



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

---

**ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ**  
**ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ**  
**ΘΕΡΜΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥΣ**  
**ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

---

**ΚΟΡΔΑΤΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2013**





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

---

**ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ**  
**ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ**  
**ΘΕΡΜΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥΣ**  
**ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

---

**ΚΟΡΔΑΤΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2013**





*«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Σχολής Επιστημών & Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2».*



**Ημερομηνία αίτησης του κ. ΚΟΡΔΑΤΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ: 8/5/2008**

**Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 28/5/2008**

**Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:**

Επιβλέπων: Ματίκας Θεόδωρος, Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.

Μέλη: Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ  
Πρασιανάκης Ιωάννης, Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

**Ημερομηνία ορισμού θέματος: 28/5/2008**

*«Ανάπτυξη θερμογραφίας lock-in για την ανάλυση και τον προσδιορισμό θερμο-μηχανικών μηχανισμών σε υλικά και δομές»*

**Αλλαγή τίτλου: 27/1/2009**

*«Μη καταστροφικός χαρακτηρισμός της βλάβης προηγμένων υλικών μέσω ανάλυσης της θερμο-μηχανικής συμπεριφοράς τους με μεθόδους θερμογραφίας»*

**Ημερομηνία Ανασυγκρότησης Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής : 27/1/2009**

**Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:**

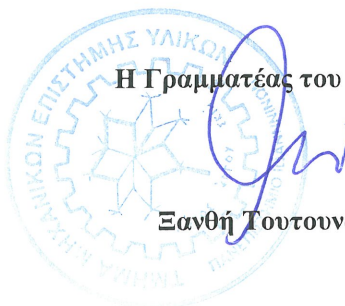
Επιβλέπων: Ματίκας Θεόδωρος, Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.

Μέλη: Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ  
Παϊπέτης Αλκιβιάδης, Αν. Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.

**ΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ : 20/12/2012**

Ματίκας Θεόδωρος	Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.
Μοροπούλου Αντωνία	Καθηγήτρια Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
Παϊπέτης Αλκιβιάδης	Αν. Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.
Χαραλαμπάκης Νικόλαος	Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ
Χαραλαμπόπουλος Αντώνιος	Αν. Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ
Μπάρκουλα Νεκταρία-Μαριάνθη	Επ. Καθηγήτρια Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.
Δάσιος Κωνσταντίνος	Λέκτορας Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 15/4/2013

  
Η Γραμματέας του Τμήματος  
Ξανθή Τουτουτζόγλου



Αφιερωμένο στην οικογένειά μου...



## *Περίληψη*

Η ανάγκη εφαρμογής αξιόπιστων μη καταστροφικών μεθόδων για τον έλεγχο υλικών και δομών αυξάνεται συνεχώς, καθώς συμβάλλουν στην αειφορία και στην ανθεκτικότητα των κατασκευών και δεν παρουσιάζουν τους περιορισμούς των συμβατικών καταστροφικών μεθόδων. Τα πλεονεκτήματα των μη καταστροφικών μεθόδων συνίστανται στο ότι έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής σε όλες τις φάσεις της δομής / κατασκευής και μπορούν να χαρακτηρίζουν πολλές ιδιότητες των υλικών και να αποτιμήσουν τη βλάβη τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνειά τους, με αποτέλεσμα να καθιστούν δυνατό τον προσδιορισμό της εναπομένουσας ζωής και την πρόβλεψη της επερχόμενης αστοχίας τους.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η μη καταστροφική αξιολόγηση της βλάβης υλικών μέσω ανάλυσης της θερμό-μηχανικής συμπεριφοράς τους με χρήση μη καταστροφικών μεθόδων. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου αναπτύχθηκαν νέες καινοτόμες μεθοδολογίες βασισμένες στην υπέρυθρη θερμογραφία και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν τόσο με τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους όσο και με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής. Η παρούσα έρευνα χωρίζεται σε δυο βασικές κατευθύνσεις: (α) την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της υγιούς λειτουργίας υλικών που υποβάλλονται σε κυκλική μηχανική καταπόνηση και την ανάπτυξη παραμέτρου (μετρικής βλάβης) για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου βλάβης, και (β) τη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού στη θραύση, η οποία σχετίζεται με την ανίχνευση, την απεικόνιση της διαδρομής και το ρυθμό διάδοσης επιφανειακής και υπό-επιφανειακής ρωγμής.

Μελετήθηκε, λοιπόν, τόσο η ανάπτυξη όσο και η διάδοση μίας ρωγμής σε υλικά που υποβάλλονται σε κυκλική μηχανική φόρτιση και χαρακτηρίστηκε το επίπεδο βλάβης των υλικών ως συνάρτηση των κύκλων κόπωσης προσδιορίζοντας τις θερμικές παραμέτρους τους. Επιπλέον, καθορίστηκε το όριο κόπωσης μέσω μίας νέας μεθοδολογίας που συνδυάζει δύο μη καταστροφικές μεθόδους, την υπέρυθρη θερμογραφία και την ακουστική εκπομπή. Αναπτύχθηκε επίσης μία μεθοδολογία βασισμένη στην υπέρυθρη θερμογραφία για τον χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακής βλάβης σε κατασκευές από σκυρόδεμα και εφαρμόστηκε σε υφιστάμενη κατασκευή μεγάλης ιστορικής σημασίας για την ελληνική πολιτιστική κληρονομιά. Τέλος, αναπτύχθηκε μια νέα καινοτόμος τεχνική lock-in θερμογραφίας ικανή να ανιχνεύσει υπό-επιφανειακή βλάβη σε υλικά.





## *Abstract*

The need for availability of reliable nondestructive methods for evaluation of materials and structures is currently increasing due to the fact that nondestructive evaluation (NDE) contributes to the sustainability and enhanced durability of constructions surpassing the disadvantages of destructive techniques. The advantages of NDE methods include their ability of application during the lifetime of a structure or construction, the characterization of many material properties and the assessment of surface and subsurface damage, resulting in the determination of the residual life and the prediction of upcoming failure.

The objective of this thesis is the evaluation of material damage through analysis of the thermo-mechanical behavior using nondestructive techniques. In order to achieve this goal, innovative methodologies based on infrared thermography have been developed, then benchmarked with conventional methods as well as acoustic emission. This research is divided into two main directions: (a) Real-time health monitoring of materials subjected to cyclic mechanical loading and the establishment of a parameter to quantify the level of damage (damage metrics), and (b) study of the material's behavior at fracture, which is associated with the determination of crack initiation and crack growth rate, as well as the prediction and monitoring of the crack path.

