



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ»**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

ΦΑΡΜΑΚΗ ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

Εσώφυλλο:

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση:

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΔΟΜΕΣ – ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την25/06/2019.....από την εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων : κ. Θεόδωρος Ματίκας, Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :

1. κ. Θεόδωρος Ματίκας , Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
2. κ. Κωσταντίνος Δάσιος , Επίκουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
3. κ. Νεκταρία – Μαριάνθη Μπάρκουλα , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

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

(Υπογραφή υποψηφίου)

Αφιερωμένο στην οικογένεια μου...

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια περάτωσης του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Προηγμένα Υλικά», του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών (ΤΜΕΥ) της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και αποτελεί μελέτη της δομική ακεραιότητας σύνθετων υλικών αεροπορικού τύπου με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας.

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερος όσους πίστεψαν σε εμένα και συντέλεσαν με την στήριξή τους στην πραγματοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέπων της εργασίας μου κ. Θεόδωρο Ματίκα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και υπεύθυνο του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών, για την ανάθεση του θέματος, τις πολύτιμες συμβουλές αλλά και για την ανεκτίμητη καθοδήγησή του συντέλεσε στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Οφείλω να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κ.Κωνσταντίνο Δάσιο, Επίκουρο Καθηγητή του ΤΜΕΥ και την κα.Νεκταρία-Μαριάνθη Μπάρκουλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του ΤΜΕΥ για τις πολύτιμες υποδείξεις τους και που μου έκαναν την τιμή να είναι μέλη της επιτροπής.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτωρ του Τμήματος κ.Δημήτριο Έξαρχο για την συνεχή βοήθεια, την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές του στη θερμογραφία αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Ακόμη ευχαριστώ όλα τα μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών που με υποστήριξαν σε διάφορα στάδια της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου που όλα αυτά τα χρόνια της φοίτησης μου πιστεύουν στις δυνατότητες μου και με στηρίζουν συναισθηματικά και υλικά.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε η μελέτη της δομικής ακεραιότητας σύνθετων υλικών αεροπορικού τύπου συγκεκριμένα σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) με τη χρήση της μη καταστροφικής μεθόδου, της υπέρυθρης θερμογραφίας. Σκοπός της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η ανίχνευση αντιπροσωπευτικών ζημιών σε σύνθετες αεροναυτικές δομές όπως οι αποκολλήσεις από κρούση ή τεχνητά ελαττώματα με χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται αρχικά στους μη καταστροφικούς ελέγχους (ΜΚΕ) που έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των υλικών διότι επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υλικού (όπως η μικροδομή και η μακροδομή, η μηχανική τάση, οι φυσικές ιδιότητες, και τα ελαττώματα/βλάβες) σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο, γραμμή, επιφάνεια, ή όγκο ενδιαφέροντος και σε σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Επίσης, στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται ο μη καταστροφικός έλεγχος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, η θερμογραφία υπέρυθρου αλλά και η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε αυτή της Lock-in θερμογραφίας. Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα σύνθετα υλικά (Composite Materials), που ως σύνθετα υλικά ορίζονται τα υλικά που προέρχονται από την φυσική ανάμιξη δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την δημιουργία ενός υλικού με τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των αρχικών υλικών. Επίσης γίνεται αναφορά στα CFRPs και στη σημασία τους ως δομικά στοιχεία στις μέρες μας.

Τέλος, στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και ερμηνεύονται βάσει του θεωρητικού υποβάθρου του πρώτου μέρους. Συμπεραίνεται ότι, η χρήση της Lock-in θερμογραφίας υπέρυθρου είναι μία κατάλληλη και αξιόπιστη μέθοδος για την ανίχνευση τεχνητών ελαττωμάτων αλλά και βλαβών σε CFRP υλικά.

Abstract

In the present thesis an analysis of the structural integrity of aviation type composite materials was carried out. Specifically polymer matrix composites reinforced with carbon fibers (CFRP) were examined using the non-destructive method of infrared thermography. The aim of this work was the detection of representative damages to the aeronautic composite structures such as impact detachments or artificial defects using infrared thermography.

In the first part is presented the theoretical background. The first chapter referred to the non-destructive tests (NDT) that have become an integral part of the material science because it allows the determination of material parameters (such as microstructure and macrostructure, mechanical stress, physical properties, defects etc.) at almost any point, line, surface, or volume of interest and in almost any state during the life of the material. The first chapter also referred to the non destructive test used in the present study, the infrared thermography and specifically the Lock-in method. The second chapter referred to the composite materials, namely materials that come from physical mixing of two or more materials with the aim to create a material with final properties different from those of the materials constituting it. Also mentioned the CFRPs and its importance as a building block nowadays.

In the third part are presented the experimental setup and the results of the experimental process. Finally the results are interpreted according to the theoretical background of the first part. In conclusion the use of Lock-in infrared thermography is an appropriate and reliable method for detecting artificial defects and damages in CFRP materials.

Πίνακας περιεχομένων

Μέρος I : Θεωρία	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι – Θερμογραφία	13
1.1 Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους	14
1.2 Θερμογραφία.....	26
1.2.1 Εισαγωγή στη θερμογραφία υπερύθρου	26
1.2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	28
1.2.3 Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας	29
1.2.3.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	30
1.2.3.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (ή θερμική μεταβίβαση)	31
1.2.3.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	32
1.2.4 Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία	33
1.2.4.1 Συντελεστής εκπομπής	33
1.2.4.2 Επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τον συντελεστή εκπομπής	36
1.2.5 Τεχνικές θερμογραφίας.....	37
1.2.5.1 Παθητική Θερμογραφία	38
1.2.5.2 Ενεργητική Θερμογραφία.....	39
1.2.5.1 Θερμογραφία με δονήσεις (VT)	40
1.2.5.2 Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (SH)	40
1.2.5.3 Θερμογραφία με παλμό (PT).....	41
1.2.5.4 Θερμογραφία φάσης παλμού (PPT)	42
1.2.5.5 Θερμογραφία Lock-in (LT).....	43
1.2.6 Θερμικές κάμερες υπερύθρου.....	48
1.2.7 Παραδείγματα εφαρμογών θερμογραφίας υπερύθρου	49
1.2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμογραφίας IR.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Σύνθετο πολυμερικής μήτρας ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP-carbon fiber reinforced polymer)	55
2.1 Σύνθετα Υλικά	56
2.1.1 Εισαγωγή	56
2.1.2 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	60
2.1.3 Ινώδη σύνθετα υλικά	63
2.2 Πολυμερικές Μήτρες	66
2.2.1 Εισαγωγή	66
2.2.2 Υλικά μητρών συνθέτων.....	66

2.2.3	Μηχανικές ιδιότητες πολυμερών	67
2.3	Ίνες Ενίσχυσης	70
2.3.1	Τύποι Ίνών	70
2.3.2	Μορφές Ίνών	71
2.3.3	Ίνες Άνθρακα	73
2.3.4	Η Διεπιφάνεια Ίνας-Μήτρας.....	77
<i>Μέρος II :Πείραμα</i>		79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :Πειραματική Διάταξη		79
3.1	Εισαγωγή.....	80
3.2	Υλικά και Εργαστηριακός Εξοπλισμός.....	80
3.3	Πειραματική Διαδικασία	83
3.4	Αποτελέσματα	85
3.5	Συμπεράσματα	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1	Παραδείγματα εφαρμογών μη καταστροφικού ελέγχου.	17
Εικόνα 2	Διαφορές φωτογραφίας και θερμογραφίας [41].....	26
Εικόνα 3	Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [34].	29
Εικόνα 4	Παθητική θερμογράφιση ενός κτηρίου.	39
Εικόνα 5	Είδη lock-in θερμογραφίας [45-46].....	47
Εικόνα 6	Υπέρυθρες θερμικές κάμερες 52: (α) LWIR θερμική κάμερα FLIR ThermaCAM T360, με FPA 320x240 pixels, φασματική απόκριση 7.5–13 μm. (β) MWIR θερμική κάμερα CEDIP/JADE με ανιχνευτή InSb και FPA 320x240 pixels, φασματική απόκριση 3.6–5.0 μm.	48
Εικόνα 7	Θερμογραφικός έλεγχος του πηδαλίου του μαχητικού αεροσκάφους [45].	50
Εικόνα 8	Ενεργειακός έλεγχος κτιρίων με υπέρυθρη θερμογραφία [45].	50
Εικόνα 9	Εντοπισμός υγρασίας σε κτίρια με υπέρυθρη θερμογραφία [45].....	51
Εικόνα 10	Θερμογραφικός έλεγχος γέφυρας οδικού δικτύου: Περιοχή με πιθανό πορώδες [45].	51
Εικόνα 11	Θερμογραφικός έλεγχος γέφυρας οδικού δικτύου: Εμφανή προβλήματα στις υδρορροές (κόκκινος κύκλος), και ύπαρξη αυξημένης υγρασίας στη δοκό (κίτρινος κύκλος) [45].	52

Εικόνα 12 Μονή Μολυβδοσκεπάστου και πειραματική διάταξη υπέρυθρης θερμογραφίας για την αξιολόγηση βλάβης στο εσωτερικό της Μονής [50].	53
Εικόνα 13 Θερμογραφικός έλεγχος για την αξιολόγηση της Φθοράς Μνημείων Πολιτιστικής Κληρονομιάς.	53
Εικόνα 14 Κατηγορίες σύνθετων υλικών με βάση τη φάση ενίσχυσης.	57
Εικόνα 15 Χρήση των σύνθετων υλικών στα εξωτερικά καλύμματα του AIRBUS A380.	60
Εικόνα 16 Διάδοση ρωγμής σε ένα ομογενές υλικό (α) και σε ένα διφασικό σύνθετο υλικό (b).	62
Εικόνα 17 Σύνθετο υλικό τύπου Sandwich με κυψελωτό πυρήνα (Honeycomb).	62
Εικόνα 18 Τύποι ινωδών ενισχύσεων σύνθετων υλικών[52].	63
Εικόνα 19 Εικόνα φωτομικρογραφίας ενίσχυσης κοντών ινών.	65
Εικόνα 20. Πλεκτό ύφασμα από ίνες άνθρακα.	73
Εικόνα 21 Η κλίμακα της διεπιφάνειας μακροσκοπικά (αριστερά) και μακροσκοπικά (δεξιά).	77
Εικόνα 22 Η διεπιφάνεια συνάρτηση του θερμικού, μηχανικού και χημικού περιβάλλοντος.	78
Εικόνα 23 Πρότυπη πλάκα CFRP με τεχνητά ελαττώματα.	80
Εικόνα 24 Πρότυπη σύνθετη πλάκα με αντιπροσωπευτικά ελαττώματα διαφορετικού μεγέθους.	81
Εικόνα 25 Σύνθετη πλάκα με βλάβη από κρούση.	81
Εικόνα 26 Πολύστρωτες πλάκες CFRP.	82
Εικόνα 27 Υπέρυθρη κάμερα θερμογραφίας τύπου Cedip Jade 510 εταιρίας CEDIP	82
Εικόνα 28 Συσκευή καταγραφής δεδομένων εργαστηρίου.	83
Εικόνα 29 Διάταξη πειραματικής διαδικασίας με θερμογραφία υπέρυθρου.	84
Εικόνα 30 Γεννήτρια ρεύματος (α) και παλμογεννήτρια (β) εργαστηρίου.	84

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Χαρακτηριστικά της οργανολογίας.	15
Σχήμα 2 Κατηγορίες μη καταστροφικού ελέγχου.	19
Σχήμα 3 Αρχή του ελέγχου υλικών με φιλμ.	20

Σχήμα 4 Αναπαράσταση μεθόδου διεισδυτικών υγρών.	21
Σχήμα 5 Δινορεύματα (I) που επάγονται σε ένα αγώγιμο μεταλλικό έλασμα (C).	21
Σχήμα 6 Αναπαράσταση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου σε υλικό με ρωγμή.....	22
Σχήμα 7 Δοκιμή υπερήχων.	23
Σχήμα 8 Αναπαράσταση μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας.	24
Σχήμα 9 Τυπική διάταξη ακουστικής εκπομπής.....	25
Σχήμα 10 Τυπική διάταξη θερμογραφίας υπερύθρου.....	25
Σχήμα 11 Αρχή της θερμογραφίας [34].....	28
Σχήμα 12 Απεικόνιση των τριών μηχανισμών μετάδοσης της θερμότητας [44].	30
Σχήμα 13 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή [44].	31
Σχήμα 14 Μεταφορά θερμότητας από μία θερμή επιφάνεια προς το περιβάλλον ρευστό με συναγωγή [45].	32
Σχήμα 15 Η υπέρυθρη ενέργεια που ακτινοβολείται από την επιφάνεια ενός αντικειμένου [34].....	35
Σχήμα 16 Διάγραμμα ακτινοβολίας μέλανος σώματος και πραγματικής επιφάνειας [34].....	36
Σχήμα 17 Παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή εκπομπής.	36
Σχήμα 18 Πειραματική διάταξη θερμογραφίας με δονήσεις [34].	40
Σχήμα 19. Θερμογραφία με παλμό (PT) [32].	42
Σχήμα 20 Θερμογραφία Lock – in (LT) [32].	43
Σχήμα 21 Θερμογραφία παλμού και Lock-in [32]	44
Σχήμα 22 Η έννοια του lock-in κατά αναλογία με ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα [45].....	45
Σχήμα 23 Αρχή του υπολογισμού των εικόνων "φάσης", "εύρους", και "θερμοκρασίας"[46].....	46
Σχήμα 24 Κατηγορίες σύνθετων υλικών.	58
Σχήμα 25 Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη. 58	
Σχήμα 26 Τυπικές καμπύλες τάσεως-επιμηκύνσεως ψαθυρών, όλκιμων και ελαστομερών πολυμερών.	68
Σχήμα 27 Κάποια βασικά υλικά που βασίζονται σε στοιχεία της 2 ^{ης} και 3 ^{ης} περιόδου του Περιοδικού Πίνακα.	70
Σχήμα 28 Γραφική δομή ατόμων C.	74
Σχήμα 29 Τυπική δομή ανθρακονήματος.	74

Σχήμα 30 Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα.....	74
Σχήμα 31 Για 0Joule και πλάκα με 18 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.....	86
Σχήμα 32 Για 0Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.....	86
Σχήμα 33 Για 8Joule και πλάκα με 18 φύλλα A: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.	87
Σχήμα 34 Για 8Joule και πλάκα με 18 φύλλα B: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.	88
Σχήμα 35 Για 8Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.....	88
Σχήμα 36 Για 4Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.....	89
Σχήμα 37 Για 2.5Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.	90
Σχήμα 38 Αξιολόγηση της Lock-in θερμογραφίας για την ανίχνευση ελαττωμάτων στη σύνθετη πλάκα CFRP. (a) Πρότυπη σύνθετη πλάκα με αντιπροσωπευτικά ελαττώματα διαφορετικού μεγέθους, (b)-(c) Εικόνες θερμογραφίας αντίστοιχων περιοχών.....	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τιμές συντελεστή εκπομπής ϵ [45].	34
Πίνακας 2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας.	54
Πίνακας 3 Ιδιότητες μακρών ινών.	64
Πίνακας 4 Ιδιότητες ινών μικρού μήκους.....	65

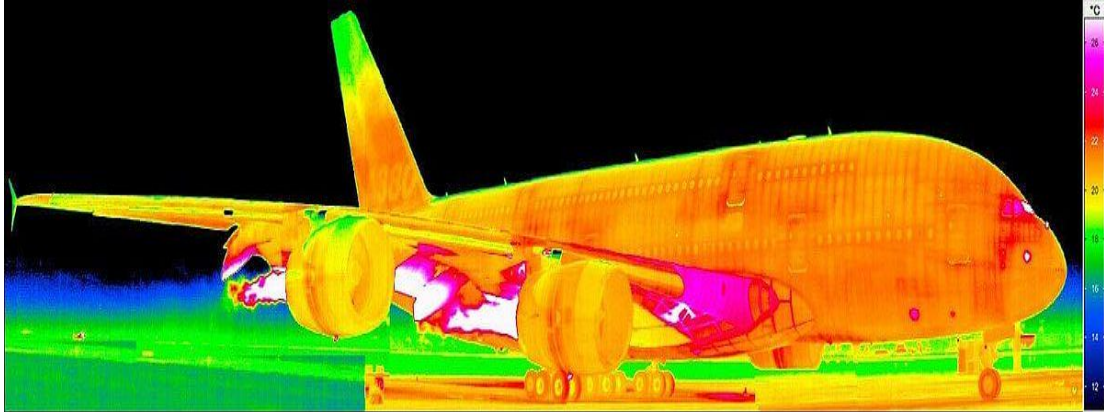
Πίνακας 5 Ιδιότητες ινών άνθρακα, γυαλιού και Kevlar.....	76
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά υπέρυθρης κάμερας Cedip Jade 510.....	83

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Καμπύλες σ - ϵ διαφόρων τύπων ινών.....	76
---	----

Μέρος I : Θεωρία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι – Θερμογραφία



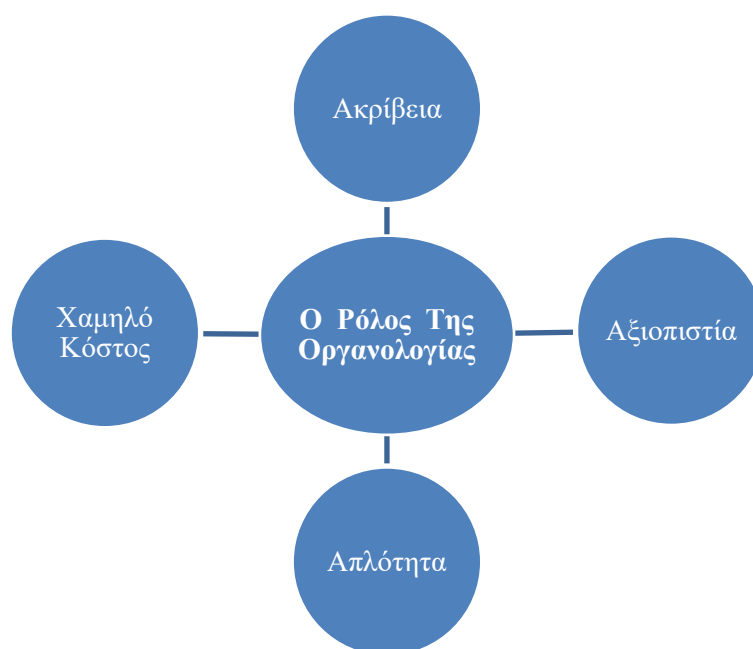
1.1 Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους

Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) είναι μια επιθεώρηση ή έλεγχος ενός δοκιμίου χωρίς να επηρεάζεται καθόλου το ίδιο το υπό-εξέταση δοκίμιο ώστε να καθοριστεί η παρουσία ή η απουσία ασυνεχειών που μπορεί να επηρεάσουν τη χρήση ή το ίδιο το δοκίμιο. Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών είναι σημαντικός για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό προϊόντων. Η ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό υλικών και δομών που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών (π.χ. αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, θαλάσσιες κατασκευές, πυρηνική βιομηχανία, κατασκευές πολιτικού μηχανικού, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, κλπ.) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών και οργανολογίας [1-3]. Ορισμένα μειονεκτήματα είναι ότι κάποιες από τις μεθόδους αυτές χαρακτηρισμού απαιτούν κοπή η οποία καταστρέφει την υπό εξέταση δομή και κάποιες δεν παρέχουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού στο λειτουργικό του περιβάλλον. Μια ιδανική μέθοδος χαρακτηρισμού θα πρέπει να παρέχει στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με τη μικροδομή και τη μακροδομή του χωρίς την ανάγκη τεμαχισμού της δομής. Τέτοιου είδους δεδομένα μπορούν να ληφθούν μόνο χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) [4]. Οι όροι μη καταστροφικός έλεγχος (nondestructive inspection – NDI), μη καταστροφική δοκιμή (nondestructive testing – NDT) ή μη καταστροφική αξιολόγηση (nondestructive evaluation – NDE) αναφέρονται στη χρήση των ΜΚΕ, μιας κατηγορίας δηλαδή φυσικών δοκιμών που επιτρέπουν την ανίχνευση ή/και μέτρηση ιδιοτήτων του υλικού ή ατελειών χωρίς όμως να εμποδίζεται η λειτουργική χρήση της δομής [5-9].

Ο ΜΚΕ έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της μελέτης των υλικών διότι επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υλικού (όπως η μικροδομή και η μακροδομή, η μηχανική τάση, οι φυσικές ιδιότητες, και τα ελαττώματα/βλάβες) σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο, γραμμή, επιφάνεια, ή όγκο ενδιαφέροντος και σε σχεδόν οποιαδήποτε κατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Ο μη καταστροφικός έλεγχος αναφέρεται σε πολλές διαφορετικές μεθόδους που βασίζονται σε ελαστικά κύματα, διεισδύουσες ακτινοβολίες, φως, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικά αισθητήρια, κλπ. Η κάθε μέθοδος μπορεί να χωρίζεται σε διαφορετικές τεχνικές, οι οποίες έχουν κοινή φυσική βάση (π.χ. ακουστική, οπτική, μαγνητισμός, κλπ.), όμως

διαφοροποιούνται ως προς την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό επίπεδο ή στο πεδίο σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος ή της κατασκευής. Λόγω του μεγάλου αριθμού πιθανών μεθόδων και τεχνικών μη καταστροφικού χαρακτηρισμού και αξιολόγησης υλικών και δομών, οι ΜΚΕ δεν είναι ένα μεμονωμένο πεδίο, αλλά μια συνέργεια πολλών επιστημονικών και τεχνικών ειδικοτήτων [10-15].

Ο ρόλος της οργανολογίας μη καταστροφικού ελέγχου είναι σημαντικός για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων. Η οργανολογία θα πρέπει να διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να απολαμβάνει ευρείας αποδοχής στην επιστημονική και τεχνική κοινότητα [16].



Σχήμα 1 Χαρακτηριστικά της οργανολογίας.

Ο ρόλος του ΜΚΕ βασίζεται σε δύο κύριους άξονες. Ο πρώτος είναι προφανώς η αποτροπή της καταστροφικής αστοχίας των κατασκευών. Είναι πολλά τα παραδείγματα αστοχιών στην ιστορία του τεχνικού πολιτισμού τα οποία συνέβησαν λόγω αδυναμίας ανίχνευσης βλάβης σε αρχικό στάδιο. Λόγω καταπόνησης κατά τη λειτουργία η βλάβη αυξάνεται εκθετικά (όπως μία ρωγμή κατά την κόπωση) και ως εκ τούτου μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία με ανθρώπινα θύματα και δευτερευόντως απώλεια κεφαλαίου. Τυπικό παράδειγμα από την αεροναυπηγική το αεροσκάφος “Comet”, όπου οι ρωγμές ξεκινούσαν από τις ακμές των παραθύρων.

Δυστυχώς τη δεκαετία του 1950 όταν κυκλοφόρησε το συγκεκριμένο αεροσκάφος, δεν υπήρχαν μέθοδοι πλήρους πεδίου για τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων με συνέπεια να μην είναι εμφανής η συγκέντρωση τάσεων στις ακμές που οδήγησε αρκετά από τα αεροπλάνα σε αστοχία εν πτήση μετά από περίπου 1000 κύκλους συμπίεσης-αποσυμπίεσης [17]. Στο πεδίο των σιδηροδρόμων, τα ατυχήματα (πολλές φορές θανατηφόρα) ήταν εβδομαδιαίο φαινόμενο στα τέλη του 19ου αιώνα [18]. Οι ανθρώπινες απώλειες έφταναν τις διακόσιες ζωές ανά έτος! Ρωγμές στους άξονες και σε άλλα δομικά στοιχεία του τρένου περνούσαν απαρατήρητες μέχρι να φτάσουν στο σημείο καταστροφικής αστοχίας. Ο μεγάλος αριθμός των αστοχιών ανάγκασε την επιστημονική και τεχνική κοινότητα να λάβει μέριμνα για την εύρεση των λόγων αστοχίας και την αποφυγή αυτής στα διάφορα πεδία. Έτσι υπήρξε ανάπτυξη κλάδων όπως η θραυστομηχανική, για καλύτερο σχεδιασμό των κατασκευών (αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων κλπ.), η επιστήμη των υλικών για ανάπτυξη πιο ανθεκτικών υλικών και φυσικά των ΜΚΕ για τον εντοπισμό της βλάβης πριν αυτή αποκτήσει κρίσιμο μέγεθος και οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία.

Στην επικράτεια μιας χώρας λειτουργούν χιλιάδες κατασκευές που υποστηρίζουν την ανθρώπινη δραστηριότητα και ανάπτυξη (π.χ. εθνικές οδοί, γέφυρες, σιδηρόδρομοι). Όλες οι κατασκευές χρήζουν συντήρησης (κάποιες εφαρμογές βλ.Εικόνα 1). Δυστυχώς όμως τα διαθέσιμα κονδύλια είναι πάντα περιορισμένα. Άρα θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στις κατασκευές που έχουν πραγματική ανάγκη ή αλλιώς έχουν φτάσει κοντά στο όριο ασφαλούς ζωής τους. Γίνεται κατανοητή λοιπόν η αναγκαιότητα εφαρμογής μεθόδων ΜΚΕ οι οποίες με γρήγορο, αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο θα επιτρέψουν την κατάστρωση σχεδίου συντήρησης των κατασκευών βάσει της φθοράς που έχει υποστεί η ακεραιότητά τους και της επικινδυνότητας της λειτουργίας τους.

Αεροπορική Βιομηχανία: Τα συστατικά στοιχεία ενός αεροπλάνου ελέγχονται πριν συναρμολογηθούν και γίνονται περιοδικοί έλεγχοι κατά τη διάρκεια ζωής αεροσκαφών. Λόγω καταπόνησης πολλές φορές εμφανίζονται ρωγμές οι οποίες μπορεί να είναι κόπωσης ή χτύπημα ενός κεραυνού. Όπως και ένα άλλο πρόβλημα είναι η διάβρωση είτε κατά την προσγείωση είτε κατά την απογείωση.

