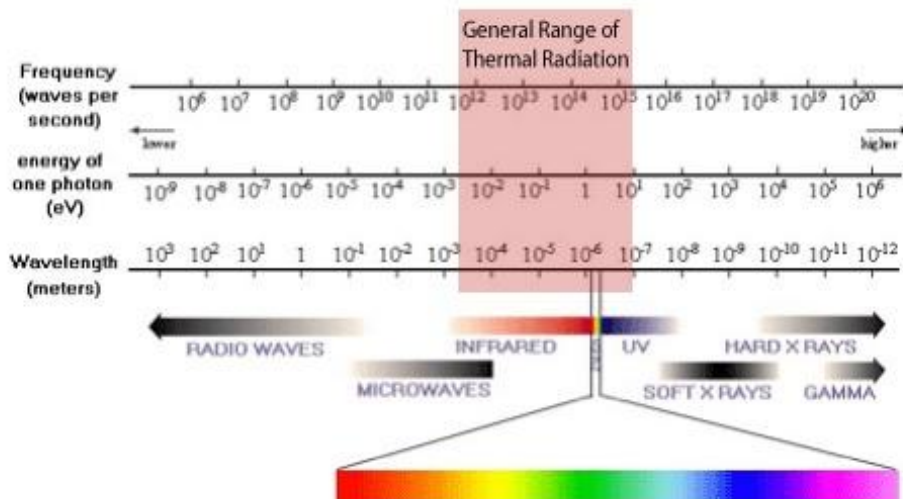
1.5.3. Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας

Η μεταφορά θερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω τριών μηχανισμών: αγωγή, μεταφορά (ή συναγωγή) και ακτινοβολία. Η αγωγή παρατηρείται κυρίως στα στερεά και σε μικρότερο βαθμό στα υγρά καθώς θερμότερα, πιο ενεργητικά μόρια μεταφέρουν την ενέργειά τους σε ψυχρότερα μόρια. Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα σε υγρά και αέρια και περιλαμβάνει την μαζική μετακίνηση των μορίων.

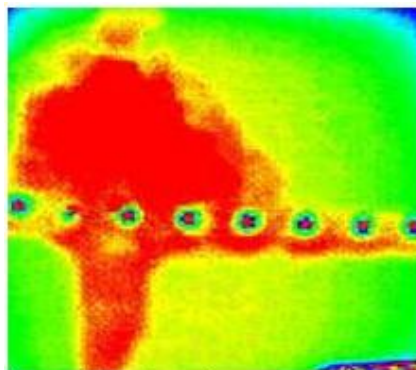
Ο τρίτος τρόπος κατά τον οποίο η θερμότητα μεταφέρεται είναι μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία δεν χρειάζεται κάποιο μέσο να ρέει και ως εκ τούτου μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και στο κενό. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παράγεται όταν τα ηλεκτρόνια χάνουν την ενέργεια τους και να πέσουν σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Τόσο το μήκος κύματος όσο και η ένταση της ακτινοβολίας έχουν άμεση σχέση με τη θερμοκρασία των μορίων ή ατόμων.



Εικόνα 1.22. Συσκευή θερμογραφίας



Εικόνα 1.23. Φάσμα συχνοτήτων θερμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 1.24. Εντοπισμός διάβρωσης και λέπτυνσης μετάλλων

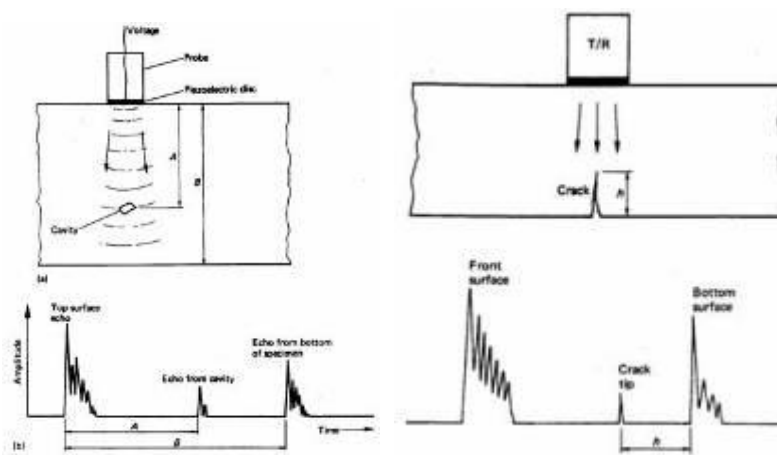
1.6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΕΡΗΧΩΝ (ULTRASONIC INSPECTION)

Οι μηχανικές δονήσεις διαδίδονται μέσα από στερεά, υγρά και αέρια καθώς η δόνηση μεταφέρεται από το ένα σωματίδιο της ύλης στο διπλανό του. Όταν τα σωματίδια της ύλης ταλαντώνουν και η κίνησή τους είναι κανονική τότε μετρείται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ($\text{Hz} = \text{sec}^{-1}$). Όταν μάλιστα η συχνότητα της δόνησης είναι μεταξύ 10 και 20000 Hz, ο ήχος ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί. Οι δονήσεις με συχνότητα πάνω από 20000 Hz οι «ήχοι» δεν ακούγονται και ονομάζονται υπέρηχοι (ultrasound ή ultrasonic).

Τα ηχητικά κύματα δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Τα κύματα των ήχων και υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε (ΜΚΕ).

1.6.1. Αρχή Λειτουργίας

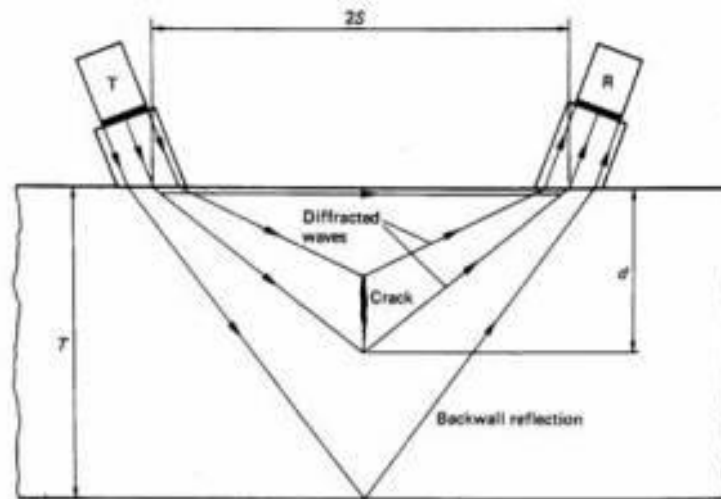
Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων μέσα στο υλικό και την καταγραφή των ανακλάσεων που επιστρέφουν. Ο παλμός υπερήχων δημιουργείται με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Οι ανακλάσεις δονούν τον ίδιο ή άλλο πιεζοηλεκτρικό δίσκο ο οποίος τις μετατρέπει πάλι σε τάσεις. Κάθε επιφάνεια ανακλά μια ηχώ του παλμού, με πρώτη απ' όλες την επιφάνεια στην οποία εφάπτεται ο δίσκος και τελευταία την απέναντι επιφάνεια του υλικού. Ανάμεσα στις δύο ανακλάσεις θα βρίσκεται η ηχώ από οποιοδήποτε ατέλεια υπάρχει μέσα στο υλικό και με εύρος που εξαρτάται από το μέγεθος κάθε ατέλειας.



Εικόνα 1.25. Αρχή λειτουργίας Ελέγχου με Υπερήχους. Εικόνα 1.26. Μέτρηση βάθους ρωγμής (h).

1.6.2. Χρόνος Περίθλασης (Time of Flight Diffraction ultrasonics – TOFD)

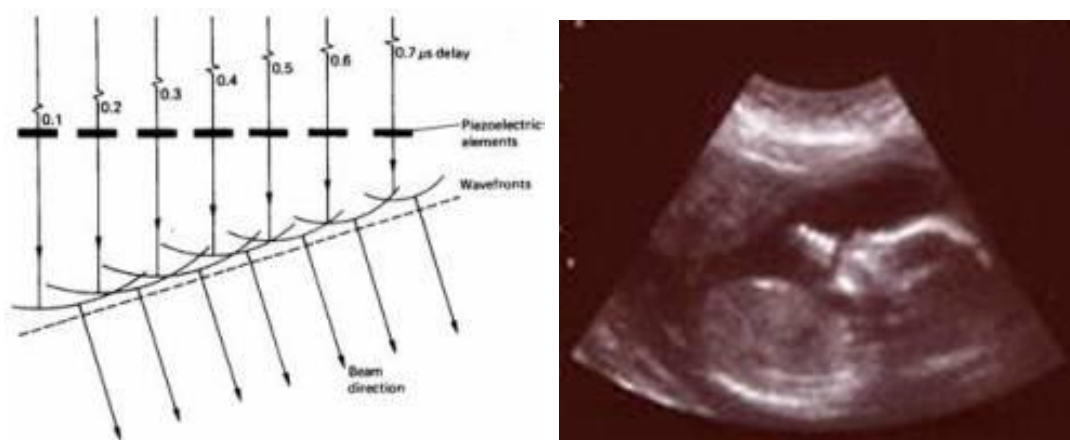
Μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου που μετρά το χρόνο ανάκλασης είναι η μέτρηση του χρόνου διάθλασης του παλμού υπερήχων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα κύματα που διαθλούνται στα χείλη των ρωγμών και βάσει της γεωμετρίας του δοκιμίου και των θέσεων του πομπού και του δέκτη υπολογίζει το βάθος και μήκος των ατελειών.



Εικόνα 1.27. Μέτρηση ρωγμής με την διάθλαση των υπερήχων (TOFD)

1.6.3. Συστοιχία Φάσης με Υπερήχους (Phased Array ultrasonics)

Οι σύγχρονες τεχνικές που είχαν επιτυχία σε παρόμοιους επιστημονικούς κλάδους, εφαρμόζονται και στις μεθόδους υπερήχων. Η συστοιχία φάσης, γνωστή από τα ραντάρ και σόναρ, υλοποιείται και εδώ με μια συστοιχία από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και μας δίνει τη δυνατότητα να κατευθύνουμε τη δέσμη των παλμών με μεγάλη ακρίβεια χωρίς τη παρεμβολή μηχανικών ή άλλων μέσων.



Εικόνα 1.28. Συστοιχία φάσης υπερήχων. Εικόνα 1.29. Εικόνα μωρού από συστοιχία φάσης υπερήχων.

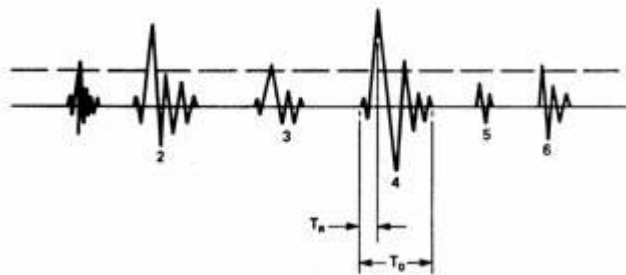
1.6.4. Περιστρεφόμενο σύστημα για αγωγούς (Internal Rotary Inspection System - IRIS)

Για την εφαρμογή των μεθόδων σε ειδικές κατασκευές έχουν αναπτυχθεί επί μέρους τεχνικές. Ειδικά για το εσωτερικό των αγωγών έχουν αναπτυχθεί συστήματα όπως το περιστρεφόμενο σύστημα ελέγχου (IRIS) που τοποθετείται μέσα στον αγωγό και τον σαρώνει κυκλικά και κατά μήκος για τον εντοπισμό ρωγμών και διαβρώσεων.

1.7. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ (ACOUSTIC EMISSION)

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, τότε το υλικό παράγει ήχους με τη μορφή διακριτών παλμών. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission – AE) ή Εκπομπή Κυμάτων Τάσης (Stress-Wave Emission – SWE). Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κυρίως πρόκειται για υπερήχους με συχνότητες από 30 kHz έως 30 MHz.

Κύρια χαρακτηριστικά των παλμών Ακουστικής Εκπομπής είναι ο χρόνος ανόδου TR, η συνολική διάρκεια TD και το πλάτος τους όταν ξεπερνά ένα ελάχιστο όριο (threshold). Η ρύθμιση του ελάχιστου ορίου είναι σημαντική για την επιλογή ή απόρριψη των παλμών (π.χ. στην επόμενη εικόνα, ο παλμός 5 αγνοείται ενώ ο 4 υπολογίζεται δυο φορές).

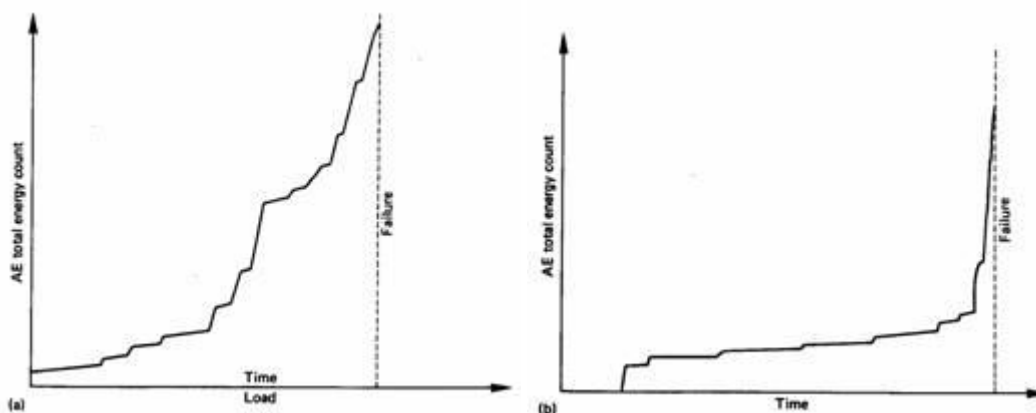


Εικόνα 1.30. Σειρά παλμών Ακουστικής Εκπομπής.

Η τελική επιλογή της παρουσίας ή όχι ενός παλμού είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία και στην οποία συμμετέχουν εκτός από ειδικά κυκλώματα φίλτρων και προγράμματα Η/Υ που υλοποιούν τεχνικές Θεωρίας Αποφάσεων και Αναγνώρισης Προτύπων.

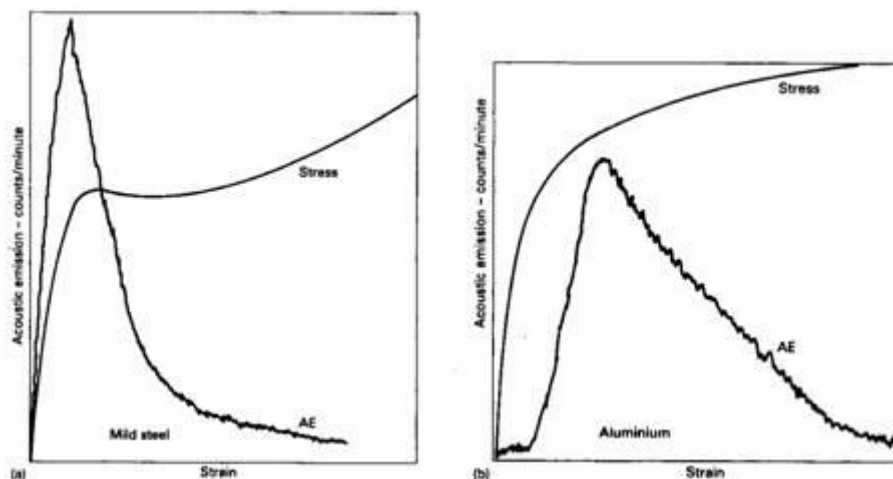
Οι πιο βασικές παράμετροι που μελετώνται γραφικά είναι η συνολική ενέργεια των παλμών και το πλήθος των αφικνούμενων παλμών στη μονάδα του χρόνου. Οι παράμετροι αυτοί της ΑΕ συγκρίνονται και συνδυάζονται με άλλες παραμέτρους της κόπωσης ώστε να προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Συσχετίζοντας π.χ., την

συνολική ενέργεια των παλμών με τον χρόνο ή τους κύκλους φόρτισης προκύπτουν διαγράμματα τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τα διαγράμματα της μορφής $\alpha-N$ (μήκους ρωγμής – κύκλων φόρτισης).



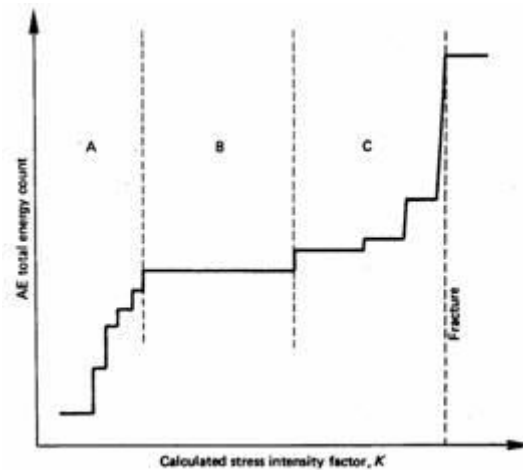
Εικόνα 1.31. Διάγραμμα ενέργειας ΑΕ προς χρόνο φόρτισης (α) για «θορυβώδη» υλικά και (β) για «ήσυχα» υλικά.

Αντίστοιχα, συσχετίζοντας το πλήθος των αφικνούμενων παλμών ανά λεπτό με τη παραμόρφωση του υλικού, μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάγραμμα τους μαζί με το διάγραμμα $\sigma-\epsilon$ (τάσης-παραμόρφωσης) όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 1.32. Διάγραμμα πλήθους παλμών ΑΕ προς ανηγμένη παραμόρφωση ϵ : (α) για ατσάλι και (β) για αλουμίνιο.

Τέλος, αν σχεδιάσουμε τη συνολική ενέργεια των παλμών ΑΕ ως προς τον συντελεστή έντασης τάσεων K προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα όπου φαίνεται ότι υπάρχει μια αύξηση των εκπομπών ΑΕ όταν το K πλησιάζει τη δυσθραυστότητα (fracture toughness KIC).



Εικόνα 1.33. Διάγραμμα ενέργειας ΑΕ προς συντελεστή K .

1.7.1. Εντοπισμός μιας πηγής ΑΕ

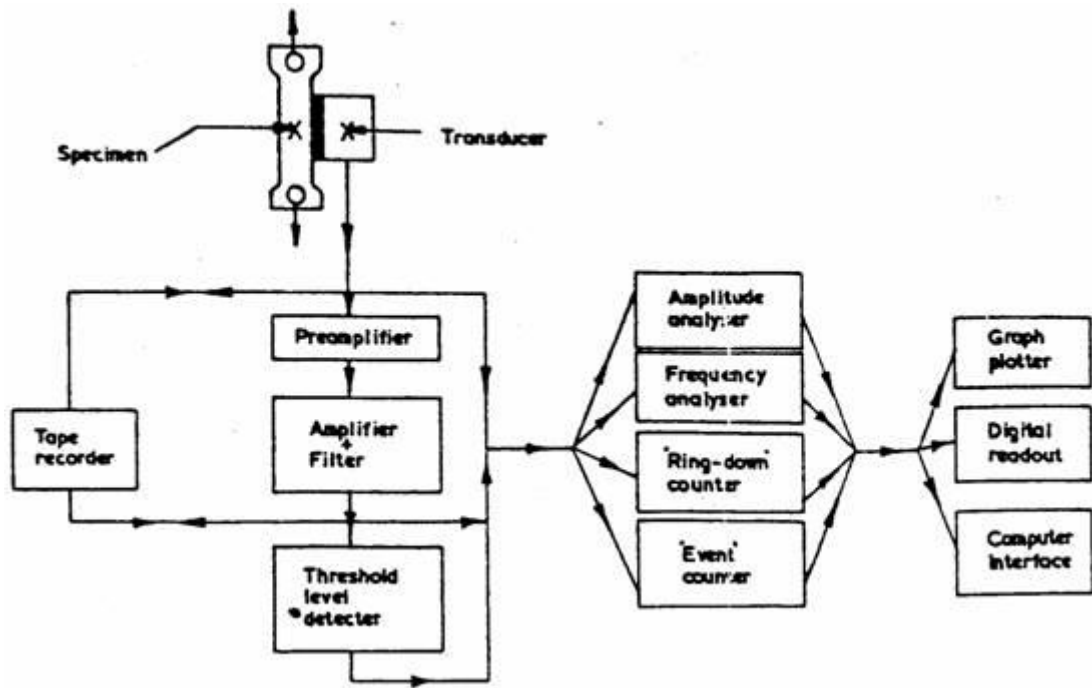
Μια από τις ευρύτερα διαδεδομένες εφαρμογές της ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης του ελαττώματος ή της ατέλειας που παράγει τους παλμούς ΑΕ. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί πολλούς αισθητήρες υπερήχων (10-20). Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικειμένου σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να καλύπτουν όλο το αντικείμενο. Η χρονική συσχέτιση των σημάτων τους επιτρέπει τον γεωμετρικό προσδιορισμό της θέσης της πηγής κάθε παλμού ΑΕ. Για ατέλειες που βρίσκονται σε ακτίνα περίπου 1 m από τους αισθητήρες, μπορεί να εντοπιστεί η θέση τους με ακρίβεια εκατοστού (1 cm).