Therefore, crack initiation and propagation in materials subjected to cyclic loading were studied and the level of material's damage as a function of fatigue cycles was characterized by determining its thermal parameters. Moreover, the fatigue limit was determined by a novel methodology combining two nondestructive methods, infrared thermography and acoustic emission. A methodology, based on infrared thermography for the characterization of sub-surface damage in concrete structures was also developed and then was applied to a cultural heritage monument. Finally, an innovative quantitative lock-in thermography technique, able of detecting sub-surface defects in materials, was developed.



## *Ευχαριστίες*

Αισθάνομαι, ιδιαίτερα, την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ματίκα Θεόδωρο, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για την αγάπη με την οποία στήριξε την εργασία αυτή από την πρώτη στιγμή, την πολύτιμη βοήθεια και τη συνεχή ενθάρρυνση του. Η συνεισφορά του ήταν καθοριστική, καθώς με τις γνώσεις του και την ανεκτίμητη καθοδήγηση του συντέλεσε στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης έρευνας. Η συνεργασία μαζί του αποτέλεσε εμπειρία ζωής.

Ευχαριστώ πολύ, επίσης, τον κ. Παϊπέτη Αλκιβιάδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για το αμέριστο ενδιαφέρον που έδειξε, καθώς και την υποστήριξή του σε όλα τα στάδια της παρούσας διατριβής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την κ. Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την άριστη συνεργασία μας και για την τιμή που μου έκανε να είναι μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου.

Θα ήταν παράλειψη να μην αναφέρω τη συνεισφορά του κ. Δάσιου Κωνσταντίνου, Λέκτορα του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για τη σημαντική συνεισφορά γνώσεων και για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διδακτορικής έρευνας.

Να ευχαριστήσω επίσης, την κ. Μπάρκουλα Νεκταρία-Μαριάνθη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων, τον κ. Χαραλαμπόπουλο Αντώνιο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. του Ε.Μ.Π. και τον κ. Χαραλαμπάκη Νικόλαο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. για την υποστήριξη και τις πολύτιμες υποδείξεις.

Επιπλέον ευχαριστώ τον κ. Αγγέλη Δημήτριο, του Vrije Universiteit Brussel (VUB) για τη συνεργασία που είχαμε και τη συμβολή του σχετικά με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα του ΤΜΕΥ Δήμητρα Σουλιώτη που με ανέχθηκε και μου συμπαραστάθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και κατά τη συγγραφή, αλλά και για την καθημερινή ψυχολογική και ερευνητική της υποστήριξη. Η γνωριμία μας αποτέλεσε σταθμό για τη ζωή μου.

Αξίζει ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα του ΤΜΕΥ και φίλο Δημήτρη Έξαρχο για την πολύτιμη βοήθεια του στην πραγματοποίηση των πειραμάτων, καθώς και για τις τόσο επικοινωνητικές ερευνητικές, και όχι μόνο, συζητήσεις μας.

Καθοριστική ήταν επίσης η συνεισφορά του κ. Κανδύλη Λεωνίδα, ΕΤΕΠ του ΤΜΕΥ που με την τεχνική του υποστήριξη ήταν δίπλα μου κάθε φορά που τον χρειάστηκα.

Επίσης, δεν νοείται να ξεχάσω τους συνεργάτες και παράλληλα φίλους Σωτήρη Γραμματικό, Γιώργο Γκίκα, Τάσο Μπαλάσκα, Θύμιο Τάτση και Μιχάλη Ντόβα, καθώς και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων & Μη Καταστροφικού Ελέγχου (MSS-NDE) για την αλληλοκατανόηση και αλληλοσυμπαράστασή τους.

Ευχαριστώ πολύ την εταιρεία MC-21 για τα δοκίμια A359/SiC<sub>p</sub> που προσέφερε.

Τέλος, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, στους γονείς μου Ζαχαρία και Ειρήνη και την αδερφή μου Θεοδότη, που με την κατανόηση τους, την υποστήριξη τους και την αδιάλειπτη συμπαράστασή τους τόσο σε ψυχολογικό αλλά και σε υλικό επίπεδο, κατάφερα να ολοκληρώσω τη διδακτορική μου διατριβή.

# Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>27</b>
1.1. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής .....	27
1.2. Ανάπτυξη της εργασίας .....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ .....</b>	<b>33</b>
2.1. Εισαγωγή .....	33
2.2. Κατηγοριοποίηση των μη καταστροφικών μεθόδων .....	34
2.2.1. Οπτικός έλεγχος και διεισδυτικά υγρά .....	36
2.2.2. Μαγνητικά σωματίδια .....	37
2.2.3. Ραδιογραφία .....	37
2.2.4. Δινορεύματα .....	38
2.2.5. Υπέρηχοι .....	38
2.3. Ακουστική Εκπομπή .....	39
2.3.1. Ιστορική αναδρομή .....	39
2.3.2. Βασικές θεωρητικές αρχές της Ακουστικής Εκπομπής .....	40
2.3.3. Αξιολόγηση των σημάτων Ακουστικής Εκπομπής .....	41
2.3.4. Οργανολογία Ακουστικής Εκπομπής .....	43
2.3.5. Δυνατότητες της μεθόδου της ΑΕ .....	44
2.4. Υπέρυθρη θερμογραφία .....	46
2.4.1. Εισαγωγικά .....	46
2.4.1.1. Ιστορικό της τεχνολογίας υπερύθρου .....	46
2.4.1.2. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .....	47
2.4.1.3. Μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας .....	49
2.4.2. Εισαγωγή στη θερμογραφία .....	51
2.4.2.1. Θεωρία θερμικών κυμάτων .....	52
2.4.2.2. Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία .....	53
2.4.3. Τεχνικές Θερμογραφίας .....	58
2.4.3.1. Θερμογραφία παλμού (PT) .....	58

2.4.3.2. Θερμογραφία lock-in (LT) .....	60
2.4.3.3. Θερμογραφία φάσης παλμού (PPT) .....	65
2.4.3.4. Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (SH) .....	66
2.4.3.5. Θερμογραφία με δονήσεις (VT) .....	66
2.4.4. Θερμικές κάμερες υπερύθρου .....	67
<b>2.5. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....</b>	<b>69</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