Έλεγχος Αγωγών: Οι σωλήνες είναι πολύ ευαίσθητοι στη εξωτερική και εσωτερική διάβρωση όπως και σε διάφορα είδη ρηγματώσης. Για να διατηρείται ασφαλής η λειτουργία των σωλήνων πραγματοποιούνται περιοδικές επιθεωρήσεις ώστε να εντοπίζονται εγκαίρως ρωγμές και ασυνέχειες.

Έλεγχος Γέφυρας: Οι γέφυρες παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης, ρηγματώσης κ.ά. Ο οπτικός έλεγχος είναι η κύρια μέθοδος ελέγχου της γέφυρας μαζί με τα οπτικά σωματίδια και τους υπερήχους. Μία ακόμη μέθοδος είναι η ακουστική εκπομπή όπου ειδικά συστήματα ελέγχου τοποθετούνται μόνιμα στις γέφυρες για να μεταφέρουν πληροφορίες για την συνεχή κατάσταση της γέφυρας.

Έλεγχος Δεξαμενών: Οι μεγάλες δεξαμενές χημικών, πετρελαίου, οι οποίες μπορούν να περιλαμβάνουν πολλούς τόνους επικίνδυνων εύφλεκτων υγρών πρέπει να ελέγχονται στα κομμάτια των συγκολλήσεων και στο σύνολο του μετάλλου όχι μόνο για τις κατασκευαστικές ανέχειες αλλά και κατά της διάρκειας ζωής καθώς κινδυνεύουν από διάβρωση και εμφάνιση ρωγμών.

Εικόνα 1 Παραδείγματα εφαρμογών μη καταστροφικού ελέγχου.

Ο έλεγχος των υλικών στο πεδίο πραγματοποιείται συχνά συγκρίνοντας τα δεδομένα της επιθεώρησης με τα αποτελέσματα από ένα πρότυπο δοκίμιο, επισημαίνοντας τυχόν σημαντικές αποκλίσεις [19]. Αυτό σημαίνει ότι καλά καθορισμένα πρότυπα δοκίμια θα πρέπει να είναι διαθέσιμα για τη βαθμονόμηση της οργανολογίας ελέγχου. Για την αποφυγή εσφαλμένων αποτελεσμάτων, τα πρότυπα δοκίμια θα πρέπει να εμπεριέχουν ενσωματωμένες ατέλειες που να προσομοιάζουν εκείνες που εμφανίζονται φυσικά στο υπό έλεγχο υλικό ή δομή. Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό με τη μέθοδο των υπερήχων του ποσοστού του πορώδους σε ένα υλικό, απαιτούνται πρότυπα δοκίμια με βαθμονομημένα επίπεδα πορώδους [20,21].

Η διαδικασία του ελέγχου συχνά περιπλέκεται από το γεγονός ότι πολλά υλικά είναι από τη φύση τους ανισότροπα (πχ. σύνθετα υλικά), ενώ οι περισσότερες τεχνικές ΜΚΕ αναπτύχθηκαν για ισότροπα υλικά, όπως τα μέταλλα. Η ανάπτυξη νέων τεχνικών ΜΚΕ για την αξιολόγηση ανισότροπων υλικών και δομών αποτελεί σημαντικό ερευνητικό αντικείμενο [22-26].

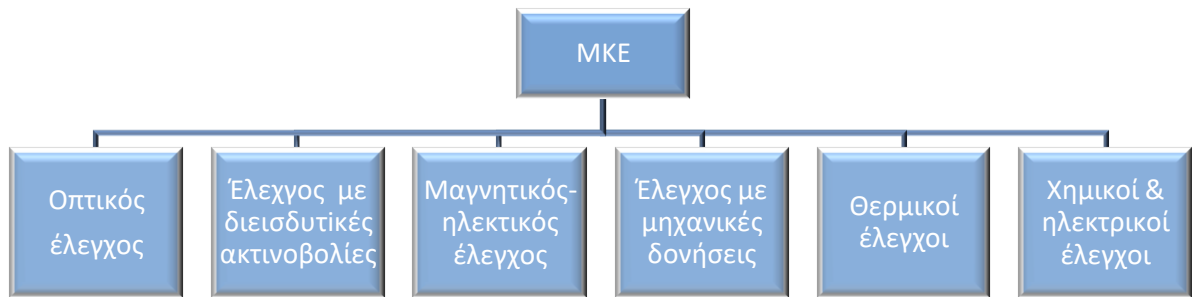
Η περιοχή της συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) είναι ένα ακόμα αναδυόμενο πεδίο έρευνας στο τομέα των ΜΚΕ. Τα δεδομένα που συλλέγονται με

μία τεχνική μπορούν με βάση το data fusion να συνδυαστούν με τα δεδομένα από μια διαφορετική τεχνική με σκοπό την ανίχνευση ατέλειας/βλάβης, η οποία δεν είναι ανιχνεύσιμη από μια μόνο τεχνική όταν αυτή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα. Δεδομένα από διάφορες τεχνικές μπορούν λοιπόν να συγχωνευτούν για να παρέχουν μια πληρέστερη περιγραφή των λεπτομερειών της μικροδομής ενός υλικού από ότι είναι δυνατό με τη χρήση μεμονωμένων κλασσικών μεθόδων.

Η ανάπτυξη νέων, καινοτόμων τεχνολογιών επιτρέπουν την πραγματοποίηση πιο αποδοτικών προληπτικών ελέγχων [27-31]. Νέες εξελίξεις στους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, στους ενσωματωμένους στη δομή αισθητήρες, καθώς και στη μετάδοση των αποτελεσμάτων ελέγχου με ασύρματη επικοινωνία επηρεάζουν τόσο την ικανότητα και αποτελεσματικότητα του ελέγχου όσο και το κόστος. Για παράδειγμα, νέου τύπου αισθητήρες θερμογραφίας υπερύθρου, ανιχνευτές ακτίνων-X, και αισθητήρες υπερήχων δίνουν τώρα τη δυνατότητα ταχείας σάρωσης μεγάλων περιοχών των δομών για ελαττώματα. Αρκετές νέες εξελίξεις στους τομείς αυτούς επωφελήθηκαν από τη θεαματική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια της μη επεμβατικής ιατρικής απεικόνισης.

Η ανάπτυξη μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MicroElectroMechanical Systems – MEMS) με βάση νέες συσκευές ημιαγωγών και ταυτοποίησης ραδιοσυχνότητας (Radio-Frequency Identification – RFI), καθώς και των ενσωματωμένων πλεγμάτων ιών Bragg, επιτρέπει την εμφύτευση συσκευών ελέγχου και παρακολούθησης σε ένα υλικό κατά τη στιγμή της κατασκευής του, ώστε να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση της υγιούς λειτουργίας (Structural Health Monitoring -SHM) της δομής σε πραγματικό χρόνο. Το SHM αναφέρεται στη διαδικασία εφαρμογής μιας στρατηγικής για την απομακρυσμένη ανίχνευση βλάβης και την παρακολούθηση της υποβάθμισης του υλικού σε τεχνολογικές δομές και κατασκευές. Συσκευές και μέθοδοι SHM επιτρέπουν την εξ αποστάσεως ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας του υλικού, καθιστώντας δυνατή τη διαχείριση των εξαρτημάτων μιας κατασκευής για τη βέλτιστη χρήση τους κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους [32].

Η επιτροπή για τη μη καταστροφική αξιολόγηση του National Materials Advisory Board (NMAB) υιοθέτησε ένα σύστημα για την κατηγοριοποίηση των ΜΚΕ σε έξι κύριες κατηγορίες [33].



Σχήμα 2 Κατηγορίες μη καταστροφικού ελέγχου.

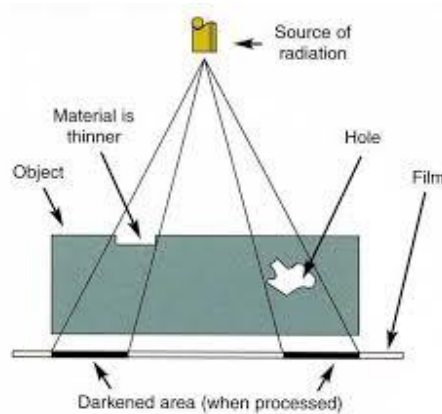
Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες: α) πηγή ενέργειας ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες Χ, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία), β) φύση των σημάτων και η εικόνα ή υπογραφή που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο (εξασθένιση των ακτίνων Χ, ανάκλαση των υπερήχων), γ) μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι), δ) μέθοδοι καταγραφής των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπερύθρου), ε) ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ποσοτική ή ποιοτική). Αντικείμενο της κάθε μεθόδου είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

- Ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.)
- Δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.)
- Διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.)
- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.)
- Σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμειξίσεις κ.ά.)
- Στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής, φθορά από τριβή κ.ά.)
- Ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος, περιεχόμενο εικόνας κ.ά.)
- Μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας

Κάποιοι μη καταστροφικοί έλεγχοι που χρησιμοποιούνται συνήθως παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια [34-40].

- Ραδιογραφικές Μέθοδοι (Radiographic testing)

Οι ραδιογραφικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν με Ακτίνες X (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays), Ψηφιακή Τομογραφία (Computed Tomography), Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια) , (Neutron Radiography). Ανιχνεύουν εσωτερικές ατέλειες (κενά, πορώδες, ρωγμές), όμως η εφαρμογή τους έχει υψηλό κόστος, χαμηλή ευαισθησία σε λεπτές στρωματικές ατέλειες και κίνδυνο για την υγεία.

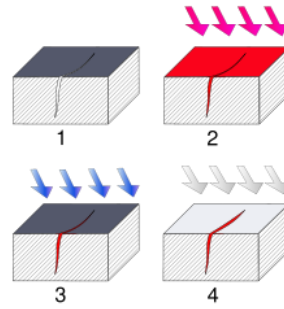


Σχήμα 3¹ Αρχή του ελέγχου υλικών με φιλμ.

- Μέθοδος των διεισδυτικών υγρών (Liquid Penetrant Flow testing)

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. Παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος, φορητότητα, εύκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εύκολη εφαρμογή εν αντιθέση κάποια μειονεκτήματα είναι ότι το ελάττωμα πρέπει να είναι ανοικτό σε μια προσιτή επιφάνεια και το επίπεδο ανιχνευσιμότητας εξαρτάται από τον χειριστή.

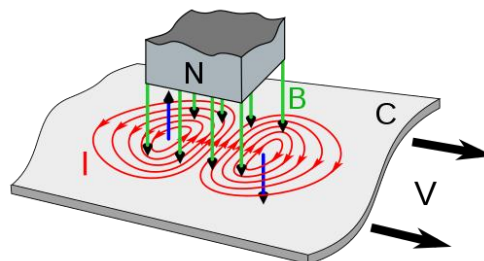
¹ <https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php>.



Σχήμα 4² Αναπαράσταση μεθόδου διεισδυτικών υγρών.

- Μέθοδος των δινορευμάτων (Eddy Current)

Η μέθοδος των δινορευμάτων ή επαγωγικών ρευμάτων (eddy currents) είναι μέθοδος ανίχνευσης και εντοπισμού, όπως και κατά προσέγγιση προσδιορισμού κοντά στην επιφάνεια ευρισκομένων ρωγμών, οι οποίες δεν είναι ορατές με το μάτι σε μεταλλικά και γενικά μαγνητιζόμενα υλικά. Εμφανίζει μέτριο κόστος, φορητότητα και αυτοματοποίηση ενώ ανιχνεύει ατέλειες που μεταβάλλει την αγωγιμότητα των μετάλλων, έχει μικρό βάθος διείσδυσης και ευαισθησία στη γεωμετρία του δοκιμίου.



Σχήμα 5³ Δινορεύματα (I) που επάγονται σε ένα αγώγιμο μεταλλικό έλασμα (C).

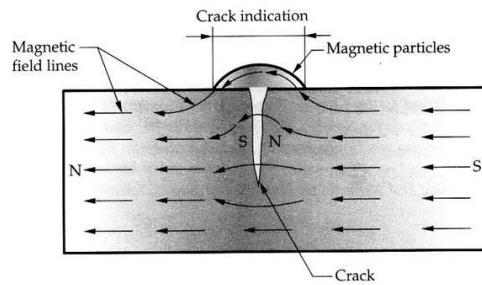
- Μέθοδοι μαγνητικών σωματιδίων (Magnetic particle Characterization)

Οι μαγνητικές μέθοδοι βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών (ρωγμές, επικαλύψεις, κενά, πορώδες, εγκλείσματα) του υλικού κάποιες από τις οποίες είναι ο Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια (Magnetic Particles), η Μαγνητογραφία (Magnetography), ο Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage – MFL)

² <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/308MethYgrwn.html>.

³ <https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php>

και ο Έλεγχος Θορύβου (Barkhausen Noise). Κάποια πλεονεκτήματα τους είναι η απλότητα τους στη χρήση, το χαμηλό κόστος και ανιχνεύει επιφανειακές και μη επιφανειακές ατέλειες. Μειονεκτήματα είναι ότι είναι εφαρμόσιμες μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας, συχνά παρατηρούνται άσχετες ενδείξεις και εξαρτώνται από τον χειριστή.

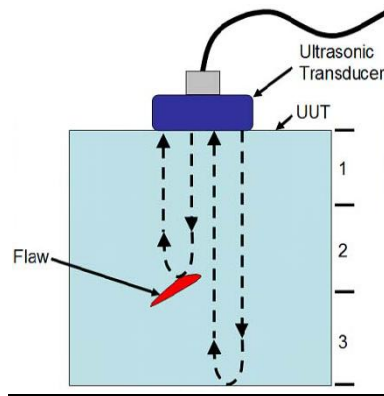


Σχήμα 6⁴ Αναπαράσταση εφαρμογής μαγνητικού πεδίου σε υλικό με ρωγμή.

- Μέθοδος των υπερήχων (Ultrasonic inspection) ή κρουστικών κυμάτων

Η τεχνική αυτή στηρίζεται στη διάδοση ακουστικών κυμάτων υπερηχητικών συχνοτήτων (>20 kHz) εντός υλικών, γνωστής ακουστικής εμπέδησης. Επιτρέπει τον ταχύ και αξιόπιστο εντοπισμό εσωτερικών ατελειών, όπως πόρων και εγκλεισμάτων, καθώς και ρωγμών ή αστοχιών εσωτερικών διεπιφανειών του υλικού όταν αυτές είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης των ακουστικών κυμάτων. Εμφανίζει εξαιρετικό βάθος διείσδυσης, καλή ευαισθησία και ανάλυση και μόνιμο αρχείο αποτελεσμάτων εν τούτοις απαιτείται ακουστικό μέσο σύζευξης με το εξάρτημα, χαμηλή ταχύτητα και η ερμηνεία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη.

⁴ <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Magnetic%20Particle%20Inspection.htm>

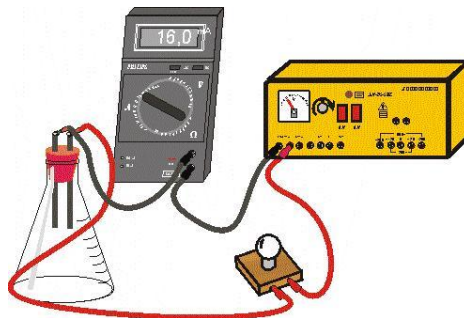


Σχήμα 7⁵ Δοκιμή υπερήχων.

- Μέθοδοι μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται ως η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα σώμα/υλικό γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων, δηλαδή σωματιδίων που έχουν τη δυνατότητα κίνησης μέσα στο υλικό. Ωστόσο, η κίνηση μέσα σε ένα υλικό είναι πιο περιορισμένη επειδή υπάρχουν εμπόδια, τα ακίνητα άτομα ή μόρια του υλικού, με τα οποία συγκρούονται οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος (φαινόμενο Τζάουλ), αυτές οι συγκρούσεις ονομάζονται σκεδάσεις. Από την άλλη μεριά η ποσότητα των ελεύθερων φορέων που προσφέρει το υλικό αυξάνει την αγωγιμότητά του. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα θα ρεύσει εντός του υλικού. Ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών μελετών έχουν χρησιμοποιήσει ηλεκτρικές μετρήσεις, ως μία από τις μη καταστροφικές μεθόδους, για τη διερεύνηση διαφόρων φαινομένων είτε σε μεταλλικά, σύνθετα αλλά και σε υλικά με βάση το τσιμέντο. Πολλές από αυτές τις μελέτες έχουν δείξει ότι οι ηλεκτρικές μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της υγρασίας μέσα στα υλικά ή την υγεία του σκυροδέματος αλλά και για τις αλλαγές της μικροδομής στην ενυδάτωση τσιμέντου.

⁵<http://hesed.info/blog/ultrasonic-sound-waves.abp>

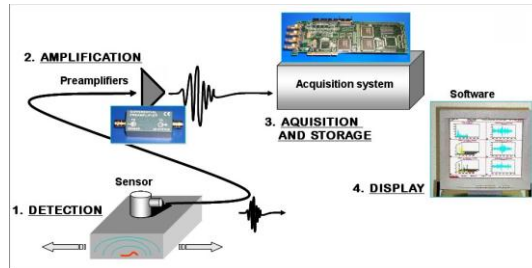


Σχήμα 8⁶ Αναπαράσταση μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

- Μέθοδος ακουστικής εκπομπής (Acoustic emission)

Τεχνική από τις πιο υποσχόμενες για έλεγχο δοκιμής ακεραιότητας υλικών και κατασκευών. Βασίζεται στην καταγραφή και μελέτη ελαστικών κυμάτων που διεγείρονται κυρίως από διάδοση βλάβης στο υλικό αλλά και από άλλες αιτίες. Τα σήματα αυτά καταγράφονται από αισθητήρες και μετατρέπονται σε ηλεκτρικές κυματομορφές που παρέχουν πληροφορία για την πηγή της βλάβης και την τοποθεσία της. Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κυρίως πρόκειται για υπερήχους με συχνότητες από 30 kHz έως 30 MHz. Το πλεονεκτήματα της είναι ότι θεωρείται εργαλείο καθολικού ελέγχου (global monitoring tool) αφού με ένα μικρό αριθμό αισθητήρων μπορεί να συλλέγεται πληροφορία από μεγάλο μέρος του όγκου της κατασκευής. Εφόσον η τεχνική χρησιμοποιείται για μη καταστροφική παρακολούθηση θραύσης, εξωτερικό φορτίο είναι απαραίτητο (μηχανικό/θερμικό) ώστε να υπάρξει κινητικότητα ρωγμών (διάδοση ή τριβή επιφανειών). Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι δεν είναι επαναλήψιμη διότι κάθε γεγονός θραύσης είναι μοναδικό και αν δεν καταγραφεί, δεν υπάρχει πιθανότητα επανάληψης της μέτρησης (σε αντίθεση με τον υπέρηχο). Τέλος μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στην αποφυγή θορύβου ειδικά σε περιπτώσεις ελέγχου στο πεδίο, όπου πολλοί αστάθμητοι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν ακουστικά σήματα που αν δεν φιλτραριστούν θα «μολύνουν» τα χρήσιμα δεδομένα (π.χ. αέρας, βροχή, ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος).

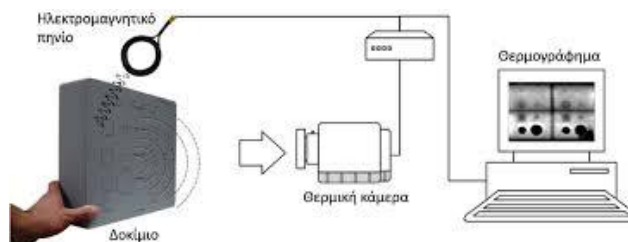
⁶<http://ekfe-a-peiraia.att.sch.gr/XimLykeiou/agogimotita.htm>



Σχήμα 9⁷ Τυπική διάταξη ακουστικής εκπομπής.

- Μέθοδος Θερμογραφίας

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε και στη παρούσα διπλωματική για την ανίχνευση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας, το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες), οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.



Σχήμα 10⁸ Τυπική διάταξη θερμογραφίας υπέρυθρου

⁷ http://www.epandt.com/us/products_ea_us.html

⁸ <http://www.repository.kallipos.gr>

1.2 Θερμογραφία

1.2.1 *Εισαγωγή στη θερμογραφία υπέρυθρου*

Η θερμογραφία υπέρυθρου ή υπέρυθρη θερμογραφία, InfraRed (IR) thermography, είναι η μέθοδος που παρατηρεί, μετράει και καταγράφει την θερμότητα και την ροής της. Όλα τα σώματα στη γη, με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν (-273 C) εκπέμπουν θερμική ενέργεια στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ποσότητα της θερμότητας που εκπέμπει ένα σώμα είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη θερμοκρασία του. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να δει με γυμνό μάτι αυτή την ακτινοβολία, αλλά με τη χρήση υπέρυθρων καμερών θερμογραφίας μπορεί να δει τη θερμότητα, να παρατηρήσει ανωμαλίες, που με τη σειρά τους θα τον οδηγήσουν να αναγνωρίσει προβλήματα.

Για να γίνει άμεσα αντιληπτή η έννοια της θερμογραφίας, μπορεί κανείς να σκεφτεί το έξης:

- Η Φωτογραφία περιγράφεται ως η «απεικόνιση του φωτός»
- Η Θερμογραφία περιγράφεται ως η «απεικόνιση της θερμότητας»

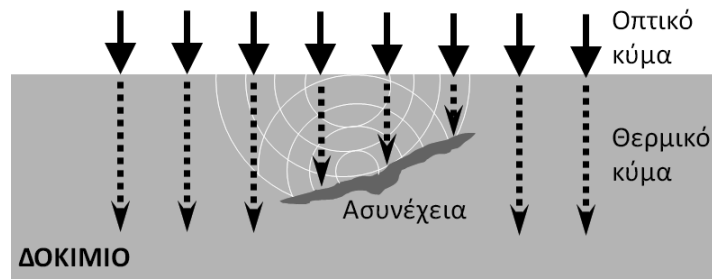


Εικόνα 2 Διαφορές φωτογραφίας και θερμογραφίας [41].

Πριν από 200 χρόνια, κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί την ύπαρξη του υπέρυθρου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ανακάλυψη έγινε συμπτωματικά το 1800 κατά τη διάρκεια έρευνας πάνω σε ένα καινούργιο οπτικό υλικό. Ο Sir Frederick William Herschel (1738–1822), Βασιλικός Αστρονόμος του Βασιλιά Γεωργίου του III της Αγγλίας και ήδη διάσημος για την ανακάλυψη του πλανήτη Ουρανού, αναζητούσε ένα υλικό οπτικού φίλτρου που θα μείωνε τη φωτεινότητα της εικόνας του ήλιου στα τηλεσκόπια κατά την παρατήρηση της ηλιακής επιφάνειας. Καθώς δοκίμαζε διάφορα δείγματα έγχρωμου γυαλιού, τα οποία

έδιναν παρόμοιες μειώσεις της φωτεινότητας, εντυπωσιάστηκε όταν ανακάλυψε ότι μερικά από τα δείγματα άφηναν να περάσει ελάχιστη από τη θερμότητα του ήλιου, ενώ άλλα άφηναν να περάσει τόσο πολλή θερμότητα που κινδύνευε το μάτι μετά από ελάχιστα λεπτά παρατήρησης. Ο Herschel οδήγησε λοιπόν το ηλιακό φως με ένα γυάλινο πρίσμα για να δημιουργήσει ένα φάσμα των ορατών χρωμάτων και στη συνέχεια μέτρησε τη θερμοκρασία του κάθε χρώματος. Όπως μετρούσε τις θερμοκρασίες για το ιώδες, μπλε, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και ερυθρό φως, διαπίστωσε ότι οι θερμοκρασίες των χρωμάτων αυξάνονταν από το ιώδες προς το ερυθρό. Μετακινώντας το θερμομέτρο στη σκοτεινή περιοχή πέρα από το ερυθρό άκρο του φάσματος, με έκπληξη διαπίστωσε ότι στην περιοχή αυτή η θερμοκρασία συνέχιζε να αυξάνει. Εντόπισε το σημείο μεγιστοποίησης της θερμοκρασίας, το οποίο βρισκόταν αρκετά πέρα από το ερυθρό άκρο του φάσματος, στην περιοχή που σήμερα είναι γνωστή ως «υπέρυθρα μήκη κύματος». Ο Herschel ονόμασε το νέο αυτό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος «θερμομετρικό φάσμα» και την ακτινοβολία «σκοτεινή θερμότητα» ή «αόρατες ακτίνες» γιατί δεν φαινόταν με γυμνό μάτι. Η επινόηση του όρου «υπέρυθρες» δεν αποδίδεται στον Herschel. Ο όρος αυτός άρχισε να εμφανίζεται σε έντυπες εκδόσεις σχεδόν 75 χρόνια αργότερα και εξακολουθεί ακόμη και σήμερα να αγνοείται το όνομα εκείνου που τον καθιέρωσε [41].

Η θερμογραφία υπέρυθρου βασίζεται στην αρχή ότι οι υποεπιφανειακές ασυνέχειες σε ένα υλικό οδηγούν στη δημιουργία τοπικών διαφορών στην επιφανειακή θερμοκρασία του δοκιμίου. Κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένα άκρα βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10 μm (στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος) [40].



Σχήμα 11 Αρχή της θερμογραφίας [34].

Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.

Με την θερμογραφία εντοπίζουμε:

- θερμικές γέφυρες στο κέλυφος του κτηρίου
- σημεία διαφυγής θερμού αέρα από το κτήριο
- αγωγούς θερμού κρύου νερού ή αέρα μέσα στην κατασκευή ενός κτηρίου
- διαφορετικά υλικά μέσα σε μία κατασκευή
- ύπαρξη νερού μέσα στα υλικά και
- υποεπιφανειακές ανωμαλίες στα υλικά.