1.7.2. Υπέρ και Κατά της Μεθόδου ΑΕ

Η μέθοδος των ΑΕ είναι μια από τις νεότερες μεθόδους ΜΚΕ. Έχει ήδη περάσει τα βασικά στάδια ανάπτυξης και ήδη έχουν δοθεί οι πρώτες τυποποιήσεις από την ASTM με πιο σημαντικό το ASTM.E.750.

Τα κυριότερα προτερήματα της μεθόδου είναι ότι: μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες και κατασκευές, μας δείχνει ότι υπάρχουν ατέλειες που επεκτείνονται, εντοπίζει τις ατέλειες, τις εντοπίζει ακόμη και σε απρόσιτα σημεία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενώ η κατασκευή μας λειτουργεί (on-line).

Η μέθοδος έχει φυσικά και μειονεκτήματα όπως: δεν εκπέμπονται παλμοί ΑΕ από όλες τις ατέλειες του υλικού, η απόδοσή της εξαρτάται από τη μέθοδο φόρτισης της κατασκευής και από την ύπαρξη θορύβου, δεν καθορίζει το μέγεθος της ατέλειας και δεν είναι ακόμη πλήρως τυποποιημένη.



Εικόνα 1.34. Συνδεσμολογία μεθόδου ΑΕ.

1.7.3. Μέθοδοι Ακουστικής Πρόσκρουσης (Acoustic Impact)

Η μέθοδος αυτή έρχεται από τα πρώτα χρόνια του σιδηροδρόμου όταν, οι ελεγκτές των οχημάτων, χτυπούσαν με σφυριά τους τροχούς του τραίνου για να διαπιστώσουν από τον ήχο τυχόν βλάβες. Σήμερα το «χτύπημα» έχει τυποποιηθεί και αυτοματοποιηθεί και ο ήχος αναλύεται ηλεκτρονικά ώστε να εξαχθούν οι χρήσιμες πληροφορίες.

Υπάρχει μια σειρά τεχνικών που βασίζονται στην ίδια αρχή όπως είναι: η ηχητική μέθοδος (sonic), η ακουστική μέθοδος (acoustic), η μέθοδος μηχανικής εμπέδησης (mechanical impedance), και, η μέθοδος των δονήσεων (vibration).

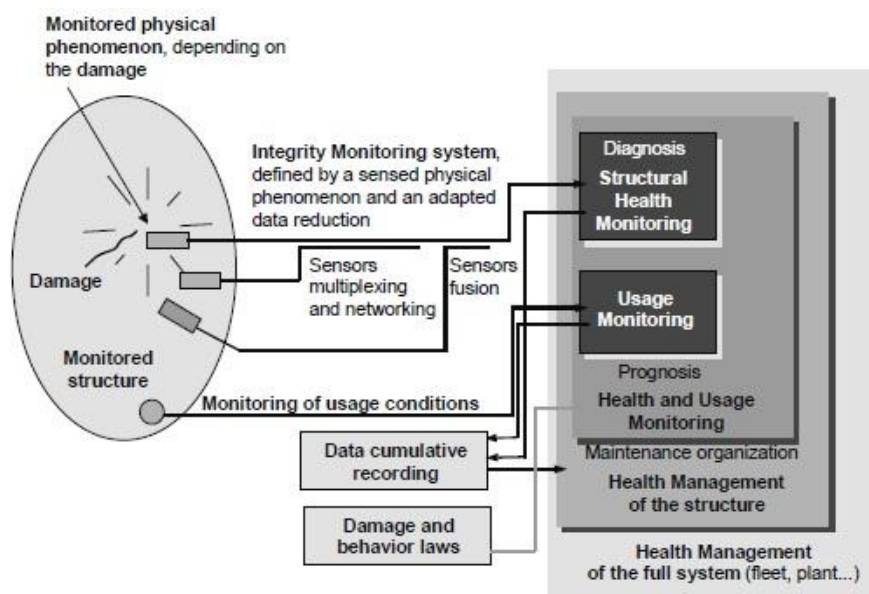
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ (STRUCTURAL HEALTH MONITORING - SHM)

2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας έχει ως στόχο να δώσει, σε κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κατασκευής, μια διάγνωση της κατάστασης των υλικών που την διέπουν, των διαφόρων μερών της και των τμημάτων που αποτελούν το σύνολό της. Η κατάσταση της κατασκευής πρέπει να παραμείνει στα πλαίσια που προβλέπει η μελέτη, αν και αυτή μπορεί να μεταβληθεί από τη φυσιολογική πάροδο του χρόνου λόγω της χρήσης, με τη δράση του περιβάλλοντος, καθώς και από τυχαία γεγονότα. Χάρη στο χρόνο παρακολούθησης, ο οποίος καθιστά δυνατή την εξέταση του ιστορικού της κατασκευής και με τη βοήθεια της παρακολούθησης της χρήσης, μπορεί να παρέχει επίσης μια πρόγνωση (εξέλιξη βλαβών, υπολειπόμενη διάρκεια ζωής κλπ).

Αν λάβουμε υπόψη μόνο την πρώτη λειτουργία, τη διάγνωση, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας είναι ένας νέος βελτιωμένος τρόπος για Μη Καταστροφική Αξιολόγηση των κατασκευών. Αυτό είναι εν μέρει αλήθεια, αλλά η Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας είναι κάτι πολύ περισσότερο. Περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αισθητήρων, ενδεχομένως έξυπνων υλικών, τη μετάδοση δεδομένων, την υπολογιστική ισχύ και την ικανότητα επεξεργασίας μέσα στις δομές. Καθιστά δυνατή την επανεξέταση του σχεδιασμού της δομής και την πλήρη διαχείριση της δομής αυτής εξ ολοκλήρου αλλά και δομών που θεωρούνται κομμάτια μεγαλύτερων συστημάτων.



Εικόνα 2.1. Βασικές αρχές και οργάνωση ενός συστήματος Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο οργανώνεται ένα τυπικό συστήματος SHM. Το πρώτο μέρος του συστήματος, το οποίο αντιστοιχεί στην λειτουργία ελέγχου ακεραιότητας της δομής, ορίζεται από:

- i) το είδος του φυσικού φαινομένου, το οποίο συνδέεται με την ζημία και παρακολουθείται από τον αισθητήρα
- ii) το είδος του φυσικού φαινομένου που χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα ώστε να παράγει ένα σήμα (συνήθως ηλεκτρικό) αποστέλλεται στο υποσύστημα ανάκτησης και αποθήκευση.

Αρκετοί αισθητήρες του ίδιου τύπου, οι οποίοι αποτελούν ένα δίκτυο, μπορούν να διασταυρωθούν και τα δεδομένα τους συνενωθούν με αυτά από άλλους τύπους αισθητήρων. Ενδεχομένως, άλλοι αισθητήρες, παρακολουθούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το καθιστούν δυνατό να εκτελέσει τη λειτουργία παρακολούθησης χρήσης. Το σήμα που παραλήφθηκε από το υποσύστημα παρακολούθησης ακεραιότητας, παράλληλα με τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί προηγουμένως, χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή για την δημιουργία μιας διάγνωση. Η ανάμιξη των πληροφοριών του υποσυστήματος παρακολούθησης της ακεραιότητας με αυτών του υποσυστήματος παρακολούθησης χρήσης και με των γνώσεων μηχανικής και νόμων συμπεριφοράς καθιστά δυνατή την πρόγνωση (εναπομένουσα ζωή της κατασκευής) και την διαχείριση της κατασκευής (οργάνωση των εργασιών συντήρησης, επισκευών, κ.λπ.).

Τέλος, παρόμοια συστήματα διαχείρισης δομών που σχετίζονται με άλλες δομές που αποτελούν ένα είδος υπέρ-συστήματος (ένα σμήνος αεροσκαφών, μια ομάδα ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών, κτλ.) καθιστούν δυνατή την διαχείριση του υπέρ-συστήματος. Φυσικά, λειτουργικά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν ακόμα και αν δεν είναι τόσο ολοκληρωμένα, όπως περιγράφονται εδώ.

2.2. ΚΙΝΗΤΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Το να γνωρίζουμε την ακεραιότητα κατασκευών σε χρήση, σε συνεχή πραγματικό χρόνο είναι ένας πολύ σημαντικός στόχος για τους κατασκευαστές, τους τελικούς χρήστες και τους συντηρητές. Ως αποτέλεσμα της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας προκύπτουν:

- Η βέλτιστη χρήση της κατασκευής, ελαχιστοποίηση του χρόνου επιθεώρησης και η αποφυγή καταστροφικών αστοχιών.
- Η δυνατότητα βελτίωσης των προϊόντων στον κατασκευαστή

- Αλλάζει δραστικά την οργάνωση της εργασίας των υπηρεσιών συντήρησης:

i) στοχεύοντας στην αντικατάσταση τακτικών και περιοδικών έλεγχων συντήρησης με συντήρηση βάσει επιδόσεων καθώς και με τη μείωση του υπάρχοντος εργατικού δυναμικού συντήρησης και ιδίως με την αποφυγή αποσυναρμολόγησης μέρων όπου δεν έχουν κρυφές ασυνέχειες.

ii) με δραστική ελαχιστοποίηση της ανθρώπινης συμμετοχής και κατά συνέπεια τη μείωση της εργασίας και τα ανθρώπινα λάθη και ως εκ τούτου τη βελτίωση της ασφάλειας και της αξιοπιστία.

Η βελτίωση της ασφάλειας φαίνεται να είναι ένα ισχυρό κίνητρο, ιδιαίτερα μετά κάποια θεαματικά ατυχήματα λόγω:

i) μη ικανοποιητικής συντήρησης, για παράδειγμα, στον αεροναυπηγικό τομέα, το ατύχημα του Aloha Airlines ή στον τομέα της μηχανικής, την κατάρρευση της γέφυρας του ποταμού Mianus

ii) της κακώς ελεγχόμενης διαδικασίας κατασκευής, για παράδειγμα, την κατάρρευση γέφυρας Injak.

Και στους δύο τομείς παρατηρήθηκε το πρόβλημα της γήρανσης των κατασκευών όπου μεταγενέστερα καθιερώθηκαν διαδικασίες. Για να επισημανθεί η σημασία του προβλήματος της κατασκευαστικής γήρανσης, υπενθυμίζεται η ακόλουθη στατιστική: επιθεώρηση γέφυρας στα τέλη της δεκαετίας του 1980 αποκάλυψε ότι στις ΗΠΑ από τις 576.000 γέφυρες εθνικών οδών, 236.000 κρίθηκαν ανεπαρκείς υπό την οπτική των παρόντων προτύπων.

Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση των διαφόρων αιτιών των αεροπορικών ατυχημάτων επισημαίνει την σχετικά χαμηλή επίδραση της ανεπαρκούς συντήρησης. Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η συντήρηση είναι υπεύθυνη μόνο για το 14% των απωλειών κύτους. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο το 4% του συνόλου των ατυχημάτων οφείλονται σε δομικές αδυναμίες. Συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι, χάρη στην εισαγωγή της παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας επιπλέον η βελτίωση των τεχνικών συντήρησης και μια μείωση ατυχημάτων που βασίζονται σε δομικά προβλήματα κατά δύο μονάδες θα οδηγούσε σε μια παγκόσμια μείωση των ατυχημάτων χαμηλότερη της τάξης του 10%, το οποίο απέχει πολύ από αυτό που απαιτείται για να αποφευχθεί η σημαντική αύξηση του αριθμού των ατυχημάτων στο εγγύς μέλλον, εάν η εναέρια κυκλοφορία συνεχίσει να αυξάνεται.

Το οικονομικό κίνητρο είναι το ισχυρότερο, κυρίως για τους τελικούς χρήστες. Στην πραγματικότητα για τις κατασκευές με συστήματα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας, τα προβλεπόμενα οφέλη είναι το σταθερό κόστος συντήρησης και η αξιοπιστία, ενάντια στο αυξανόμενο κόστος συντήρησης και τη μειωμένη αξιοπιστία των κλασικών κατασκευών χωρίς τέτοια συστήματα.



Εικόνα 2.2. Πτήση 243 των αερογραμμών Aloha, Απρίλιος 1988, ανεπαρκής συντήρηση
Εικόνα 2.3. Κατάρρευση της γέφυρας Ιηζακα, Ιούλιος 1998, ανεπαρκής κατασκευαστικός έλεγχος

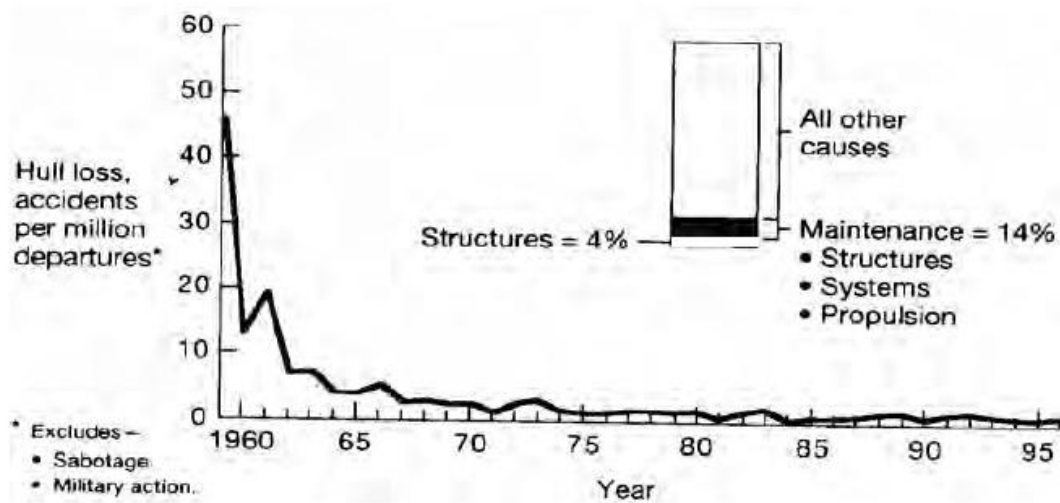
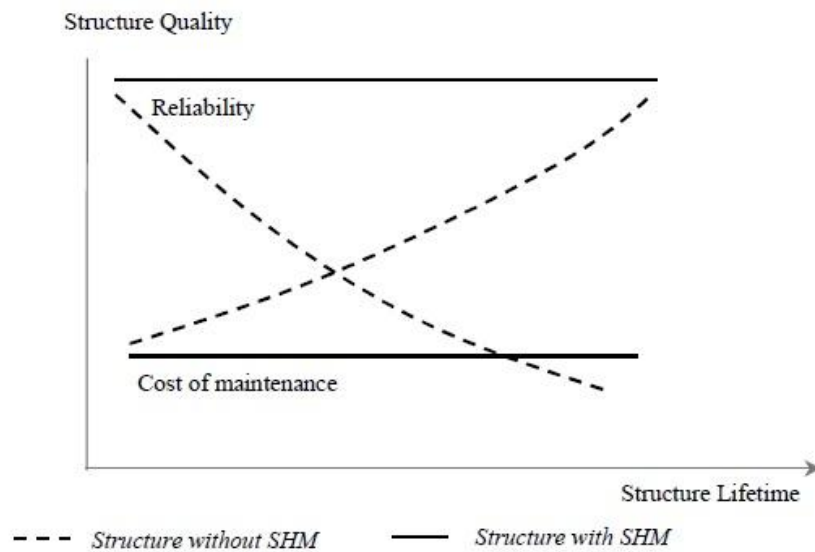


Figure 1.3. Origin of hull losses: safety record for the worldwide commercial jet fleet, from [GOR 97]



Εικόνα 2.4. Πρόβλεψη απωλειών κυτών, αρχείο ασφάλειας παγκοσμίου εμπορικού σμήνου

Εικόνα 2.5. Οφέλη των τελικών χρηστών από την παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας

Ο οικονομικός αντίκτυπος της εισαγωγής της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των αεροσκαφών δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί. Εξαρτάται από τις συνθήκες χρήσης. Επίσης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος κατά το κατασκευαστικό κόστος της κατασκευής. Το κόστος των συστημάτων παρακολούθησης δεν πρέπει να είναι υπέρογκα υψηλό ώστε να υπερνικά την ενδεχόμενη αποταμίευση από τις αναμενόμενες συντηρήσεις.

Inspection type	Current inspection time (% of total)	Estimated potential for smart systems	Time saved (% of total)
Flight line	16	0.40	6.5
Scheduled	31	0.45	14.0
Unscheduled	16	0.10	1.5
Service instructions	37	0.60	22.0
	100		44.0

Εικόνα 2.6. Εκτιμώμενη εξοικονόμηση χρόνου εργασιών επιθεώρησης από τη χρήση της Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας

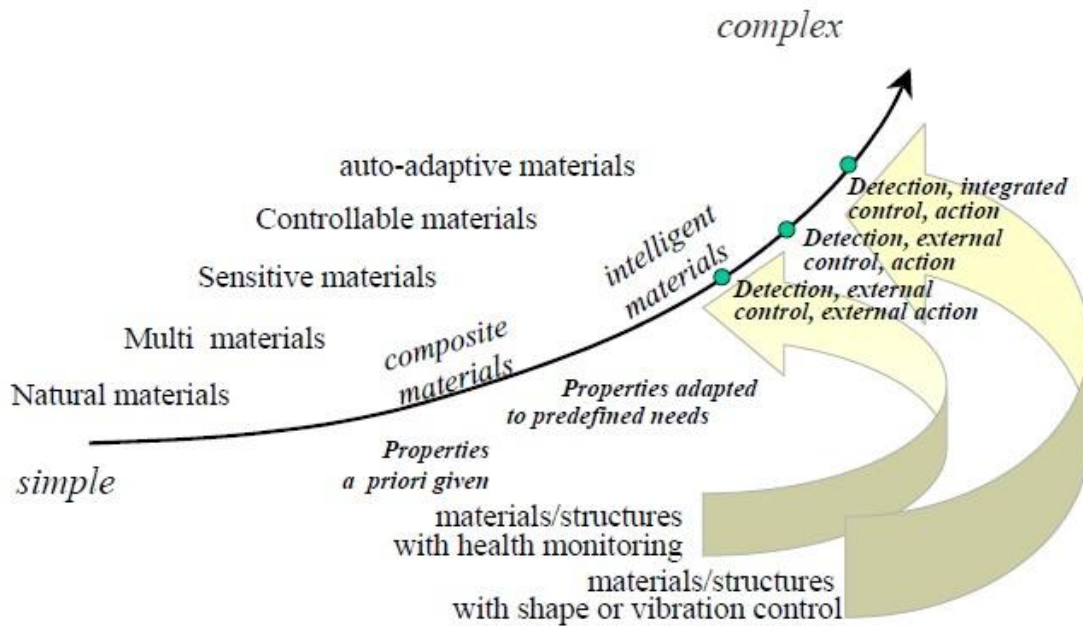
Επιπλέον στον αεροναυπηγικό τομέα, υπάρχει επίσης όφελος και για τους κατασκευαστές. Λαμβάνοντας υπόψη την μόνιμη παρουσία αισθητήρων στο στάδιο της σχεδίασης θα επιτραπεί η μείωση στα περιθώρια ασφαλείας σε μερικούς κρίσιμους τομείς. Η μείωση του βάρους σε αυτήν την περίπτωση θα είναι εφικτή, δίνοντας μια αύξηση στις επιδόσεις των αεροσκαφών και ταυτόχρονα μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων.