### **Ανάπτυξη μη καταστροφικών μεθόδων .....**

#### **3.1. Παρακολούθηση Ρωγμής .....**

3.1.1. Σκοπός – Αντικείμενο .....	73
3.1.2. Εισαγωγή .....	75
3.1.3. Συμπεριφορά ανάπτυξης ρωγμής .....	80
3.1.3.1. Θεωρία απεικόνισης τάσεων με θερμογραφία lock-in .....	80
3.1.3.2. Υλικά και μηχανικές δοκιμές .....	84
3.1.3.3. Μεθοδολογία θερμογραφίας lock-in .....	89
3.1.3.4. Μεθοδολογία Ακουστικής Εκπομπής .....	94
3.1.3.5. Αποτελέσματα και συζήτηση .....	95
3.1.4. Χαρακτηρισμός της θραύσης σε πραγματικό χρόνο .....	108
3.1.4.1. Μελέτη θραύσης σύνθετων κεραμικών υλικών γεωμετρίας DEN .....	108
3.1.4.2. Μελέτη θραύσης σύνθετων κεραμικών υλικών γεωμετρίας CT .....	120
3.1.5. Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	132
3.1.6. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	134

#### **3.2. Ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθοδολογίας για την ποσοτικοποίηση της βλάβης μεταλλικών υλικών .....**

3.2.1. Σκοπός - Αντικείμενο .....	139
3.2.2. Εισαγωγή .....	139
3.2.3. Υλικά .....	140
3.2.4. Πειραματική διάταξη και διαδικασία .....	142
3.2.5. Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	145
3.2.6. Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	151
3.2.7. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	152

<b>3.3. Ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθοδολογίας για τον ταχύ προσδιορισμό του ορίου κόπωσης</b> .....	<b>155</b>
3.3.1. Σκοπός – Αντικείμενο .....	155
3.3.2. Εισαγωγή .....	155
3.3.3. Υλικά .....	157
3.3.4. Μεθοδολογία προσδιορισμού ορίου κόπωσης – Πειραματική διαδικασία .....	160
3.3.5. Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	163
3.3.5.1. Χάλυβας <i>AISI 1006</i> .....	163
3.3.5.2. Αλουμίνιο <i>1050 H16</i> .....	166
3.3.5.3. Σύνθετο κεραμικό υλικό <i>SiC/BMAS</i> .....	170
3.3.5.4. Σύνθετα μεταλλικά υλικά <i>A359/SiC<sub>p</sub></i> .....	173
3.3.6. Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	179
3.3.7. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	181
<b>3.4. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον χαρακτηρισμό της υπό-επιφανειακής βλάβης</b> .....	<b>183</b>
3.4.1. Σκοπός – Αντικείμενο .....	183
3.4.2. Εισαγωγή .....	184
3.4.3. Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπέρυθρης θερμογραφίας για το χαρακτηρισμό υπο-επιφανειακών ρωγμών σε σκυρόδεμα .....	187
3.4.3.1. Υλικά και πειραματική διαδικασία .....	188
3.4.3.2. Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	192
3.4.4. Αξιολόγηση φθοράς της Μονής «Μολυβδοςκεπάστου» .....	197
3.4.4.1. Μέθοδοι υπέρυθρης θερμογραφίας (θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση, θερμογραφία φάσης παλμού και οπτική <i>lock-in</i> θερμογραφία) .....	197
3.4.4.2. Πειραματική διάταξη και διαδικασία .....	199
3.4.4.3. Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	200
3.4.5. Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	208
3.4.6. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	209
<b>3.5. Ανάπτυξη νέας μη καταστροφικής τεχνικής «θερμοηλεκτρικής <i>lock-in</i> θερμογραφίας»</b> .....	<b>213</b>
3.5.1. Σκοπός – Αντικείμενο .....	213
3.5.2. Εισαγωγή .....	213
3.5.3. Αρχή λειτουργίας της «θερμοηλεκτρικής <i>lock-in</i> θερμογραφίας» .....	214
3.5.4. Πειραματική διάταξη – Ανάπτυξη τεχνικής .....	216
3.5.5. Εφαρμογή της «θερμοηλεκτρικής <i>lock-in</i> θερμογραφίας» .....	219

3.5.6. Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	223
3.5.7. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου .....	224

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... 227**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ  
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ..... 233**

5.1. Λίστα δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές .....	233
5.2. Λίστα δημοσιεύσεων σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων .....	236



## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1. Βασικοί τύποι σημάτων Ακουστικής Εκπομπής .....	41
Εικόνα 2.2. Αρχή της μέτρησης της Ακουστικής Εκπομπής .....	42
Εικόνα 2.3. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. 1: Ακτίνες Χ. 2: Υπεριώδεις (UV). 3: Ορατό. 4: Υπέρυθρες (IR). 5: Μικροκύματα. 6: Ραδιοκύματα .....	48
Εικόνα 2.4. Αρχή της θερμογραφίας .....	51
Εικόνα 2.5. Διάγραμμα μέλαν σώματος και πραγματικής επιφάνειας .....	56
Εικόνα 2.6. Η έννοια του lock-in κατά αναλογία με ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα ..	60
Εικόνα 2.7. Αρχή του υπολογισμού των εικόνων "φάσης", "εύρους", και "θερμοκρασίας" .....	62
Εικόνα 2.8. Λειτουργία του lock-in ενισχυτή .....	63
Εικόνα 2.9. Είδη lock-in θερμογραφίας .....	65
Εικόνα 2.10. Υπέρυθρες θερμικές κάμερες .....	67
Εικόνα 3.1.1. Τύποι ρωγμών και αντίστοιχα σήματα AE .....	78
Εικόνα 3.1.2. Απεικόνιση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης της ρωγμής στη διεπιφάνεια μήτρας/ενίσχυσης .....	79
Εικόνα 3.1.3. Αρχή λειτουργίας θερμογραφίας lock-in .....	84
Εικόνα 3.1.4. Σύνθετο κράμα αλουμινίου/SiC.....	86
Εικόνα 3.1.5. Φούρνος υψηλών θερμοκρασιών .....	87
Εικόνα 3.1.6. Διαδικασία θερμικής κατεργασίας «T6» .....	87
Εικόνα 3.1.7. Διαδικασία θερμικής κατεργασίας «HT2» .....	88
Εικόνα 3.1.8. Γεωμετρία δοκιμίου .....	88
Εικόνα. 3.1.9. Σχηματική λειτουργία επιμηκυνσιόμετρου (Extensometer) και πραγματική φωτογραφία της διάταξης. ....	89
Εικόνα 3.1.10. Πειραματική διάταξη .....	90
Εικόνα 3.1.11. Υπέρυθρη θερμική κάμερα .....	90
Εικόνα 3.1.12.α. Θερμογράφημα με γραμμές αναφοράς .....	92
Εικόνα 3.1.12.β. Διάγραμμα τάσης σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής αναφοράς ...	92
Εικόνα 3.1.12.γ. Σχηματική αναπαράσταση των 3 τύπων ρωγμής σε δοκίμιο «CT» .....	93
Εικόνα 3.1.12.δ. Διάγραμμα μέγιστης τάσης κατά μήκος μιας γραμμής σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης .....	93