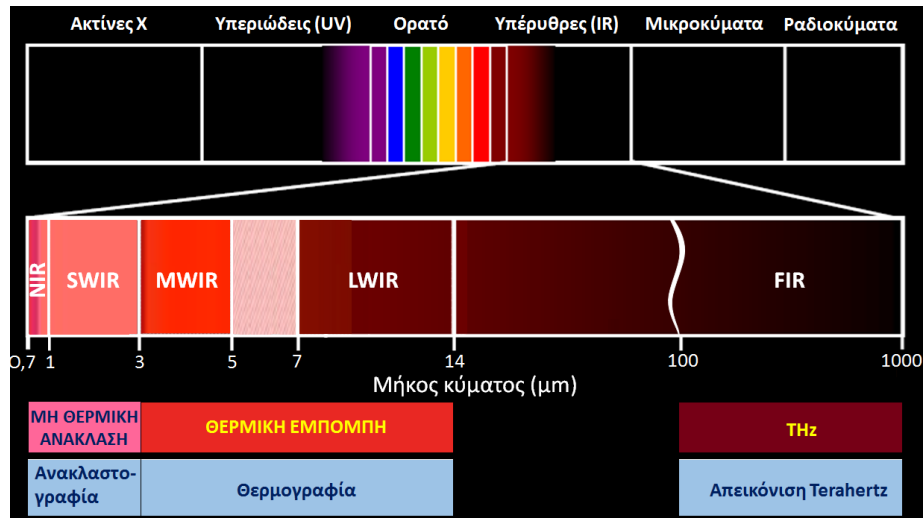
Οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν την υπέρυθη ακτινοβολία που μετράται κατά την θερμογράφιση είναι:

- η ικανότητα εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας της επιφάνειας (εκφράζεται από τον συντελεστή εκπομπής και συγκρίνεται με εκείνη του μέλαν σώματος)
- η επιφανειακή θερμοκρασία
- η θερμική αγωγιμότητα
- η θερμοχωρητικότητα
- το πάχος του θερμαινόμενου στρώματος και
- η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [42].

1.2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει όλες τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες: τις ακτίνες γ, τις ακτίνες χ, την υπεριώδη ακτινοβολία, την λεπτή περιοχή του ορατού φωτός, την υπέρυθη ακτινοβολία, τα κύματα terahertz και τα

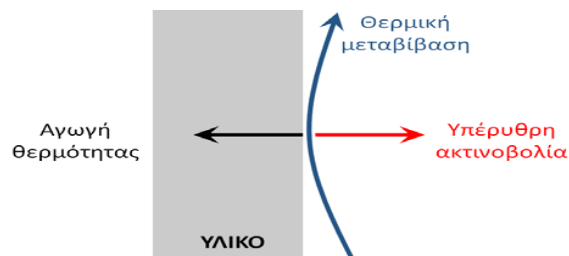
μικροκύματα. Οι περιοχές αυτές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σχετίζονται και διαφοροποιούνται μεταξύ τους, βάσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

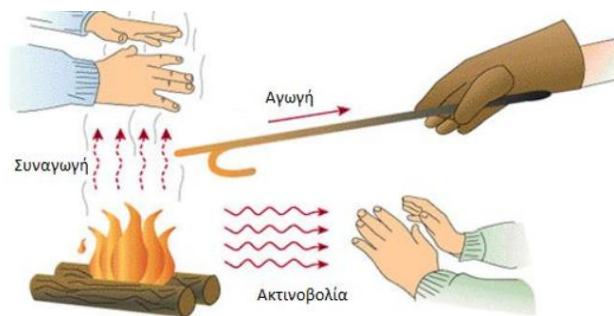


Εικόνα 3 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [34].

1.2.3 Μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας

Για την κατανόηση της θερμογραφίας είναι σημαντική η γνώση των μηχανισμών διάδοσης της θερμότητας. Η θερμότητα μπορεί να διαδοθεί από ένα θερμό σε ένα ψυχρό σώμα με αγωγή (conduction), με θερμική μεταβίβαση (convection), ή με ακτινοβολία (radiation). Στο Σχήμα 13 παρουσιάζονται οι τρεις τρόποι διάδοσης της θερμότητας για ένα υλικό [43].





Σχήμα 12 Απεικόνιση των τριών μηχανισμών μετάδοσης της θερμότητας [44].

1.2.3.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή μέσω της μάζας των σωμάτων. Η δυσκολία μεταφοράς της θερμότητας μέσω ενός σώματος εξαρτάται από την αγωγιμότητά του. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας ενός υλικού μέσω της μάζας του. Καλοί αγωγοί της θερμότητας είναι για παράδειγμα τα μέταλλα, ενώ τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας είναι, αντίθετα, κακοί αγωγοί της θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή έχει ως συνέπεια την απώλεια θερμότητας από ένα δοκίμιο. Η ποσότητα της θερμότητας, Q , που μεταφέρεται με αγωγή ακολουθεί το νόμο του Fourier:

$$Q = (k/d) [F (t_1 - t_2) a]$$

όπου:

k = θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του υλικού

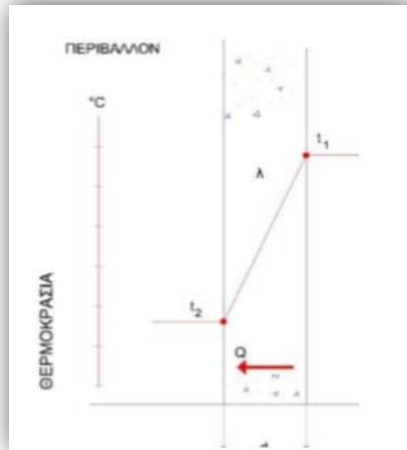
F = εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου

t_1 = θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου

t_2 = θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου

d = πάχος του υλικού

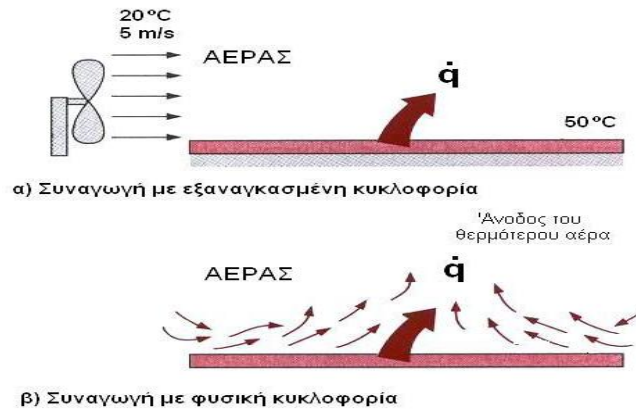
a = χρόνος ροής της θερμότητας [34].



Σχήμα 13 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή [44].

1.2.3.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (ή θερμική μεταβίβαση)

Η θερμότητα σε ένα ρευστό μεταφέρεται μέσω της μάζας του, με την κίνηση της. Αν η κίνηση γίνεται σε μέσο, όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές (ο κρύος αέρας κινείται προς τα κάτω, ενώ ο ζεστός αέρας κινείται προς τα πάνω) ονομάζουμε την κίνηση αυτή φυσική διάχυση, όταν όμως η κίνηση γίνεται βεβιασμένα (π.χ. με χρήση ανεμιστήρων, κλπ.) την ονομάζουμε βίαιη διάχυση. Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση είναι ένα μακροσκοπικό φαινόμενο και παρατηρείται κατά την διάχυση των ρευστών. Η διαφορά πυκνοτήτων διαφόρων ρευστών προκαλεί φυσική διάχυση. Αντίστοιχα, η μηχανική ανάμειξη προκαλεί βεβιασμένη διάχυση. Μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση παρατηρείται και μεταξύ ρευστού και στερεού σώματος [34].



Σχήμα 14 Μεταφορά θερμότητας από μία θερμή επιφάνεια προς το περιβάλλον ρευστό με συναγωγή [45].

1.2.3.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία, τον συντελεστή εκπομπής κ.ά. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Βασίζεται στην ικανότητα αρκετών σωμάτων να απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που δέχονται και να την επανεκπέμπουν. Σε αντίθεση με τους προαναφερθέντες τρόπους μετάδοσης θερμότητας με αγωγή και συναγωγή, στην ακτινοβολία δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού μέσου για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση θερμότητας η οποία ενισχύεται στο κενό. Το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας κυμαίνεται από 0.1 μέχρι 100 μm. Όταν προσπέσει σε ένα σώμα θα ανακλαστεί ή θα απορροφηθεί ή θα μεταφερθεί. Η ποσότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας W που εκπέμπεται από ένα σώμα όταν σε αυτό προσπέσει ακτινοβολία ακολουθεί το νόμο Stefan-Boltzmann[45]:

$$W(T) = \epsilon \sigma T^4$$

όπου:

W = εκπεμπόμενη ενέργεια [W/m^2]

ϵ = συντελεστής εκπομπής ή εκπεμπτικότητα (emissivity) του υλικού

[αδιάστατο]

σ = σταθερά Stefan – Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$]

T = απόλυτη θερμοκρασία [K]

1.2.4 *Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία*

Οι μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας εξαρτώνται από κάποια χαρακτηριστικά του υλικού, όπως:

- Ειδική θερμότητα, c (ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από την μάζα του υλικού για δεδομένο εύρος θερμοκρασίας).
- Πυκνότητα, ρ (μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου).
- Θερμική αγωγιμότητα, k (ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται σε δεδομένη κατεύθυνση όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στο υλικό σε εκείνη την κατεύθυνση).
- Θερμική διάχυση, α (ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας στο περιβάλλον υλικό).
- Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h (μέτρο της αποτελεσματικότητας ανταλλαγής της θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και μιας ροής υγρού ή αερίου).
- Θερμοκρασία, T (μέτρο της θερμικής ενέργειας που εμπεριέχεται σε ένα αντικείμενο).
- Συντελεστής εκπομπής, ε (δείχνει την αποδοτικότητα μιας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Η θερμογραφία εξαρτάται από τις διαφορές των υλικών στα χαρακτηριστικά αυτά, για να ορίσει ένα μετρήσιμο, και συνήθως εντοπισμένο, διαφορικό θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, όταν θερμαίνεται ή ψύχεται ένα δοκίμιο που η πυκνότητα του δεν είναι ίδια παντού, τότε η αλλαγή στη θερμοκρασία θα παρατηρηθεί πιο αργά στις περιοχές εκείνες με υψηλότερη πυκνότητα. Αυτή η διαφορά στον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας μπορεί να μετρηθεί και να αξιολογηθεί με τη θερμογραφία [34].

1.2.4.1 *Συντελεστής εκπομπής*

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη διάδοση της θερμότητας, και είναι ένα χαρακτηριστικό των υλικών, είναι ο συντελεστής εκπομπής, ε , του

δοκιμίου. Ο συντελεστής εκπομπής δείχνει την αποδοτικότητα μιας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα όταν σε αυτό προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

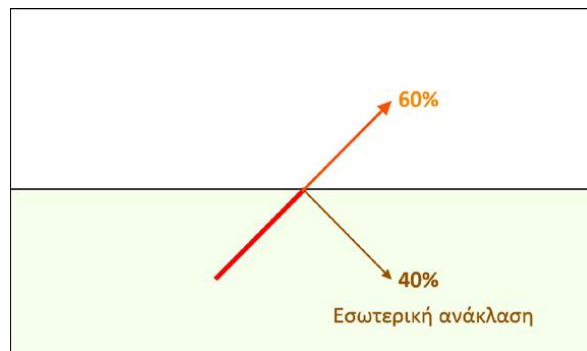
Το μέλαν σώμα ως το πιο αποδοτικό θερμαντικό σώμα έχει συντελεστή εκπομπής ίσο με τη μονάδα, ενώ όλα τα υπόλοιπα έχουν μικρότερο από 1.0. Ενδεικτικά παραδείγματα του συντελεστή εκπομπής κάποιων γνωστών υλικών φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Τιμές συντελεστή εκπομπής ϵ [45].

Υλικά	Συντελεστής εκπομπής ϵ
Αλουμίνιο	0.05
Χαλκός	0.03
Σίδηρος	0.81
Χάλυβας (λείανση)	0.07
Χάλυβας (οξειδωμένος)	0.79
Σκυρόδεμα	0.92
Πλεξιγκλάς	0.75
Γυαλί	0.92
Πάγος	0.97
P.V.C.	0.93
Ανθρώπινο δέρμα	0.98

Στα μη αγωγή υλικά (όπως πλαστικό, ξύλο κ.λπ.) ο συντελεστής εκπομπής (ϵ) είναι μεγαλύτερος από 0.6 ενώ στα αγωγή υλικά αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε ματ επιφάνειες το ϵ πλησιάζει σε τιμές κοντά στη μονάδα. Αντίθετα, σε λείες και καθαρές μεταλλικές επιφάνειες το ϵ είναι πολύ μικρό, ενώ αλλάζει με την αλλαγή της φυσικής κατάστασης ή χημικής σύστασης της επιφάνειας (οξειδωμένη μεταλλική επιφάνεια). Εκτός από το υλικό, ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται και από τη γωνία, που παρατηρείται το υπό εξέταση σώμα, το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία. Έτσι, σε κάθε μέτρηση, για τη σωστή και ακριβή απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας στο θερμογράφημα, πρέπει να επιλέγεται και η σωστή τιμή του ϵ για κάθε περίπτωση.

Το Σχήμα 16 δείχνει το λόγο για τον οποίο τα αντικείμενα δεν εκπέμπουν τέλεια την υπέρυθη ακτινοβολία. Καθώς η ενέργεια μετακινείται από το εσωτερικό του υλικού προς την επιφάνεια, μια ποσότητα ενέργειας ανακλάται και πάλι στο εσωτερικό και έτσι δεν διαφεύγει ποτέ, κατά τρόπο σχετικό και μόνο το 60% της ενέργειας εκπέμπεται πραγματικά [34].

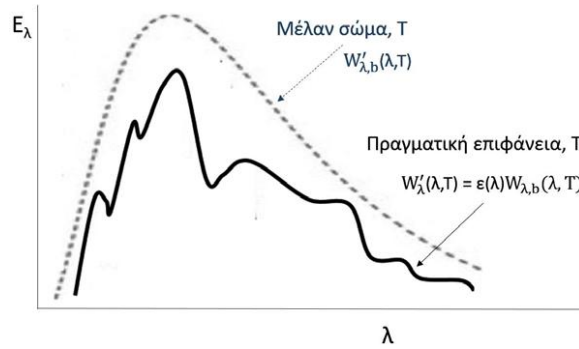


Σχήμα 15 Η υπέρυθρη ενέργεια που ακτινοβολείται από την επιφάνεια ενός αντικειμένου [34].

Ο συντελεστής εκπομπής (ή εκπεμπτικότητα) ενός αντικειμένου είναι ο λόγος της ενέργειας που ακτινοβολείται ως προς την ενέργεια που το αντικείμενο θα ακτινοβολούσε εάν ήταν μέλαν σώμα. Το μέλαν σώμα είναι ιδανικό αντικείμενο που ακτινοβολεί το μέγιστο της δυνατής ενέργειας για δεδομένη θερμοκρασία. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν επιφάνειες που ακτινοβολούν λιγότερη ενέργεια από αυτή του μέλανος σώματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 ο συντελεστής εκπομπής ϵ μιας πραγματικής επιφάνειας είναι διαφορετικός από αυτόν του μέλανος σώματος. Ο φασματικός συντελεστής εκπομπής μιας επιφάνειας σε θερμοκρασία T , με εκπομπή μήκους κύματος λ , στην κατεύθυνση (θ', φ') , ορίζεται συναρτήσει της φασματικής ενέργειας εκπομπής W_λ , ως:

$$\epsilon(\lambda, T, \theta', \varphi') = \frac{W'_\lambda(\lambda, T, \theta', \varphi')}{W'_\lambda, b(\lambda, T)}$$

Για τα μέταλλα, ο συντελεστής εκπομπής αυξάνει με τη θερμοκρασία και παραμένει σταθερός πάνω από μια τιμή θ , ενώ για τα μη μεταλλικά υλικά αυτό δεν ισχύει.



Σχήμα 16 Διάγραμμα ακτινοβολίας μέλανος σώματος και πραγματικής επιφάνειας [34].

Η τιμή του συντελεστή εκπομπής ϵ για τα υλικά ποικίλει και εξαρτάται από διάφορους παραμέτρους κάποιιοι από τους οποίους παρουσιάζονται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 17 Παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή εκπομπής.

1.2.4.2 Επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τον συντελεστή εκπομπής

Όπως προαναφέρθηκε ο συντελεστής εκπομπής ϵ στους μη καταστροφικούς ελέγχους και συγκεκριμένα στη θερμογραφία, παίζει σημαντικό παράγοντα ως προς τη χρήση τους. Είναι δύσκολο να μετρηθεί η ακτινοβολία που εκπέμπεται από υλικά

με συντελεστή εκπομπής κατά 20% μικρότερο αυτού του μέλανος σώματος. Λειασμένες μεταλλικές επιφάνειες, ύπαρξη λιπαντικών κηλίδων είναι παράγοντες που το υλικό παρουσιάζει μικρό συντελεστή εκπομπής σε σχέση με το μέλαν σώμα κατά 5 έως 10%. Εξαιτίας των παραπάνω, οι υπέρυθρες εικόνες είναι ασαφείς και συχνά εμφανίζονται θερμά σημεία που δίνουν εσφαλμένα αποτελέσματα για παρουσία ατελειών σε ένα δοκίμιο. Ακόμη ο συντελεστής εκπομπής ποικίλει ανάλογα και με την γωνία πρόσπτωσης δηλαδή για ομαλές μεταλλικές επιφάνειες ο συντελεστής εκπομπής τείνει να είναι μικρότερος για κανονική πρόσπτωση από ότι στην μηδενική πρόσπτωση.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων που προκαλούνται από τον συντελεστή εκπομπής είναι οι εξής:

- Καθαρισμός επιφάνειας: Για να αποφευχθεί η μείωση του συντελεστή εκπομπής από λιπαντικές κηλίδες ή από κατεστραμμένες επιστρώσεις απαιτείται ο καθαρισμός της επιφάνειας των δοκιμίων.
- Μαύρη βαφή: Μια κοινή προσέγγιση για την επίλυση των προβλημάτων του συντελεστή εκπομπής είναι η κάλυψη μεταλλικών επιφανειών πριν τη λήψη αποτελεσμάτων με χρώμα υψηλού συντελεστή εκπομπής. Τέτοιο χρώμα είναι το μαύρο με υψηλό ϵ (από 0,9 έως 0,98) το οποίο έχει πολύ χαμηλή ανάκλαση [34].

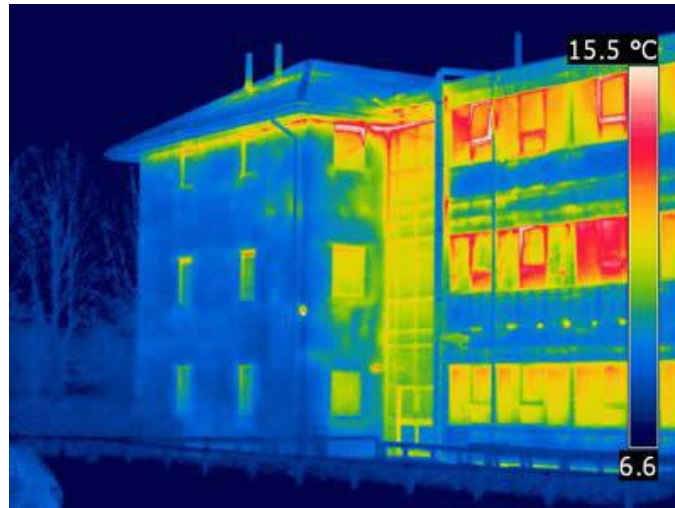
1.2.5 Τεχνικές θερμογραφίας

Η θερμογραφία υπέρυθρου χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών και κατασκευών. Το κύριο πλεονέκτημα της θερμογραφίας έναντι των κλασικών μεθόδων μη καταστροφικών δοκιμών έγκειται στη δυνατότητα επιθεώρησης μεγάλων επιφανειών με γρήγορο και ασφαλή τρόπο, χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει πρόσβαση και στις δύο πλευρές του υπό έλεγχο αντικειμένου. Ωστόσο, η θερμογραφία υπέρυθρου περιορίζεται στον εντοπισμό σχετικά ρηχών ατελειών (σε βάθος μερικών χιλιοστών κάτω από την επιφάνεια) επειδή επηρεάζεται από τη διάχυση της θερμότητας στον όγκο του υλικού.

Η θερμογραφία υπέρυθρου μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική. Αυτοί οι δυο τύποι θερμογραφικού ελέγχου χρησιμοποιούνται ανάλογα με το εάν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται ή όχι σε θερμική ισορροπία [34].

1.2.5.1 Παθητική Θερμογραφία

Κατά την παθητική θερμογραφία (passive thermography) καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθη ακτινοβολία χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας. Η τεχνική απαιτεί αρκετή θερμική αντίθεση ανάμεσα στο υπό έλεγχο αντικείμενο και στο περιβάλλον, ώστε να είναι ανιχνεύσιμη από ένα αισθητήρα υπέρυθρων. Με την παθητική θερμογραφία απεικονίζεται λοιπόν η θερμοκρασία της υπό έλεγχο κατασκευής όταν αυτή βρίσκεται, με φυσικό τρόπο, σε μια διαφορετική θερμοκρασία από εκείνη του περιβάλλοντος. Η παθητική θερμογραφία εφαρμόζεται κυρίως σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες, όπου η θερμοκρασία αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της σωστής λειτουργίας. Οι σημαντικές εφαρμογές της παθητικής θερμογραφίας περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: κάμερες επιτήρησης, προληπτική συντήρηση αεροσκαφών, ανίχνευση πυρκαγιών, ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων, έλεγχο θερμομόνωσης κατασκευών, έλεγχο ηλεκτρικών εξαρτημάτων, κλπ. Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές οι ασυνήθιστες, μη-φυσιολογικές θερμοκρασιακές διαφορές αποτελούν ένδειξη ύπαρξης κάποιου προβλήματος που πρέπει να προσεχθεί. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της παθητικής θερμογραφίας είναι η ανίχνευση παρουσίας υγρασίας σε μέρη του αεροσκάφους αμέσως μετά την προσγείωση, καθόσον η σημαντική θερμική διαφορά ανάμεσα στο υλικό και το νερό επιτρέπει την ανίχνευση της βλάβης. Παρόμοια, ανιχνεύεται και η παρουσία υγρασίας σε κτίρια και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς [34].



Εικόνα 4 Παθητική θερμογράφιση ενός κτηρίου.

1.2.5.2 Ενεργητική Θερμογραφία

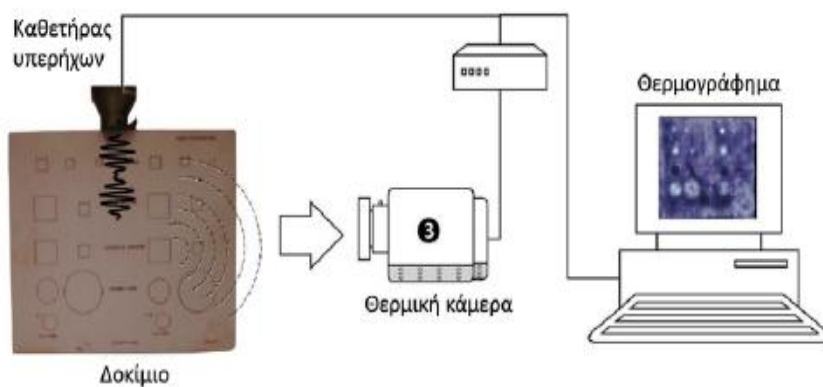
Η ενεργητική θερμογραφία (active thermography) είναι η τεχνική θερμογραφίας που βασίζεται στην ύπαρξη εξωτερικής πηγής ενέργειας ώστε να προκύψουν και να μετρηθούν οι σχετικές θερμικές διακυμάνσεις. Έτσι λοιπόν απαιτείται η δημιουργία θερμικής αντίθεσης με την χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας, όταν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Αυτή η εξωτερική πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται ανάλογα με την εφαρμογή, για να ενεργοποιήσει το υπό έλεγχο αντικείμενο με οπτικά, μηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά κλπ ερεθίσματα. Ως οπτική διέγερση μπορούν να θεωρηθούν οι λαμπτήρες αλογόνου όπου δημιουργούν θερμότητα στην επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται ως θερμικό κύμα μέσω του δοκιμίου στις υποεπιφανειακές ανωμαλίες, και τέλος επιστρέφει πάλι στην επιφάνεια, όπου ανιχνεύεται από τη θερμική κάμερα. Μηχανική διέγερση μπορεί να θεωρηθεί ένας εσωτερικός τρόπος διέγερσης, καθώς η θερμότητα παράγεται στη διεπιφάνεια μεταξύ ατέλειας και υλικού και στη συνέχεια διαδίδεται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Κατά την ηλεκτρομαγνητική διέγερση, δημιουργούνται δινορεύματα σε αγώγιμο δοκίμιο με τη βοήθεια εξωτερικού πηνίου, τα οποία στη συνέχεια παράγουν εσωτερική θερμότητα στο υλικό.

Ανάλογα λοιπόν με το ερέθισμα που προκαλεί αυτές τις θερμικές αντιθέσεις προκύπτουν τα παρακάτω είδη θερμογραφίας: α) Θερμογραφία με δονήσεις (Vibration Thermography -VT), β) Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (Step

Heating -SH) , γ) Θερμογραφία με παλμό (Pulsed Thermography -PT), δ) Θερμογραφία φάσης παλμού (PPT), ε) Θερμογραφία Lock-in (Lock-in Thermography -LT).