2.3. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΣ ΤΡΟΠΩΣ ΝΑ ΚΑΝΟΥΜΕ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΙΟ ΕΞΥΠΝΕΣ

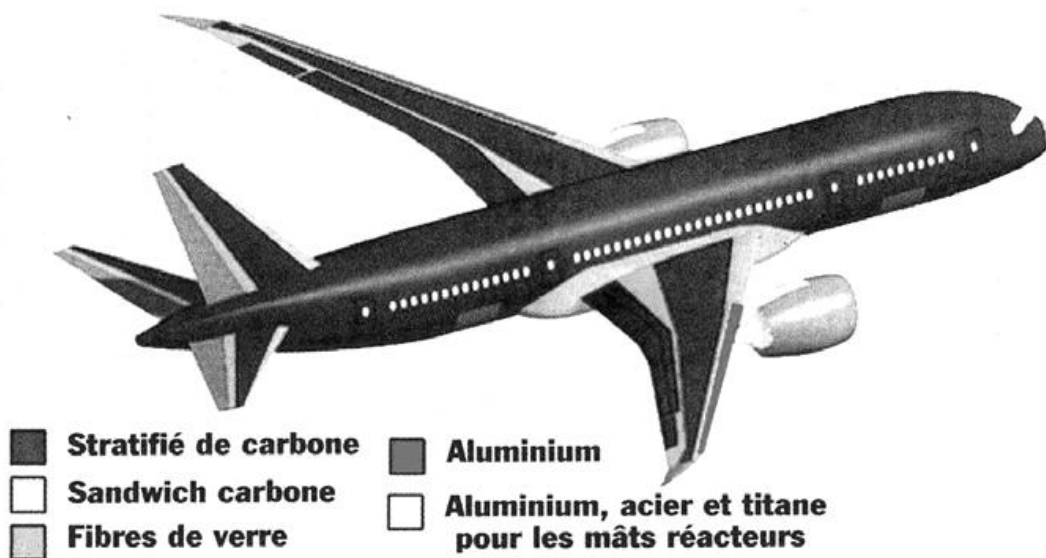
Με το τέλος της δεκαετίας του '80, η ιδέα έξυπνων υλικών και κατασκευών έχει γίνει όλο και πιο αισθητή στο μυαλό των μηχανικών. Αυτή η νέα ιδέα έγινε εξαιρετικά καλοδεχούμενη στα πεδία της αεροναυπηγικής και της μηχανικής κατασκευών. Στην πραγματικότητα η ιδέα αυτή είναι την παρούσα χρονική στιγμή ένας εκ των κινητήριων μοχλών για την καινοτομία σε όλους τους τομείς.

Η ιδέα των έξυπνων υλικών και κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βήμα προς τη γενικότερη εξέλιξη των αντικειμένων που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο. Υπάρχει μια συνεχής έλξη από το απλό στο σύνθετο στην ανθρώπινη παραγωγή, ξεκινώντας από τη χρήση ομογενών υλικών, τα οποία παρέχονται από τη φύση και είναι αποδεκτά με τις φυσικές τους ιδιότητες, ακολουθούν τα πολύ-υλικά και συγκεκριμένα σύνθετα υλικά τα οποία μας επιτρέπουν να δημιουργήσουμε κατασκευές με ιδιότητες προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες

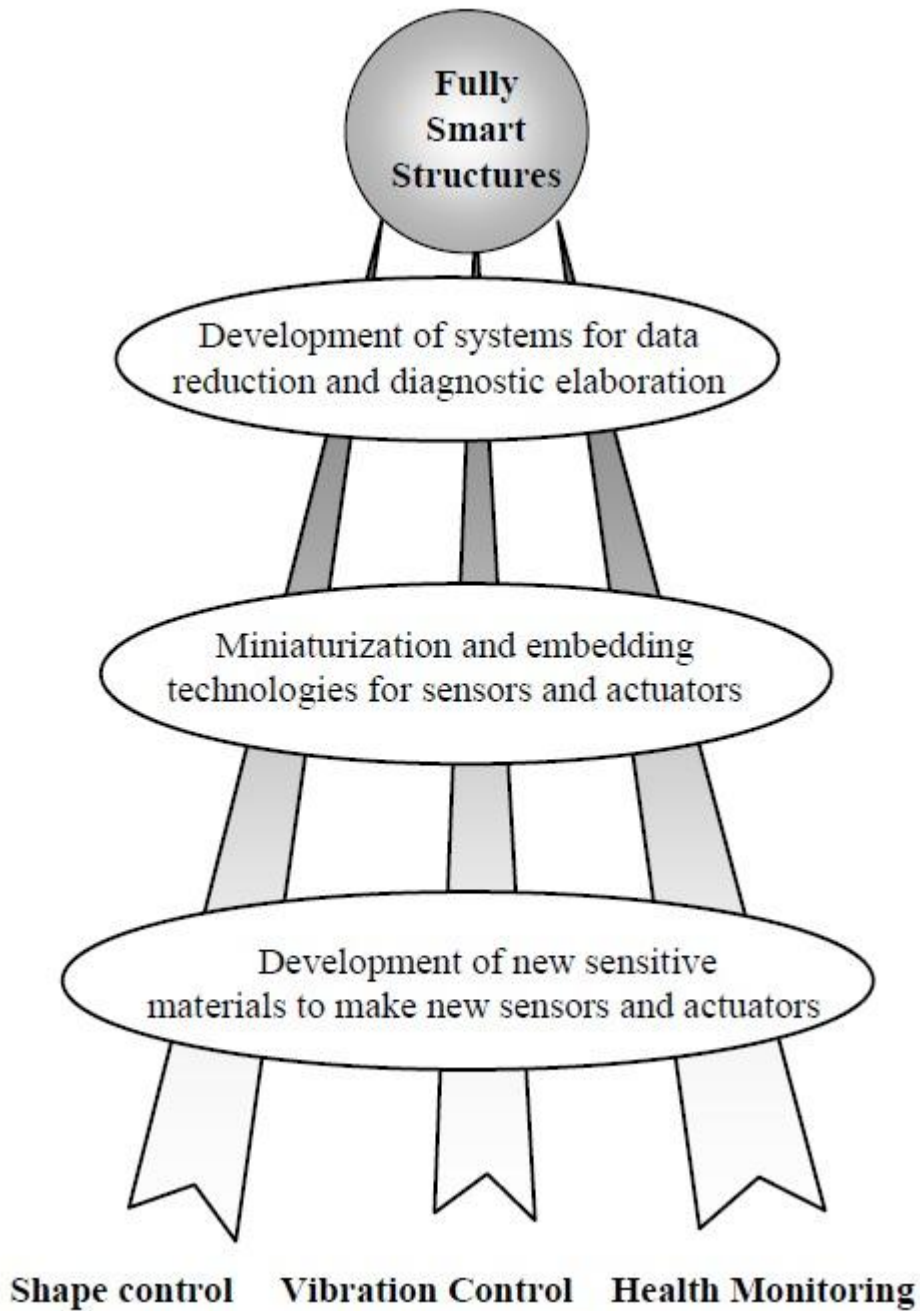
χρήσεις. Στην πραγματικότητα τα σύνθετα υλικά αντικαθιστούν ομογενή υλικά σε όλο και περισσότερες κατασκευές. Αυτό παρατηρείται κυρίως στον αεροναυπηγικό τομέα. Παραδείγματος χάρη, σύνθετα μέρη χρησιμοποιούνται πλέον, ή προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν, στα μοντέρνα αεροσκάφη. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αεροσκάφος Boeing 7E7 Dreamliner είναι το πρώτο το οποίο θα εντάξει συστήματα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας στο σχεδιασμό του και συγκεκριμένα συστήματα πρόβλεψης πρόσκρουσης.



Εικόνα 2.7. Γενικότερη εξέλιξη υλικών και κατασκευών που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο και η θέση της παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας καθώς και η ένταξη της στις κατασκευές



Εικόνα 2.8. Boeing 7E7 Dreamliner: το 50% της κατασκευής του αποτελείται από σύνθετα υλικά



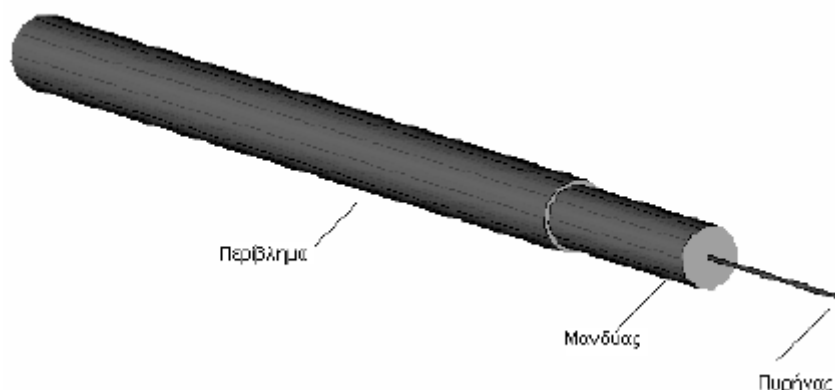
Εικόνα 2.9. Συμπληρωματικότητα των συστημάτων Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας κατά τον έλεγχο της μορφής και τον δονήσεων

Το επόμενο βήμα είναι η μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών και των κατασκευών ώστε να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Αυτό απαιτεί να είναι ευαίσθητα, ελεγχόμενα και ενεργά. Τα διάφορα επίπεδα των "έξυπνων" υλικών και κατασκευών ανταποκρίνονται στην ύπαρξη της μιας, των δυο ή και των τριών αυτών ιδιοτήτων. Έτσι λοιπόν τα ευαίσθητα, ελεγχόμενα και

προσαρμοζόμενα υλικά/κατασκευές μπορούν να διαχωριστούν. Υπάρχουν τρεις τύποι, αυτά που ελέγχουν το σχήμα τους, αυτά που ελέγχουν τις δονήσεις τους και αυτά που ελέγχουν την υγεία τους. Στην πραγματικότητα όλα τα επιτεύγματα σε αυτό το πεδίο έχουν ως κύρια επιδίωξη να κάνουν τα υλικά και τις κατασκευές πιο ευαίσθητες, εισάγοντας αισθητήρες. Μια εξέλιξη θα ήταν η ανάπτυξη αυτό-διορθούμενων υλικών και κατασκευών. Όσον αφορά τα συστήματα αυτό-ίασης όμως πολύ λίγες προσπάθειες έχουν γίνει.

2.4. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Μελετώντας τις εξελίξεις στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, διαπιστώνεται η σαφής ανάπτυξη που επήλθε στο χώρο με τη χρήση των οπτικών ινών για τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Βασικό χαρακτηριστικό τους, όπως εξάλλου προκύπτει και από το όνομα τους, είναι η δυνατότητα ταχείας μεταφοράς πληροφοριών υπό τη μορφή παλμών φωτός μέσα από τον πυρήνα τους.



Εικόνα 2.10. Οπτική ίνα

Κυρίαρχη απαίτηση για μία κατασκευή με δυνατότητα αίσθησης είναι η κατά το δυνατόν πιο γρήγορη και ακριβής ανίχνευση της μετρούμενης ποσότητας (μηχ. τάση, θερμοκρασία, τροπή) με ταυτόχρονη δυνατότητα μετάδοσης αυτής στις διατάξεις ελέγχου της κατασκευής. Παράλληλα θα πρέπει η μέτρηση να είναι ανεξάρτητη από εξωτερικούς παράγοντες όπως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, κ.α., να έχει ικανοποιητική ανάλυση και ευκολία προσαρμογής στην όλη κατασκευή, ιδιαίτερα όταν προορίζεται για χρήση σε αεροναυπηγικές κατασκευές. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι τέτοιας μορφής πλεονεκτήματα παρουσιάζει η χρήση οπτικών ινών και οπτικών αισθητήρων, για την ανίχνευση μετρούμενων ποσοτήτων.

Η μέθοδος κατασκευής των οπτικών αισθητήρων στηρίζεται στην κατάλληλη ολοκλήρωση δυνατοτήτων αίσθησης στις ίνες, η οποία ουσιαστικά μεταφράζεται σε ανίχνευση μεταβολής χαρακτηριστικών της μετάδοσης φωτός όπως ένταση, φάση, πόλωση, συχνότητα, κ.α. που προκαλείται από τη μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών πεδίου. Ανάλογα με τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, οι οπτικοί αισθητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες.

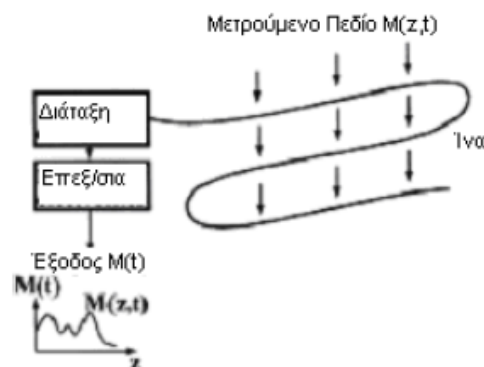
Η βασική απαίτηση μιας διάταξης οπτικού αισθητήρα είναι η μέτρηση μιας παραμέτρου πεδίου σε μια περιοχή ενδιαφέροντος. Ανάλογα το εύρος της περιοχής αυτής καθορίζονται τα ακόλουθα είδη αισθητήρων:

- Εάν η περιοχή είναι σημειακή, ο αισθητήρας ονομάζεται σημειακός αισθητήρας. Με αυτή τη φιλοσοφία λειτουργούν η πλειοψηφία των οπτικών αισθητήρων οι οποίοι μετρούν μεγέθη θερμοκρασίας, πίεσης, τροπής, κλπ



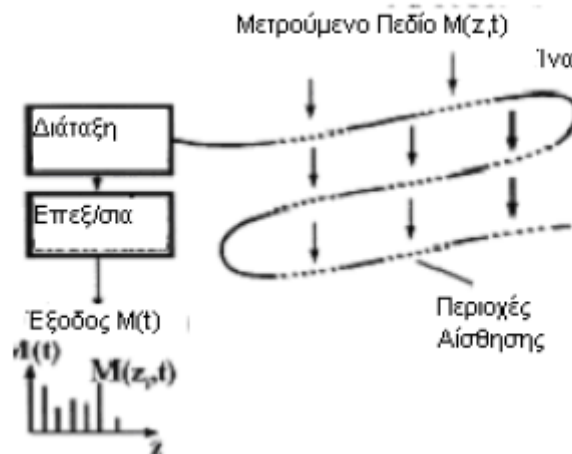
Εικόνα 2.11. Σημειακός οπτικός αισθητήρας

- Εάν η περιοχή μέτρησης δεν είναι σημειακή αλλά κατανομημένη, ο αισθητήρας καλείται κατανομημένος και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτείται η λήψη μετρήσεως μιας παραμέτρου κατά μήκος μιας περιοχής οπτικής ίνας (π.χ. για την μέτρηση της κατανομής της θερμοκρασίας)



Εικόνα 2.12. Κατανομημένος οπτικός αισθητήρας

- Εάν η περιοχή μέτρησης είναι σημειακή και κατανεμημένη ταυτόχρονα, ο αισθητήρας καλείται ημι-κατανεμημένος. Ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μέτρησης σε συγκεκριμένες μικρές κατανεμημένες περιοχές (π.χ. χημικές διεργασίες).



Εικόνα 2.13. Ημι-κατανεμημένος οπτικός αισθητήρας

2.5. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών είναι μια μορφή παρακολούθησης που με την πάροδο του χρόνου γίνεται όλο και πιο δημοφιλής. Οι αισθητήρες πλέον τοποθετούνται στην κατασκευή κατά το στάδιο της υλοποίησης της και αποτελούν κομμάτι αυτής από το σχεδιασμό της, κυρίως σε αεροναυπηγικές κατασκευές.

Ένας παράγοντας που καθιστά αυτή τη μέθοδο τόσο δημοφιλή είναι η εύκολη τοποθέτηση των αισθητήρων. Επίσης το κόστος εισαγωγής αυτής της μεθόδου σε μία κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί αρκετά χαμηλό σε σχέση με το κόστος της μελλοντικής συντήρησης της κατασκευής λόγω του ότι οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα σε πραγματικό χρόνο χωρίς να σταματάει η λειτουργία της κατασκευής.

Παρακάτω θα επεκταθούμε περαιτέρω στη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για την Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας των κατασκευών, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

ΜΕΡΟΣ Β

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

Για την εκπόνηση των πειραμάτων θα χρησιμοποιηθεί η συσκευή SMART της εταιρίας Acellent η οποία χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου οι αισθητήρες αυτοί δημιουργούν οδεύοντα κύματα Lamb στα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

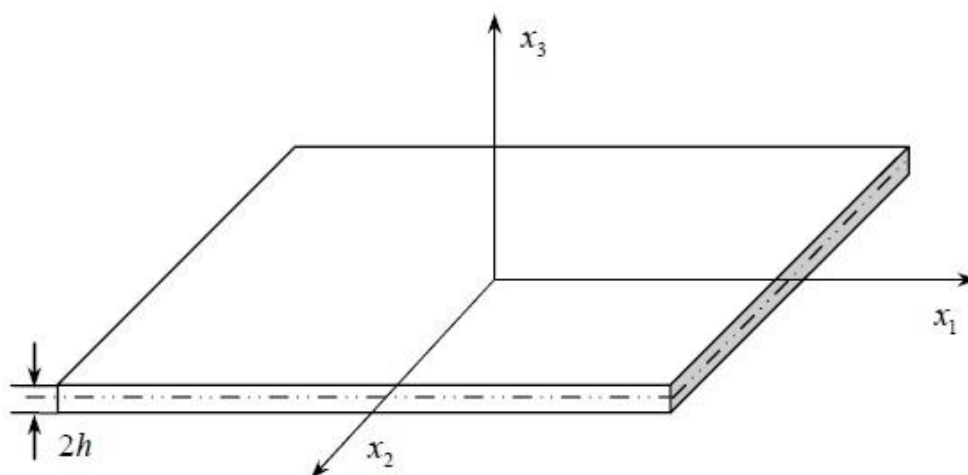
3.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΚΥΜΑΤΑ LAMB

Αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την ανίχνευση ατελειών σε υλικά, ωστόσο μέθοδοι που χρησιμοποιούν κύματα Lamb θεωρούνται ως ένας αξιόπιστος τρόπος για να εντοπιστούν ατέλειες και ασυνέχειες σε αυτά τα υλικά. Ο Λόρδος Rayleigh ήταν ο πρώτος ο οποίος επεξήγησε την διάδοση κυμάτων κατά μήκος μιας καθοδηγούμενης επιφάνειας, το 1889, τα κύματα αυτά είναι γνωστά ως κύματα Rayleigh σήμερα. Μετά από την εργασία του Rayleigh, ο Horace Lamb, Βρετανός μαθηματικός εφαρμογών, αναφέρετε στα κύματα που ανακάλυψε στις πλάκες σε μια από τις ιστορικές δημοσιεύσεις του, Waves in an Elastic Plate, το 1917 και τα κύματα αυτά ονομάστηκαν κατ' αυτόν ως κύματα Lamb. Ο Lamb επίσης εδραίωσε τις θεωρητικές βάσεις για τέτοιου είδους κύματα.

Τα κύματα Lamb δεν προσέλκυσαν την προσοχή λόγω των εξαιρετικά πολύπλοκων εξισώσεων που απαιτούνται για την περιγραφή τους, έως ότου ο Osborne και ο Hart επανεξέτασαν αυτό το θέμα το 1945 για να εξετάσουν τα κύματα Lamb τα οποία ενεργοποιούνται στις δομές κατά τη διάρκεια υποβρύχιων εκρήξεων. Η μελέτη τους παρουσίασε μεγάλες δυνατότητες για εφαρμογές των κυμάτων Lamb. Μια ολοκληρωμένη λύση για τα κύματα Lamb παρουσιάστηκε από τον Mindlin το 1950, ακολουθούμενη από σημαντικές λεπτομέρειες που συμπλήρωσαν ο Gazis το 1958 και ο Viktorov το 1967, ο οποίος επίσης αξιολόγησε για πρώτη φορά τις ιδιότητες διασποράς των κυμάτων Lamb. Ο Firestone και ο Ling εισήγαγαν την χρήση κυμάτων Lamb για την ανίχνευση ατελειών γύρω στα 1940-1950, μετά την οποία τα κύματα Lamb εδραιώθηκαν σε εφαρμογές όπως η σεισμολογία και ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος. Παράλληλα με την θεωρητική ανάπτυξη, εντατική πειραματική έρευνα, για το σκοπό της κατανόηση των θεμελιωδών αρχών των κυμάτων Lamb, καταβλήθηκε από τον Worlton το 1961 και από τον Frederick και τον Worlton το 1962. Με τις προόδους στην υπολογιστικών συσκευών, το χρονικό διάστημα από τη δεκαετία του 1980 μέχρι σήμερα έχει παρατηρηθεί πρωτοφανής ευημερία στις εφαρμογές της μηχανικής που σχετίζονται με τα κύματα Lamb, και κυρίως στις τεχνικές αναγνώρισης ατελειών κατά τα πρόσφατα έτη.

3.2.ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ LAMB

Τα ελαστικά κύματα σε ένα στερεό υλικό χαρακτηρίζονται από την κίνηση των σωματιδίων του υλικού. Τα κύματα Lamb αναφέρονται στα κύματα που μεταδίδονται σε λεπτές πλάκες (με τη διάσταση του μήκους και του πλάτους να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του πάχους και του μήκος κύματος το οποίο είναι της τάξης του πάχους) και προβλέπουν ανώτατα και κατώτατα όρια για την κατεύθυνση της συνεχούς διάδοσης των κυμάτων.