Εικόνα 3.1.12.ε. Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου «CT» που απεικονίζει τη διαδρομή της ρωγμής .....	94
Εικόνα 3.1.13. Φωτογραφία των αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο .....	95
Εικόνα 3.1.14. Διάγραμμα μέγιστης τάσης κατά μήκος μιας γραμμής σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης .....	96
Εικόνα 3.1.15. Θερμογράφημα με δεκαπέντε γραμμές αναφοράς .....	96
Εικόνα 3.1.16. Διάγραμμα μήκους ρωγμής σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης ....	97
Εικόνα 3.1.17. Σύγκριση θερμογραφίας lock-in με τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας για το AA 7075 – T6 .....	98
Εικόνα 3.1.18. Θερμογραφήματα που απεικονίζουν το τασικό πεδίο και την διάδοση της ρωγμής .....	99
Εικόνα 3.1.19. Σύγκριση θερμογραφίας lock-in με τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας για το A359/SiC για της θερμικές κατεργασίες T6, HT1 και T1 .....	100
Εικόνα 3.1.20. Απεικόνιση ρωγμής α) στους 2000 κύκλους, β) στους 6320 κύκλους, γ) στους 6420 κύκλους και δ) στους 9763 κύκλους .....	101
Εικόνα 3.1.21. Διάγραμμα τάσης σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής αναφοράς «12» για τον 9583 κύκλο κόπωσης .....	102
Εικόνα 3.1.22. Απεικόνιση ρωγμής με τη μέθοδο της θερμογραφίας lock-in και σύγκριση με την πραγματική ρωγμή. ....	102
Εικόνα 3.1.23. Θερμογράφημα απεικόνισης διαδρομής της ρωγμής .....	103
Εικόνα 3.1.24. Ιστορικό ρυθμού διάδοσης ρωγμής και σημάτων ΑΕ .....	104
Εικόνα 3.1.25. Ιστορικό ρυθμού διάδοσης ρωγμής και (α) διάρκειας σημάτων ΑΕ, (β) χρόνου ανύψωσης .....	104
Εικόνα 3.1.26. Ιστορικό ρυθμού διάδοσης ρωγμής και της τιμής RA .....	105
Εικόνα 3.1.27. Δοκίμιο μετά την αστοχία .....	106
Εικόνα 3.1.28. Τιμές RA σε σχέση με το μήκος ρωγμή υπολογισμένο από τη θερμογραφία lock-in .....	107
Εικόνα 3.1.29. Γεωμετρία δοκιμίων τύπου «DEN» .....	108
Εικόνα 3.1.30. Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο των δοκιμίων τύπου «DEN» .....	109
Εικόνα 3.1.31. Τυπική καμπύλη φορτίου και παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2 .....	110
Εικόνα 3.1.32. Τυπικό θερμογράφημα δοκιμίου με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35 .....	110
Εικόνα 3.1.33. Διάγραμμα ΔΤ και φορτίου σε σχέση με το χρόνο για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35 .....	111

Εικόνα 3.1.34 Θερμογραφήματα για κάθε κύκλο φόρτισης για δοκίμιο λόγου εσοχής/πλάτους 0.35 .....	112
Εικόνα 3.1.35 (i,ii). Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής και διάγραμμα φορτίου – χρόνου του τελευταίου κύκλου φόρτισης (δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35) .....	114
Εικόνα 3.1.36. (i,ii). Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής και διάγραμμα φορτίου – χρόνου του τελευταίου κύκλου φόρτισης (δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2) .....	116
Εικόνα 3.1.37. (i,ii). Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής και διάγραμμα φορτίου – χρόνου του τελευταίου κύκλου φόρτισης (δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2) .....	117
Εικόνα 3.1.38. Μέγιστες διαφορές θερμοκρασίες για τους δύο τύπους εσοχών .....	118
Εικόνα 3.1.39. Διάγραμμα RA και ΔT σε σχέση με το χρόνο .....	119
Εικόνα 3.1.40. Γεωμετρία CMC τύπου CT .....	121
Εικόνα 3.1.41. Πειραματική διάταξη προσδιορισμού μήκους ρωγμής .....	122
Εικόνα 3.1.42. Τυπικό θερμογράφημα δοκιμίου γεωμετρίας «CT» .....	123
Εικόνα 3.1.43. Θερμογράφημα με 50 γραμμές αναφοράς .....	125
Εικόνα 3.1.44. Τυπική καμπύλη φορτίου και επιμήκυνσης σε σχέση με το χρόνο για την κυκλική φόρτιση δοκιμίου τύπου «CT» .....	126
Εικόνα 3.1.45. Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών και επιμήκυνσης σε σχέση με το χρόνο .....	127
Εικόνα 3.1.46. Απεικόνιση μήκους ρωγμής με τη μέθοδο της θερμογραφίας .....	128
Εικόνα 3.1.47. Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής για σύνθετα κεραμικά «cross-ply SiC/BMAS» .....	129
Εικόνα 3.1.48. Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού μήκους ρωγμής.....	130
Εικόνα 3.1.49. Διάγραμμα της συσσωρευμένη ενέργειας των ακουστικών σημάτων και της παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο .....	131
Εικόνα 3.2.1. Πειραματική διάταξη .....	142
Εικόνα 3.2.2. Γεωμετρία δοκιμίου «dog bone» .....	143
Εικόνα 3.2.3. Συνεχής κυκλική φόρτιση .....	143
Εικόνα 3.2.4. Επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση .....	144
Εικόνα 3.2.5. Περιοχή θερμογραφικού ελέγχου .....	145
Εικόνα 3.2.6. Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης για την πρώτη πειραματική διάταξη .....	146
Εικόνα 3.2.7. Θερμογραφήματα των τριών περιοχών. i) Περιοχή Α (50 κύκλοι), ii) Περιοχή Β (200 κύκλοι), iii) Περιοχή Β (400 κύκλοι), iv) Περιοχή Γ (750 κύκλοι) .....	147