1.2.5.1 Θερμογραφία με δονήσεις (VT)

Η θερμογραφία με δονήσεις είναι μία τεχνική που βασίζεται στο γεγονός ότι προκαλούνται εξωτερικές μηχανικές δονήσεις ή διέγερση με υπερήχους (γι' αυτό και ονομάζεται επίσης θερμογραφία υπερήχων). Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται άμεσα σε θερμική με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται θερμότητα λόγω τριβής ακριβώς στις θέσεις όπου εμφανίζονται ατέλειες όπως ρωγμές και αποκολλήσεις στρωμάτων. Η θερμογραφία με δονήσεις μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση ατελειών, δύσκολα ανιχνεύσιμες από τις άλλες μεθόδους θερμογραφίας, όπως «κλειστές» ρωγμές (closed cracks) σε γρανάζια και για τον έλεγχο μεγάλων επιφανειών στο πεδίο. Το σημαντικότερο όμως πρόβλημα είναι ότι πολλές φορές οι μηχανικές δονήσεις ως θερμική διέγερση είναι δύσκολο να επιτευχθούν [34,45,46].



Σχήμα 18 Πειραματική διάταξη θερμογραφίας με δονήσεις [34].

1.2.5.2 Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (SH)

Η θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση (ή κλιμακωτή θέρμανση) δεν διαφέρει ιδιαίτερα από τη θερμογραφία με παλμούς. Το μέσο διέγερσης είναι πάλι θερμικοί παλμοί (συνήθως οπτική διέγερση) και χρησιμοποιεί μεγαλύτερους παλμούς διάρκειας από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά, αλλά εδώ καταγράφεται η

αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου καθώς πραγματοποιείται βαθμιαία θέρμανση με παλμούς.

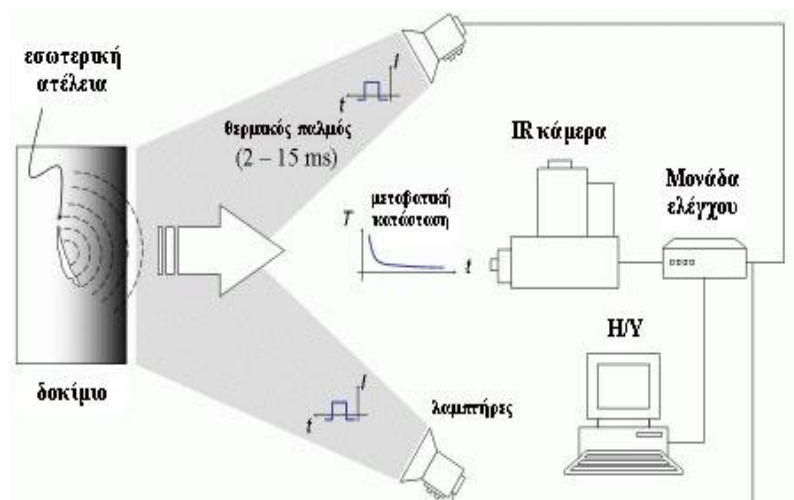
Η SH θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του πάχους επικαλύψεων, την αποτίμηση της ακεραιότητας της διεπιφάνειας επικάλυψης/υποστρώματος το χαρακτηρισμό της διάβρωσης σε αεροναυπηγικές δομές κ.ά [48-49].

1.2.5.3 Θερμογραφία με παλμό (PT)

Η θερμογραφία με παλμό είναι μια από τις πιο κοινές μεθόδους θερμογραφίας. Ένας λόγος είναι ότι αποτελεί μια μη χρονοβόρα διαδικασία, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένας μικρός θερμικός παλμός που διαρκεί από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου, για υψηλής αγωγιμότητας υλικά (όπως τα μέταλλα), έως λίγα δευτερόλεπτα για υλικά με μικρή αγωγιμότητα (όπως τα πλαστικά,) [17].

Στη θερμογραφία παλμού, ένας παλμός ενέργειας εφαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου δημιουργώντας ένα θερμικό μέτωπο το οποίο διαδίδεται στο εσωτερικό του υλικού με διάχυση, σύμφωνα με την εξίσωση του Fourier. Ο παλμός αυτός μπορεί να δημιουργηθεί από λαμπτήρες αλογόνου, δέσμη λέιζερ, αέρα ή δέσμη νερού. Η θερμική διέγερση μπορεί να είναι θερμή ή ψυχρή, διότι αυτό που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στη θερμογραφία παλμού είναι η θερμοκρασιακή διαφορά που προκύπτει και όχι η απόλυτη θερμοκρασία. Η διάρκεια του παλμού ποικίλει από μερικά msec για υλικά μικρού πάχους και θερμικά αγωγίμα υλικά (π.χ. μέταλλα) έως λίγα δευτερόλεπτα για υλικά μεγάλου πάχους και υλικά με μικρή θερμική αγωγιμότητα (π.χ. πλαστικά). Η συμπεριφορά του δοκιμίου αναλύεται είτε κατά τη διάρκεια της θέρμανσης (δηλ. κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του) είτε κατά τη διάρκεια της αποθέρμανσης (δηλ. κατά τη μείωση της θερμοκρασίας του). Η θερμογραφία παλμού μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους: Πρώτον, η πηγή θερμικής διέγερσης και η υπέρυθη κάμερα είναι τοποθετημένα μπροστά από το δοκίμιο και η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη θερμότητα που ανακλάται (reflection) . Δεύτερον, η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη μετάδοση (transmission) της θερμότητας μέσω του δοκιμίου, καθώς η πηγή διέγερσης και η κάμερα είναι τοποθετημένες εκατέρωθεν του δοκιμίου. Κατά τη θερμογραφία παλμού είναι δυνατή η ποσοτική

ανάλυση των αποτελεσμάτων, η οποία βασίζεται στη θερμική αντίθεση (thermal contrast) των θερμογραφημάτων [34,46].



Σχήμα 19. Θερμογραφία με παλμό (PT) [32].

1.2.5.4 Θερμογραφία φάσης παλμού (PPT)

Η θερμογραφία φάσης παλμού είναι η τεχνική που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της θερμογραφίας φάσης αλλά και της lock-in. Κατά την PPT το υπό-εξέταση δοκίμιο διεγείρεται θερμικά με έναν τετραγωνικό παλμό όπως και στην PT. Όταν ένα δοκίμιο θερμαίνεται με παλμούς τότε θερμικά κύματα διαφόρων συχνοτήτων και εύρους διαδίδονται στο εσωτερικό του. Ο διαχωρισμός αυτών των συχνοτήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με το μονοδιάστατο μετασχηματισμό Fourier (ο οποίος παρατίθεται παρακάτω) για κάθε εικονοστοιχείο (pixel x,y) των θερμογραφημάτων κατά την αποθέρμανση του υλικού.

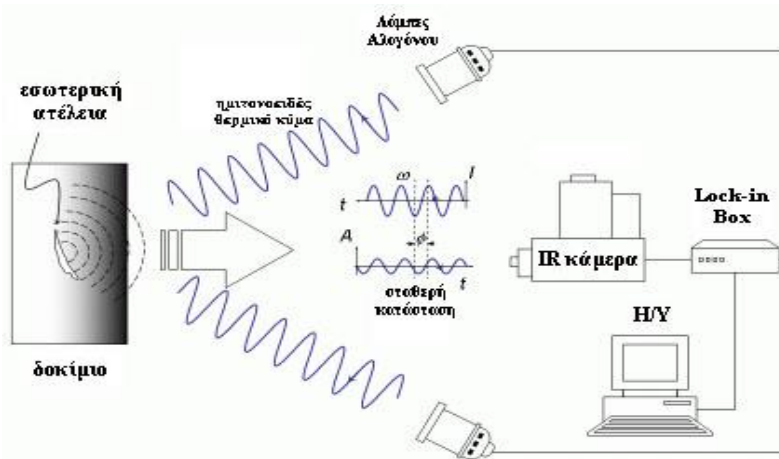
$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{2\pi i k n / N} = Re_n + i Im_n \quad [30]$$

Όπου i είναι ο φανταστικός αριθμός, Re και Im είναι αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μετασχηματισμού και ο δείκτης n συμβολίζει την αύξηση της συχνότητας. Η ανάλυση μέσω μετασχηματισμών Fourier παρέχει αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με αυτά της PT, με αποτέλεσμα την ανίχνευση διαφόρων ειδών υπό-επιφανειακών ατελειών. Το

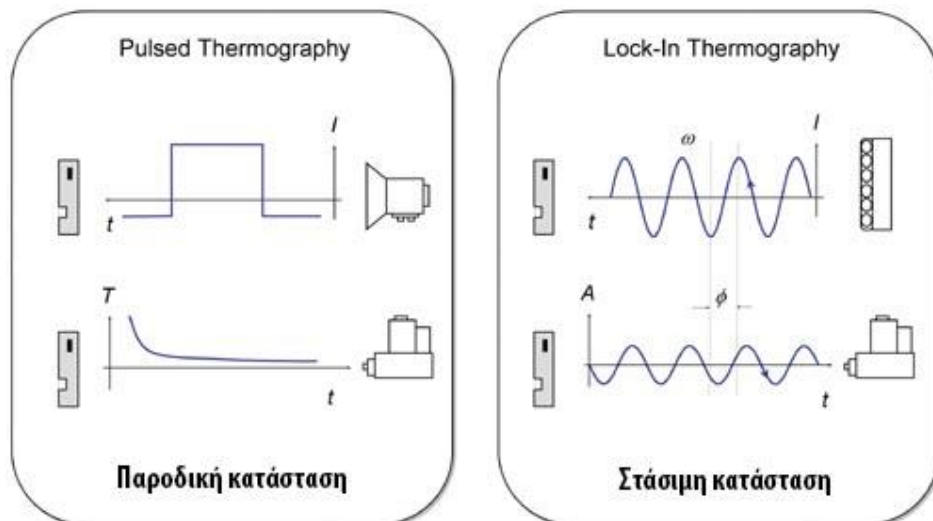
μεγαλύτερο πλεονέκτημα της θερμογραφίας φάσης παλμού είναι ότι προκύπτουν θερμογραφήματα «φάσης». Τα θερμογραφήματα φάσης επηρεάζονται ελάχιστα από τη μη ομοιόμορφη θέρμανση διότι όλες οι πληροφορίες σχετικά με το εύρος του θερμικού παλμού εμπεριέχονται στο εύρος που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Fourier. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση είναι το βασικό πρόβλημα της θερμογραφίας «φάσης» [47].

1.2.5.5 Θερμογραφία Lock-in (LT)

Η θερμογραφία lock-in, η οποία είναι επίσης γνωστή ως διαμορφωμένη ή συγχρονισμένη θερμογραφία (modulated thermography), βασίζεται στην δημιουργία θερμικών κυμάτων που παράγονται από μια περιοδική (συνήθως ημιτονοειδή) θερμική διέγερση.

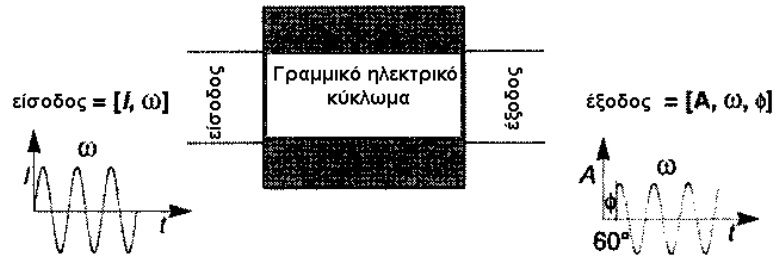


Σχήμα 20 Θερμογραφία Lock – in (LT) [32].



Σχήμα 21 Θερμογραφία παλμού και Lock-in [32]

Στην περίπτωση ημιτονοειδούς θερμικής διέγερσης, ιδιαίτερα εξασθενημένα κύματα και κύματα διασποράς βρίσκονται στο εσωτερικό αλλά και στην επιφάνεια ενός υλικού. Τα κύματα αυτά είναι γνωστά ως θερμικά κύματα. Το ενδιαφέρον είναι πως αυτά τα κύματα μπορούν να παραχθούν (π.χ. με περιοδική εναπόθεση θερμότητας στην επιφάνεια του δείγματος με την βοήθεια λαμπτήρα) και να ανιχνευθούν «από απόσταση» με τη βοήθεια θερμικής κάμερας. Η ορολογία Lock-in αναφέρεται στην ανάγκη να ελεγχθεί η ακριβής χρονική εξάρτηση μεταξύ του σήματος εξόδου και του σήματος εισόδου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με έναν ενισχυτή Lock-in ώστε να προκύψουν εικόνες «φάσης» και «μεγέθους» (“phase”, magnitude”). Οι εικόνες «φάσης» συσχετίζονται με το χρόνο διάδοσης των θερμικών κυμάτων και δεδομένου ότι δεν επηρεάζονται από τοπικά εξωτερικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του δοκιμίου, μπορούν να αξιοποιηθούν για μη καταστροφικό έλεγχο. Το εύρος του βάθους σε μια εικόνα «φάσης» είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας της θερμικής διέγερσης, οπότε οι υψηλότερες συχνότητες περιορίζουν την ανάλυση σε μια περιοχή κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Για να κατανοηθεί η έννοια της lock-in θερμογραφίας, αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα για το οποίο μια μόνιμη κατάσταση με ημιτονοειδής είσοδο με γωνιακή συχνότητα ω και μέτρο E_1 , παρατηρείται έξοδος E_0 με ίδια ημιτονοειδή συχνότητα ω αλλά με μέγεθος A και φάση ϕ .



Σχήμα 22 Η έννοια του lock-in κατά αναλογία με ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα [45].

Στην περίπτωση των Μη Καταστροφικών Ελέγχων η παραπάνω έννοια εφαρμόζεται ως εξής, με το δοκίμιο να αντικαθιστά το γραμμικό κύκλωμα. Θερμότητα με μέγεθος Q εναποτίθεται στην επιφάνεια του δοκιμίου με γωνιακή συχνότητα ω . Αυτή η θερμότητα δημιουργεί θερμικό κύμα το οποίο προωθείται μέσα στο δοκίμιο και ανακλάται όπου υπάρχει ατέλεια, πίσω στην επιφάνεια και ταυτόχρονα μια υπέρυθη κάμερα καταγράφει αυτή την εκδήλωση. Οι παράμετροι των σημάτων εισόδου και εξόδου είναι:

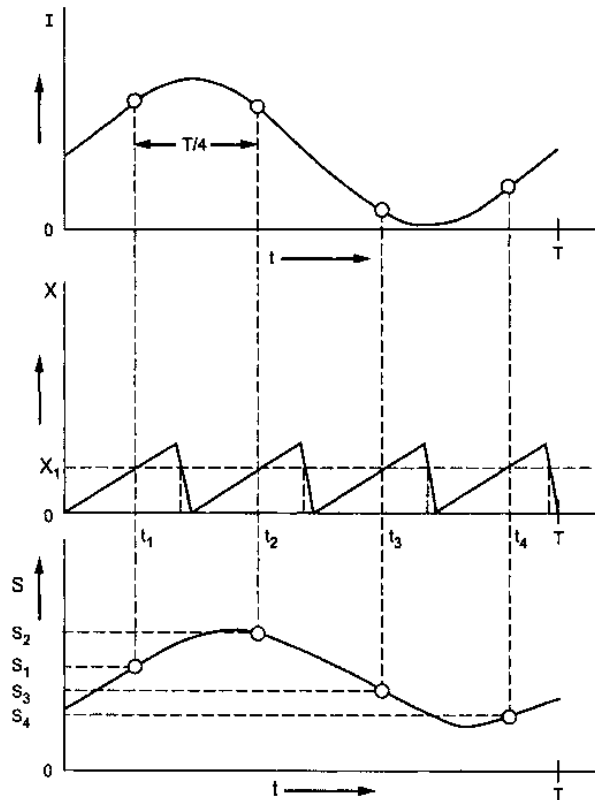
$$\text{Είσοδος} = \{Q, \omega\} \text{ και } \text{Έξοδος} = \{A, \phi, \omega\}$$

Η Lock-in θερμογραφία ορισμένες φορές ονομάζεται και φωτοθερμική ραδιομετρία, η οποία βασίζεται στη δημιουργία θερμικών κυμάτων μέσα στο δοκίμιο, για παράδειγμα, από εναπόθεση θερμότητας περιοδικά στην επιφάνεια του δοκιμίου και η διαφορά θερμοκρασίας ανιχνεύεται και καταγράφεται από μια θερμική κάμερα. Συγκεκριμένα η μέτρηση της θερμοκρασίας πάνω στο δοκίμιο επιτρέπει να ανακατασκευαστεί το θερμικό κύμα και να καθιερωθούν οι τιμές A και ϕ για τέσσερα ισαπέχοντα σημεία θερμοκρασίας S_1, S_2, S_3 και S_4 (Σχήμα 23) που καταγράφηκαν στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου (1 περίοδος ημιτονοειδούς καμπύλης).

$$\varphi = \alpha \tan \frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}$$

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

και



Σχήμα 23 Αρχή του υπολογισμού των εικόνων "φάσης", "εύρους", και "θερμοκρασίας"[46].

Τέσσερα σημεία, συνήθως, επιτρέπουν τον υπολογισμό του A και φ , ενώ περισσότερα σημεία επιτρέπουν και την αποφυγή «θορύβου» που προκύπτει από τη διαδικασία. Η μέθοδος lock-in παρέχει τρεις εικόνες: φάση φ , μέγεθος A και συμβατική θερμογραφία T . Μια εικόνα θερμογραφίας είναι η χαρτογράφηση της εκπεμπόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η εικόνα «φάσης» έχει σχέση με το χρόνο διάδοσης και η εικόνα μεγέθους με τον συντελεστή θερμικής διάχυσης. Προφανώς, ένα από τα ισχυρά σημεία της lock-in θερμογραφίας είναι η εικόνα «φάσης», η οποία δεν εξαρτάται από τοπικά οπτικά και υπέρυθρα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Μια άλλη σημαντική παράμετρος για τη θερμογραφία lock-in είναι η διάρκεια της θερμικής διέγερσης, η οποία πρέπει να είναι το λιγότερο ένας κύκλος

(π.χ. για συχνότητα 1Hz απαιτείται χρόνος το λιγότερο 1sec, ενώ για 0,1Hz απαιτείται χρόνος τουλάχιστον 10sec). Ένα από τα κυριότερα σημεία της οπτικής lock-in θερμογραφίας είναι η συσκευή lock-in (lock-in box). Κάθε σήμα που λαμβάνεται χαρακτηρίζεται από «θόρυβο». Όταν λοιπόν ένα σήμα επεξεργαστεί από έναν ενισχυτή lock-in τότε έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται το σήμα πλέον χωρίς «θόρυβο». [45-46].

Η θερμογραφία lock-in βασίζεται στη δημιουργία θερμικών κυμάτων από μία εξωτερική διέγερση. Ανάλογα τον τύπο αυτής της διέγερσης η lock-in θερμογραφία διακρίνεται στις εξής υποκατηγορίες:

- Οπτική θερμογραφία lock-in
- Θερμογραφία lock-in με υπέρηχους
- Θερμογραφία lock-in με μικροκύματα
- Θερμογραφία lock-in με δινορεύματα
- Θερμογραφία lock-in με θερμό-ηλεκτρική διέγερση



Εικόνα 5 Είδη lock-in θερμογραφίας [45-46].

1.2.6 Θερμικές κάμερες υπέρυθρου

Οι περισσότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούν ειδικές υπέρυθρες θερμικές κάμερες (βλ. Εικόνα 6) που ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared cameras), χωρίς να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο. Οι κάμερες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν αισθητήρες που δεν αντιλαμβάνονται το πλάνο επιτήρησης όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του φωτός στο οπτικό φάσμα και άρα όπως παρουσιάζεται στο ανθρώπινο μάτι. Αντίθετα, λαμβάνουν την εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας.



Εικόνα 6 Υπέρυθρες θερμικές κάμερες 52: (α) LWIR θερμική κάμερα FLIR ThermaCAM T360, με FPA 320x240 pixels, φασματική απόκριση 7.5–13 μm . (β) MWIR θερμική κάμερα CEDIP/JADE με ανιχνευτή InSb και FPA 320x240 pixels, φασματική απόκριση 3.6–5.0 μm .

Το 1970 ένα νέο είδος συσκευών απεικόνισης εμφανίστηκε και έφερε επανάσταση στον τομέα των υπέρυθρων. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία, αυτά που χρειάζονται για την κατασκευή μιας θερμικής κάμερας είναι τα οπτικά, μια συστοιχία εστιακού επιπέδου, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά και μια μονάδα ψύξης. Κάποιες συστοιχίες εστιακού επιπέδου αποτελούνται από [46]:

- ανιχνευτές φράγματος Schottky,
- ανιχνευτές υπερπλέγματος ,
- ενδογενείς ανιχνευτές,
- ανιχνευτές Z-επιπέδου και
- ανιχνευτές συστοιχίας μικροβολομέτρων

Οι ανιχνευτές φράγματος Schottky έχουν διαστάσεις 512 x 512 pixels και είναι κατασκευασμένοι από PtSi (το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 3-5 μm), ή από GaSi

(το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 8-14 μm και 8-16 μm). Για την κατασκευή θερμικής κάμερας με αυτούς τους ανιχνευτές απαιτείται σύστημα ψύξης ώστε η θερμοκρασία να είναι σταθερή στους 77 K.

Οι ανιχνευτές υπερπλέγματος είναι κατασκευασμένοι από ημιαγωγούς, όπως GaAs/GaAlAs, και το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 0,8-2,6 μm . Για τη σωστή λειτουργία τους απαιτείται σύστημα ψύξης ώστε να επιτευχθούν θερμοκρασίες 50-70 K. Οι ενδογενείς ανιχνευτές έχουν διαστάσεις 128 x 128 pixels, ανιχνεύουν φάσμα από 8-12 μm και είναι κατασκευασμένοι από HgSdTe. Επίσης κάποιοι ανιχνευτές είναι κατασκευασμένοι από InGaAs και λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου.

Οι ανιχνευτές Z-επιπέδου βασίζονται σε κυκλώματα πυριτίου που είναι κατεργασμένα πάνω σε μια μικροσκοπική επιφάνεια μαζί με έναν ανιχνευτή εγκατεστημένο στη μια της άκρη. Αυτές οι επιφάνειες ενωμένες συνθέτουν τον τελικό ανιχνευτή, που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σταγόνων μέσα σε δοκίμια.

Οι ανιχνευτές συστοιχίας μικροβολομέτρων έχουν διαστάσεις 320 x 240 pixels, λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά η απόδοσή τους δεν είναι τόσο καλή όσο των ανιχνευτών που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα που χρησιμοποιούν, οι θερμικές κάμερες δρουν στις αντίστοιχες ζώνες (μήκη κύματος) του υπέρυθρου φάσματος ακτινοβολίας. Αυτές κατανέμονται ως εξής [45]:

- SWIR (Short-Wave Infrared), από 1.0 μm έως 3.0 μm , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό InGaAs.
- MWIR (Mid-Wave Infrared), από 3.0 μm έως 5.0 μm , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό InSb, HgCdTe και σπανιότερα PbSe.
- LWIR (Long-Wave Infrared), από 7.0 μm έως 14.0 μm , με αισθητήρες που χρησιμοποιούν ως υλικό HgCdTe.

1.2.7 Παραδείγματα εφαρμογών θερμογραφίας υπέρυθρου

Η θερμογραφία υπέρυθρου για τον μη καταστροφικό έλεγχο υλικών και δομών έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών: αεροναυπηγική, κατασκευαστική βιομηχανία, πετροχημικές εγκαταστάσεις, περιβάλλον, υποδομές πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρονικός εξοπλισμός, αρχιτεκτονική, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, έργα τέχνης, ενεργειακός έλεγχος κτιρίων, κλπ. Παρακάτω, παρατίθενται μερικά επιλεγμένα παραδείγματα εφαρμογών.

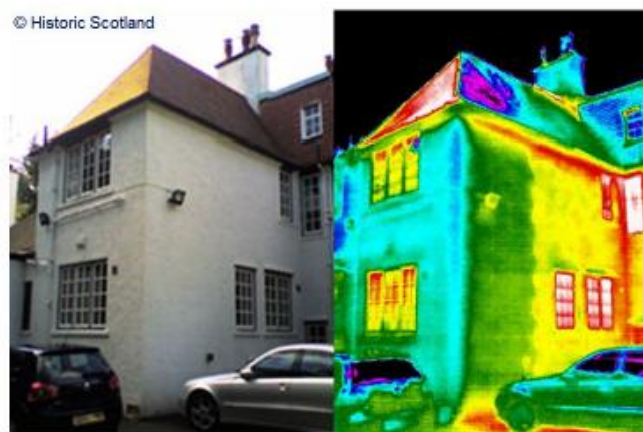
Στην Εικόνα 7 φαίνονται τα αποτελέσματα του θερμογραφικού ελέγχου του πηδαλίου του μαχητικού αεροσκάφους της Βασιλικής Καναδικής αεροπορίας (RCAF), τύπου McDonnell Douglas CF-18 Hornet . Ο έλεγχος έγινε με δυο τεχνικές,

τη θερμογραφία παλμού και τη θερμογραφία lock-in, με την οποία εντοπίστηκαν σημεία βλάβης από πρόσκρουση.



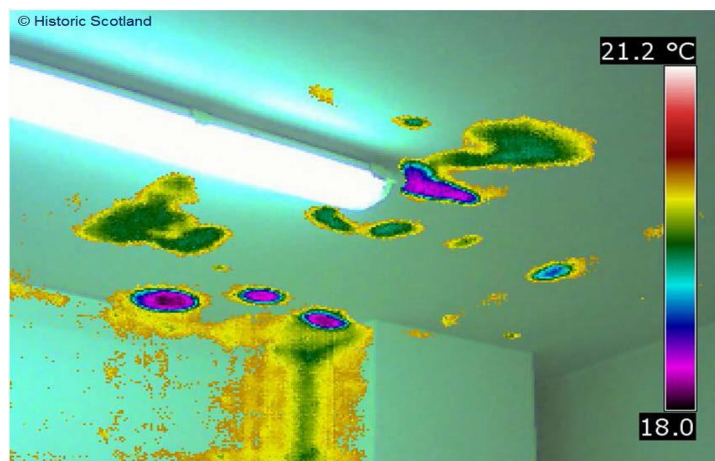
Εικόνα 7 Θερμογραφικός έλεγχος του πηδαλίου του μαχητικού αεροσκάφους [45].