Εικόνα 3.1. Λεπτή πλάκα πάχους $2h$

Σε μια λεπτή ισότροπη ομογενής πλάκα σαν αυτήν του παραπάνω σχήματος τα κύματα, ανεξαρτήτως τύπου, μπορούν να περιγραφούν σε μορφή καρτεσιανού ταυυστή από την εξής σχέση.

$$\mu \cdot u_{i,j\bar{j}} + (\lambda + \mu) \cdot u_{j,j\bar{i}} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{u}_i \quad (i, j = 1, 2, 3),$$

όπου u_i και f_i είναι η μετατόπιση και η δύναμη σώματος κατά την κατεύθυνση x_i αντίστοιχα, ρ και μ είναι η πυκνότητα και ο συντελεστής διάτμησης της πλακάς αντίστοιχα και $\lambda = (2\mu \nu) / (1 - 2\nu)$ (με λ ο συντελεστής Lamé και ν ο λόγος Poisson)

Κατά την επίπεδη ένταση η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφυλιστεί τις εξής δυο σχέσεις

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Όπου η πρώτη διέπει τα διαμήκη κύματα και η δεύτερη τα εγκάρσια. Με

$$\phi = [A_1 \sin(px_3) + A_2 \cos(px_3)] \cdot \exp[i(kx_1 - \omega t)],$$

$$\psi = [B_1 \sin(qx_3) + B_2 \cos(qx_3)] \cdot \exp[i(kx_1 - \omega t)],$$

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{wave}}}.$$

A_1, A_2, B_1, B_2 είναι τέσσερις σταθερές που καθορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες. $k, \omega, \lambda_{\text{wave}}$ είναι ο αριθμός κύματος, η γωνιακή συχνότητα και το μήκος κύματος αντίστοιχα. c_L και c_T είναι οι ταχύτητες των διαμηκών ή εγκάρσιων κυμάτων αντίστοιχα (όπου L σημαίνει Longitudinal=διαμήκης και T σημαίνει Transverse=εγκάρσιο)

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}, \quad c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα κύματα Lamb είναι η επαλληλία των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων.

Σαν αποτέλεσμα της επίπεδης έντασης οι μετατοπίσεις κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος (x_1) και τον κάθετο άξονα (x_3) μπορούν να περιγραφούν ως

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3}, \quad u_2 = 0, \quad \text{and} \quad u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi}{\partial x_1}$$

και συνεπώς

$$\begin{aligned}\sigma_{31} &= \mu \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} \right), \\ \sigma_{33} &= \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + 2\mu \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \\ &= \lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1 \partial x_3} \right).\end{aligned}$$

Για μια πλάκα με ελεύθερες τις επιφάνειες πάνω και κάτω, εφαρμόζοντας τις εξής συνοριακές συνθήκες

$$u(x, t) = u_0(x, t)$$

$$t_i = \sigma_{ji} n_j$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0 \quad \text{at } x_3 = \pm d/2 = \pm h$$

όπου d είναι το πάχος της πλάκας και h το μισό πάχος, μπορούμε να πάρουμε τη γενική περιγραφή των κυμάτων Lamb για ένα ισότροπο και ομογενές υλικό:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2 qp \mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)}$$

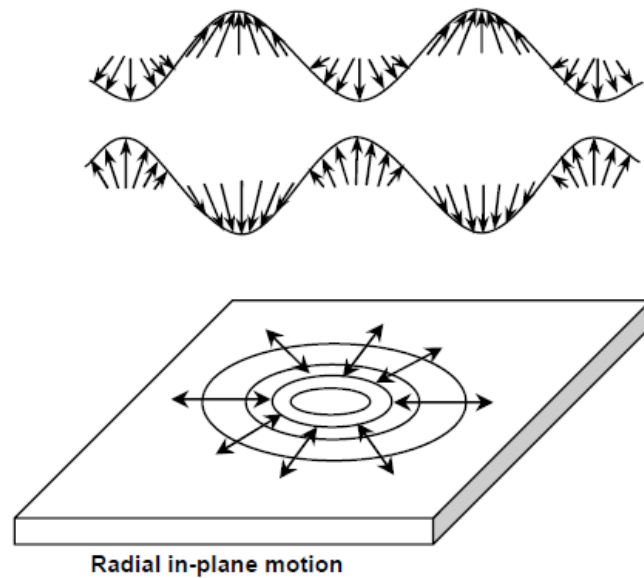
Με αντικατάσταση από προηγούμενες εξισώσεις και λαμβάνοντας υπόψη ότι η εφαπτομένη ορίζεται ως ο λόγος του ημιτόνου προς το συνημίτονο τα οποία έχουν συμμετρικές και αντισυμμετρικές ιδιότητες αντίστοιχα μπορούμε να κάνουμε διαχωρισμό σε δύο μέρη με μόνο συμμετρικές και αντισυμμετρικές ιδιότητες αντίστοιχα, υπονοώντας έτσι ότι τα κύματα Lamb αποτελούνται από συμμετρικούς και αντισυμμετρικούς παλμούς.

$$\begin{aligned}\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} &= -\frac{4k^2 qp}{(k^2 - q^2)^2} \\ \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} &= -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 qp}\end{aligned}$$

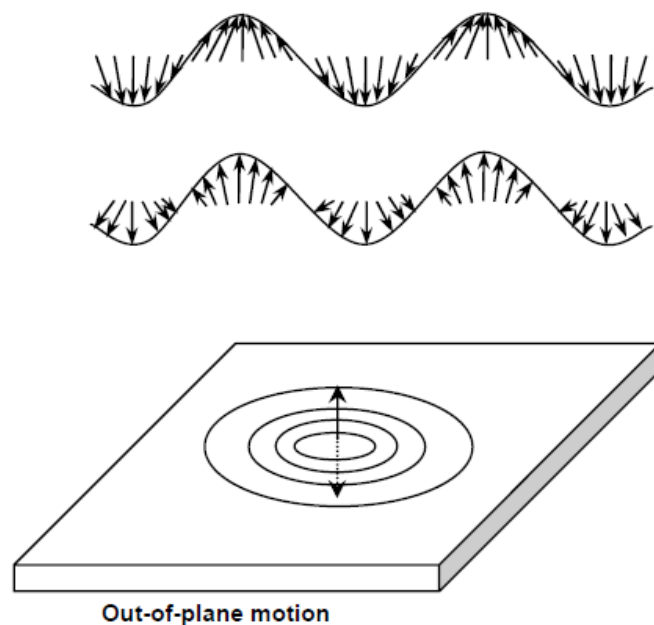
Όπου η πρώτη εξίσωση αναφέρεται σε συμμετρικούς παλμούς και η δεύτερη σε αντισυμμετρικούς. Οι παραπάνω εξισώσεις είναι γνωστές και ως **εξισώσεις**

Rayleigh-Lamb. Αν και φαινομενικά είναι απλές μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά

μόνο σε μερικές περιπτώσεις. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν τις κινήσεις των σωματιδίων κατά τα συμμετρικά και αντισυμμετρικά κύματα Lamb, υποδεικνύοντας την κατεύθυνση των σωματιδίων και την τελική κίνηση. Οι συμμετρικοί παλμοί κατά κύριο λόγο έχουν ακτινική εντός του επιπέδου μετατόπιση των σωματιδίων, ενώ οι αντισυμμετρικοί έχουν μετατόπιση εκτός του πεδίου κυρίως.



Εικόνα 3.2. Συμμετρικό κύμα Lamb

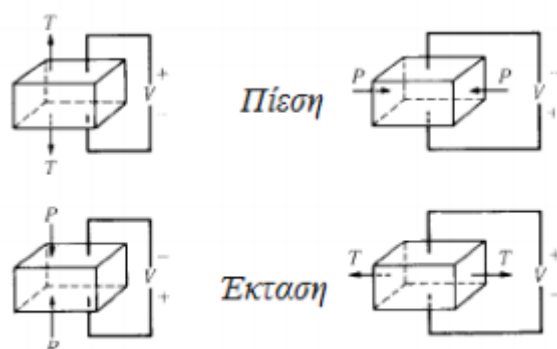


Εικόνα 3.3. Αντισυμμετρικό κύμα Lamb

3.3.ΤΟ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

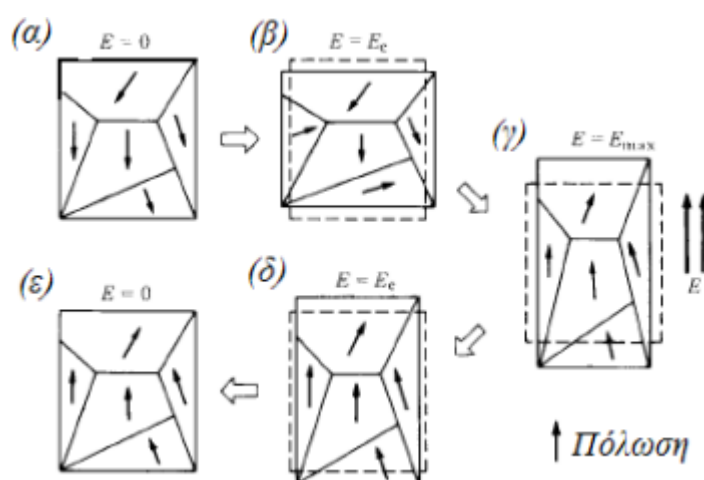
Ο Πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων κρυσταλλικών υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική πίεση ή ταλάντωση. Ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται όταν βρεθεί εντός ηλεκτρικού πεδίου. Η εμφάνιση του χρονολογείται περισσότερο από ένα αιώνα νωρίτερα, όταν οι Pierre και Jacques Curie ανακάλυψαν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (1880). Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο βρίσκει εφαρμογή σε αρκετά μεγάλο εύρος πεδίων. Χρησιμοποιείται συχνά από τους μηχανικούς, λόγω ιδιοτήτων των πιεζοηλεκτρικών υλικών, για λόγους Μη καταστροφικού ελέγχου και Παρακολούθησης Δομικής Ακεραιότητας.

Η μοντέρνα ιστορία του πιεζοηλεκτρισμού ξεκινά το 1990, με την ανακάλυψη των ιδιοτήτων του τιτανιούχου βαρίου. Χαρακτηριστική ιδιότητα του πιεζοηλεκτρισμού είναι η σύζευξη του ελαστικού (δυναμική σύζευξη) και του ηλεκτρικού (στατική σύνδεση) πεδίου. Γενικά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αποκρίνονται σε μία μηχανική φόρτιση .ε την παραγωγή μίας ηλεκτρικής τάσης. Αυτό είναι το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (direct piezoelectric effect). Κατά συνέπεια, αν εφαρμόσω μία ηλεκτρική φόρτιση σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό τότε αυτό θα συσταλεί ή θα διασταλεί αναλόγως της πολικότητας του, παράγοντας μηχανικό έργο. Αυτό είναι το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (reverse piezoelectric effect). Το ζεύγος Curie ήταν οι πρώτοι οι οποίοι παρατήρησαν τον πιεζοηλεκτρισμό στα quarks, το 1880. Είναι δυνατόν να χωρίσουμε το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη φορά που ασκούνται οι μηχανικές δυνάμεις σε σχέση με τον ηλεκτρικό άξονα εφαρμογής της τάσης. Για παράλληλη εφαρμογή δυνάμεων έχουμε το διαμήκες (longitudinal) και για κάθετη εφαρμογή το εγκάρσιο (transverse) πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.



Εικόνα 3.4. Διαμήκες και εγκάρσιο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Για να αντιληφθούμε καλύτερα τη διαδικασία με την οποία παράγεται κίνηση θα παραθέσουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής ηλεκτρικής τάσης σε ένα κρύσταλλο από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Στον κρύσταλλο αυτό αρχικά όλα τα στοιχεία που τον αποτελούν είναι πολωμένα προς τα κάτω. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση πόλωσης των στοιχείων. Τότε αρχικά παρατηρούμε μία μεταβολή της πόλωσης των επιμέρους στοιχείων και μία έκταση του κρυστάλλου, αποτέλεσμα εγκάρσιου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Σε μικρό χρονικό διάστημα όμως, καθώς τα επιμέρους στοιχεία προσανατολίζονται σε σχέση με το ηλεκτρικό πεδίο, παρατηρούμε πάλι μία έκταση του κρυστάλλου παράλληλα αυτή τη φορά με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Σταδιακά, καθώς αφαιρούμε το πεδίο παρατηρούμε πως ο κρύσταλλος επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα, αλλά τα στοιχεία του πλέον έχουν κρατήσει την πόλωση του πεδίου.



Εικόνα 3.5. Στιγμιότυπα εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου σε πιεζοηλεκτρικό κεραμικό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΚΟΠΩΣΗ

Τα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής συνήθως υποβάλλονται σε δυναμικά φορτία δηλαδή σε δυνάμεις οι οποίες μεταβάλλονται με το χρόνο. Τα υλικά κάτω από τέτοια φορτία κοπαινούν και καταστρέφονται μετά από ένα χρονικό διάστημα, ακόμα και αν οι τάσεις που το καταπονούν, είναι μικρότερες από το όριο αναλογίας. Παρατηρείται δηλαδή, διαφορετική μηχανική συμπεριφορά του υλικού όταν αυτό υποβάλλεται σε δυναμικές ή στατικές καταπονήσεις.

Η μείωση της αντοχής του υλικού κάτω από εναλλασσόμενα φορτία ονομάζεται κόπωση του υλικού. Το φαινόμενο της κόπωσης οφείλετε κυρίως στην εσωτερική δομή του υλικού και ιδιαίτερα στην ύπαρξη γραμμικών, επιφανειακών και χωρικών ατελειών ή μικρορωγμών. Σημαντικό ρόλο στην κόπωση του δομικού στοιχείου ή μιας κατασκευής παίζει επίσης η μόρφωση, η κατεργασία, η σύνδεση και οι συνθήκες λειτουργίας στις οποίες υποβάλλεται το υλικό.

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών ή κατασκευών σε δυναμικά φορτία γίνεται σε μακροχρόνια πειράματα, όπου το δοκίμιο ή η κατασκευή υποβάλλεται σε εναλλακτικά φορτία. Από τα πειράματα αυτά προκύπτουν οριακές τιμές τάσεων (πχ όριο κόπωσης), τις οποίες μπορεί να φέρει το υλικό θεωρητικά για οποιονδήποτε αριθμό επανάληψης των φορτίων. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το είδος του επιβαλλόμενου φορτίου, από τις διαστάσεις και το σχήμα του δοκιμίου, από την κατεργασία του, από τις συνθήκες διεκπεραίωσης του πειράματος (θερμοκρασία και ταχύτητα καταπόνησης) κ.α.

Η αντοχή σε κόπωση ενός υλικού μπορεί να επηρεαστεί από τους εξής παράγοντες:

- μέση τάση
- αριθμό κύκλων φόρτισης
- διαστάσεις του δοκιμίου
- ποιότητα επιφάνειας(κατεργασία, εγκοπές, γεωμετρία κλπ)
- θερμοκρασία
- οξείδωση
- προϊστορία υλικού

Η ταχύτητα της κόπωσης δεν είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού αλλά επηρεάζεται από πολλούς απροσδιόριστους παράγοντες ώστε στην πράξη να παρουσιάζονται τιμές διάχυτα διασκορπισμένες.

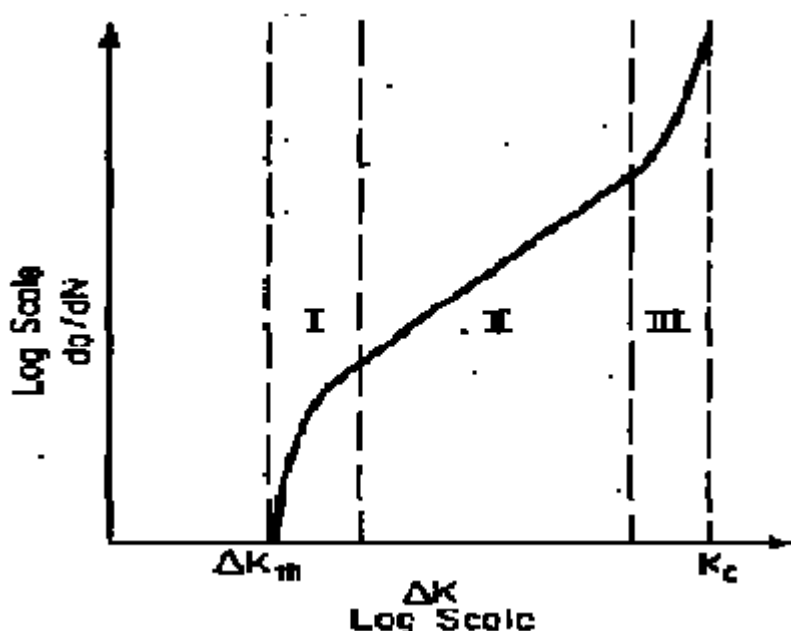
Θραύση υπό κόπωση

Σαν θραύση κόπωσης ορίζεται η θραύση ή η αστοχία ενός υλικού, που οφείλεται σε κόπωση, λόγω εναλλακτικών φορτίων που το καταπονούν. Το είδος αυτής της θραύσης είναι το πιο γνωστό και παρατηρείται ιδιαίτερα σε άξονες ή άλλα τμήματα μηχανών, που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες. Το 95% των περιπτώσεων θραύσης στην πράξη οφείλονται σε κόπωση.

Η θραύση κόπωσης ξεκινά σχεδόν πάντα από την επιφάνεια του σώματος και διαδίδεται με πολύ αργό ρυθμό προς το εσωτερικό του μέχρι που η επιφάνεια διατομής γίνει τόσο μικρή, ώστε να μην αντέχει πια τις εξωτερικές καταπονήσεις και σπάει βίαια.

Οι διαδικασίες που παίρνουν μέρος στην κόπωση του υλικού μπορούν να χωριστούν μακροσκοπικά στα εξής τρία στάδια:

- I. στάδιο κράτυνσης ή ενδοτράχυνσης
- II. στάδιο δημιουργίας ρωγμών
- III. στάδιο διάδοσης ρωγμών

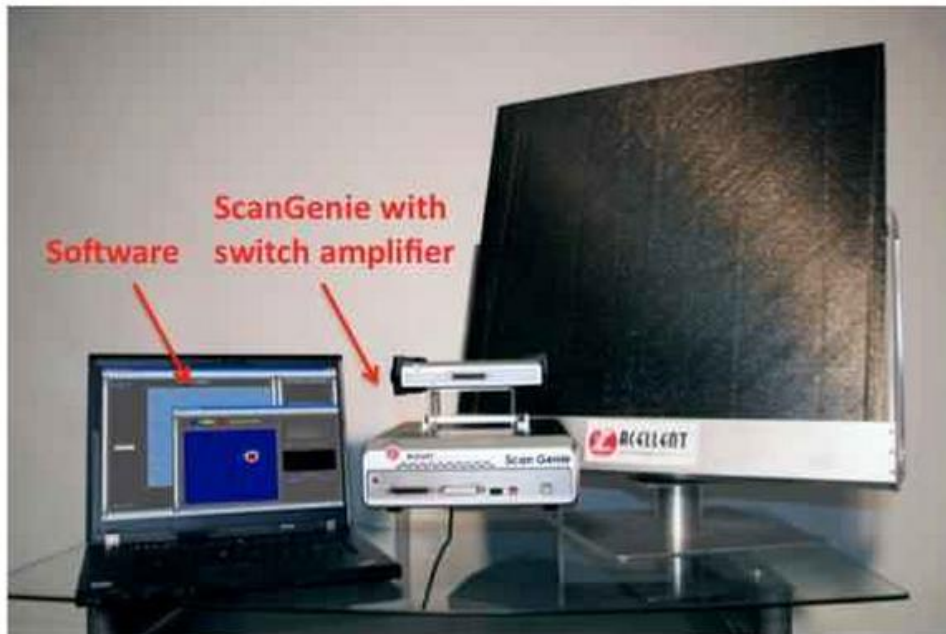


Εικόνα 3.6. Στάδια διάδοσης ρωγμών

Το στάδιο αυτό, που αποκαλείται και το μέγιστο μέρος της διάρκειας ζωής κόπωσης, είναι ακόμα αδιερεύνητο. Η ρωγή διαδίδεται μέχρι που η φέρουσα διατομή αδυνατήσει τόσο ώστε να μην μπορεί να αντέξει τα εξωτερικά φορτία, όπου και σπάει βίαια. Ακόμα η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής δεν έχει μεγάλη τεχνική σημασία. Αν και όλα τα φαινόμενα και οι μηχανισμοί δεν έχουν διαλευκανθεί, μπορούμε με τη βοήθεια της θραυστομηχανικής να εκτιμήσουμε την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Η ΣΥΣΚΕΥΗ SMART ΤΗΣ ACELLENT

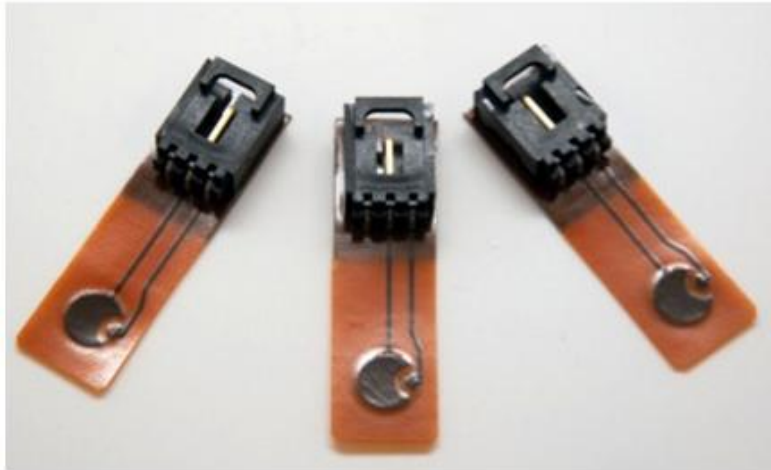


Εικόνα 5.1. Η συσκευή SMART της Acellent

Η συσκευή SMART είναι μια συσκευή η οποία επιτρέπει τη σύνδεση με πλήθος αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να δικτυωθούν για την παρακολούθηση των επιπτώσεων σε μια δομή. Η συσκευή έχει πολλαπλά κανάλια για τη διασύνδεση με τους ειδικούς αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν ειδικά προγραμματισμένες διαγνωστικές κυματομορφές οδήγησης των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Η συσκευή αποθηκεύει τα δεδομένα των αισθητήρων και μπορεί να εκτελέσει σε πραγματικό χρόνο ανάλυση των δεδομένων. Παρέχεται η δυνατότητα διασύνδεσης έως και 64 πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.