Εικόνα 3.2.8. Διάγραμμα μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης για τη δεύτερη πειραματική διάταξη .....	148
Εικόνα 3.2.9. Θερμογραφήματα των τριών περιοχών κατά την επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση. i) Περιοχή 1 (100 κύκλοι), ii) Περιοχή 2 (200 κύκλοι), iii) Περιοχή 2 (700 κύκλοι), iv) Περιοχή 3 (1350 κύκλοι) .....	149
Εικόνα 3.3.1. Γεωμετρία δοκιμίου «dog bone» μονολιθικών υλικών .....	158
Εικόνα 3.3.2. Γεωμετρία δοκιμίου «dog bone» σύνθετων υλικών .....	159
Εικόνα 3.3.3. Πειραματική διάταξη .....	162
Εικόνα 3.3.4. Καμπύλη Wöhler (χάλυβας AISI 1006) .....	164
Εικόνα 3.3.5. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης χάλυβα AISI 1006 με θερμογραφία .....	164
Εικόνα 3.3.6. Θερμογραφήματα χάλυβα AISI 1006 .....	165
Εικόνα 3.3.7. Καμπύλη Wöhler (αλουμίνιο 1050 H16) .....	167
Εικόνα 3.3.8. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης αλουμινίου 1050 H16 με θερμογραφία ..	167
Εικόνα 3.3.9. Θερμογραφήματα αλουμινίου 1050 H16 .....	168
Εικόνα 3.3.10. Συσσωρευμένη ακουστική δραστηριότητα για το Al 1050 H16 .....	169
Εικόνα 3.3.11. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης σύνθετου υλικού SiC/BMAS με θερμογραφία.....	170
Εικόνα 3.3.12. Θερμογραφήματα σύνθετου SiC/BMAS .....	171
Εικόνα 3.3.13. Ρυθμός αύξησης ενέργειας και δραστηριότητας AE .....	172
Εικόνα 3.3.14. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης σύνθετου A359/SiC 10% με θερμογραφία .....	174
Εικόνα 3.3.15. Θερμογραφήματα συνθέτου υλικού A359/SiC 10% .....	175
Εικόνα 3.3.16. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης σύνθετου υλικού A359/SiC 15% με θερμογραφία .....	176
Εικόνα 3.3.17. Θερμογραφήματα σύνθετου A359/SiC 15% .....	176
Εικόνα 3.3.18. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης με θερμογραφία σύνθετου υλικού A359/SiC 30% .....	177
Εικόνα 3.3.19. Θερμογραφήματα του A359/SiC 30% .....	178
Εικόνα 3.4.1. Δημιουργία ρωγμών λόγω διάβρωσης σε μεταλλικό οπλισμό .....	184
Εικόνα 3.4.2. Μονή «Μολυβδοσκεπάστου» .....	186
Εικόνα 3.4.3. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης 4 σημείων .....	188
Εικόνα 3.4.4. Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων με διαφορετικά βέλη κάμψης .....	189

Εικόνα 3.4.5. Απεικόνιση ρωγμών που αντιστοιχούν σε βέλος κάμψης δοκιμίου 1,5 mm (αριστερά) και 3mm (δεξιά) .....	190
Εικόνα 3.4.6. Πειραματική διάταξη μελέτης με υπέρυθρη θερμογραφία .....	191
Εικόνα 3.4.7. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας υγιούς δοκιμίου .....	192
Εικόνα 3.4.8. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 3 mm .....	193
Εικόνα 3.4.9. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 2,5 mm .....	194
Εικόνα 3.4.10. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 2,2 mm .....	194
Εικόνα 3.4.11. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 1,5 mm .....	195
Εικόνα 3.4.12. Θερμική διέγερση κατά την μέθοδο της θερμογραφίας με βαθμιαία θέρμανση .....	198
Εικόνα 3.4.13. Πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση βλάβης μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς .....	199
Εικόνα 3.4.14. α) Τοιχογραφία του τρούλου της «Μονής Μολυβδοσκεπάστου», β) θερμογράφημα του τρούλου με ρωγμές, γ) θερμογράφημα του τρούλου με αποκολλήσεις .....	202
Εικόνα 3.4.15. Τρισδιάστατη απεικόνιση των θερμοκρασιακών διαφορών του τρούλου	202
Εικόνα 3.4.16. Κτητορική επιγραφή της μονής .....	203
Εικόνα 3.4.17. α) Θερμογράφημα με τη μέθοδο της «θερμογραφίας με βαθμιαία θέρμανση» και β) τρισδιάστατη χαρτογράφηση θερμοκρασιών της κτητορικής επιγραφής .....	204
Εικόνα 3.4.18. Θερμογραφήματα «φάσης» από θερμογραφία lock-in που απεικονίζουν τη μικροδομή του κονιάματος .....	205
Εικόνα 3.4.19. α) Ψηφιακή οπτική φωτογραφία της επιγραφής και β) θερμογράφημα «φάσης» που απεικονίζει υπό-επιφανειακές ατέλειες .....	206
Εικόνα 3.4.20. Τοιχογραφία με τεχνητές τρύπες .....	207
Εικόνα 3.5.1. Επαφές τύπου P και N .....	215
Εικόνα 3.5.2. Λειτουργία θερμοηλεκτρικού στοιχείου .....	215
Εικόνα 3.5.3. Αρχή λειτουργίας «θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας» .....	216
Εικόνα 3.5.4. Πειραματική διάταξη .....	217
Εικόνα 3.5.5. Σύστημα ελέγχου θερμοηλεκτρικού στοιχείου .....	218