Στην Εικόνα 8 η θερμογραφία μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την απώλεια θερμότητας από τα κτίρια. Στην οροφή του κτιρίου του σχήματος εμφανίζεται μεγάλη περιοχή (μωβ χρώμα) απώλειας θερμότητας.



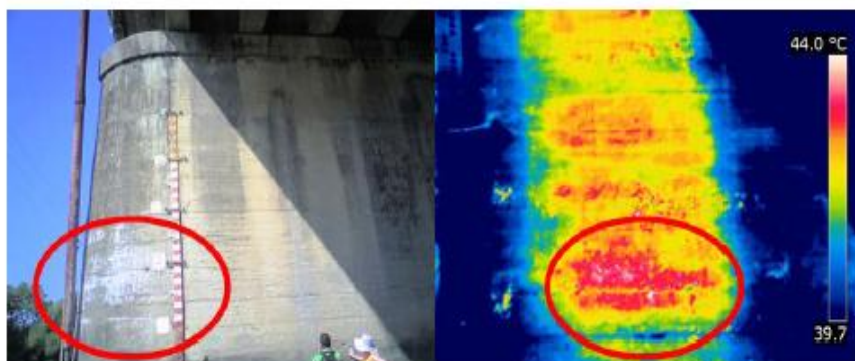
Εικόνα 8 Ενεργειακός έλεγχος κτιρίων με υπέρυθρη θερμογραφία [45].

Στην Εικόνα 9 φαίνεται ο εντοπισμός υγρασίας σε κτίρια, με υπέρυθρη θερμογραφία. Το σχήμα παρουσιάζει υπέρθεση θερμογραφήματος σε οπτική εικόνα στο εσωτερικό κτιρίου. Η παρουσία υγρασίας εμφανίζεται στο θερμογράφημα ως ψυχρότερη περιοχή, όταν το νερό εξατμίζεται ή διαρρέει κρύο νερό.



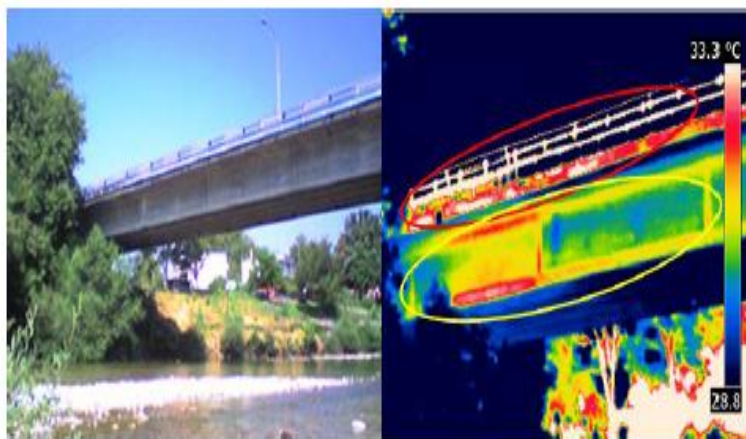
Εικόνα 9 Εντοπισμός υγρασίας σε κτίρια με υπέρυθρη θερμογραφία [45].

Τα παρακάτω δύο παραδείγματα αναφέρονται στο μη καταστροφικό έλεγχο γεφυρών οδικού δικτύου με υπέρυθρη θερμογραφία. Στην Εικόνα 10, φαίνεται το θερμογράφημα του μεσόβαθρου της γέφυρας Αράχθου, Άρτας, όπου εμφανίζεται μεγάλη ανομοιογένεια στο σκυρόδεμα και πιθανό πορώδες.



Εικόνα 10 Θερμογραφικός έλεγχος γέφυρας οδικού δικτύου: Περιοχή με πιθανό πορώδες [45].

Στην Εικόνα 11, φαίνεται το θερμογράφημα στην περιοχή κοντά στο κατάστρωμα και στην επιφάνεια του κορμού της δοκού της γέφυρας, με εμφανή προβλήματα στις υδρορροές, καθώς και παρουσία αυξημένης υγρασίας στη δοκό.



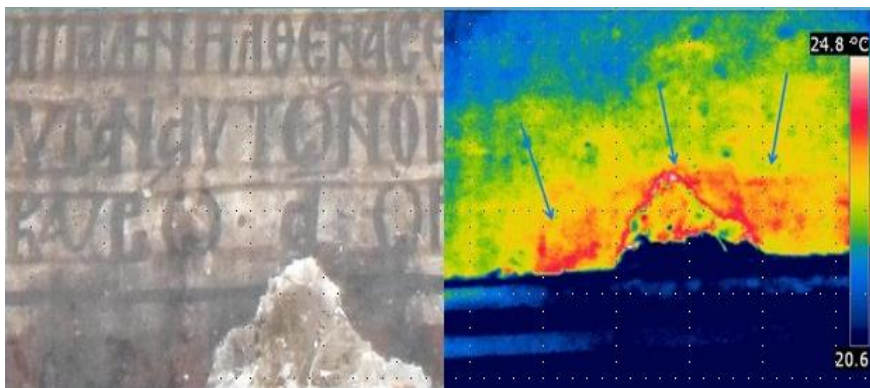
Εικόνα 11 Θερμογραφικός έλεγχος γέφυρας οδικού δικτύου: Εμφανή προβλήματα στις υδρορροές (κόκκινος κύκλος), και ύπαρξη αυξημένης υγρασίας στη δοκό (κίτρινος κύκλος) [45].

Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται η εφαρμογή τεχνικών υπέρυθρης θερμογραφίας για την αποτίμηση βλάβης σε μνημείο της Βυζαντινής περιόδου, της Μονής Μολυβδοσκεπάστου στην Ήπειρο, που χρονολογείται από τον 6ο αιώνα. Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από τέσσερις λαμπτήρες πυρακτώσεως, ισχύος 1kW με δυνατότητα ρύθμισης συνεχούς τάσης εύρους 0-10 Volts, ως πηγή θερμικής διέγερσης, μονάδα επεξεργασίας δεδομένων (H/Y), ένα lock-in ενισχυτή και δύο διαφορετικούς τύπους υπέρυθρης θερμικής κάμερας. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι τοιχογραφίες και τα κονιάματα επικάλυψης της μονής δεν έχουν συγκεκριμένο συντελεστή εκπομπής λόγω της ανομοιογένειας τους, συνεπώς, για την επίτευξη του θερμογραφικού ελέγχου ο συντελεστής εκπομπής ορίστηκε ως 0,75 [50].



Εικόνα 12 Μονή Μολυβδοσκεπάστου και πειραματική διάταξη υπέρυθρης θερμογραφίας για την αξιολόγηση βλάβης στο εσωτερικό της Μονής [50].

Στην τελευταία Εικόνα 13 παρουσιάζεται το θερμογράφημα για την αξιολόγηση της φθοράς μιας τοιχογραφίας, όπου παρατηρείται εκτός από το σημείο της ήδη υπάρχουσας αποκόλλησης και κάποια άλλα έντονα σημεία (χρώμα κόκκινο) όπου δηλώνουν την μεγάλη πιθανότητα εξέλιξή της.



Εικόνα 13 Θερμογραφικός έλεγχος για την αξιολόγηση της Φθοράς Μνημείων Πολιτιστικής Κληρονομιάς.

1.2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμογραφίας IR

Όπως κάθε μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου έτσι και η θερμογραφία υπέρυθρου έχει κάποια πλεονεκτήματα αλλά και ορισμένες δυσκολίες στην εφαρμογή της, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 2 [34,46,51].

Πίνακας 2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπέρυθρης θερμογραφίας.

Πλεονεκτήματα Θερμογραφίας	Μειονεκτήματα Θερμογραφίας
Τεχνική μη επαφής (non-contact)	Δυνατότητα ελέγχου μικρού πάχους υλικού κάτω από την επιφάνεια
Παρέχει γρήγορα κ' αξιόπιστα αποτελέσματα που είναι εύκολο να ερμηνευτούν	Δυνατότητα ανίχνευσης μόνο ατελειών που οφείλονται σε μετρήσιμη αλλαγή των θερμικών ιδιοτήτων
Τεχνική πλήρους πεδίου (full field) με ταχύ ρυθμό ελέγχου	Κόστος εξοπλισμού
Εύκολη η χρήση του εξοπλισμού της υπέρυθρης θερμογραφίας	Προβλήματα προσδιορισμού του συντελεστή εκπομπής (emmissivity)
Παρέχει μεγάλο εύρος εφαρμογών κ' αποτελεί μοναδικό εργαλείο ελέγχου για κάποιες εφαρμογές	

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Σύνθετο πολυμερικής μήτρας
ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP- carbon fiber
reinforced polymer)**



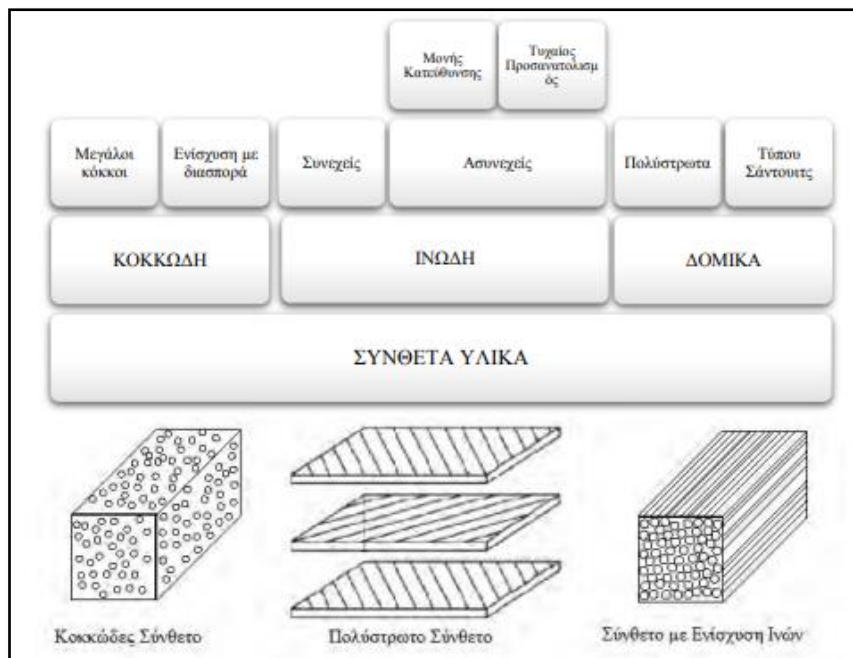
2.1 Σύνθετα Υλικά

2.1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία ανάπτυξη νέων υλικών λόγω των ολοένα και περισσότερων απαιτήσεων για ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες κατασκευές. Τα νέα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από αυξημένη αντοχή και μικρό βάρος, έχουν σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας και το χαρακτηριστικό τους μέγεθος είναι οι υψηλές τιμές λόγου αντοχή/ βάρος. Αυτά τα υλικά λοιπόν βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων καθημερινής χρήσης.

Στη κατηγορία των νέων υλικών συγκαταλέγονται και τα σύνθετα υλικά (composite materials) που ήδη παρουσιάζουν ευρύτατη εφαρμογή σε πολλούς κατασκευαστικούς τομείς. Η βασική ιδέα της ανάπτυξης ενός συνθέτου υλικού είναι η φυσική ανάμιξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών και η δημιουργία ενός υλικού με τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των υλικών που το αποτελούν. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή αρχικών υλικών και τεχνικής ανάμιξης με σκοπό την κατασκευή ενός συνθέτου υλικού με τις επιθυμητές ιδιότητες και ως εκ τούτου λόγω του μεγάλου αριθμού των συνδυασμών των υλικών και των μεθόδων κατασκευής τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε πολλούς τύπους [52].

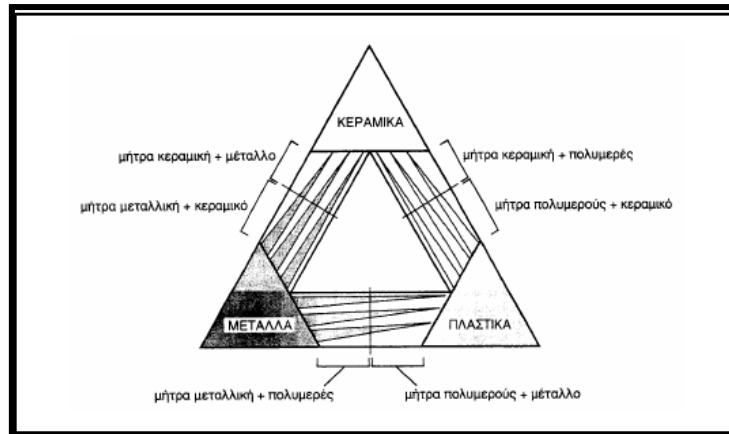
Η συνεχής φάση ενός συνθέτου υλικού ονομάζεται μήτρα (matrix), ενώ η διεσπαρμένη φάση ονομάζεται φάση ενίσχυσης και συνήθως βρίσκεται σε μορφή σωματιδίων, φολίδων, ασυνεχών ινών, συνεχών ινών ή στρώσεις πλακών (βλ.Εικόνα 14).



Εικόνα 14⁹ Κατηγορίες σύνθετων υλικών με βάση τη φάση ενίσχυσης.

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών γίνεται συνήθως με βάση τα χαρακτηριστικά του μητρικού υλικού. Έτσι υπάρχουν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (ΣΠΜ, Polymer Matrix Composites, PMCs), σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (ΣΜΜ, Metal Matrix Composites, MMCs) και σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (ΣΚΜ, Ceramic Matrix Composites, CMCs). Η φάση ενίσχυσης για κάθε τύπο μήτρας μπορεί να είναι επίσης πολυμερική, μεταλλική ή κεραμική [53]. Στο Σχήμα 25 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες σύνθετων που προκύπτουν [54].

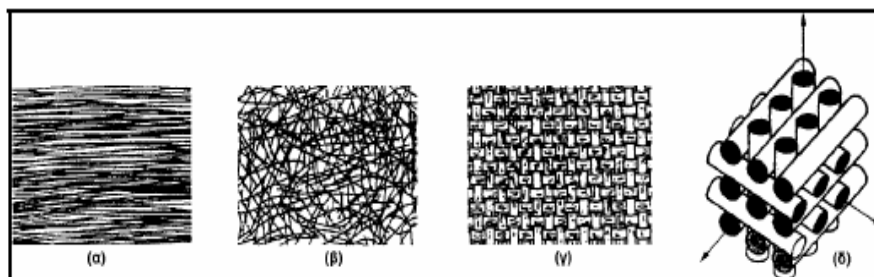
⁹ http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10315/3/Nemertes_Kollia%28phys%29.pdf



Σχήμα 24 Κατηγορίες σύνθετων υλικών.

Ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους είναι και τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Composites) όπου μια συνεχής φάση μήτρα-ενισχύεται με ίνες. Ως υλικά μήτρας χρησιμοποιούνται μέταλλα, κεραμικά ή διάφορα πολυμερή που είναι και τα πλέον πιο διαδεδομένα. Οι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά είναι οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι ίνες γυαλιού (glass fibers), οι ίνες aramid (Kevlar), οι κεραμικές ίνες (ceramic fibers) και οι πολυμερικές ίνες (polymeric fibers). Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

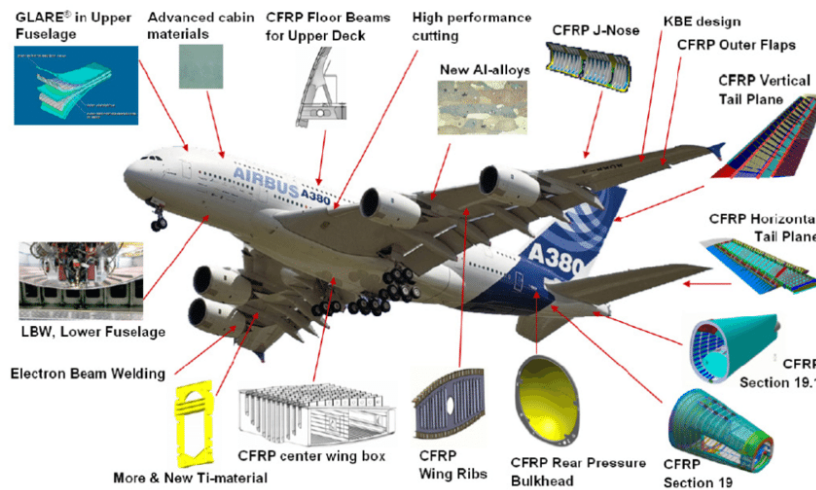
- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπό-ομάδες, βλ. Σχήμα 26 [54].



Σχήμα 25 Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα δημιουργήθηκε μια νέα επιστήμη, η επιστήμη των πολυμερών, όπου η εμφάνιση των πολυμερικών υλικών αντικατέστησε τα μέταλλα σε πολλές κατασκευές λόγω στην συμπεριφορά τους, στην επάρκεια τους και στο χαμηλό τους κόστος. Το πρώτο κύμα αντικατάστασης των μετάλλων με βιομηχανικά πλαστικά άρχισε με την εμπορευματοποίηση του nylon. Αν συγκρίνουμε το κόστος ανά μονάδα βάρους των πλαστικών ρητινών με το αντίστοιχο του χάλυβα παρατηρούμε ότι το κόστος των πλαστικών ρητινών είναι μεγαλύτερο από εκείνο του χάλυβα. Πάρα ταύτα, το συνολικό κόστος παραγωγής ενός πλαστικού προϊόντος είναι πολύ χαμηλότερο από εκείνο του αντίστοιχου μετάλλου. Η αντικατάσταση μεταλλικών κατασκευαστικών στοιχείων από αντίστοιχα πλαστικά σήμερα είναι της τάξεως του 12,5% ενώ έφτασε κατά το τέλος του 20^{ου} αιώνα στο ύψος του 50% κατ'όγκον.

Το δεύτερο κύμα άρχισε με την ανάπτυξη υπερανθεκτικών και ελαφρών συνεχών ινών, όπως είναι οι ίνες άνθρακα, γραφίτη, aramid και οι ίνες καρβιδίων του πυριτίου. Τα ινώδη σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και aramid έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν δύο βασικά μέταλλα όπως είναι το αλουμίνιο και ο χάλυβας σε βασικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Ο κύριος λόγος αντικατάστασης του αλουμινίου από προηγμένα σύνθετα υλικά στις αεροπορικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές, είναι κυρίως η μείωση του βάρους της κατασκευής (βλ. Εικόνα 14). Για παράδειγμα, στο μέλλον τα σύνθετα υλικά αναμένεται να καλύπτουν ένα ποσοστό 50-60% του συνολικού βάρους των αεροσκαφών, κάτι που θα συμβεί αρχικά στα πολεμικά αεροσκάφη και στη συνέχεια θα επεκταθεί στα εμπορικά και επιβατικά. Την τελευταία δεκαετία, η κατανάλωση των βασικών μετάλλων, όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο, παραμένει σταθερή ενώ αντίθετα η κατανάλωση σε προηγμένα σύνθετα υλικά αυξάνει με έναν ετήσιο ρυθμό της τάξεως του 30% περίπου [52].



Εικόνα 15¹⁰ Χρήση των σύνθετων υλικών στα εξωτερικά καλύμματα του AIRBUS A380.

2.1.2 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών

Οι ιδιότητες ενός υλικού είτε κοινού είτε σύνθετου, μπορούν να χωριστούν σε μηχανικές και μη μηχανικές. Στις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού ανήκουν η ακαμψία, η αντοχή, η ολκιμότητα, η σκληρότητα, η συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση, ερπυσμό κ.ά. Στις μη μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού περιλαμβάνονται η πυκνότητα, η θερμική συμπεριφορά, η αντίσταση σε διάβρωση κ.ά.

Τα σύνθετα υλικά έχουν το πλεονέκτημα ότι, εκτός το γεγονός ότι παρουσιάζουν τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν, έχουν επιπλέον ιδιότητες που κανένα από τα αρχικά υλικά δεν διαθέτε, κάποιες από τις οποίες είναι:

- Αντοχή
- Ακαμψία
- Αντίσταση σε διάβρωση
- Αντίσταση σε φθορά λόγω χρήσης
- Κόστος
- Βάρος
- Συμπεριφορά σε κόπωση κ.ά

Κάθε σύνθετο υλικό δεν μπορεί να διαθέτει όλες τις παραπάνω ιδιότητες αλλά κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει ορισμένες από αυτές. Για παράδειγμα τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι σημαντικά για την ακαμψία, την αντοχή, το βάρος και το

¹⁰ https://www.researchgate.net/figure/The-AIRBUS-A380-aircraft-composite-applications-wwwairbuscom_fig1_303144941

κόστος τους. Αναλυτικότερα κάποια βασικά πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών ως κατασκευαστικά στοιχεία είναι [52]:

i. Άριστες μηχανικές ιδιότητες

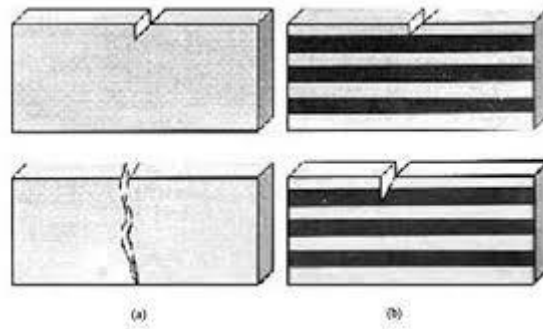
Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Αρκετοί τύποι ινών που έχουν μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία εντάσσονται στην κατηγορία των προηγμένων ινών και έχουν αποτελέσει υλικά κατασκευής σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι ίνες βορίου και γραφίτη με την μορφή λεπτών νημάτων (filaments) έχουν λάβει από τους ερευνητές μεγάλη προσοχή λόγω της μεγάλης τους αντοχής και δυσκαμψίας.

ii. Ανάληψη φορτίου μετά την αστοχία

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι τα μεγάλα φορτία που εξακολουθούν να αναλαμβάνουν μετά από πιθανή αστοχία. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι τα ινώδη σύνθετα που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP) μετά τη διαρροή τους εξακολουθούν να αναλαμβάνουν φορτία που φθάνουν το 85% της τάσης αστοχίας τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την αστοχία του υλικού συμβαίνει θραύση των ινών και η τάση μεταβιβάζεται σε πολλές κατευθύνσεις μέσα στο υλικό.

iii. Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές- Μεγάλη διάρκεια ζωής

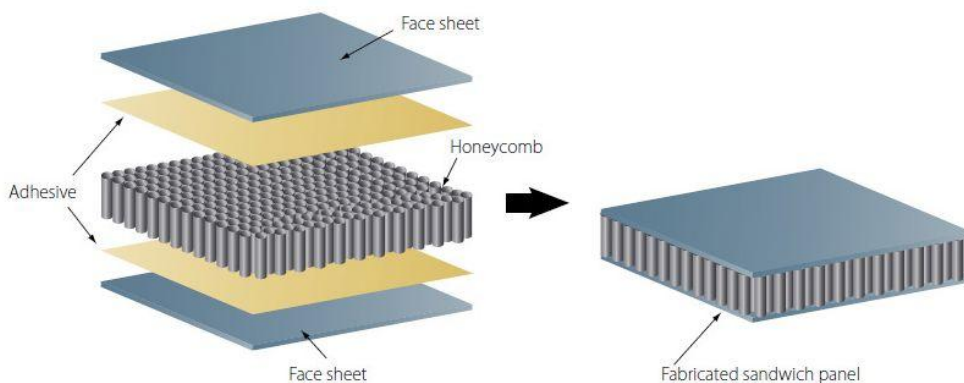
Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σχετικά μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγκοπών ενώ η διάδοση των ρωγμών είναι περιορισμένη κάτι που βελτιώνει την αντοχή του υλικού σε κόπωση. Για παράδειγμα, αν συγκρίνουμε την ανά μονάδα βάρους διάρκεια ζωής σε κόπωση των ινωδών σύνθετων υλικών σε σχέση με τα παραδοσιακά θα παρατηρήσουμε ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ αυξημένες τιμές σε σχέση με το τιτάνιο που είναι το ανθεκτικότερο από όλα τα μέταλλα σε κόπωση.



Εικόνα 16¹¹ Διάδοση ρωγμής σε ένα ομογενές υλικό (α) και σε ένα διφασικό σύνθετο υλικό (β).

iv. Βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες

Με τη χρήση σύνθετων υλικών τύπου sandwich μπορούν να κατασκευαστούν βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από την διατήρηση του σχήματός τους ακόμα και κάτω από την επίδραση υψηλών φορτίων.



Εικόνα 17¹² Σύνθετο υλικό τύπου Sandwich με κυψελωτό πυρήνα (Honeycomb).

v. Αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας

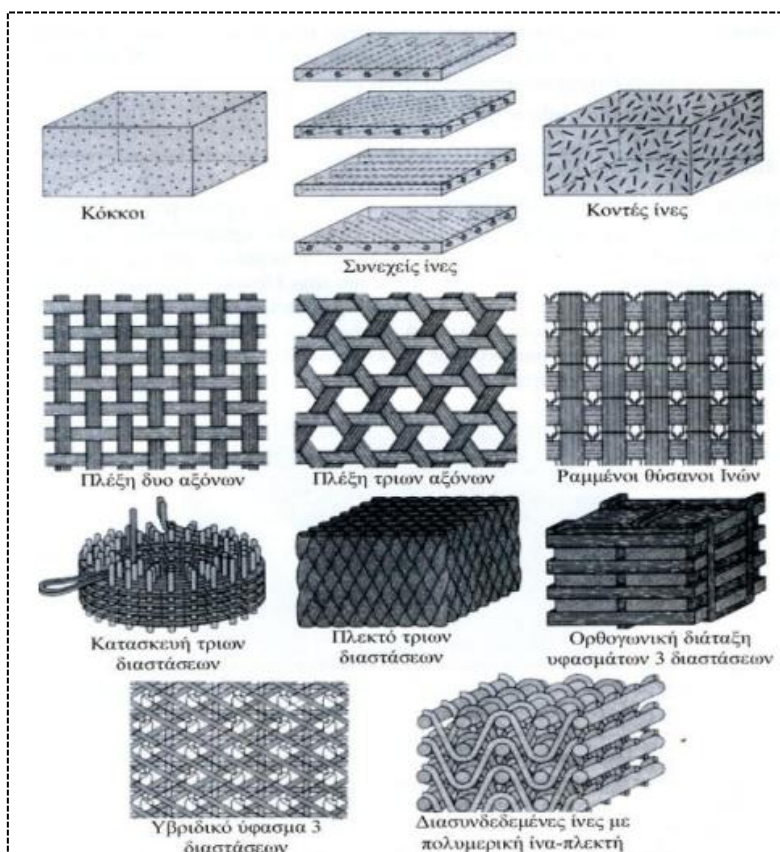
Η υψηλή αντοχή των ινωδών συνθέτων υλικών σε κρουστικά φορτία υψηλής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την περιορισμένη καταστροφή της κατασκευής και την διατήρηση του περιγράμματος στις περιοχές γύρω από την καταστροφή.