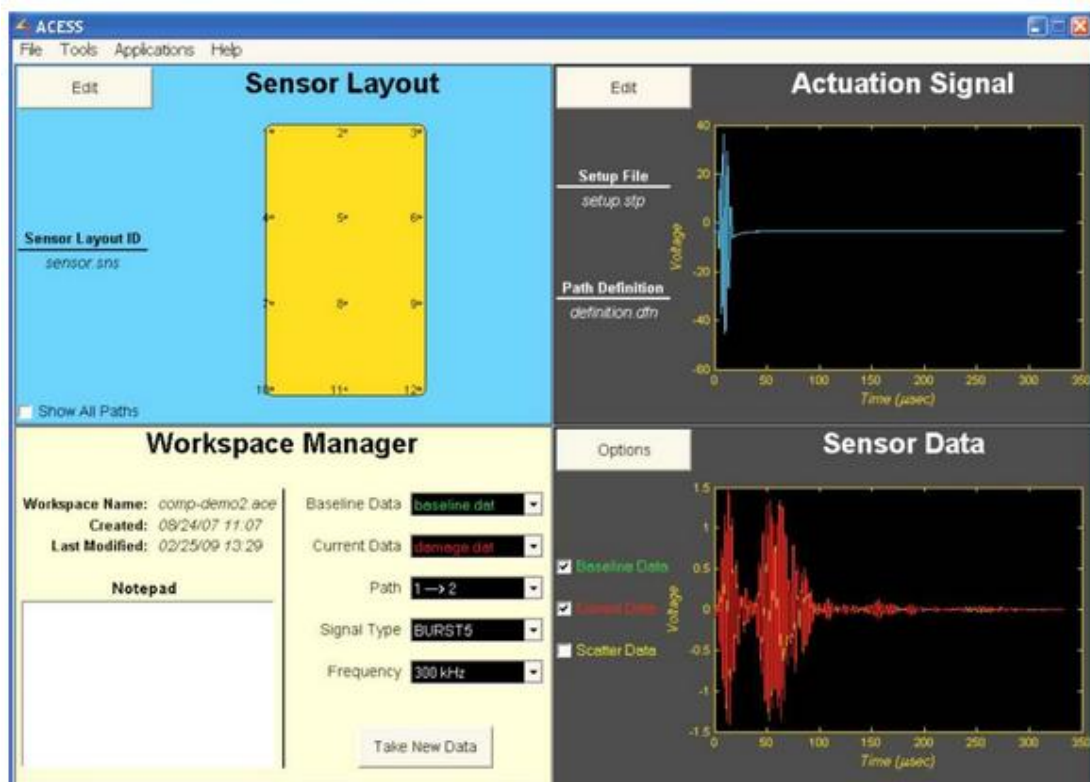
Εικόνα 5.2. Κομμάτι της συσκευής SMART της Acellent



Εικόνα 5.3. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που χρησιμοποιεί η συσκευή

5.1. Το λογισμικό της συσκευής SMART

Το λογισμικό που η συσκευή χρησιμοποιεί ονομάζεται ACCESS (ACEllent Software Suite) και είναι το βασικό λογισμικό που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών σε σύνθετες και μεταλλικές δομές. Πολλαπλοί διαγνωστικοί παλμοί μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας το λογισμικό, συμπεριλαμβανομένων παλμών 3 μεγίστων, 5 μεγίστων και 10 μεγίστων.



Εικόνα 5.4. Το λογισμικό της συσκευής SMART

Ο χώρος εργασίας (workspace) περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τη διάταξη των αισθητήρων, την παραμετροποίηση και τη διευκρίνιση των διαδρομών. Σχετικά με τη διάταξη των αισθητήρων, ρυθμίζεται η γεωμετρία των αισθητήρων καθώς εισάγονται οι συνισταμένες τους, σε ένα τοπικό σύστημα και ο τρόπος σύνδεσης τους με το μηχάνημα αφού κάθε αισθητήρας συνδέεται σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Κατά την παραμετροποίηση θέτονται παράμετροι οι οποίοι ελέγχουν το ρυθμό δειγματοληψίας, τα σημεία δειγματοληψίας και το μέσο αριθμό που χρησιμοποιείται για την αποστολή και τη λήψη των σημάτων από τους διεγέρτες και τους αισθητήρες αντίστοιχα. Ο καθορισμός των διαδρομών του σήματος λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την επιλογή του είδους του σήματος, το πλάτος και τη συχνότητα αυτού.

Για την λήψη πιο λεπτομερών σημάτων η συσκευή δίνει τη δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος (dB Gain) η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\text{dB Gain} = 20 \cdot \log_{10} (V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$$

όπου ως V_{in} ορίζεται η τάση η οποία εισάγεται στη συσκευή και V_{out} η τάση πριν από τη μετατροπή του αναλογικού σήματος, από και προς τους αισθητήρες, σε ψηφιακό. Το εύρος της ενίσχυσης είναι από 40 έως 70.

Οι τύποι σήματος που αναφέρθηκαν παραπάνω εξαρτώνται από την εφαρμογή του χρήστη. Το ACCESS παρέχει την επιλογή ανάμεσα σε 3 διαφορετικούς τύπους σήματος. Κάθε συνδυασμός των σημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συλλογή δεδομένων της παρακολουθούμενης δομής.

- BURST3
- BURST5
- BURST10

Οι παλμοί είναι αυτοί είναι διαμορφωμένα ημιτονοειδή κύματα τριών, πέντε και δέκα παλμών αντίστοιχα. Για τον καθορισμό των παλμών ο χρήστης πρέπει να καθορίσει το πλάτος και τη συχνότητα.

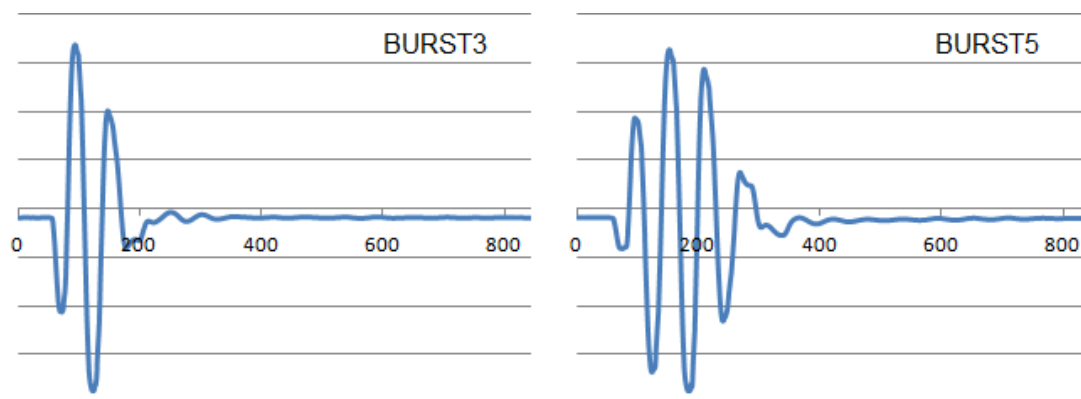
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1.ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΟΠΗΣ

Στόχος είναι, να εντοπιστούν διαφοροποιήσεις στο σήμα οι οποίες προκαλούνται από τις οπές και να μετρηθούν οι διαφοροποιήσεις αυτές σε σχέση με το σήμα που παραλήφθηκε από το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς οπή.

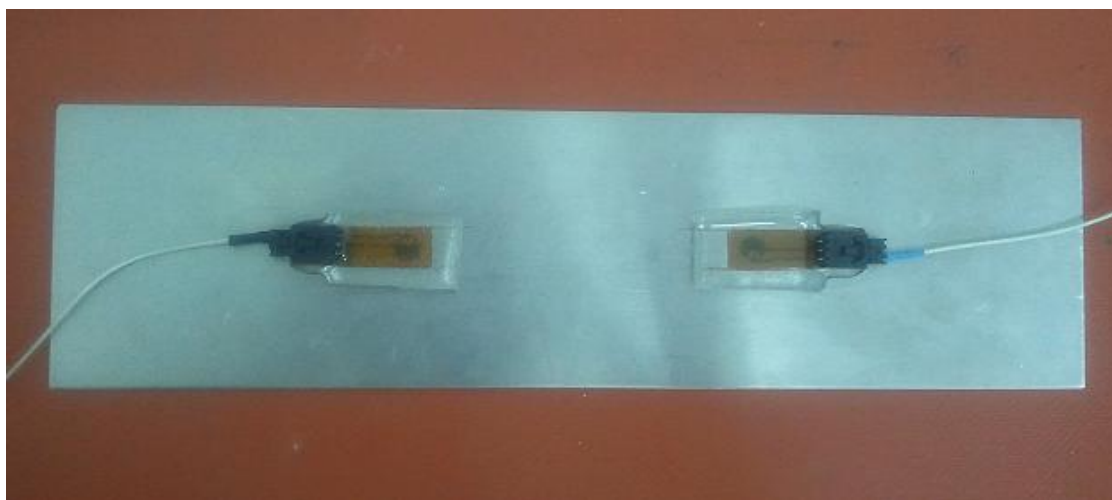
Έγιναν μετρήσεις σε δύο δοκίμια, αεροναυπηγικού αλουμινίου, όπου προσαρμόστηκαν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες οι οποίοι κολλήθηκαν με εποξική ρητίνη, δύο στοιχείων. Οι διεγέρτες δημιουργούσαν παλμούς 3 και 5 μεγίστων αντίστοιχα και η συχνότητα των παλμών ήταν 400KHz.



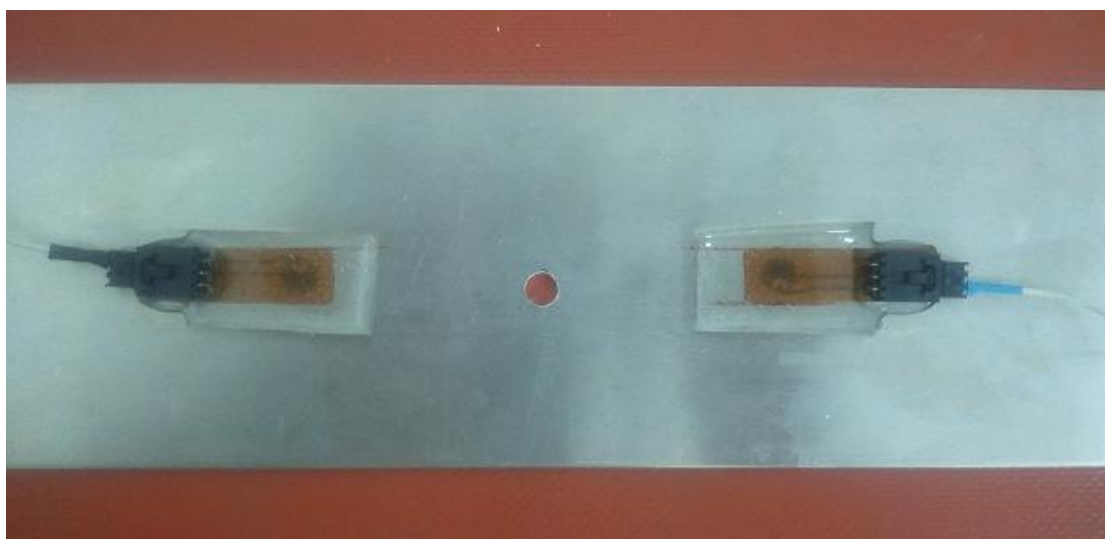
Εικόνα 6.1. Παλμοί τριών και πέντε μεγίστων

Θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα διασποράς της τάσης σε σχέση με το χρόνο , τα οποία θα αφορούν τη σύγκριση του αρχικά ληφθέντος σήματος από τους αισθητήρες σε σχέση με το ληφθέν σήμα όταν το δοκίμιο θα έχει οπή διαμέτρου 2,3,4,5,7 χιλιοστών αντίστοιχα.

Μονοδιάστατο Πείραμα

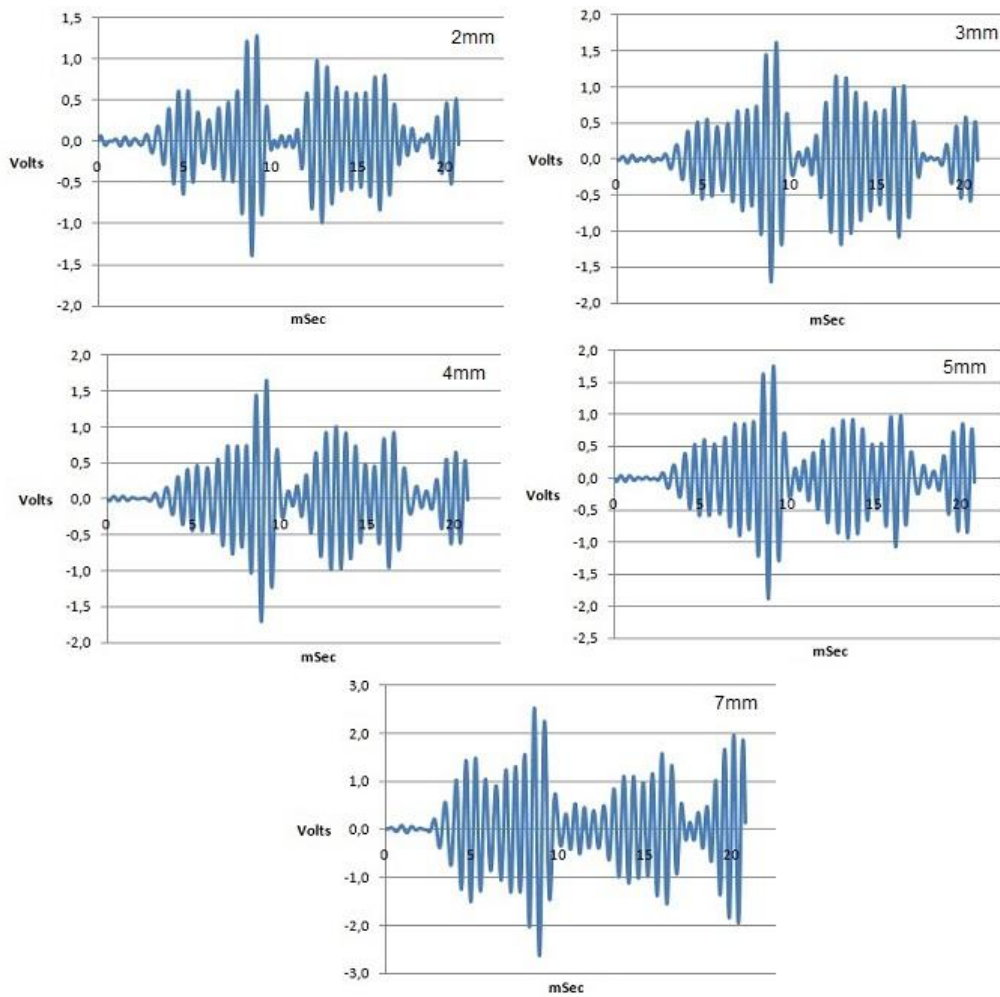


Εικόνα 6.2. Αρχικό δοκίμιο



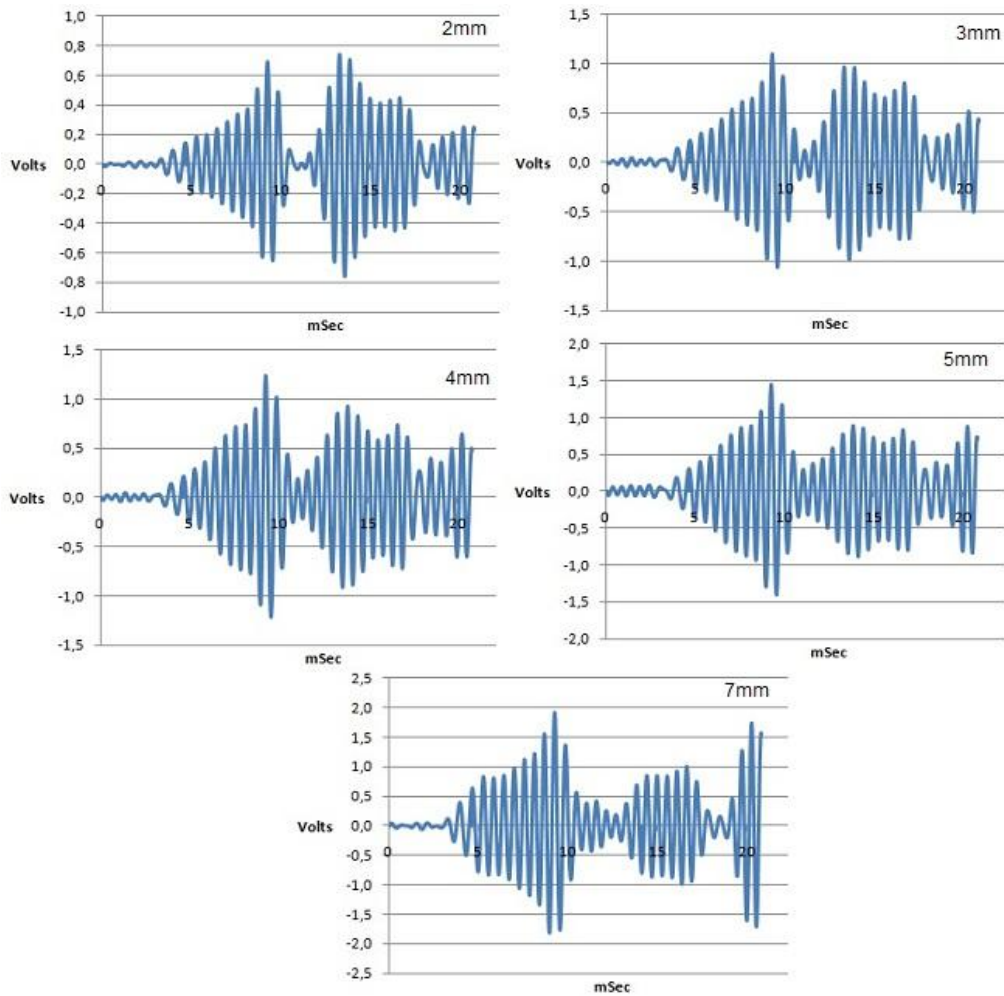
Εικόνα 6.3. Τελικό δοκίμιο με οπή διαμέτρου 7μμ

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10 εκατοστών μεταξύ τους. Αρχικά εφαρμόστηκε παλμός τριών μεγίστων (BURST3) οι διαφοροποιήσεις των ληφθέντων σημάτων σε σχέση με το ληφθέν σήμα στο αρχικό δοκίμιο παρουσιάζονται παρακάτω για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου της οπής.



Εικόνα 6.4. Διαγράμματα διασποράς της τάσης ως προς το χρόνο, από το αρχικά ληφθέν σήμα σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές της διαμέτρου της σήψ, η οποία φαίνεται πάνω δεξιά.