Εικόνα 3.5.6. Σύστημα θερμικής διέγερσης .....	219
Εικόνα 3.5.7. Στάδια εισαγωγής τεχνητών ατελειών .....	220
Εικόνα 3.5.8. α) Ψηφιακή φωτογραφία δοκιμίου και β) θερμογράφημα θερμογραφίας φάσης - παλμού .....	221
Εικόνα 3.5.9. Θερμογράφημα θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας .....	222

# Κεφάλαιο 1

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι, η αειφορία και η ανθεκτικότητα των κατασκευών και των δομών εξαρτάται κυρίως από το σωστό σχεδιασμό τους και τον ποιοτικό έλεγχο τους. Θα πρέπει, λοιπόν, να καθορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται, να προσδιορίζεται η κατανομή των τάσεων σε κάθε σημείο της δομής ή κατασκευής και να ελέγχεται η ποιότητα και η αντοχή τους τόσο στα στάδια κατασκευής τους όσο και στην εφαρμογή τους. Η επίτευξη όλων των παραπάνω συνθηκών μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με καταστροφικές όσο και με μη καταστροφικές μεθόδους.

Οι καταστροφικές μέθοδοι όμως, έχουν αρκετούς περιορισμούς, καθώς η χρήση τους οδηγεί σε καταστροφή ή υποβάθμιση των υπό-εξέταση δομών. Ως εκ τούτου, δε μπορούν να εφαρμοστούν για τον πλήρη έλεγχο μίας δομής και για τον έλεγχο κατασκευών που βρίσκονται σε λειτουργία. Τα προβλήματα που παρουσιάζει η χρήση των καταστροφικών μεθόδων επιλύονται με επιτυχία με την εφαρμογή των μη καταστροφικών μεθόδων. Τα πλεονεκτήματά τους συνίστανται στο γεγονός ότι έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν σε όλες τις φάσεις μιας κατασκευής/δομής, όπως το σχεδιασμό, την υλοποίηση, τον ποιοτικό έλεγχο και τη συντήρησή της. Επίσης, μπορούν να προσδιορίσουν πολλές ιδιότητες των υλικών, όπως π.χ. μηχανικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές, θερμικές και ακουστικές. Είναι ικανές για την αποτίμηση της βλάβης τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια των υλικών, με αποτέλεσμα να καθορίζουν την εναπομένουσα ζωή και να προβλέπουν την επερχόμενη αστοχία τους.

### 1.1. Σκοπός της διδακτορικής διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ο μη καταστροφικός χαρακτηρισμός της βλάβης υλικών μέσω ανάλυσης της θερμό-μηχανικής συμπεριφοράς τους με μη καταστροφικές μεθόδους. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου αναπτύχθηκαν καινοτόμες μεθοδολογίες και τεχνικές βασισμένες στην υπέρυθρη θερμογραφία και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν τόσο με τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους όσο και με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής. Η παρούσα έρευνα χωρίζεται σε δυο βασικές κατευθύνσεις: (α) την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της υγιούς λειτουργίας υλικών που υποβάλλονται σε κυκλική μηχανική καταπόνηση και την

ανάπτυξη παραμέτρου για την ποσοτικοποίηση του επιπέδου βλάβης και (β) τη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού στη θραύση, η οποία σχετίζεται με την ανίχνευση, την απεικόνιση της διαδρομής και το ρυθμό ανάπτυξης επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ρωγμών. Οι δυο αυτές ερευνητικές κατευθύνσεις καλύπτουν όλο το εύρος της θερμομηχανικής συμπεριφοράς του υλικού, από τα πρώιμα στάδια της φθοράς λόγω μηχανικής κόπωσης, έως την έναρξη της ρωγμής, και τελικά τη διάδοση της και την επερχόμενη θραύση. Η ανάπτυξη μεθοδολογιών για την παρακολούθηση της διάδοσης μίας ρωγμής, τον προσδιορισμό της ταχύτητας και της διαδρομής της συμβάλλει στη πρόβλεψη της επερχόμενης αστοχίας ενός υλικού. Επίσης η ποσοτικοποίηση της βλάβης που συσσωρεύεται στο υλικό στα πρώιμα στάδια λόγω μηχανικής κόπωσης είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό νέων προηγμένων υλικών και δομών.

## **1.2. Ανάπτυξη της εργασίας**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται συνολικά από πέντε Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μία εισαγωγική προσέγγιση σχετικά με τα πλεονεκτήματα της χρήσης των μη καταστροφικών μεθόδων για την αειφορία και την ανθεκτικότητα κατασκευών και δομών. Επίσης, περιγράφεται ο σκοπός της διδακτορικής έρευνας και το βασικό αντικείμενο μελέτης. Τέλος, αναφέρονται συνοπτικά τα ειδικά θέματα τα οποία πραγματεύεται σε κάθε Κεφάλαιο η διδακτορική διατριβή.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρεται ο ορισμός και οι χρήσεις των μη καταστροφικών μεθόδων. Επίσης, περιγράφονται με συντομία οι βασικές μέθοδοι μη καταστροφικών ελέγχων και αναλύονται διεξοδικά η μέθοδοι της υπέρυθρης θερμογραφίας και της ακουστικής εκπομπής, καθώς αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ως εκ τούτου, αναφορικά με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής, έγινε μία ιστορική αναδρομή, αναφέρονται οι βασικές θεωρητικές αρχές της, αναλύθηκαν οι τρόποι αξιολόγησης των σημάτων της, περιγράφεται η βασική οργανολογία της και παρουσιάζονται οι δυνατότητές της. Επιπλέον, σχετικά με τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας, αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία, αναλύεται η θεωρία στην οποία βασίζεται, καθώς και αναλύονται εκτενώς οι επιμέρους τεχνικές της.

Το Κεφάλαιο 3.1 πραγματεύεται την ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών για την παρακολούθηση ρωγμής, βασισμένες στη υπέρυθρη θερμογραφία και την ακουστική

εκπομπή. Αναπτύχθηκε, λοιπόν, μία νέα μεθοδολογία βασισμένη στη lock-in θερμογραφία για τον υπολογισμό του ρυθμού ανάπτυξης μίας ρωγμής και την πρόβλεψη της διαδρομής της. Τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν τόσο με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής όσο και με τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας (compliance method).