¹¹ Στο ομογενές υλικό οποιαδήποτε επιφανειακή ατέλεια μπορεί να γίνει αιτία έναρξης διάδοσης μιας καταστροφικής ρωγμής λόγω εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου. Ενώ στο διφασικό υλικό μπορεί να γίνει αιτία έναρξης διάδοσης ρωγμής αλλά λόγω της δομής του συνθέτου η ρωγμή δεν θα διαδοθεί καταστροφικά.

¹² http://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html

2.1.3 *Ινώδη σύνθετα υλικά*

Τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber-reinforced composites) αποτελούνται από έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε μία συνεχή μήτρα και υπάρχουν διάφοροι τύποι ινωδών ενισχύσεων σύνθετων υλικών (βλ.Εικόνα 18). Μία ίνα χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο λόγο μήκος/διάμετρο (aspect ratio). Έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες των διαφόρων υλικών παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακαμψία και ανθεκτικότητα σε σχέση με τα αντίστοιχα υλικά που βρίσκονται σε συνήθη μορφή. Αυτό οφείλεται στην τελειότητα της δομής της ίνας και συγκεκριμένα οι κρύσταλλοι του υλικού της ίνας είναι ευθυγραμμισμένοι κατά τον διαμήκη άξονα την ίνας και έχουν λιγότερες εσωτερικές ατέλειες σε σχέση με αυτές υπάρχουν στο ίδιο το υλικό που δεν έχει τη μορφή ίνας.



Εικόνα 18 Τύποι ινωδών ενισχύσεων σύνθετων υλικών[52].

Οι ίνες μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

a) Μακρές ίνες (long fibers)

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ίνες με μεγάλο λόγο μήκους/διάμετρο ($l/d \geq 100$) και με διάμετρο της τάξης μεγέθους των κρυστάλλων. Στον Πίνακα 3 δίνεται η αντοχή, η ακαμψία κάποιων βασικών ινών μεγάλου μήκους, η πυκνότητα τους και οι λόγοι ακαμψίας/πυκνότητα (ειδική ακαμψία) και αντοχής/πυκνότητα (ειδική αντοχή) οι οποίοι είναι ενδεικτικοί της αποτελεσματικότητας της ίνας κυρίως σε κατασκευές ευαίσθητες σε βάρος για παράδειγμα σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια.

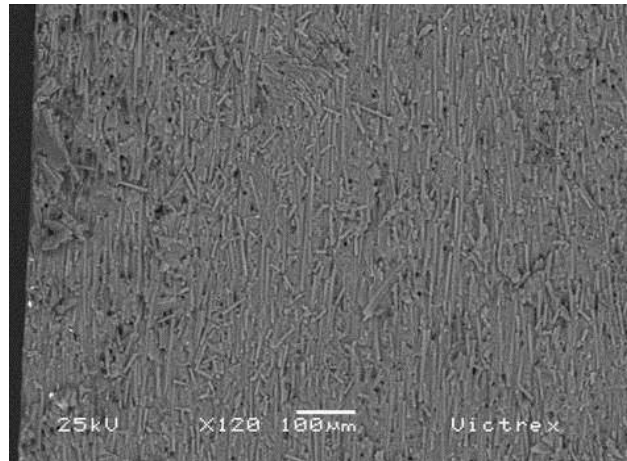
Πίνακας 3 Ιδιότητες μακρών ινών.

Υλικό ίνας	ρ (kN/m^3)	T_s (GPa)	T_s/ρ (Mm)	E (GPa)	E/ ρ (Mm)
Αργίλιο	26.3	0.62	24	73	2.8
Τιτάνιο	46.1	1.90	41	115	2.5
Χάλυβας	76.6	4.10	54	207	2.7
E-γυαλί	25.0	3.40	136	72	2.9
S-γυαλί	24.4	4.80	197	86	3.5
Άνθρακας	13.8	1.70	123	190	14.0
Βόριο	25.2	3.40	137	400	16.0
Γραφίτης	13.8	1.70	123	250	18.0

Όπου: ρ = πυκνότητα, T_s = αντοχή σε εφελκυσμό, T_s/ρ = ειδική αντοχή σε εφελκυσμό, E= μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, E/ ρ = ειδικό μέτρο ελαστικότητας.

b) Κοντές ίνες (Short fibers)

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει ίνες με μικρό λόγο μήκους/διάμετρο ($l/d < 100$). Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης (βλ.Εικόνα 19). Η αντοχή τους υπερβαίνει πολύ την αντοχή του αντίστοιχου υλικού με τυχαία διαμόρφωση. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τιμές μερικών ιδιοτήτων ινών μικρού μήκους.



Εικόνα 19¹³ Εικόνα φωτομικρογραφίας ενίσχυσης κοντών ινών.

Πίνακας 4 Ιδιότητες ινών μικρού μήκους.

Υλικό ίνας	ρ (kN/m^3)	S(t) (Gpa)	S(e) (GPa)	S(e)/ ρ (Mm)	E (GPa)	E/ ρ (Mm)
Χαλκός	87.4	12	3.0	34	124	1.4
Νικέλιο	87.9	21	3.9	44	215	2.4
Χάλυβας	76.8	20	13.0	170	200	2.6
B ₄ C	24.7	45	6.7	270	450	18.0
SiC	31.2	83	11.0	350	840	27.0
Al ₂ O ₃	38.8	41	19.0	490	410	11.0
C	13.6	98	21.0	1300	980	60.0

Όπου: ρ =πυκνότητα, S(t)=θεωρητική αντοχή, S(e)=πειραματική αντοχή, S(e)/ ρ =ειδική πειραματική αντοχή, E=μέτρο ελαστικότητας, E/ ρ =ειδικό μέτρο ελαστικότητας.

Οι ίνες χρειάζεται να είναι τέλεια ενσωματωμένες μέσα στη μήτρα αλλά και η μήτρα είναι αυτή που προστατεύει τις ίνες από το περιβάλλον ενώ παράλληλα μεταφέρει και τάσεις. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν μήτρα έχουν πυκνότητα, αντοχή και ακαμψία μικρότερη από αυτή των ινών και η πιο εμπορική μορφή ενός ινώδους υλικού είναι του πολύστρωτου σύνθετου υλικού (laminated composite) [52].

¹³ <http://www.automateddynamics.com>

2.2 Πολυμερικές Μήτρες

2.2.1 Εισαγωγή

Η μήτρα ενός σύνθετου μπορεί να είναι κεραμική (πολυκρυσταλλική ή υαλόμορφη και σπανίως ημικρυσταλλική), μεταλλική (πολυκρυσταλλική) ή πολυμερική (άμορφη ή ημικρυσταλλική).

Στην περίπτωση των πολυμερικών μητρών ορισμένα ανήκουν στα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή (πυκνώς διασταυρωμένα πολυμερή, όπως εποξειδικές ρητίνες και ακόρεστοι πολυεστέρες) τα οποία ενισχύονται σχεδόν αποκλειστικώς με ίνες. Ένας διαλύτης εισάγεται σε χαμηλότερο ιξώδες και βελτιώνει τον εμποτισμό ινών. Η διαδικασία πολυμερισμού περιλαμβάνει μη αναστρέψιμες χημικές αντιδράσεις σταυρωτής σύνδεσης και παράγει ένα τρισδιάστατο δίκτυο μακρομοριακών αλυσίδων οι οποίες δεν μπορούν να μαλακώσουν αναστρέψιμα και έχουν υψηλή αντίσταση θερμοκρασίας. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των θερμοσκληρυνόμενων δικτύων γενικά εξαρτώνται από την επιτευχθείσα πυκνότητα σταυροειδών δεσμών. Γενικά ο βασικός ρόλος των θερμοσκληρυνόμενων μητρών είναι αυτός του φορέως (συγκολλητικό) των ινών. Για ένα μεγάλο φάσμα εμπορικών πολυμερικών προϊόντων το βασικό πολυμερές είναι θερμοπλαστικό (μη διασταυρωμένο πολυμερές) ή ελαστομερές (ελαφρώς διασταυρωμένο πολυμερές). Οι θερμοπλαστικές μήτρες αποτελούνται από μεγάλες μοριακές αλυσίδες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με δυνάμεις van der Waals. Μπορούν να υποστούν κατεργασία σε λιωμένη κατάσταση σε αυξημένη θερμοκρασία και να καταστούν στερεά διατηρώντας το σχήμα τους καθώς ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου. Επίσης συνιστούν μήτρα σύνθετου, αφού περιέχουν σημαντική ποσότητα (π.χ. >2-5%) με μία ή περισσότερες επιπλέον φάσεις όπως κομμένες ίνες, φυλλίδια ή κόκκοι που τροποποιούν αισθητά τις μηχανικές ή και άλλες ιδιότητες του βασικού πολυμερούς [55-56].

2.2.2 Υλικά μητρών συνθέτων

Γενικά οποιοδήποτε στερεό είναι δυνατόν να εμφανιστεί στο ρόλο της μήτρας σύνθετου. Στα κεραμικά, η εγγενής ψαθυρότητά τους καθιστά πρακτικώς οποιοδήποτε κεραμικό υποπήφιο για τον ρόλο της μήτρας. Στην πράξη το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε σχετικώς λίγες μήτρες όπως ο άνθραξ, πυριτικές/ βοριοπυριτικές

ύαλοι, ορισμένα υαλοκεραμικά, αργιλία κ.ά. Στα μέταλλα οι πλέον κατάλληλες μήτρες θεωρούνται κυρίως τα ελαφρά δομικά μέταλλα όπως τα Al, Mg, Ti και δευτερευόντως άλλα δομικά μέταλλα όπως τα Cu, Ni, Fe, Pb. Στην περίπτωση των πολυμερών υπάρχουν: (α) οι πολυμερικές μήτρες με ευδιάκριτο πολυμερικό χαρακτήρα και (β) οι μήτρες που λειτουργούν ως συγκολλητικά ινών υψηλού/πολύ υψηλού E και οδηγούν σε σύνθετα με μέσο-υψηλό E αλλά δυσδιάκριτο πολυμερικό χαρακτήρα. Στην συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν διάφορα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή και ορισμένα εξειδικευμένα θερμοπλαστικά [55].

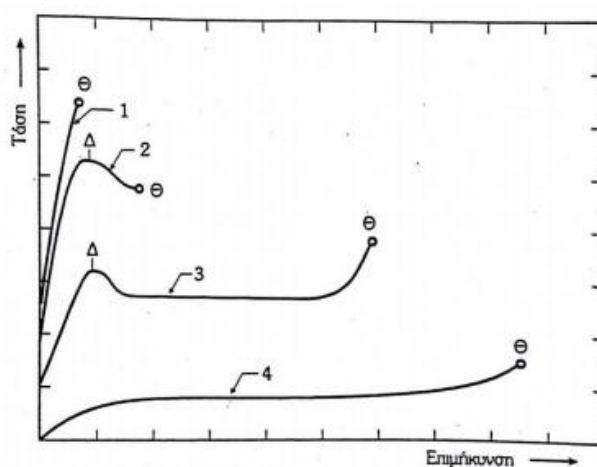
2.2.3 Μηχανικές ιδιότητες πολυμερών

Η μηχανική αντοχή των (μη ενισχυμένων) πολυμερών είναι σχετικά χαμηλή, αλλά κατόπιν ενισχύσεώς τους, ιδιαίτερα με ίνες υάλου και με υψηλών αντοχών ίνες (όπως ίνες άνθρακα, αραμιδικές ίνες) η μηχανική αντοχή τους γίνεται πολύ υψηλή.

Η επιμήκυνση κατά την εφελκυστική καταπόνηση των πολυμερών είναι σχετικά μεγάλη σε όλα τα πολυμερή (ακόμη και στα ενισχυμένα). Η αντοχή σε θλίψη των πολυμερών είναι σχετικά υψηλή. Η επιφανειακή σκληρότητα των πολυμερών είναι σχετικά υψηλή. Η χρονική αντοχή τους σε καταπόνηση είναι περισσότερο ή λιγότερο μικρή. Λόγω του φαινομένου του ερπυσμού (οφειλομένου γενικά στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά τους) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα πολυμερή σε υψηλών καταπονήσεων κατασκευές, αντίθετα με ενισχυμένα πολυμερή υψηλών μηχανικών αντοχών. Η αντοχή σε ταλάντωση διάρκειας (φορτία kr/cm^2 που μπορεί το υλικό να υποστεί χωρίς θραύση γενικά για 10^7 ταλαντώσεις εναλλασσομένων εφελκυσμών και πιέσεων) είναι συνήθως κάτω από τις κανονικές τιμές για συνήθη πολυμερή. Η αντοχή σε κρούση των δοκιμίων των πολυμερών χωρίς εγκοπή είναι γενικά σαφώς μεγαλύτερη από αυτών που έχουν εγκοπή. Οξείες ακμές και έντονες μεταβολές της διατομής οδηγούν σε εσωτερικές τάσεις που μειώνουν την αντοχή του πολυμερούς. Η αντοχή σε κρούση δοκιμίων με εγκοπή βελτιώνεται με χρησιμοποίηση ινωδών πληρωτικών υλικών, ενώ με χρησιμοποίηση μεγάλου μήκους ινών (όπως ινών ή υφασμάτων υάλου κλπ) η εγκοπή του δοκιμίου δεν οδηγεί σε καμία απώλεια αντοχής.

Στο Σχήμα 27 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσεως-επιμηκύνσεως (σ - ϵ) (stress-strain curves) που εμφανίζουν διάφορα πολυμερή υλικά κατά τη δοκιμασία τους σε εφελκυσμό (tensile). Η καμπύλη 1 παριστά την μεταβολή (σ - ϵ) υλικών, όπως

το πολυστυρένιο (στις συνήθεις θερμοκρασίες χρησιμοποίησής του), όπου αρχικά παρουσιάζεται μια ταχεία αύξηση της τάσεως με αυξανόμενη επιμήκυνση μέχρι το σημείο θραύσεως του υλικού. Τα υλικά που εμφανίζουν τέτοια συμπεριφορά ονομάζονται ψαθυρά (brittle). Η αρχική αύξηση της τάσεως σε συνάρτηση με την επιμήκυνση είναι γραμμική για χαμηλές επιμηκύνσεις και ακολουθεί το νόμο του Hooke: $\sigma = E\varepsilon$, όπου E: μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό που προσδιορίζεται από την κλίση στο αρχικό τμήμα της καμπύλης, ε =ανηγμένη επιμήκυνση δηλαδή μεταβολή μήκους προς το αρχικό μήκος του δοκιμίου επί τοις (%). Η τάση θραύσεως (stress to break) είναι η τάση στο σημείο Θ , όπου θραύεται το υλικό κατά τον εφελκυσμό, ενώ η αντίστοιχη επιμήκυνση ονομάζεται επιμήκυνση στο σημείο θραύσεως. Ενώ η τάση θραύσεως είναι μια ιδιότητα του δοκιμίου (δηλαδή επηρεάζεται άμεσα από ελαττωματικές θέσεις κλπ. μέσα στη μάζα του υλικού), αντίθετα το μέτρο ελαστικότητας αποτελεί μια αληθινή ιδιότητα του υλικού. Μετά από κάποιο σημείο (όριο αναλογικότητας) υπάρχει απόκλιση από την γραμμική μεταβολή της καμπύλης.



Σχήμα 26 Τυπικές καμπύλες τάσεως-επιμηκύνσεως ψαθυρών, όλκιμων και ελαστομερών πολυμερών.

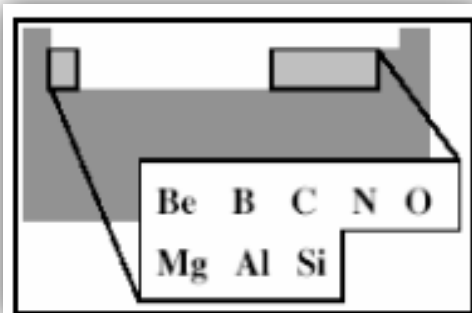
Άλλα πολυμερή, όπως μηχανολογικά πολυμερή (πχ. πολυαμίδια, πολυστυρένιο ανθεκτικό σε κρούση κλπ.) στις συνήθεις θερμοκρασίες χρησιμοποίησής τους ακολουθούν τις καμπύλες 2 και 3. Στις περιπτώσεις αυτές η τάση φθάνει σε μια μέγιστη τιμή που ονομάζεται τάση ή όριο διαρροής (yield stress) που αντιστοιχεί στο σημείο Δ της καμπύλης (σημείο διαρροής) και η αντίστοιχη επιμήκυνση ονομάζεται επιμήκυνση στο σημείο διαρροής. Αυξανόμενης

περισσότερο της επιμηκύνσεως η τάση αρχικά ελαττώνεται (επιμήκυνση μαλακοποίησεως (strain softening), πράγμα που συνήθως συμβαίνει για επιμηκύνσεις μεταξύ 5 και 50 τοις %. Η ελάχιστη τιμή της τάσεως σε αυτό το σημείο ονομάζεται τάση τανυσμού ή έλξεως (draw stress). Σε αυτό το σημείο μπορεί το δοκίμιο ή να θραύεται (καμπύλη 2) ή να υφίσταται λόγω του τανυσμού ένα προσανατολισμό σκληρύνσεως (orientation hardening) πριν θραυσθεί (καμπύλη 3). Κατά τον προσανατολισμό σκληρύνσεως τα μακρομόρια εκτείνονται τοπικά κατά τη διεύθυνση εφελκυσμού. Η έκταση των αλυσίδων προκαλεί μια αντίσταση σε παρά- πέρα παραμόρφωση με συνέπεια η τάση να παρουσιάζει αύξηση. Πάνω από το όριο διαρροής ένα τμήμα του δοκιμίου εφελκυσμού αρχίζει να γίνεται λεπτότερο προς σχηματισμό 'λαιμού'. Εάν ο προσανατολισμός σκληρύνσεως συμβαίνει πριν από τη θραύση του δοκιμίου, τότε ο λαιμός σταθεροποιείται δηλαδή προχωρεί κατά μήκος του δοκιμίου μέχρις ότου τελικά το δοκίμιο θραυσθεί. Τα υλικά που επιδεικνύουν τη συμπεριφορά των καμπυλών 2 και 3 ονομάζονται όλκιμα (ductile), παρουσιάζουν δηλαδή σημείο διαρροής σε αντίθεση προς τα ψαθυρά υλικά. Η αρχική κλίση της καμπύλης σε αυτά τα υλικά δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας τους είναι συνήθως χαμηλότερο από αυτό των ψαθυρών υλικών. Από την άλλη μεριά, η ενέργεια που απαιτείται για να παραμορφωθεί το δοκίμιο μέχρι τη θραύση του είναι πολύ μεγαλύτερη στα όλκιμα υλικά. (Η ενέργεια αυτή εκφράζεται με βάση την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη τάσεως-επιμηκύνσεως. Κατά συνέπεια πολυμερή εμφανίζουν παρόμοιες καμπύλες με τις 2 και 3 είναι ικανά να απορροφούν περισσότερη ενέργεια κατά την κρούση (impact). Τα ελαστομερή πολυμερή ακολουθούν τη μορφή της καμπύλης 4. Το μέτρο ελαστικότητας είναι χαμηλό, ενώ μπορούν να εμφανίζονται υψηλές επιμηκύνσεις της τάξεως πολλών εκατοντάδων τοις %. Πριν από την θραύση του ελαστομερούς μπορεί να εμφανίζεται μια αύξηση της τάσεως ως συνέπεια κρυσταλλικότητας οφειλόμενης στον προσανατολισμό των μακρομορίων κατά τη διεύθυνση τανυσμού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί στην πράξη να αναφέρεται είτε στην τάση θραύσεως είτε στην τάση διαρροής [55].

2.3 Ίνες Ενίσχυσης

2.3.1 *Τύποι Ίνών*

Τα τελευταία χρόνια στη σύγχρονη βιομηχανία των συνθέτων υλικών, χρησιμοποιείται μία μεγάλη ποικιλία υλικών και συγκεκριμένα ινών για την ενίσχυση μεταλλικών, κεραμικών και πλαστικών υλικών με σκοπό να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας. Κάποιες μηχανικές ιδιότητες που προσφέρουν είναι: υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον έχουν χαμηλή πυκνότητα (ρ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2η και 3η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος βλ.Σχήμα 28 [54].



Σχήμα 27 Κάποια βασικά υλικά που βασίζονται σε στοιχεία της 2^{ης} και 3^{ης} περιόδου του Περιοδικού Πίνακα.

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, βόριο, πυρίτιο) είτε από οργανικά υλικά (Aramid – Κέβλαρ, Πολυαιθυλενίο). Ο πρώτος τύπος ίνας που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση πλαστικού υλικού σε αεροπορικές κατασκευές ήταν οι ίνες από λινάρι. Με την προσθήκη ρητίνης ναυπηγήθηκε το αεροσκάφος "Gordon Aerolite". Για την κατασκευή αεροσκαφών είναι οι ίνες αρωματικού πολυαμιδίου, βορίου, άνθρακα και γυαλιού. Αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι ίνες άνθρακα (ίνες γραφίτη) και πολλές φορές σε συνδυασμό με ίνες αρωματικού πολυαμιδίου ή

γυαλιού, ενώ κάποιες άλλες φορές οι ίνες βορίου αντικαθιστώνται από ίνες άνθρακα και πυριτίου που είναι και φθηνότερες.

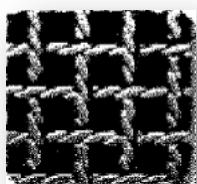
2.3.2 *Μορφές Ινών*

Θύσανοι και "Στουπιά" Ινών: Οι ίνες (εκτός του βορίου) παράγονται ως θύσανοι (tows) λεπτών νημάτων ινών. Οι ίνες άνθρακα και αρωματικού πολυαμιδίου κατασκευάζονται ως ένα ελεύθερο δέμα από εκατοντάδες, χιλιάδες νήματα, χωρίς στρέψη, το οποίο ονομάζεται "tow" και μοιάζει με "στουπί". Τα Υαλονήματα κατασκευάζονται κατασκευάζονται ως ένα ελεύθερο δέμα από εκατοντάδες, χιλιάδες νήματα, με στρέψη, το οποίο ονομάζεται «yarn» και μοιάζει με «πλεξούδα».

Ταινίες μίας Διεύθυνσης: Οι μη υφαντές ταινίες αποτελούνται, συνήθως, από "tows" , τα οποία ψεκάζονται σε καλούπια, χωρίς να δημιουργούνται κενά. Για να παραμείνουν οι ίνες στη θέση τους προεμποτίζονται με ρητίνη, η οποία είναι μερικώς πολυμερισμένη έτσι ώστε να είναι παχύρρευστη με σχετικά υψηλό ιξώδες ή με ένα θερμοπλαστικό πολυμερές. Για να μην κολλήσει η ρητίνη σε άλλα επίπεδα της ταινίας, επικαλύπτεται με ένα αποκολλητικό χαρτί "release paper", το οποίο είναι επικαλυμμένο με σιλικόνη [52].

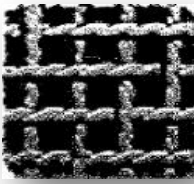
Υφαντά: Έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη ενισχυτικών υφασμάτων από ίνες αλλά πέντε είναι οι βασικοί τύποι με χαρακτηριστικές πλέξεις που χρησιμοποιούνται.

- Απλή πλέξη (Plain Weave)



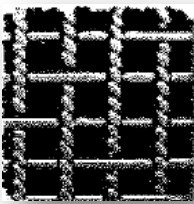
Θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ η μία ομάδα πάνω από την άλλη. Η πλέξη αυτή χαρακτηρίζεται ως η πλέον σταθερή.

- Διαγώνια πλέξη (Twill)



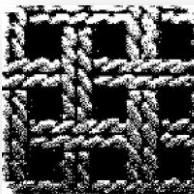
Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας από ότι η απλή πλέξη, ενώ έχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του.

- Η πλέξη Satin



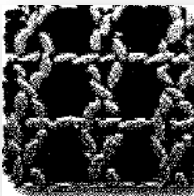
Σε αυτόν τον τύπο πλέξης η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από τις διαμήκεις θυσάνους ινών (warp) ενώ έχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία παραγωγής συνθέτων υλικών.

- Η Καλαθωτή πλέξη (Basket weave)



Αυτός ο τύπος πλέξης είναι μία παραλλαγή της απλής πλέξης στον οποίο δύο ή περισσότερες διαμήκεις θύσανοι διασταυρώνονται με δύο ή περισσότερους εγκάρδιους θυσάνους ινών. Η πλέξη αυτή είναι ισχυρότερη από την απλή αλλά λιγότερο σταθερή γιατί παρουσιάζει μία σχετική χαλαρότητα.

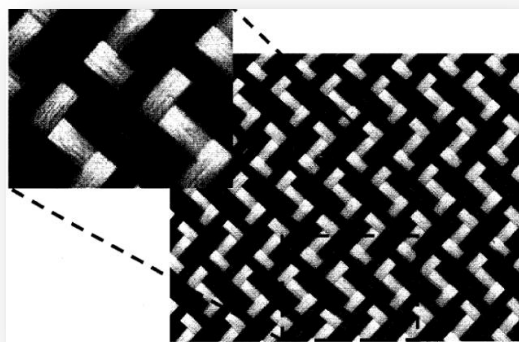
- Η πλέξη LENO



Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται ως μία "κλειδωμένη" πλέξη η οποία περιορίζει στο ελάχιστο την μετατόπιση των θυσάνων.