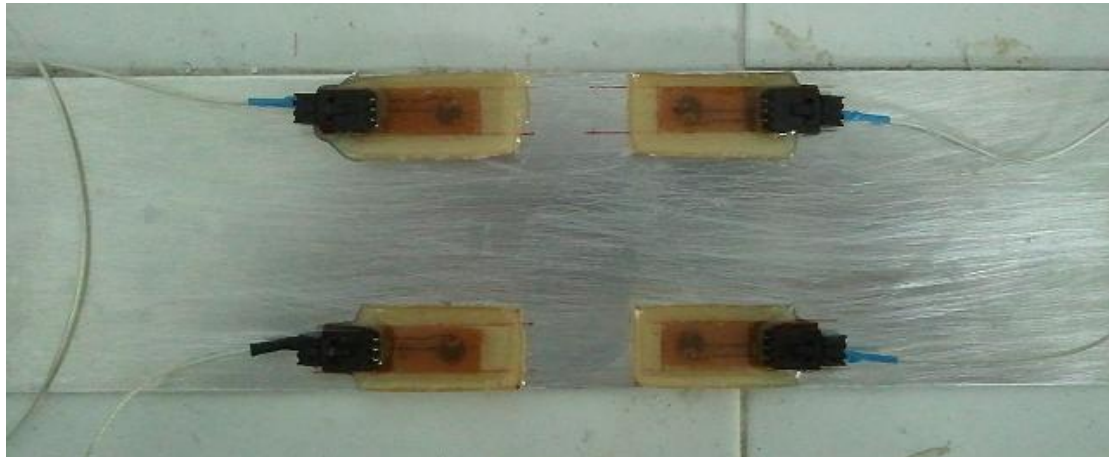
Εκ των υστέρων εφαρμόστηκε παλμός πέντε μεγίστων (BURST5) και προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα.



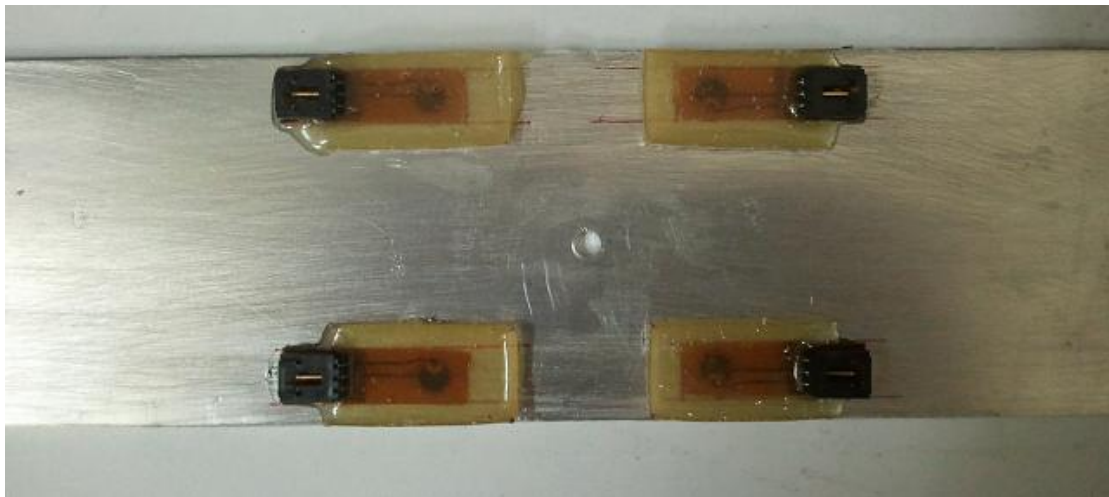
Εικόνα 6.5. Διαγράμματα διασποράς της τάσης ως προς το χρόνο, από το αρχικά ληφθέν σήμα σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές της διαμέτρου της οπής, η οποία φαίνεται πάνω δεξιά.

Παρατηρούμε ότι καθώς η διάμετρος της οπής αυξάνει, αυξάνουν και η διασπορά του σήματος και στις δύο περιπτώσεις.

Διδιάστατο Πείραμα



Εικόνα 6.6. Αρχικό δοκίμιο



Εικόνα 6.7. Τελικό δοκίμιο με οπή διαμέτρου 7mm

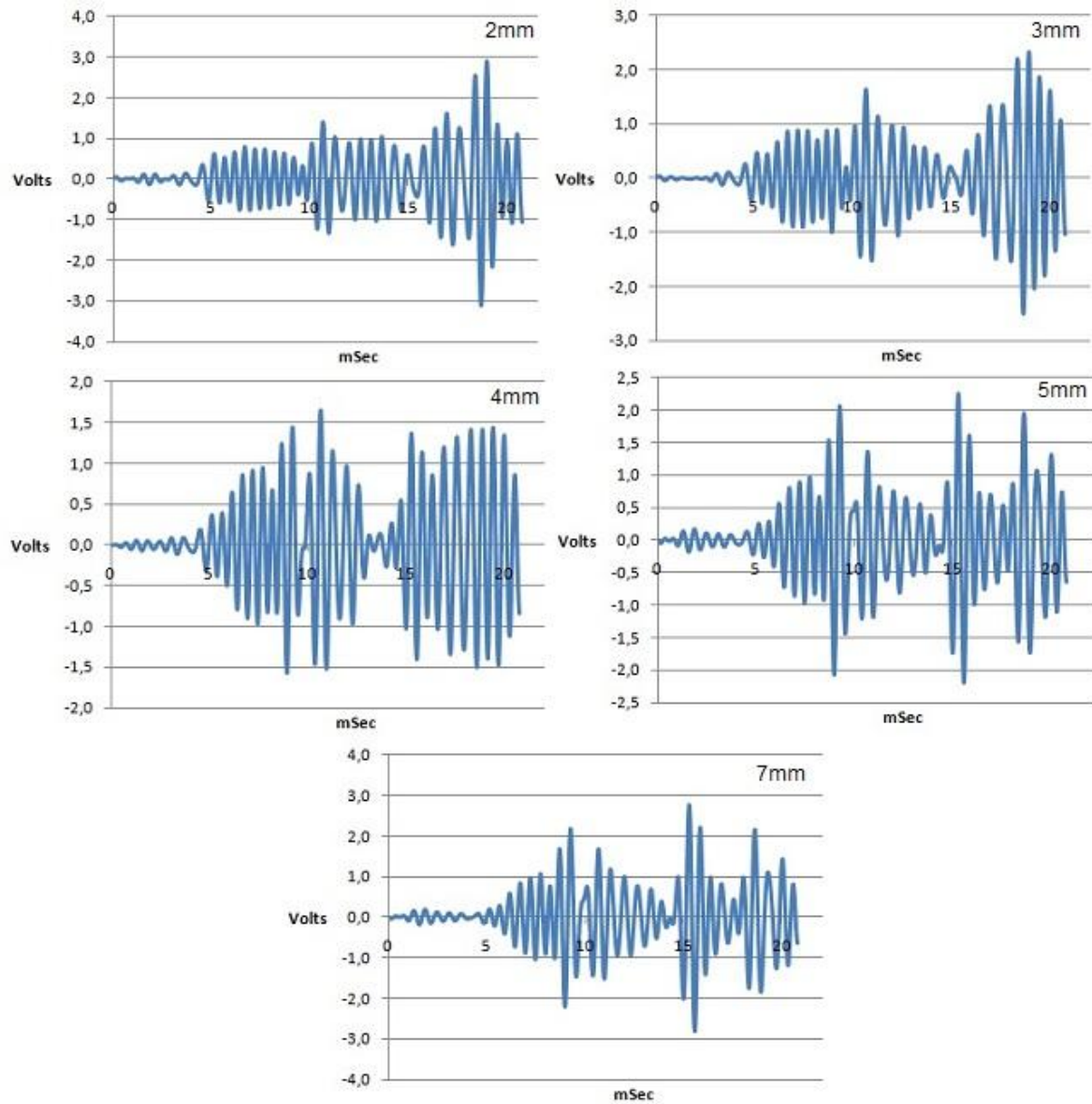
Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα τετράγωνο πλευράς 6 εκατοστών. Ξεκινώντας από τον κάτω αριστερά αισθητήρα δόθηκαν καρτεσιανές συντεταγμένες ακλουθώντας αντισωρολογιακή φορά.

Έτσι οι αισθητήρες έχουν τις εξής συντεταγμένες: 1->(0,0), 2->(6,0), 3->(6,6), 4->(0,6). Είναι προφανές ότι οι διαδρομές 1->2, 2->3, 3->4, 4->1 δεν έχουν καμία σημασία για το πείραμα και έτσι παραλήφθηκαν. Οι μόνες διαδρομές που λήφθηκαν υπόψη είναι η 1->3 και η 2->4, οι οποίες θα δείξουν και καλύτερη προσέγγιση της ασυνέχειας.

Οπότε για παλμό τριών και πέντε μεγίστων έχουμε τις εξής περιπτώσεις.

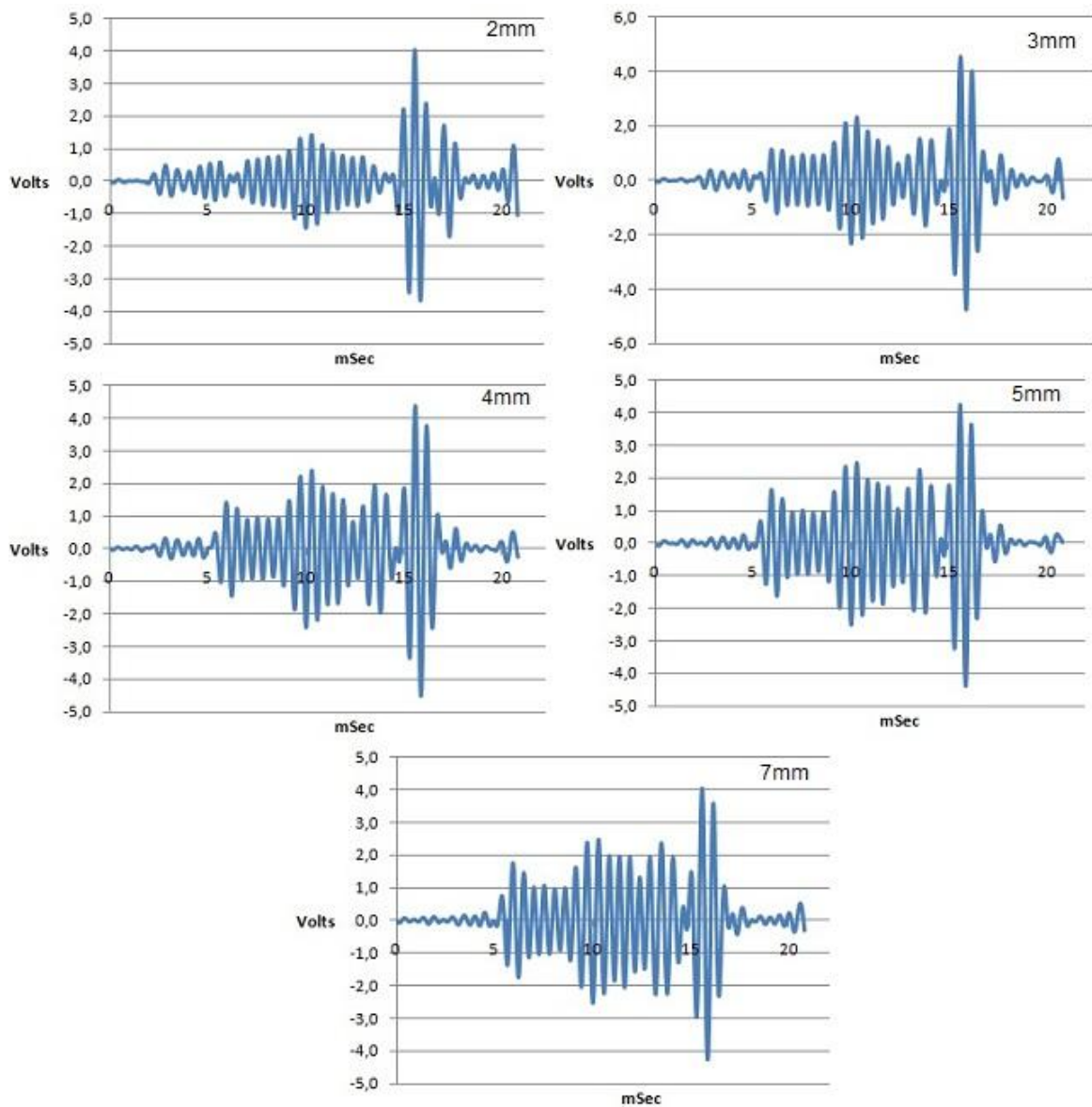
A. Παλμός τριών μεγίστων

A.I. Για την διαδρομή 1->3 έχουμε τα εξής διαγράμματα



Εικόνα 6.8.

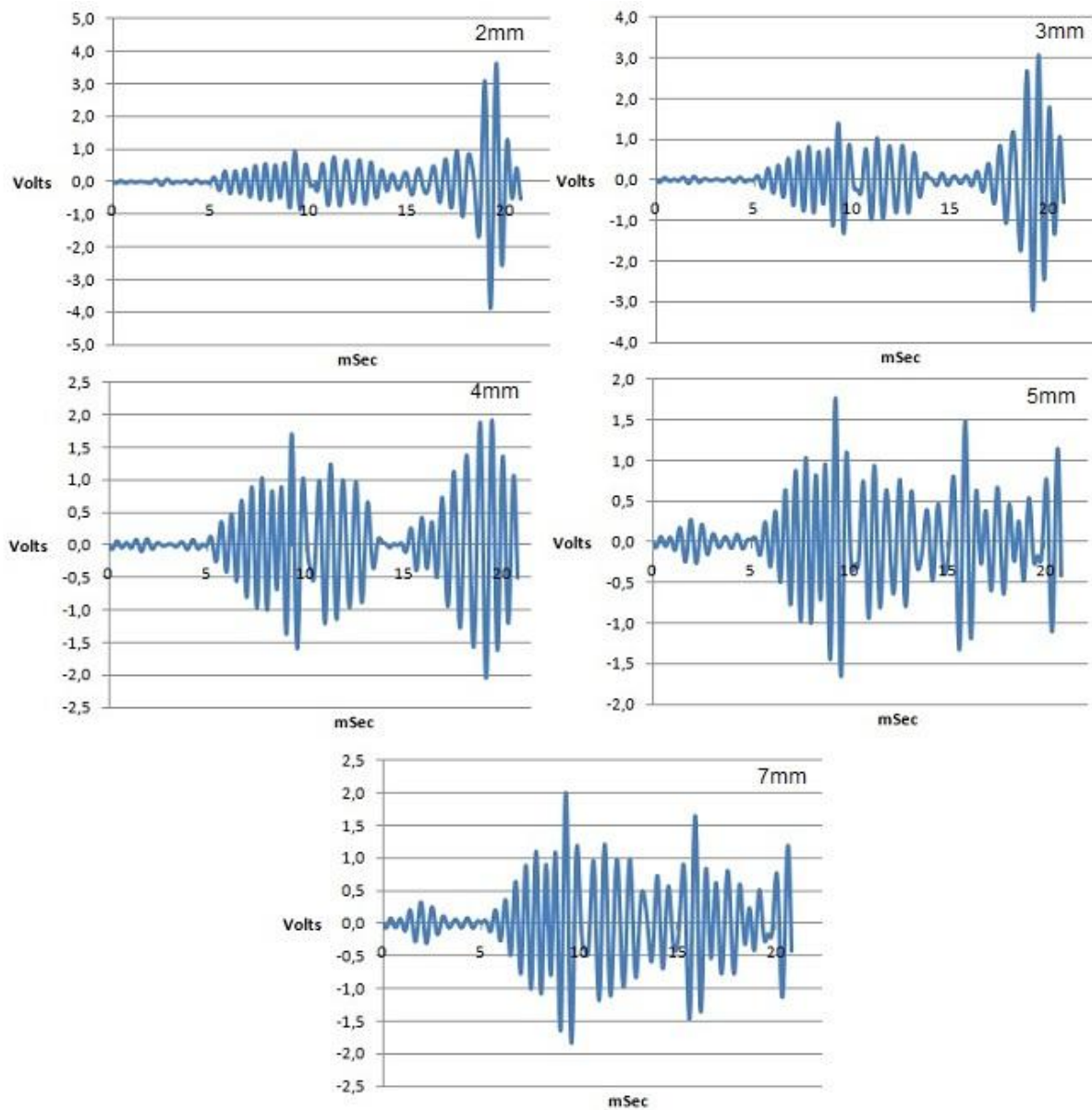
Α.ΙΙ. Για την διαδρομή 2->4 έχουμε τα εξής διαγράμματα



Εικόνα 6.9.