Ακόμη, αναπτύχθηκε μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας για την ανάλυση των θερμικών φαινομένων που παρατηρούνται σε σύνθετα υλικά με κεραμική μήτρα σε πραγματικό χρόνο, όταν υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση. Παράλληλα με την υπέρυθρη θερμογραφία, εφαρμόστηκε και η ακουστική εκπομπή για την παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται λόγω των συσσωρευμένης βλάβης στα υλικά. Ως εκ τούτου, για την ανίχνευση και τη διάδοση ρωγμής μελετήθηκαν σύνθετα υλικά με μήτρα «βορίου – μαγνησίου – αλουμινίου – πυριτίου» (BMA) ενισχυμένη με συνεχείς ίνες καρβιδίου του πυριτίου (continuous SiC – fibre). Επίσης, για τη μελέτη του τρόπου διάδοσης μίας ρωγμής και για τον προσδιορισμό του μήκους της, χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα κεραμικά με ενίσχυση ινών καρβιδίου του πυριτίου σε δοκίμια γεωμετρίας τύπου «CT» (compact tension) και τα αποτελέσματα θερμογραφίας - ακουστικής συγκρίθηκαν επιπλέον με τις μετρήσεις της συμβατικής μεθόδου για την μέτρηση του μήκους μίας ρωγμής.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3.2 προσδιορίστηκαν θερμικές παράμετροι για το χαρακτηρισμό του επιπέδου βλάβης ενός υλικού που υπόκειται σε κόπωση, με την ανάπτυξη καινοτόμου μη καταστροφικής μεθοδολογίας βασισμένη στην υπέρυθρη θερμογραφία. Η εκλυόμενη ενέργεια ποσοτικοποιήθηκε ως συνάρτηση των κύκλων μηχανικής κόπωσης σε δοκίμια χάλυβα. Φαινόμενα πιθανής μηχανικής υστέρησης αναλύθηκαν, ώστε να προσδιοριστούν οι μετρικές της βλάβης.

Στο Κεφάλαιο 3.3 αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για τον ταχύ, αξιόπιστο και οικονομικό προσδιορισμό του ορίου κόπωσης υλικών, βασισμένη στο συνδυασμό δύο μη καταστροφικών μεθόδων, της θερμογραφίας lock-in και της ακουστικής εκπομπής. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η συμβατική μέθοδος της καμπύλης «Wöhler», όπως η ανάγκη μεγάλου αριθμού εξεταζόμενων δοκιμίων καθώς και ο εκτεταμένος χρόνος πειραμάτων, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης της συγκεκριμένης μεθοδολογίας και την εφαρμογή της τόσο σε μονολιθικά όσο και σε σύνθετα υλικά. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν, μονολιθικά υλικά (χάλυβας, αλουμίνιο) και προσδιορίστηκε το όριο κόπωσης τόσο με τη νέα μεθοδολογία όσο και με τη συμβατική μέθοδο για λόγους σύγκρισης. Στη συνέχεια, η

έρευνα του συγκεκριμένου Κεφαλαίου επεκτάθηκε και σε σύνθετα κεραμικά και σύνθετα μεταλλικά υλικά.

Το Κεφάλαιο 3.4 αφορά την ανάπτυξη μεθοδολογίας, βασισμένη στην υπέρυθρη θερμογραφία για τον χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακής βλάβης σε δομές από υλικά με βάση το τσιμέντο. Ως εκ τούτου, στην πρώτο στάδιο της έρευνας που πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα, δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος υπεβλήθησαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων με αποτέλεσμα τη δημιουργία υπό-επιφανειακών ρωγμών. Τα διαφορετικά είδη ρωγμών που προέκυψαν ελέγχθηκαν με την υπέρυθρη θερμογραφία, ώστε να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε για το βάθος ανίχνευσης των υπό-επιφανειακών ρωγμών. Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτάθηκε σε μία υφιστάμενη κατασκευή και συγκεκριμένα στη Μονή «Μολυβδοσκεπάστου» που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς για την Ελλάδα. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μία τεχνική υπέρυθρης θερμογραφίας, η «θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση» και εφαρμόστηκαν, επιπλέον, άλλες δύο θερμογραφικές μέθοδοι, η οπτική θερμογραφία lock-in και η θερμογραφία φάσης – παλμού. Με τη χρήση των παραπάνω μεθόδων ανιχνεύθηκαν υπό-επιφανειακές ατέλειες και αποτιμήθηκε η φθορά των τοιχογραφιών του τρούλου και της κτητορικής επιγραφής της μονής.

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.5 σχετίζεται με την ανάπτυξη μίας καινοτόμου τεχνικής lock-in θερμογραφίας. Στη νέα τεχνική, που ονομάστηκε «θερμοηλεκτρική lock-in θερμογραφία», η θερμική διέγερση προκαλείται από ένα «θερμοηλεκτρικό στοιχείο. Στόχος της συγκεκριμένης τεχνικής είναι όχι μόνον να ανιχνεύσει πιθανή υπό-επιφανειακή βλάβη σε ένα υλικό, το οποίο επιτυγχάνεται και με άλλες συμβατικές μεθόδους θερμογραφίας, αλλά και να την ποσοτικοποιήσει. Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της εφαρμόστηκε σε σύνθετα υλικά με τεχνητές ατέλειες.

Το Κεφάλαιο 4 αποτελεί μία βασική περίληψη των αποτελεσμάτων της έρευνας της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Παρατίθενται, λοιπόν, τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν και αφορούν το μη καταστροφικό χαρακτηρισμό της βλάβης των υλικών μέσω ανάλυσης της θερμό-μηχανικής συμπεριφοράς τους με μη καταστροφικές μεθόδους.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται η λίστα των δημοσιεύσεων που προέκυψαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των 46 ερευνητικών εργασιών, 17 αφορούν διεθνή περιοδικά με κριτές και 29 πρακτικά διεθνών συνεδρίων, ενώ σε εξέλιξη βρίσκεται η υποβολή 4 επιπλέον ερευνητικών εργασιών.