Στην πλέξη με διαγώνιες γραμμές κάθε "τέλος" και "κορυφή" περνάει πάνω από δύο ή τέσσερις διασταυρωμένες "κλωστές", έτσι δημιουργείται ένα σχέδιο από διαγώνιες γραμμές στην επιφάνεια του "πλεκτού" (βλ.Εικόνα 20). Σε όλες τις πλέξεις

το κοινό σημείο είναι οι διασταυρώσεις που γίνονται στις 90° , αλλά υπάρχει περίπτωση να γίνει 45° και 60° .

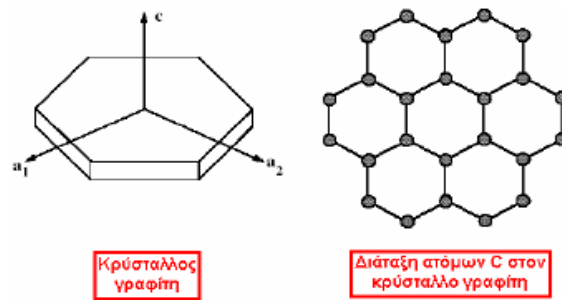


Εικόνα 20. Πλεκτό ύφασμα από ίνες άνθρακα.

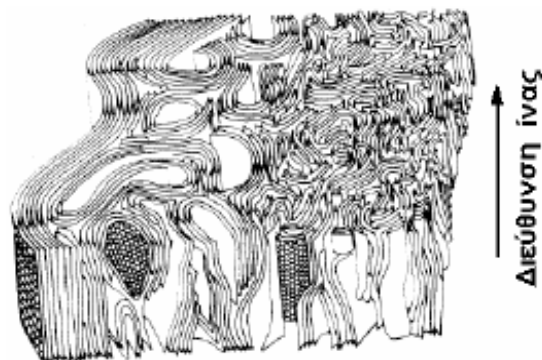
2.3.3 *Ίνες Άνθρακα*

Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα.

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων (βλ. Σχήμα. 29). Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση. Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 30.

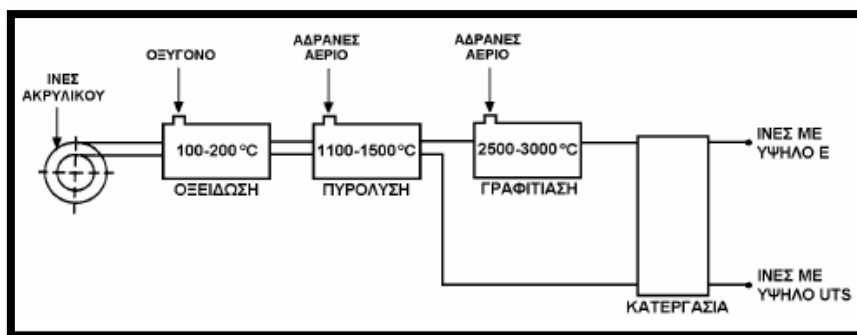


Σχήμα 28 Γραφίτικη δομή ατόμων C.



Σχήμα 29 Τυπική δομή ανθρακονήματος.

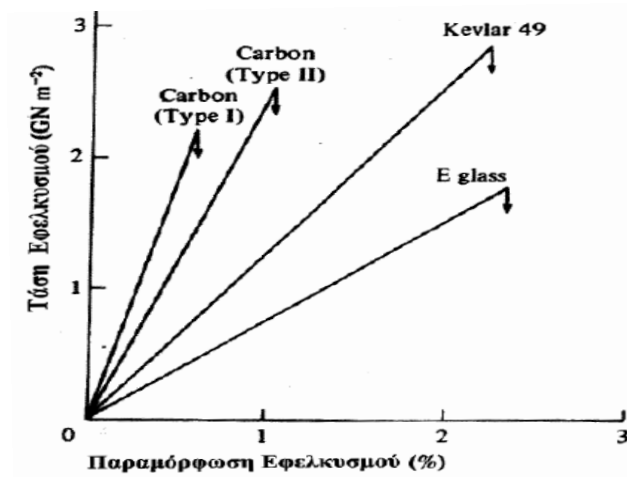
Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μετάξας (rayon) και πίσσα. Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια (βλ.Σχήμα 31).



Σχήμα 30 Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα.

- Στο πρώτο στάδιο: Γίνεται οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 οC), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Στο δεύτερο στάδιο: Γίνεται πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100- 1500οC. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Στο τρίτο στάδιο: Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm [54].

Γενικά οι ίνες παρουσιάζουν τέλεια ελαστική συμπεριφορά σχεδόν μέχρι την τάση θραύσεως. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των ινών τύπου I και II φαίνονται στο Διάγραμμα 1, όπου παρατηρούμε ότι οι ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας έχουν μικρότερη παραμόρφωση θραύσης (0,5%) σε αντίθεση με τις ίνες υψηλής αντοχής που παρουσιάζουν παραμόρφωση θραύσης (1%) κάτι που οφείλεται στη διαφορετική δομή των δύο τύπων (I και II). Οι ιδιότητες των ινών Τύπου I και II που βασίζονται στο PAN αλλά και των ινών γυαλιού και Kevlar παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 [52].



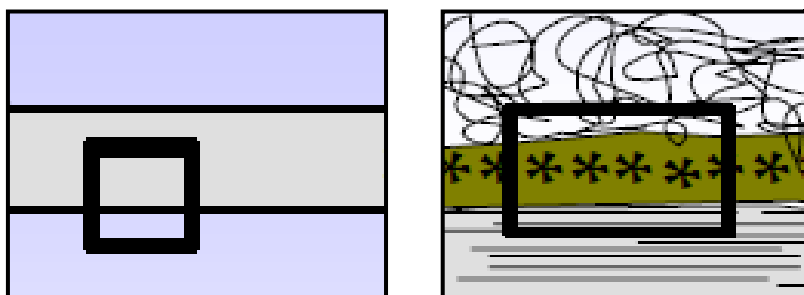
Διάγραμμα 1 Καμπύλες σ-ε διαφόρων τύπων ινών.

Πίνακας 5 Ιδιότητες ινών άνθρακα, γυαλιού και Kevlar.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	Carbon TYPE I	Carbon TYPE II	E-glass	Kevlar 49
Διάμετρος	μm	7,0 - 9,7	7,6 - 8,6	8 - 14	11,9
Πυκνότητα	10 ³ Kg m ⁻³	1,95	1,75	2,56	1,45
Μέτρο E	GN m ⁻²	390	250	76	130
Μέτρο E _⊥		12	20	76	—
Παραμ/ση θραύσης	%	0,5	1,0	1,8 - 3,2	2,2 - 2,8
Συντ/της Θερμικής Διαστολής	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	α : -0,5-1,2 α _⊥ : 7 - 12	-0,1 - -0,5 7-12	4,9 4,9	-2 59
Θερμική Αγωγιμότητα	W m ⁻¹ °C ⁻¹ //	105	24	1,04	0,04
Ευκαμψία με βάση την ευκαμψία των ινών Carbon TYPE I που θεωρείται =1	---	1,00	1,56	1,44	0,59
Αντοχή σε εφελκυσμό	GN m ⁻²	2,2	2,7	1,4 - 2,5	2,8 - 3,6
Ελάχιστη Ακτίνα Καμπυλότητας	mm	0,71	0,37	0,12	—

2.3.4 Η Διεπιφάνεια Ίνας-Μήτρας

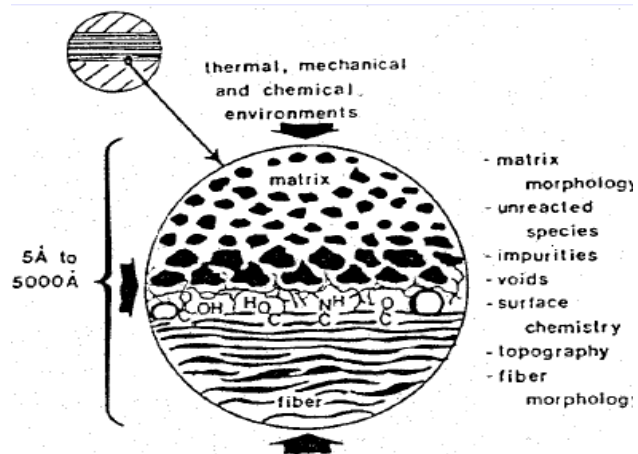
Με τον όρο διεπιφάνεια ορίζουμε την επιφάνεια που βρίσκεται ανάμεσα στην μήτρα και στην ίνα, κατά το μήκος της οποίας παρατηρείται ασυνέχεια σε μία ή περισσότερες ιδιότητες του υλικού όπως κρυσταλλικότητα, πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, συντελεστής θερμικής διαστολής, αντοχή, δυσθραυστότητα κ.ά. Αυτός είναι ένας ορισμός μακροσκοπικός όπου παρατηρούμε στη διεπιφάνεια απόλυτη ασυνέχεια. Εν αντιθέσει στη νανοκλίμακα θεωρούμε ότι η διεπιφάνεια περιβάλλει την ίνα και οι ασυνέχειες μεταβάλλονται ομαλά (βλ.Εικόνα 21). Το πάχος (είναι συνήθως της τάξης μερικών νανομέτρων) και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας της ίνας-μήτρας παίζουν σημαντικό ρόλο στις φυσικές, μηχανικές ιδιότητες και γενικά στην συμπεριφορά του συνθέτου εξαιτίας των τάσεων που αναπτύσσονται και μεταφέρονται στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας (βλ.Εικόνα 22).



Εικόνα 21 ¹⁴ Η κλίμακα της διεπιφάνειας μακροσκοπικά (αριστερά) και μακροσκοπικά (δεξιά).

Συγκεκριμένα η διεπιφάνεια είναι ο κυρίαρχος παράγοντας που ελέγχει την αντοχή στην διάδοση των ρωγμών ή δυσθραυστότητα των συνθέτων υλικών και την συμπεριφορά τους σε υγρό και διαβρωτικό περιβάλλον. Οι ισχυρές διεπιφάνειες συμβάλλουν στην ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο σύνθετο και συνεπώς στην καλύτερη μηχανική συμπεριφορά. Μια όμως πολύ ισχυρή διεπιφάνεια δρα αντισταθμιστικά στην ικανότητα του υλικού να προβάλλει αντίσταση στη θραύση. Αντίστροφα μία ασθενής διεπιφάνεια προκαλεί ανομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων αλλά επιτρέπει την ανάπτυξη φαινομένων έκλυσης ενέργειας [52-53].

¹⁴ <http://users.uoi.gr/csmlab>



Εικόνα 22 ¹⁵H διεπιφάνεια συνάρτηση του θερμικού, μηχανικού και χημικού περιβάλλοντος.

Μέρος II :Πείραμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :Πειραματική Διάταξη



3.1 Εισαγωγή

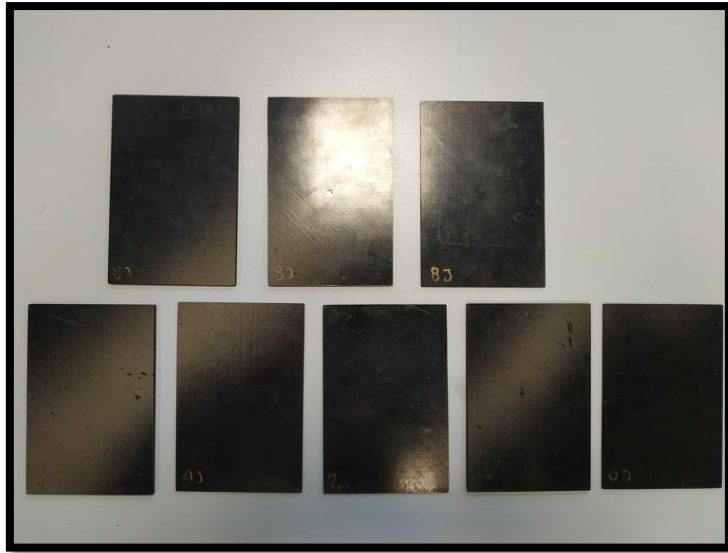
Στα πλαίσια του πειραματικού μέρους της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν σύνθετα δοκίμια πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, ευρέως γνωστά ως CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Συγκεκριμένα τα δοκίμια αυτά παρουσιάζουν πρότυπη αεροναυτική δομή με κάποια εσωτερική βλάβη (είτε αποκόλληση από κρούση είτε τεχνητή βλάβη). Για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό της βλάβης στα CFRP χρησιμοποιήθηκε η μη καταστροφική μέθοδος, της θερμογραφίας υπερύθρου.

3.2 Υλικά και Εργαστηριακός Εξοπλισμός

Τα υλικά της πειραματικής διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μία πρότυπη σύνθετη πλάκα με τεχνητά ελαττώματα καθώς και κάποια δοκίμια που παρουσίαζαν κάποια βλάβη από κρούση. Η σύνθετη πλάκα καθώς και τα δοκίμια είναι CFRP. Η πρότυπη πλάκα CFRP είχε εμβαδό 200mm x 200mm με τεχνητά ελαττώματα που τοποθετήθηκαν κατάλληλα για την επιθεώρηση με θερμογραφία υπερύθρου (βλ.Εικόνα 23). Τα τεχνητά ελαττώματα είναι από πέντε διαφορετικά ξένα αντικείμενα *μεγέθους* 3mm x 3mm (D5, D4), 6mm x 6mm (D3, D2), και 12mm x 12mm (D1) και *βάθους* D1 (1.75mm), D2 (1.4mm), D3 (1.05mm), D4 (0.7mm), D5 (0.35mm) τα οποία τοποθετήθηκαν σύμφωνα με τη διάταξη στην Εικόνα 24.

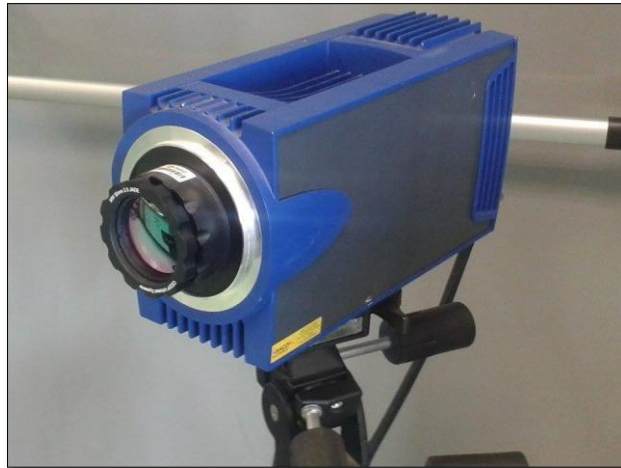


Εικόνα 23 Πρότυπη πλάκα CFRP με τεχνητά ελαττώματα.



Εικόνα 26 Πολύστρωτες πλάκες CFRP

Για τον προσδιορισμό των τεχνητών ελαττωμάτων της πρότυπης πλακάς CFRP αλλά και την ανίχνευση των αποκολλήσεων από την κρούση στις πολύστρωτες πλάκες CFRP χρησιμοποιήθηκε μία κάμερα υπέρυθρου τύπου Cedip Jade 510 της εταιρίας CEDIP (βλ.Εικόνα 25) και τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 27 Υπέρυθρη κάμερα θερμογραφίας τύπου Cedip Jade 510 εταιρίας CEDIP



Εικόνα 28 Συσκευή καταγραφής δεδομένων εργαστηρίου.

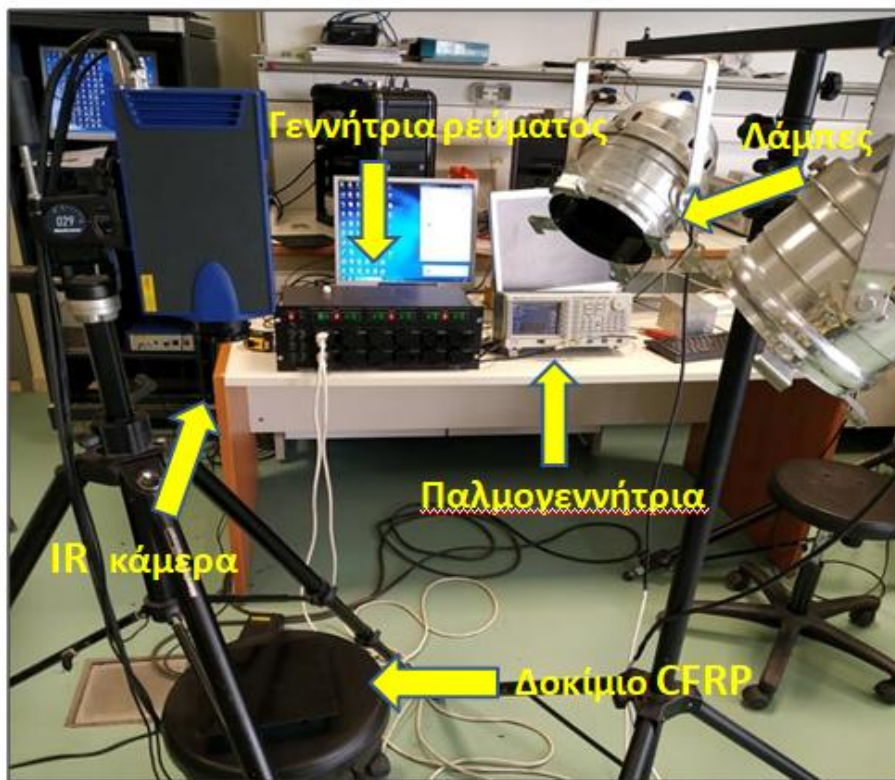
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά υπέρυθρης κάμερας Cedip Jade 510.

Χαρακτηριστικά Cedip Jade 510	
Φασματικό εύρος	3-5 μm
Τύπος αισθητήρα	Ψυχόμενος, Ίνδιο Αντιμόνιο [InSb]
Ανάλυση υπέρυθρων	320x240 εικονοστοιχεία
Ρυθμός αποτύπωσης εικόνων	50-150 Hz
Θερμική ευαισθησία/θόρυβο-ισοδύναμη θερμοκρασιακή διαφορά	< 25 mK
Εστιακό μήκος	50mm
Πεδίο εστίασης	11°x8°
Χωρική ανάλυση	0.5mRad
Εύρος θερμοκρασιών	5 °C – 120 °C

3.3 Πειραματική Διαδικασία

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ο μη καταστροφικός έλεγχος της θερμογραφίας υπέρυθρου για όλες τις πλάκες CFRP μέσω κατάλληλης διάταξης όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Εφαρμόστηκε η μέθοδος της lock-in θερμογραφίας (LT). Στη μέθοδο αυτή η θέρμανση επιτεύχθηκε με περιοδική εναπόθεση θερμότητας στην επιφάνεια της εξεταζόμενης περιοχής. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια

ρεύματος και μία παλμογεννήτρια (βλ.Εικόνα 28) και ρυθμίστηκαν τα θερμικά κύματα για τη διέγερση να είναι ημιτονοειδή με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 HZ και παράχθηκαν μέσω λαμπτήρων αλογόνου. Η lock-in θερμογραφία βασίζεται στην καταγραφή της ακριβούς χρονικής εξάρτησης ανάμεσα στο σήμα θερμοκρασίας και το σήμα αναφοράς. Το βάθος διείσδυσης της μεθόδου αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας της θερμικής διέγερσης, με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται η συχνότητα να περιορίζεται η θερμογραφική ανάλυση πολύ κοντά στην επιφάνεια.



Εικόνα 29 Διάταξη πειραματικής διαδικασίας με θερμογραφία υπέρυθρου.



Εικόνα 30 Γεννήτρια ρεύματος (α) και παλμογεννήτρια (β) εργαστηρίου.

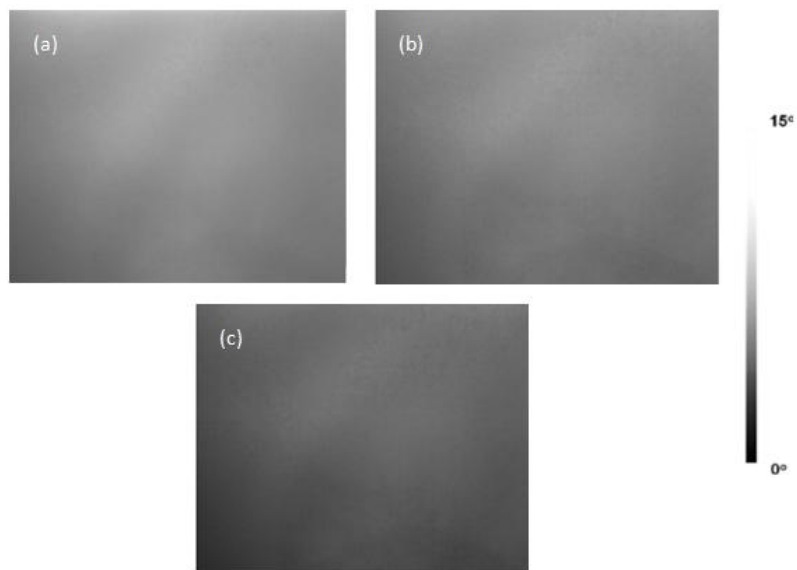
Χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη πηγή θέρμανσης η οποία παρείχε συνεχή και ομοιόμορφη θέρμανση κάτι που είναι απαραίτητο για τη χρήση της ενεργητικής θερμογραφίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ως εξωτερική διέγερση μια πηγή θερμικής διέγερσης για την επαγωγή θερμότητας στην περιοχή όπου γίνεται ανίχνευση των ελαττωμάτων και της βλάβης, η οποία οδηγεί στην διάδοση θερμικών κυμάτων μέσα στο υπό εξέταση δοκίμιο. Η εξωτερική διέγερση ήταν δύο λαμπτήρες αλογόνου (πυρακτώσεως) 1000W/ ανά λαμπτήρας που εστίαζαν πάνω στην επιφάνεια του δείγματος και η γωνία προσανατολισμού μεταξύ των λαμπτήρων αλογόνου και του δείγματος ήταν περίπου 60° σε σχέση με την κατακόρυφη κατεύθυνση.

Η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα IR και του υπό εξέταση δείγματος ήταν περίπου 55cm. Η απόσταση προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την ένταση των λαμπτήρων αλογόνου, την επίτευξη της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής αλλά και για να επιτευχθεί το καλύτερο πεδίο εστίασης δηλαδή η λήψη καλύτερων θερμογραφημάτων.

3.4 Αποτελέσματα

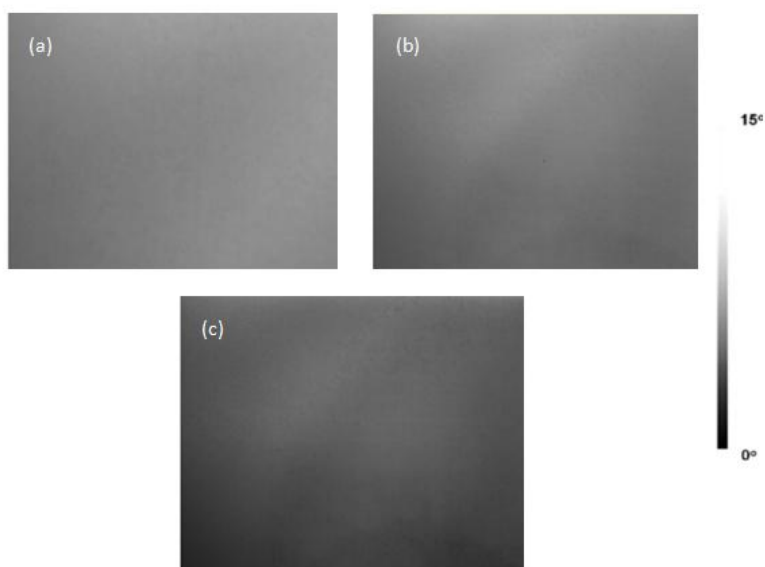
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που προηγήθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 3.3. Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ακολουθείται συνοπτικός σχολιασμός. Ωστόσο, συγκεντρωτική ανάπτυξη των συνολικών συμπερασμάτων παρουσιάζονται στο επόμενο μέρος της παρούσας διατριβής.

Στο πρώτο στάδιο έγιναν πειράματα σε πολύστρωτες πλάκες CFRP με διαφορετικό πάχος το οποίο εξαρτιόταν από τον αριθμό των στρώσεων, στα 18 φύλλα αντιστοιχούσε πάχος 3,9mm ενώ στα 9 φύλλα αντιστοιχούσε πάχος 1,65mm. Οι πλάκες αυτές παρουσίαζαν βλάβη από κρούση από 2,5 έως 8 Joule. Για την ανίχνευση της βλάβης χρησιμοποιήθηκε η lock-in θερμογραφία και για όλα τα δοκίμια ρυθμίστηκαν θερμικά κύματα για τη διέγερση να είναι ημιτονοειδή με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz.



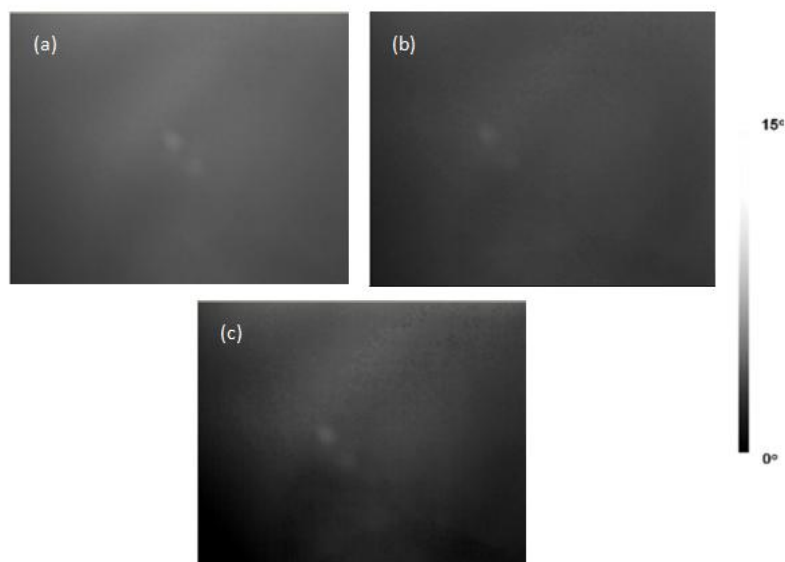
Σχήμα 31 Για 0Joule και πλάκα με 18 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

Στο Σχήμα 31 παρουσιάζονται τα θερμογραφήματα για μία ‘παρθένα’ πλάκα CFRP ως εικόνες αναφοράς που δεν έχει δεχθεί βλάβη κρούσης (0 Joule) και πάχος 3,9mm. Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz.