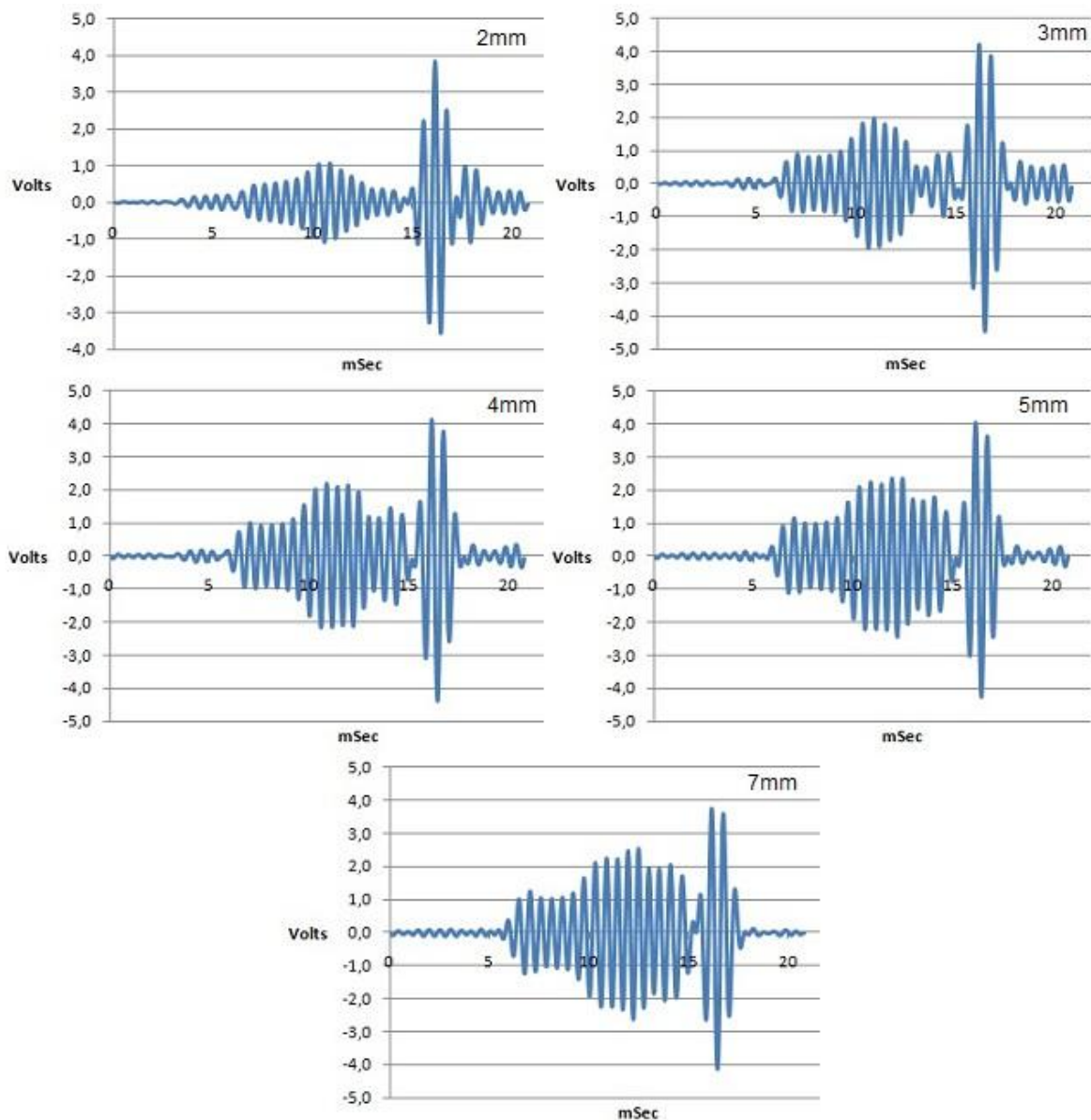
Β. Παλμός πέντε μεγίστων

Β.1. Για την διαδρομή 1->3 έχουμε τα εξής διαγράμματα



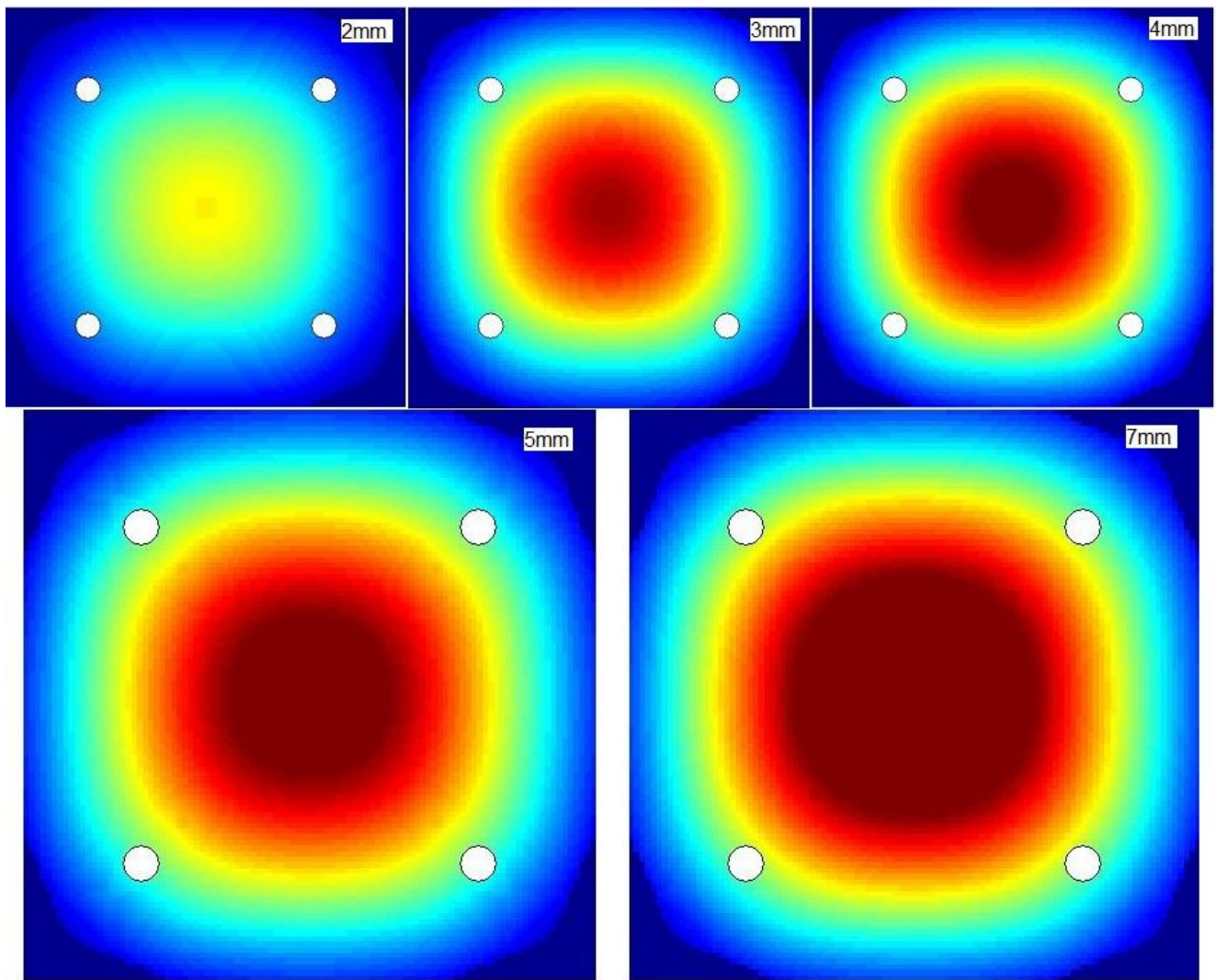
Εικόνα 6.10.

Β.ΙΙ. Για την διαδρομή 2->4 έχουμε τα εξής διαγράμματα



Εικόνα 6.11

Επίσης η συσκευή SMART μας δίνει την δυνατότητα να πάρουμε μια ποιοτική απεικόνιση των ατελειών που εντοπίζουν οι αισθητήρες, η απεικόνιση αυτή είναι η παρακάτω:



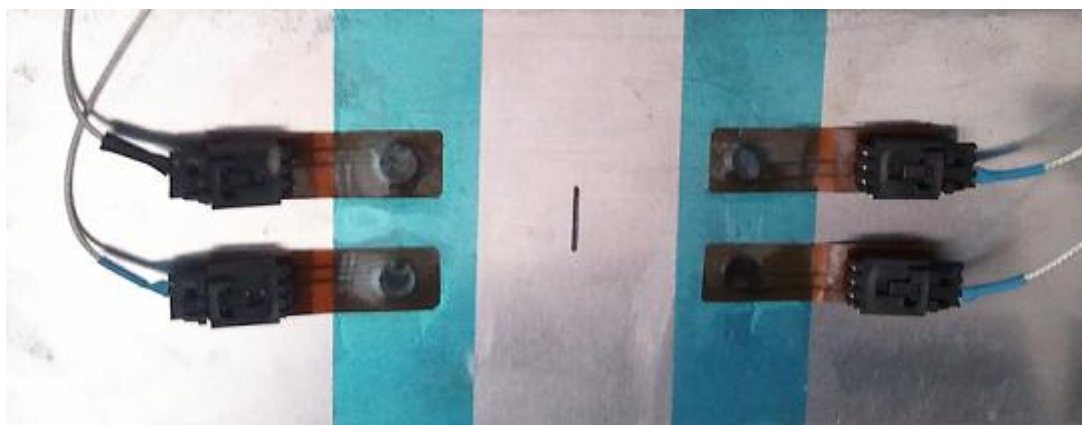
Εικόνα 6.12. Γραφική απεικόνιση της σπή

Παρατηρώντας τις εικόνες και τα διαγράμματα καταλαβαίνουμε ότι μεγαλώνοντας η σπή προκαλεί μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στο σήμα, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από το προηγούμενο πείραμα.

6.2.ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να μελετηθεί η διάδοση μιας ρωγμής με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στη νοητή ευθεία των απολήξεων της ρωγμής, κάθετα σε αυτή.

Όπως και στην παραπάνω περίπτωση και εδώ χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο αεροναυπηγικού αλουμινίου, στο οποίο είχε δημιουργηθεί μια τεχνητή ρωγμή. Για τη μελέτη της διάδοσης της ρωγμής το δοκίμιο εισήχθη σε μηχανή κόπωσης τύπου INSTRON.



Εικόνα 6.13. Αρχικό δοκίμιο



Εικόνα 6.14.Μηχανή κόπωσης INSTRON 8801

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε κυκλική φόρτιση εφελκυσμού με φορτίο που είχε εύρος από 0 έως 22KN. Κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης παίρνονταν μετρήσεις ανά 1000 κύκλους, με παλμούς τριών και πέντε μεγίστων όπως και στη προηγούμενη περίπτωση.

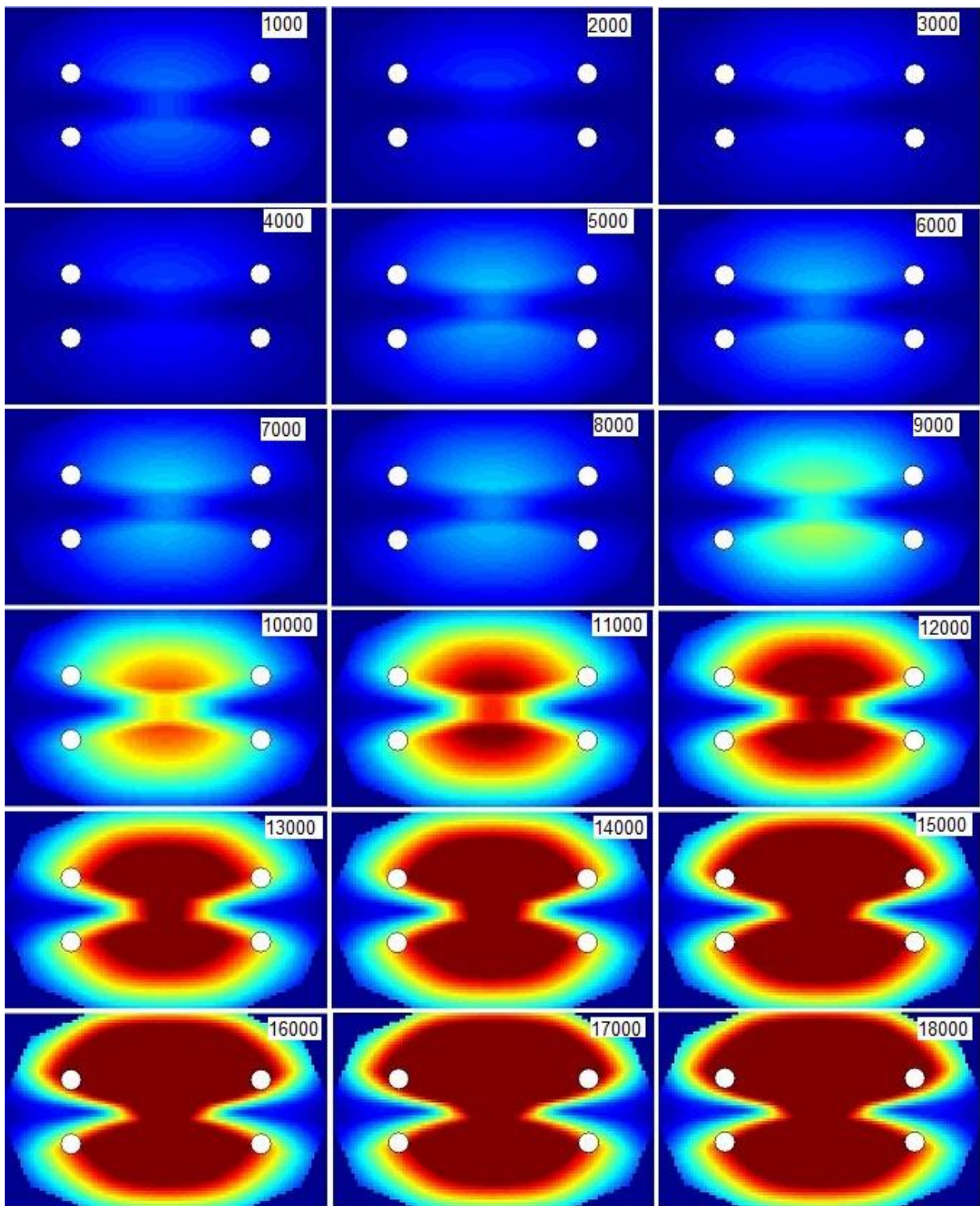
Το δοκίμιο αστόχησε μετά από 18900 κύκλους φόρτισης.



Εικόνα 6.15. Δοκίμιο αλουμινίου που αστόχησε μετά από κόπωση 18900 κύκλων

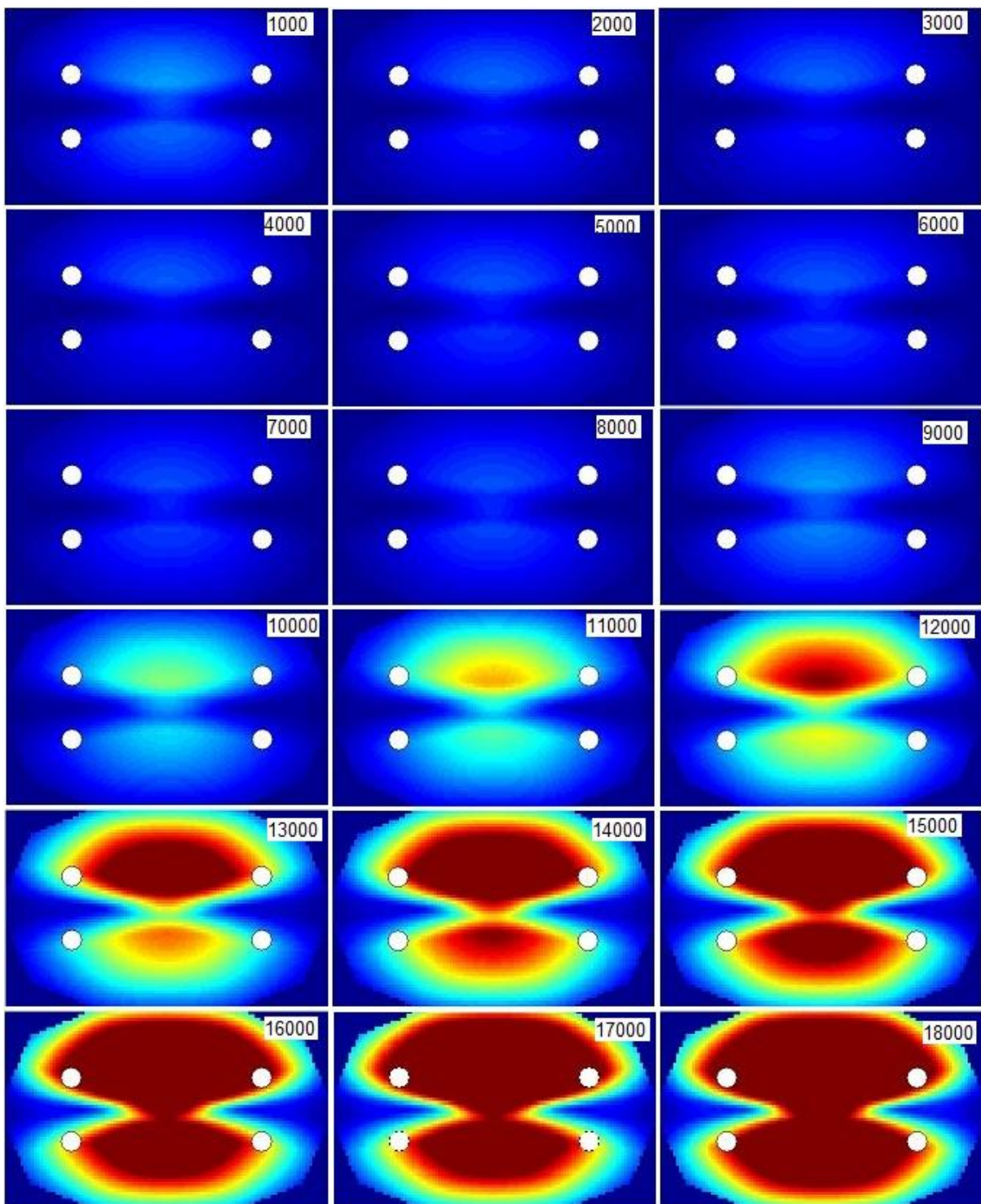
Παρακάτω δίνεται μια γραφική απεικόνιση της διάδοσης της ρωγμής ανά 1000 κύκλους.

Αρχικά για παλμό διέγερσης τριών μεγίστων:



Εικόνα 6.16. Γραφική απεικόνιση διάδοσης της ρωγμής για παλμό διέγερσης τριών μεγίστων

Για παλμό διέγερσης πέντε μεγίστων:



Εικόνα 6.17. Γραφική απεικόνιση της διάδοσης της ρωγμής για παλμό διέγερσης πέντε μεγίστων

Παρατηρούμε ότι κατά τους τελευταίους κύκλους σπού η διάδοση της ρωγμής είναι ραγδαία, οι αισθητήρες έχουν πολύ καλή απόκριση και η επιλογή των χρωμάτων από τη συσκευή είναι κατατοπιστική.

6.3.ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να μελετηθεί η αποκόλληση των στρώσεων ενός σύνθετου υλικού.

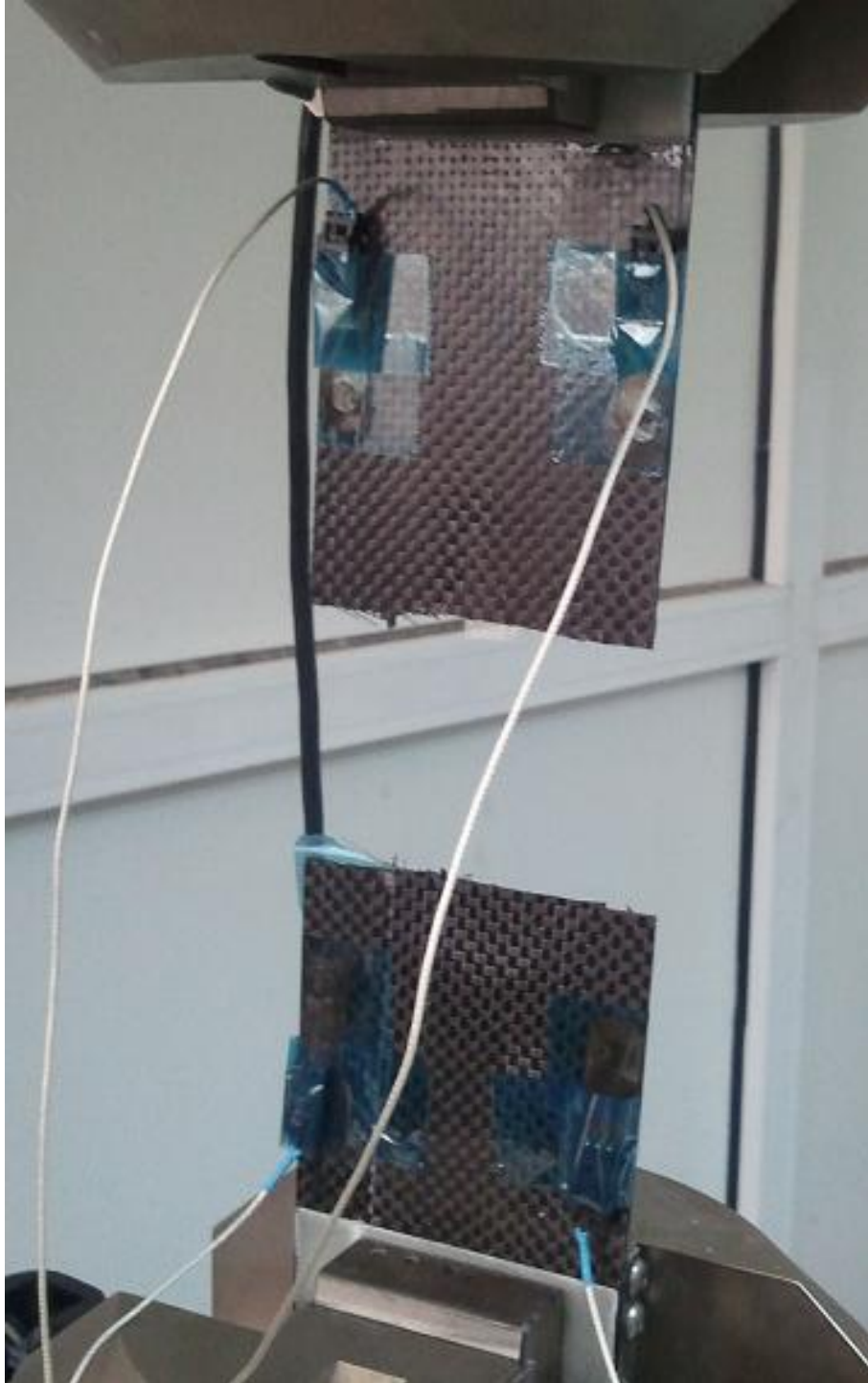
Για τις ανάγκες του πειράματος αυτού κατασκευάστηκε ένα δοκίμιο από ανθρακόνημα, έξι στρώσεων. Μετά την τοποθέτηση της τρίτης στρώσης στο κέντρο του δοκιμίου τοποθετήθηκε ένα τετράγωνο κομμάτι ζελατίνης, πλευράς δύο εκατοστών, με σκοπό κατά την διάρκεια της κόπωσης του δοκιμίου το κομμάτι ζελατίνης να δημιουργήσει αποκόλληση των στρώσεων που θα έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία.



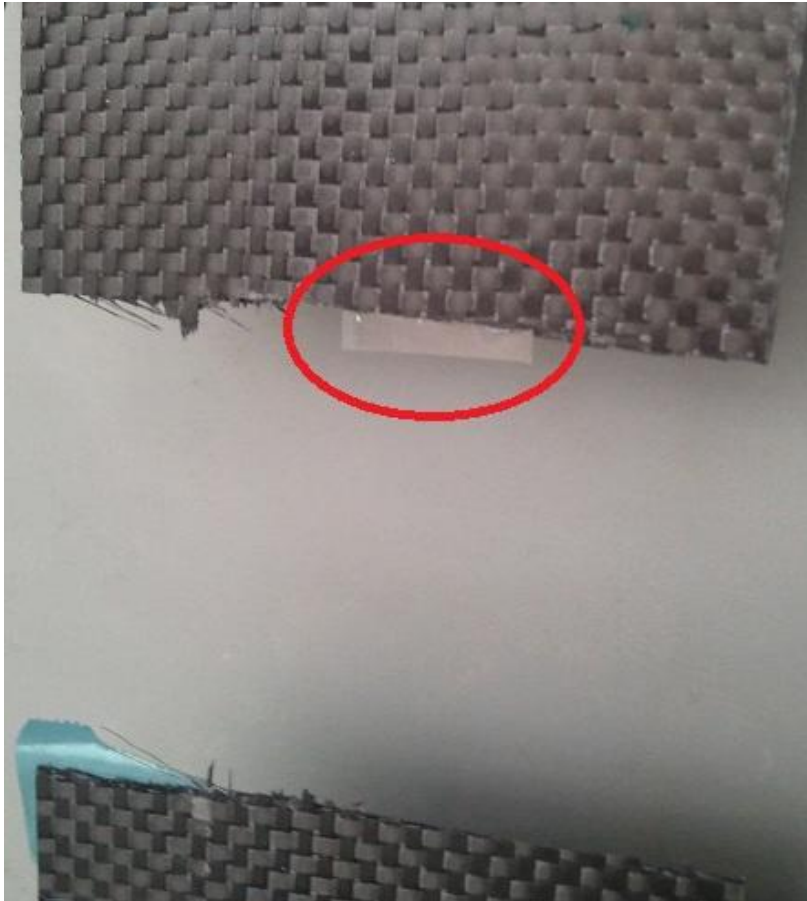
Εικόνα 6.18. Ανθρακονημάτινο δοκίμιο

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να δημιουργούν τετράγωνο πλευράς επτά εκατοστών. Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε κυκλική φόρτιση εφελκυσμού με φορτίο που είχε εύρος από 0 έως 20KN. Κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης παίρνονταν μετρήσεις ανά 1000 κύκλους.

Το δοκίμιο αστόχησε μετά από 34700 κύκλους φόρτισης.

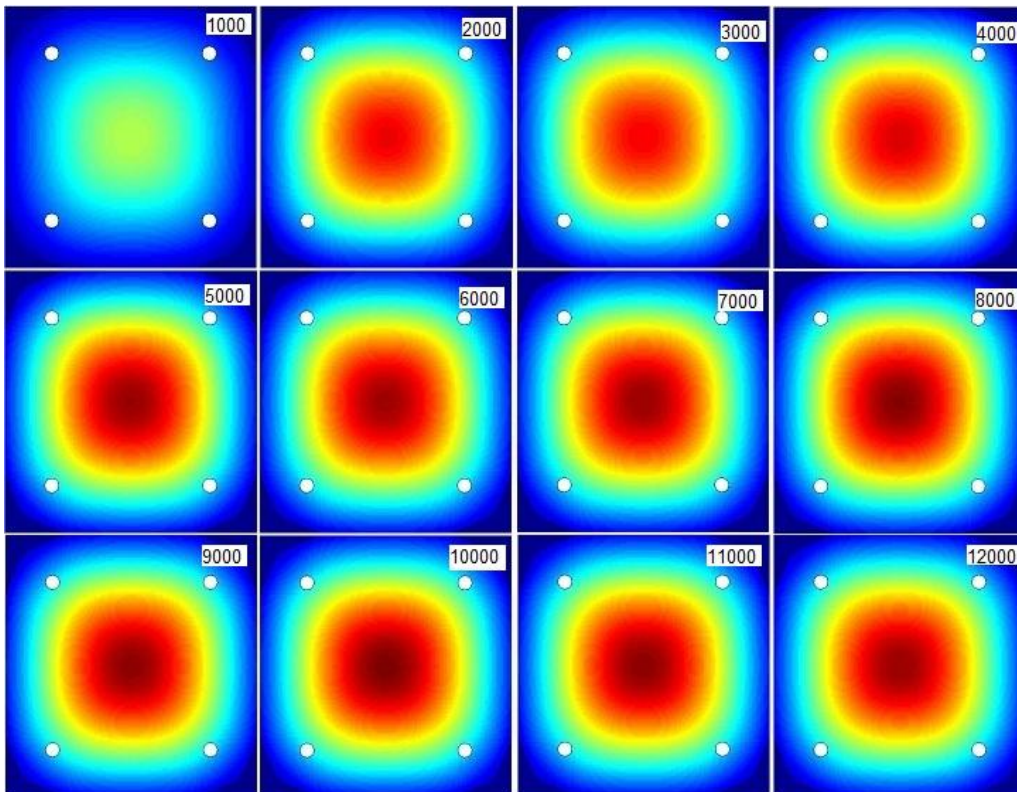


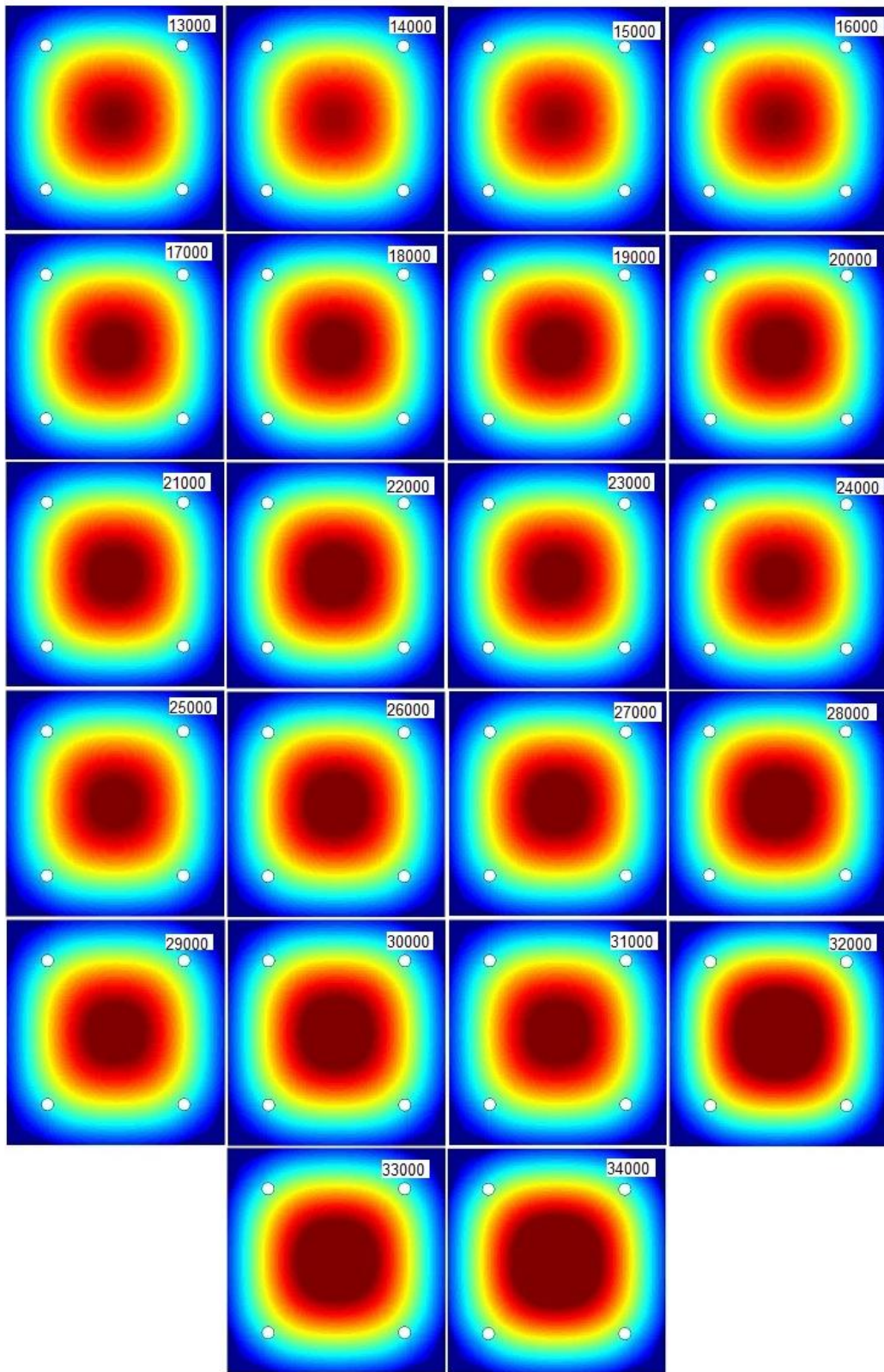
Εικόνα 6.19. Ανθρακονημάτινο δοκίμιο που αστόχησε μετά από 34700 κύκλους φόρτισης



Εικόνα 6.20. Επίθεμα ζελατίνης στο κέντρο του ανθρακονημάτινου δοκιμίου

Παρακάτω δίνεται μια απεικόνιση της διάδοσης της ασυνέχειας, ανά 1000 κύκλους.





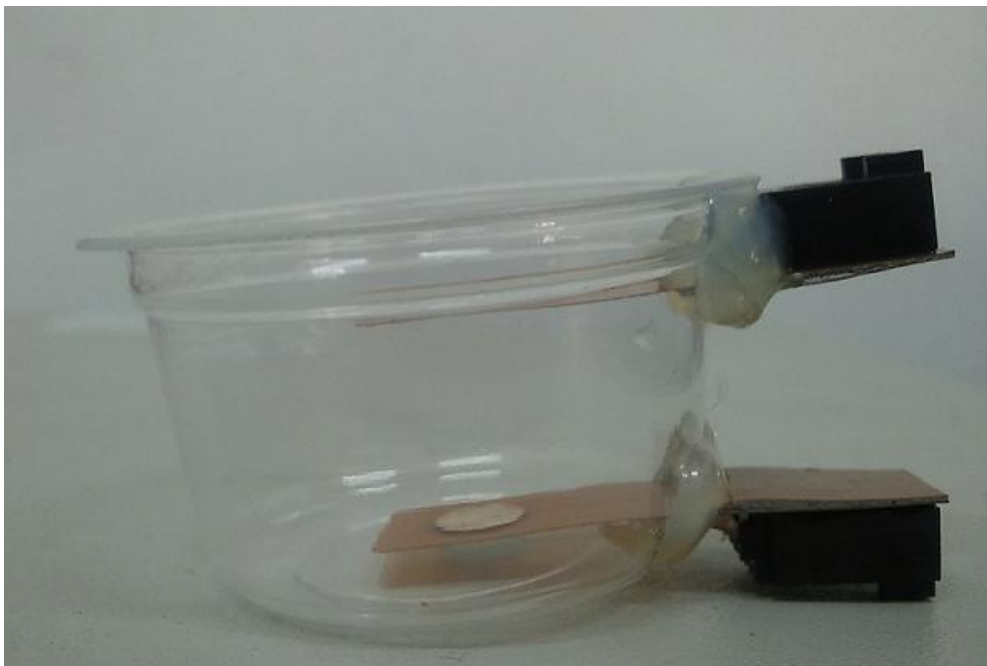
Εικόνα 6.21. Γραφική απεικόνιση της διάδοσης της ασυνέχειας

Παρατηρώντας τα γραφήματα καταλαβαίνουμε ότι είναι εμφανής ο ρόλος που έπαιξε το κομμάτι ζελατίνης στο κέντρο του δοκιμίου αφού αυτή είναι η περιοχή από την οποία ξεκίνησε η αποκόλληση.

6.4. ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ

Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να μελετηθεί με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων η διαδικασία πολυμερισμού της εποξικής ρητίνης.

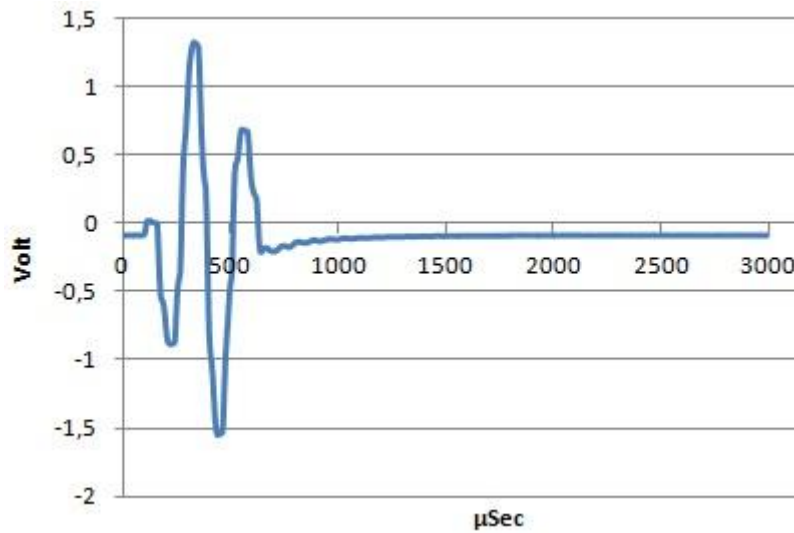
Για τις ανάγκες του πειράματος προσαρμόστηκαν σε ένα πλαστικό κύπελάκι δυο πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες.



Εικόνα 6.22. Πλαστικό κύπελλο με δύο πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες προσαρμοσμένους.

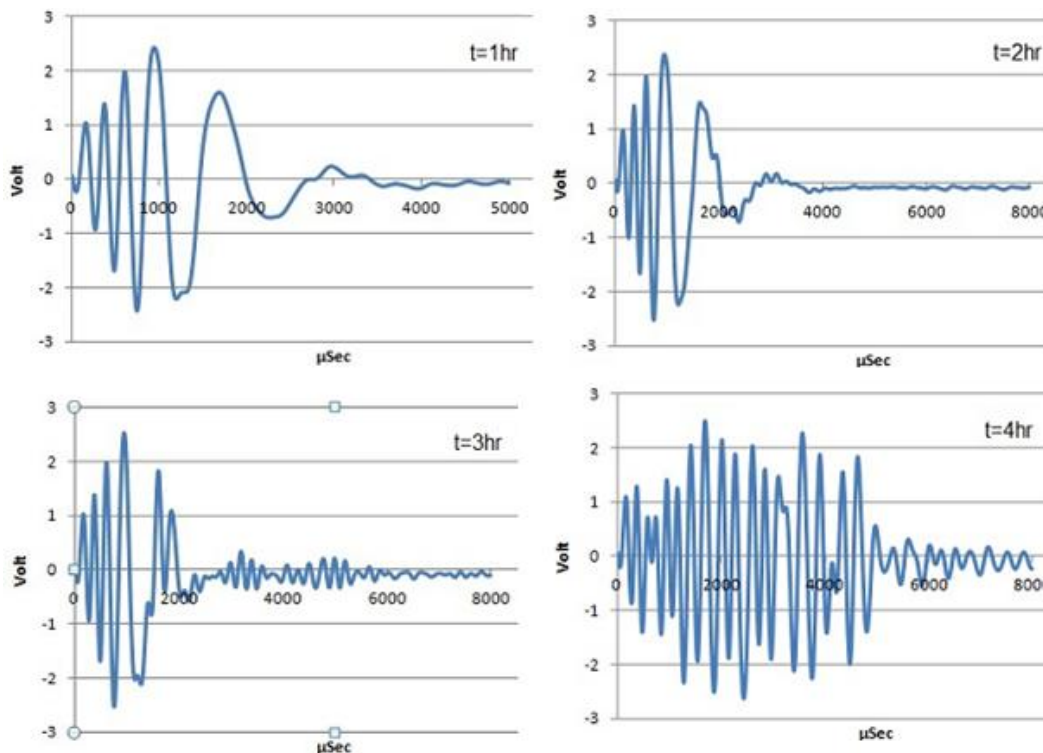
Αναδεύτηκαν 15ml ρητίνης με 2ml σκληρυντικής ουσίας και το μείγμα εκχύθηκε στο παραπάνω κύπελλο με τους αισθητήρες. Γινόντουσαν μετρήσεις ανά μία ώρα σε βάθος δώδεκα ωρών, όσο δηλαδή χρειάζεται η συγκεκριμένη ρητίνη για να πολυμεριστεί πλήρως.

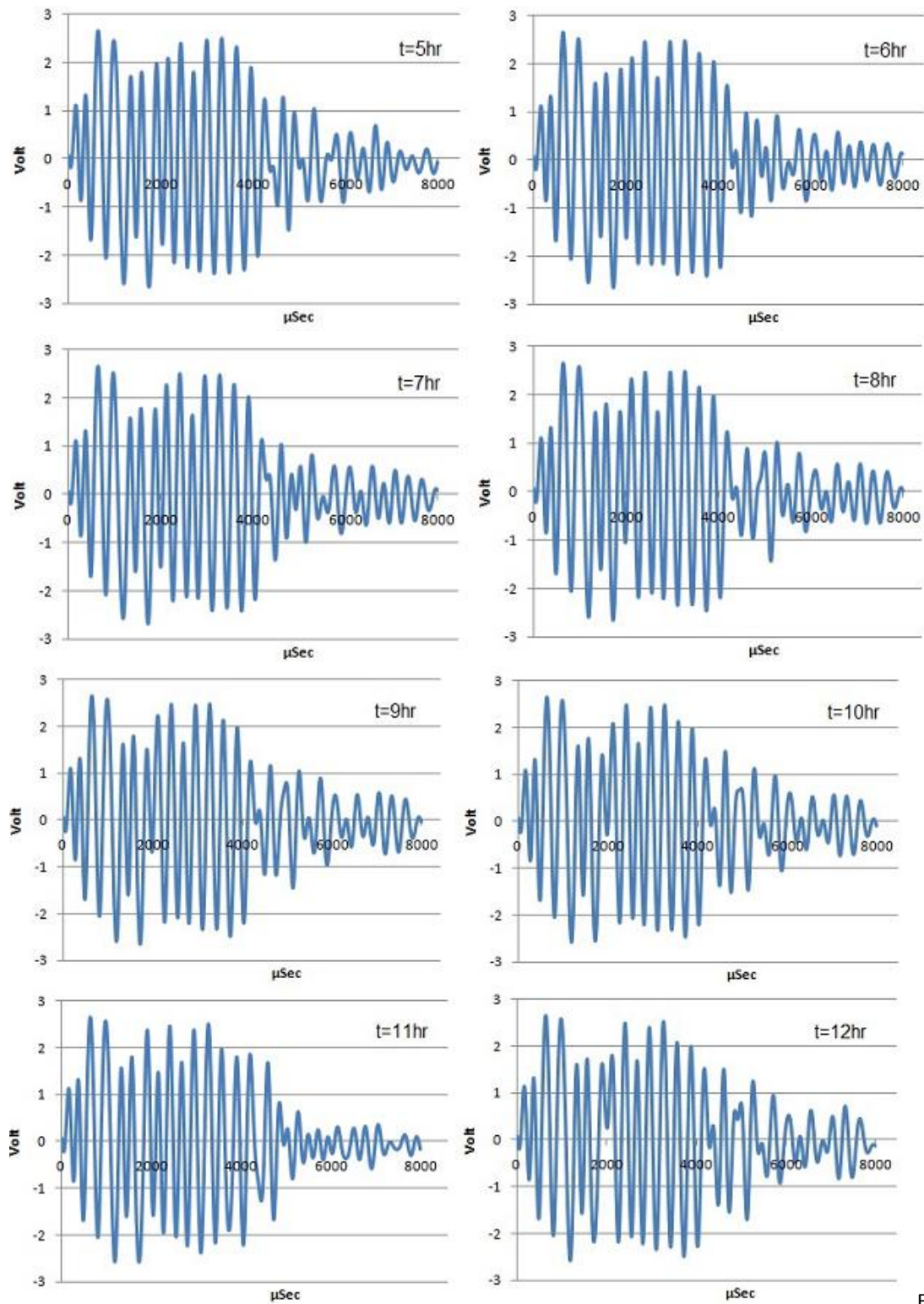
Ο διεγέρτης εφάρμοσε το εξής σήματα σε συχνότητα 100KHz



Εικόνα 6.23. Παλμός διέγερσης

Οι αποκρίσεις που λήφθηκαν ανά μία ώρα, παρουσιάζονται παρακάτω





Εικ

όνα 6.24. Ωριαίες αποκρίσεις

Είναι εμφανής η βελτίωση της απόκρισης του σήματος καθώς περνάει ο χρόνος, αποτέλεσμα του πολυμερισμού της ρητίνης.

6.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα μπορούμε να πούμε ότι η χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων ενδείκνυται για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών αφού, παρέχει μια καλή διακριτική ικανότητα ως προς τυχόν ατέλειες και ασυνέχειες των μεταλλικών και σύνθετων υλικών. Παρέχει μια πολύ καλή προσέγγιση της τοποθεσίας των ατελειών και μπορεί να εντοπίσει την πιθανή περιοχή κάποιας αστοχίας. Επίσης οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της εξέλιξης κάποιας ασυνέχειας. Από την άλλη πλευρά όμως μας παρέχουν έναν ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της ασυνέχειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. "Introduction to Non Destructive Testing", Paul E. Mix
2. "Structural Health Monitoring", Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen, Alfredo Guemes
3. "Health Monitoring of Aerospace Structures", W.J. Staszewski, C. Boller, G.R. Tomlison
4. "Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves", J. David, N. Cheeke
5. "Elastic Waves in Solids I, Free and Guided Propagation", Daniel Royer, Eugene Dieulesaint
6. "Identification of damage using Lamb waves", Zhongqing Su, Lin Ye
7. "Guided Lamb Waves Based Structural Health Monitoring Through a PZT Network System", Carlos Silva, Bruno Rocha, Afzal Suleman
8. Διδακτορική διατριβή Κωνσταντίνου Καλκάνη