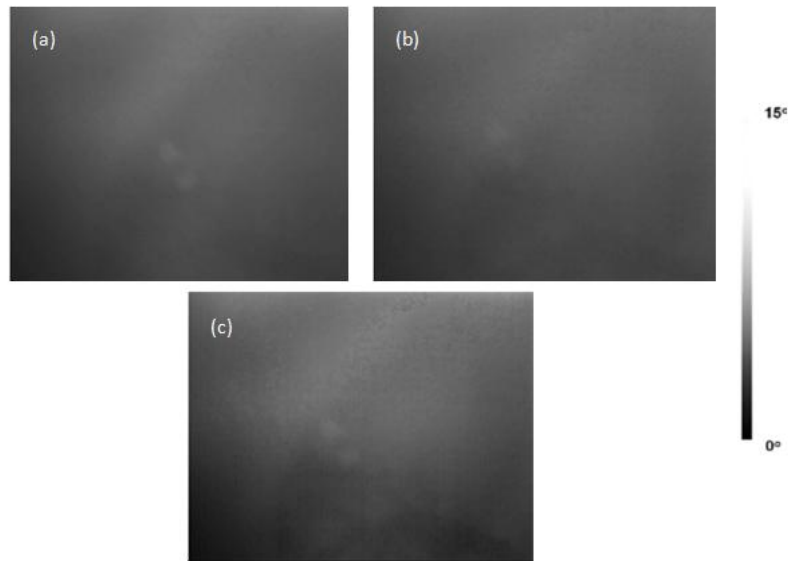
Σχήμα 32 Για 0Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

Στο Σχήμα 32 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμογραφίας ως εικόνες αναφοράς για μία ‘παρθένα’ πλάκα CFRP που δεν έχει δεχθεί βλάβη από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα (0 Joule) και πάχος 1,65mm. Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz.



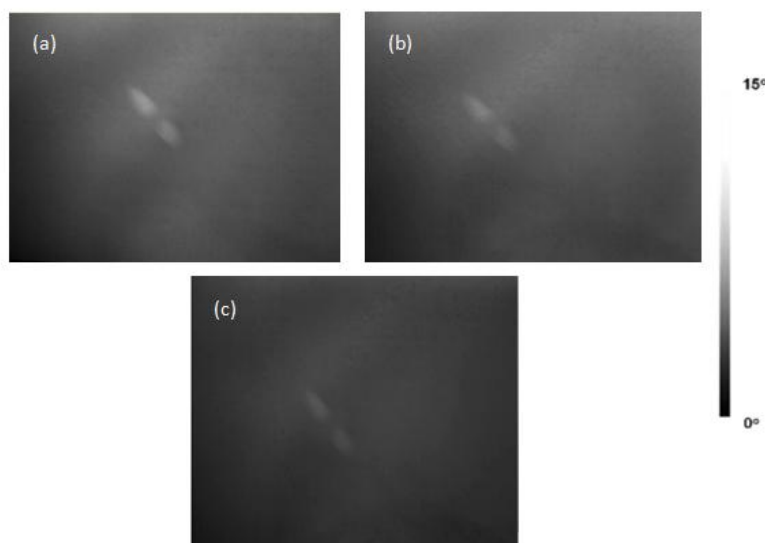
Σχήμα 33 Για 8Joule και πλάκα με 18 φύλλα A: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

Στο Σχήμα 33 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμογραφίας για μία πλάκα CFRP που έχει δεχθεί βλάβη από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα (8 Joule) και πάχος 3,9mm (18 φύλλα). Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz. Αν και το πάχος της πλάκας είναι μεγάλο παρατηρείται ότι σε όλες τις συχνότητες η βλάβη συλλαμβάνεται με ακρίβεια (με καλύτερη ανάλυση στην εικόνα (a))κάτι που αναμενόταν επειδή στην συγκεκριμένη πλάκα έχει επέλθει βλάβη με ενέργεια πολύ υψηλότερη (8 Joule) σε σχέση με τις άλλες πλάκες.



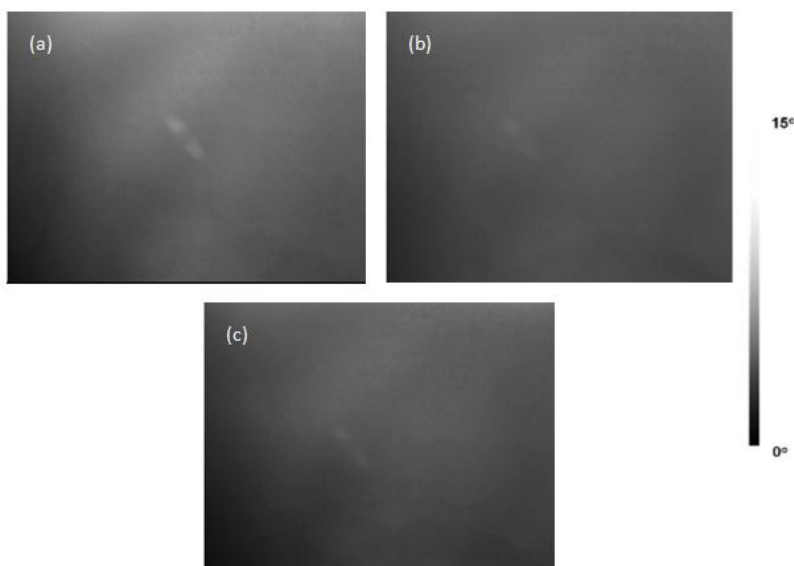
Σχήμα 34 Για 8Joule και πλάκα με 18 φύλλα B: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

Στο Σχήμα 34 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμογραφίας για μία πλάκα CFRP που έχει δεχθεί βλάβη από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα (8 Joule) και πάχος 3,9mm (18 φύλλα). Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz. Η συγκεκριμένη πλάκα χρησιμοποιήθηκε για επιβεβαίωση της παραπάνω πλάκας A. Οι εικόνες φάσης που λήφθηκαν είναι σε ποιότητα ανάλυσης και σε ακρίβεια της βλάβης ακριβώς ίδια με την πλάκα A.



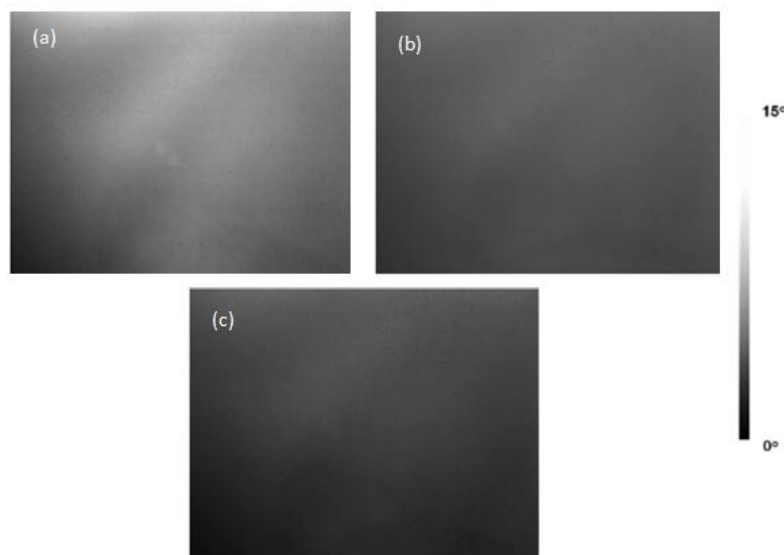
Σχήμα 35 Για 8Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμογραφίας για μία πλάκα CFRP που έχει δεχθεί βλάβη από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα (8 Joule) και πάχος 1,65mm (9 φύλλα). Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz. Στη συγκεκριμένη πλάκα το αποτύπωμα της βλάβης για τις χαμηλότερες συχνότητες είναι εμφανές (βλ. εικόνα (b)-(c)), όμως παρατηρείται μία εικόνα φάσης (a) για συχνότητα 0,1 Hz με πολύ καλή ακρίβεια και ανάλυση.



Σχήμα 36 Για 4Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

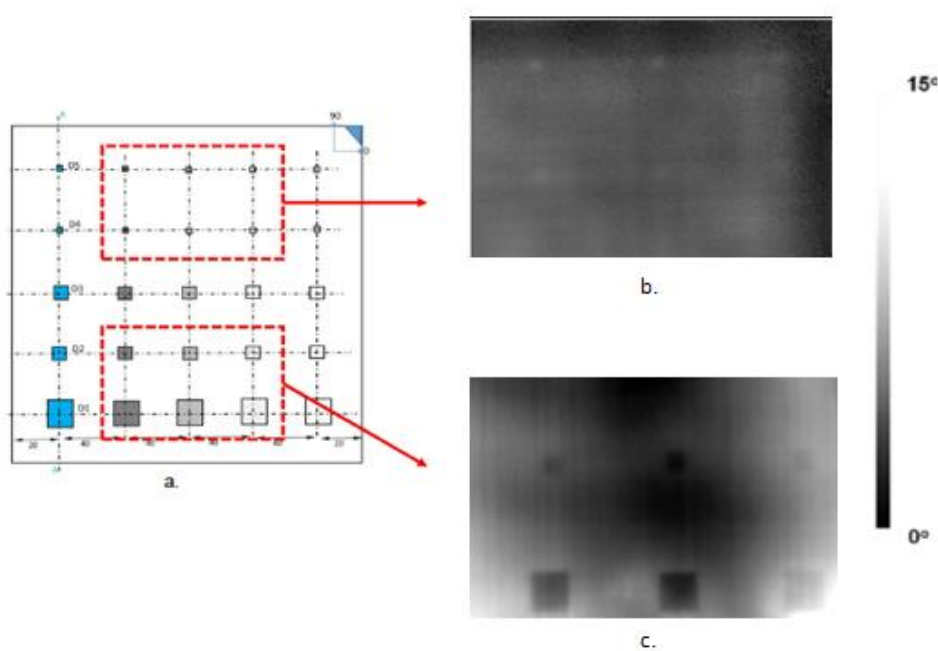
Στο Σχήμα 34 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμογραφίας για μία πλάκα CFRP που έχει δεχθεί βλάβη από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα (4 Joule) και πάχος 1,65mm (9 φύλλα). Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz. Αν και η ενέργεια κρούσης είναι σχετικά χαμηλή (4 Joule) παρατηρείται ότι για συχνότητα 1Hz εικόνα (c) η ζημιά αποκόλλησης είναι εμφανή όπως κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στην εικόνα (b) που αντιστοιχεί στα 0,5 Hz. Μία πολύ καλή εικόνα φάσης παρατηρείται για διέγερση με συχνότητα 0,1 Hz εικόνα (a) όπου το αποτύπωμα της βλάβης είναι φανερά ευδιάκριτο και με υψηλή ανάλυση.



Σχήμα 37 Για 2.5Joule και πλάκα με 9 φύλλα: (a) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,1Hz. (b) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 0,5Hz. (c) Εικόνα φάσης lock-in για συχνότητα 1Hz.

Στο Σχήμα 37 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμογραφίας για μία πλάκα CFRP που έχει δεχθεί βλάβη από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα (2,5 Joule) και πάχος 1,65mm (9 φύλλα). Χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή διέγερση με συχνότητες από 0,1 Hz - 0,5 Hz- 1 Hz. Αν και η ενέργεια κρούσης είναι πάρα πολύ χαμηλή παρατηρείται ότι η κατεστραμμένη περιοχή είναι ευδιάκριτη έχοντας και μία πολύ καλή ανάλυση όχι μόνο για συχνότητα 0,1 Hz εικόνα (a) αλλά και για μεγαλύτερες συχνότητες 0,5 Hz και 1 Hz.

Στο δεύτερο στάδιο έγιναν πειράματα σε πρότυπη σύνθετη πλάκα με τεχνητά ελαττώματα από πέντε διαφορετικά ξένα αντικείμενα *μεγέθους*: 3mm x 3mm (D5, D4), 6mm x 6mm (D3, D2), και 12mm x 12mm (D1) και *βάθους*: D1 (1.75mm), D2 (1.4mm), D3 (1.05mm), D4 (0.7mm). D5 (0.35mm). Για την ανίχνευση αυτών των ελαττωμάτων χρησιμοποιήθηκε lock-in θερμογραφία υπερύθρου και ρυθμίστηκε εξωτερική θερμική ημιτονοειδή διέγερση στα 0,1 Hz.



Σχήμα 38 Αξιολόγηση της Lock-in θερμογραφίας για την ανίχνευση ελαττωμάτων στη σύνθετη πλάκα CFRP. (a) Πρότυπη σύνθετη πλάκα με αντιπροσωπευτικά ελαττώματα διαφορετικού μεγέθους, (b)-(c) Εικόνες θερμογραφίας αντίστοιχων περιοχών.

Στο Σχήμα 38 (a) παρουσιάζεται η πρότυπη σύνθετη πλάκα CFRP με τα τεχνητά ελαττώματα διαφορετικού μεγέθους και βάθους. Οι εικόνες (b) και (c) παρουσιάζουν τις αντίστοιχες εικόνες φάσεις. Παρατηρείται ότι τόσο τα μικρά τεχνητά ελαττώματα (μεγέθους 3mm x 3mm και βάθους 0,35 έως 0,7 mm) όσο και τα μεγάλα τεχνητά ελαττώματα (μεγέθους 6mm x 6mm και 12mm x 12mm με βάθος 1,4 έως 1,75 mm) συλλαμβάνονται αποτελεσματικά με ικανοποιητική ανάλυση και ακρίβεια.

3.5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετήθηκε η δομική ακεραιότητα των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ευρέως γνωστά ως CFRP με χρήση μη καταστροφικού ελέγχου, της υπέρυθρης θερμογραφίας. Τα δοκίμια που μελετήθηκαν ήταν πολύστρωτες πλάκες CFRP πάχους 3,9mm και 1,65mm παρόμοιες με εκείνες των συνθέτων ατράκτων των αεροσκαφών. Στα δοκίμια αυτά είχε επέλθει βλάβη στην επιφάνεια από εκκρεμές χάλυβα με

ενέργεια από 2,5 έως 8 Joule. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της lock-in θερμογραφίας υπερύθρου με εξωτερική διέγερση ημιτονοειδή με συχνότητες από 0,1 έως 1 Hz.

Παρατηρήθηκε ότι για συχνότητα 0,1 Hz η ανάλυση των εικόνων φάσης για όλες τις πλάκες και με διαφορετικό πάχος αλλά και με βλάβη διαφορετικής ενέργειας είναι πολύ υψηλή με μεγάλη ακρίβεια. Κάτι που ήταν από την βιβλιογραφία αναμενόμενο γνωρίζοντας ότι χρησιμοποιώντας την lock-in θερμογραφία υπερύθρου όσο μειώνεται η συχνότητα τόσο μεγαλύτερο και ακριβέστερο είναι το ανιχνεύσιμο βάθος της βλάβης. Ακόμη παρατηρείται ότι όχι μόνο στις πλάκες με αποτύπωμα ενέργεια υψηλό αλλά και σε πολύ χαμηλές ενέργειες κρούσης η lock-in θερμογραφία μπορεί να αξιολογήσει αποτελεσματικά και με ακρίβεια τους διάφορους τύπους των ζημιών. Μελετήθηκε ακόμη πρότυπη πλάκα CFRP με τεχνητά ελαττώματα διαφορετικού μεγέθους και βάθους τοποθετημένα καταλλήλως χρησιμοποιώντας την lock-in θερμογραφία υπερύθρου. Η επιλογή της συχνότητας που ρυθμίστηκε ήταν στα 0,1 Hz και παρατηρήθηκε ότι σε όλα τα διαφορετικά μεγέθη και βάθη η lock-in θερμογραφία είναι η κατάλληλη μέθοδος για ανίχνευση ζημιών αφότου οι εικόνες φάσης που πάρθηκαν παρουσίαζαν πολύ καλή ανάλυση.

Βιβλιογραφία

- [1] Moropoulou, A., A. Karagiannis-Bakolas, K. C. Labropoulos, N. K. Katsiotis, M. Karoglou, E. T. Delegou, "Application of Non-Destructive Techniques to Assess the State of Hagia Sophia's Mosaics", *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration*, T. E. Matikas, ed., (SPIE, 2012).
- [2] Moropoulou, A., A. N. P., G. Haralampopoulos, Z. Marioli-Riga, "Non-Destructive Techniques in the Investigation of Aircraft Materials: Determination of Defects and Patches Assessment", *Advanced Nondestructive Evaluation Methods and Applications*, pp. 167-173, (SPIE, 2001).
- [3] Katsiotis, N. S., T. E. Matikas, A. Moropoulou, "Investigation of the Contribution Possibilities of Non-Destructive Methods of Testing for the Diagnosis and Quality Control of Building Materials with Emphasis Given on Sustainable Construction", *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration*, T. E. Matikas, ed., (SPIE, 2012).
- [4] "Nondestructive Evaluation and Quality Control", *Metals Handbook*, (ASM International, Metals Park, OH, 1989).
- [5] Kline, R. A., *Nondestructive Characterization of Materials*, Lancaster, PA: Technomic Publishing, 1992.
- [6] Mallick, P. K., *Nondestructive Tests*, in *Composites Engineering Handbook*, New York: Marcel Dekker, 1997.
- [7] Matikas, T. E., P. Karpur, D. A. Stubbs, S. Krishnamurthy, "Metal Matrix Composite Characterization Using Nondestructive Evaluation Methods", *Proc. of AIAA 1992 Mini-Symposium*, (Dayton, Ohio, 1992).
- [8] Matikas, T. E., E. Shell, P. D. Nicolaou, "Characterization of Fretting Fatigue Damage Using Nondestructive Approaches", *Proc. of SPIE Conference on Nondestructive Evaluation of Aging Materials and Composites III*, vol. 3585, pp. 2-10, 0277786X (ISSN), DOI: 10.1117/12.339835, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, Newport Beach, CA, USA, 1999).
- [9] McGonagle, W., *Nondestructive Testing*, New York: Gordon Breach, 1961.
- [10] Aggelis, D. G., E. Z. Kordatos, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, "Combined Use of Thermography and Ultrasound for the Characterization of Subsurface Cracks in Concrete", *Construction and Building Materials*, vol.24(10), pp. 1888-1897, (2010).
- [11] Geier, M. H., *Quality Handbook for Composite Materials*, London: Chapman & Hall, 1994.
- [12] Green, R. E., ed., "Nondestructive Characterization of Materials", vol.8, *International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials*, (Plenum, New York, 1998).
- [13] Green, R. E., K. J. Kozaczek, C. O. Ruud, eds., "Nondestructive Characterization of Materials", vol. I-IV, Plenum, New York, 1994.
- [14] Halmshaw, R., *Nondestructive Testing Handbook*, London: Chapman & Hall, 1991.
- [15] Hellier, C., *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 2nd Edition: McGraw-Hill, 2012.
- [16] Mix, P. E., *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*, 2nd Edition: Wiley-Interscience, 2005.

- [17] <http://www.extremetech.com/extreme/129764-tech-wrecks-lessons-from-some-of-the-biggest-hardwarescrew-ups/3>
- [18] Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, The Hague: Kluwer, 1986.
- [19] H. J. Shapuk, "Annual Book of ASTM Standards: E-7, Nondestructive Testing", ed., (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997).
- [20] Stanley, R. K., ed., "Special Nondestructive Testing Methods", vol. 9, Nondestructive Testing Handbook, P.O. Moore, P. McIntire, eds., (American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH, 1995).
- [21] Summerscales, J., "Manufacturing Defects in Fibre-Reinforced Plastic Composites", Insight, vol. 36(12), pp.936–942, (1994).
- [22] M. R. Mitchell, O. Buck, eds, "Cyclic Deformation, Fracture, and Nondestructive Evaluation of Advanced Materials", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1992.
- [23] Rose, J. L., A. A. Tseng, eds., "New Directions in Nondestructive Evaluation of Advanced Materials", vol., American Society of Mechanical Engineers, New York, 1988.
- [24] Rösner, H., N. Meyendorf, S. Sathish, T. E. Matikas, "Nondestructive Evaluation of Fatigue in Titanium Alloys", MRS, vol. 591, pp. 73-78, 2000.
- [25] Sharpe, R. S., Research Techniques in Nondestructive Testing, New York: Academic Press, 1984.
- [26] Shull, P. J., Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications, 1st Edition: RC Press, 2002.
- [27] Altergott, W., E. Henneke, eds., "Characterization of Advanced Materials", vol. 1, Plenum, New York, 1990.
- [28] Baaklini, G., N. Meyendorf, T. E. Matikas, R. S. Gilmore, eds., "Nondestructive Methods for Materials Characterization", vol. 591, Materials Research Society, 2000.
- [29] Boogaard, J., G. M. van Dijk, eds., "Nondestructive Testing: Proceedings of the 12th World Conference on Nondestructive Testing", vol., Elsevier Science, New York, 1989.
- [30] Bray, D. E., Non-Destructive Testing Techniques: New Dimensions in Engineering (Book 5): John Wiley & Sons, 1992.
- [31] Bray, D. E., R. K. Stanley, Nondestructive Evaluation, a Tool for Design, Manufacturing, and Service, New York: McGraw-Hill, 1989.
- [32] Matikas, T. E., D. G. Aggelis, "New Trends in Materials Nondestructive Characterization Using Surface Acoustic Wave Methodologies", Ultrasonic Waves, D. Santos, ed., ISBN: 978-953-51-0201-4, In Tech, 2011.
- [33] Wenk, S. A., R. C. McMaster, P. McIntire, Choosing NDT: Applications, Costs, and Benefits of Nondestructive Testing in Your Quality Assurance Program, Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [34] Ματίκας Θ., Αγγέλης Δ., "Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι", Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Vrije Univ. Brussel, <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3599>
- [35] <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/304Radiografik.html>
- [36] Φαρμάκη Σ., "Μελέτη διασποράς νανοσωλήνων άνθρακα και η επίδρασή της στις φυσικές και θερμικές ιδιότητες νανοενισχυμένων κονιαμάτων", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2017.

- [37] Δρ. Πανδώρα Ψυλλάκη, "ΕΝΟΤΗΤΑ Β: Αστοχία Υλικών και Κριτήρια Επιλογής Τους Για Μηχανολογικές Εφαρμογές", Τμήμα Μηχανολογίας, ΣΤΕΦ/ ΤΕΙ Πειραιά, Μάρτιος, 2013.
- [38] Σπανός Χρ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ., "Πρακτικά - Εγχειρίδια. Μέθοδοι για την Επιτόπου Αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των Υλικών", Τ.Ε.Ε. Αθήνα, Μάιος 2001.
- [39] Τζανή Α., "Γεωραντάρ", Phd Επίκουρος Καθηγητής Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.
- [40] Mechanics, Smart Sensors & Nondestructive Evaluation (MSS-NDE) Laboratory, University of Ioannina, <http://mss-nde.uoi.gr>.
- [41] Μαυρικάκης Ν. "Έλεγχος Υλικών με Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
- [42] Εγχειρίδιο Χρήστη Flir B Series και T Series. Publ. No. 1558798 Rev. a288 GREEK (EL) (2008)
- [43] Χατζηπαναγιώτου Π., "Μέτρηση και υπολογισμός θερμικών Χαρακτηριστικών εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [44] [http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20\(1\).pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20(1).pdf)
- [45] Κορδάτος Ε., "Μη Καταστροφικός Χαρακτηρισμός της Βλάβης Προηγμένων Υλικών Μέσω Ανάλυσης της Θερμο-Μηχανικής Συμπεριφοράς τους με Μεθόδους Θερμογραφίας", Διδακτορική Διατριβή, Επιβλέπων Καθηγ. Ματίκας Θ., Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2013.
- [46] Maldague X., "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing: Wiley", 2001.
- [47] Maldague XPV, Moore PO. "Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing: American Society for Nondestructive Testing", 2001.
- [48] Maclachlan Spicer JW, Kerns WD, Aamodt LC, Murphy JC. "Time-Resolved Infrared Radiometry of Multilayer Organic Coatings Using Surface and Subsurface Heating", Proc. of *SPIE 1467, Thermosense XIII*, pp. 311-321, (1991).
- [49] Osiander R, Maclachlan Spicer JW, Amos JM, "Thermal Inspection of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites", Proc. of *SPIE, Thermosense XX*, vol. 3361, pp. 339-349, (Orlando, FL, 1998).
- [50] Kordatos, E. Z., D. A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, T. E. Matikas, "Application of IR Thermography to Damage Characterization of Structures and the Diagnosis of Historic Monuments", Proc. of 5th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (ETNDT5), pp. 77-81, (Ioannina, Greece, 2011).
- [51] <https://www.flir.com>
- [52] Γ.Χ. Παπανικολάου, Δ. Μουζακίς, "Σύνθετα υλικά", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007.
- [53] Δάσιος Γ.Κ., "Χαρακτηρισμός της Θραυστομηχανικής Συμπεριφοράς Σύνθετων Υλικών Κεραμικής Μήτρας", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.
- [54] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf

- [55] Κ.Γ. Μπέλτσιος, "Επιστήμη και Τεχνολογία των Σύνθετων Υλικών", Εκδόσεις Τζιόλα.
- [56] Benzarti K., Colin X., "Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications", vol.12, pp.361-439, 2013.
- [57] Καραγιοβανάκη Σ., "Κατασκευή Σύνθετων Μαγνητικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας και Εφαρμογές τους", Διδακτορική Διατριβή, Επιβλέπων: Καθηγ. Ζουμπουλάκης Λ., Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2013.