# Κεφάλαιο 2

---

**ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

### 2.1. Εισαγωγή

Ως Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ) ορίζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ή την εξέταση ενός υλικού, ενός εξαρτήματος ή ενός συστήματος χωρίς να βλάπτουν τη «μελλοντική του χρησιμότητα» [1]. Ο όρος ΜΚΕ συχνά αναφέρεται σε μη ιατρικές επιθεωρήσεις της ακεραιότητας ενός υλικού, Οι ακτίνες Χ, οι υπέρηχοι, και οι ενδοσκοπήσεις που χρησιμοποιούνται στην ιατρική χαρακτηρίζονται με τον όρο «μη επεμβατικές» διαγνωστικές μέθοδοι.

Όπως προαναφέρθηκε, οι ΜΚΕ εφαρμόζονται για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των υλικών. Πληθώρα άλλων τεχνικών όπως, η ράδιο-αστρονομία, οι μετρήσεις αγωγιμότητας και η ρεομετρία είναι ΜΚΕ αλλά στην πραγματικότητα δεν χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των υλικών. Τα ραντάρ και το σόναρ κατατάσσονται ως μη καταστροφικοί έλεγχοι όταν για παράδειγμα χρησιμοποιηθούν για την επιθεώρηση φραγμάτων, αλλά δεν αποτελούν ΜΚΕ όταν χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση θαλασσών.

Θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα η σημασία του όρου «μελλοντική χρησιμότητα». Μερικοί έλεγχοι υλικών συμπεριλαμβάνουν τη συλλογή δειγμάτων από την υπό εξέταση κατασκευή κάτι το οποίο είναι απολύτως καταστροφικό. Παραδείγματος χάριν, σε έναν έλεγχο για την ακεραιότητα μιας γέφυρας απαιτείται η συλλογή πυρήνων (καρότα) από κύρια δομικά στοιχεία. Παρόλο που ο έλεγχος μιας γέφυρας, με την αξιολόγηση των πυρήνων, θεωρείται μη καταστροφικός αφού δεν καταστρέφεται όλη η κατασκευή, δεν παύει στην πραγματικότητα να είναι καταστροφικός διότι δεν υπάρχει μελλοντική χρησιμότητα των πυρήνων που αφαιρέθηκαν.

Από το 1920 οι έλεγχοι, που δεν προκαλούν καταστροφή και αναπτύχθηκαν λόγω «επιστημονικής περιέργειας» αποτελούν απαραίτητο εργαλείο στον τομέα της βιομηχανίας. Στον τομέα αυτό οι ΜΚΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν :

- ◆ για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ακεραιότητας των προϊόντων
- ◆ για την αποφυγή των βλαβών και την πρόληψη ατυχημάτων που πολλές φορές έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζωών
- ◆ για την αύξηση του κέρδους του χρήστη
- ◆ για τη διασφάλιση της ικανοποίησης του πελάτη
- ◆ για τον καλύτερο σχεδιασμό των προϊόντων
- ◆ για τον έλεγχο κατά το στάδιο της παραγωγής
- ◆ για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους αλλά και του κόστους συντήρησης
- ◆ για τη διατήρηση σταθερής ποιότητας προϊόντων και
- ◆ για την εξασφάλιση της λειτουργικής ετοιμότητας του τελικού προϊόντος

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι μπορούν να θεωρηθούν ως κλάδος της επιστήμης των υλικών γιατί το αντικείμενο τους είναι ο έλεγχος της ομοιομορφίας, της ποιότητας και της λειτουργικότητας των υλικών και των δομών. Η επιστήμη των μη καταστροφικών ελέγχων ενσωματώνει όλη την τεχνολογία για την ανίχνευση και τη μέτρηση πολύ σημαντικών ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένων και των ασυνεχειών, σε αντικείμενα μικρής κλίμακας (εργαστηριακά δοκίμια) αλλά και μεγάλης όπως μιας κατασκευής σε λειτουργία.

## 2.2. Κατηγοριοποίηση των μη καταστροφικών μεθόδων

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. Οι κατηγορίες αυτές είναι [2]:

1. οπτικός έλεγχος
2. έλεγχος με διεισδυτικές ακτινοβολίες (penetrating radiation)
3. μαγνητικός-ηλεκτρικός έλεγχος
4. έλεγχος με μηχανικές δονήσεις
5. θερμικοί έλεγχοι
6. χημικοί και ηλεκτροχημικοί έλεγχοι

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι 6 κύριες κατηγορίες των ΜΚΕ και οι εφαρμογές τους.



Πίνακας 2.1. Κατηγορίες ΜΚΕ και εφαρμογές τους

Κατηγορίες	Εφαρμογές
Μηχανικές-Οπτικές	<ul style="list-style-type: none"> <li>● χρώμα</li> <li>● ρωγμές</li> <li>● διαστάσεις</li> <li>● πάχος</li> <li>● επιφανειακή τραχύτητα</li> <li>● συντελεστής ανάκλασης</li> <li>● κ.ά.</li> </ul>
Ακτινοβολία διείσδυσης (penetrating radiation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ρωγμές</li> <li>● διαφοροποίηση στην πυκνότητα</li> <li>● εγκλείσματα</li> <li>● πάχος</li> <li>● μικροπορώδες</li> <li>● διαχωρισμός</li> <li>● κ.ά.</li> </ul>
Ηλεκτρομαγνητισμός	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ανισοτροπία</li> <li>● κοιλότητες</li> <li>● τοπικές παραμορφώσεις</li> <li>● σκληρότητα</li> <li>● θερμική επεξεργασία</li> <li>● κρυσταλλική δομή</li> <li>● συγκέντρωση ιόντων</li> <li>● κ.ά.</li> </ul>
Υπέρηχοι	<ul style="list-style-type: none"> <li>● έναρξη &amp; διάδοση ρωγμής</li> <li>● αποκολλήσεις</li> <li>● πυκνότητα</li> <li>● μέτρο ελαστικότητας</li> <li>● μηχανική υποβάθμιση</li> <li>● επιφανειακές τάσεις</li> <li>● κ.ά.</li> </ul>
Υπέρυθρη ακτινοβολία	<ul style="list-style-type: none"> <li>● έναρξη &amp; διάδοση ρωγμής</li> <li>● θερμική αγωγιμότητα</li> <li>● πάχος</li> <li>● ρωγμές</li> <li>● υγρασία</li> <li>● διάβρωση</li> <li>● αποκολλήσεις</li> <li>● εγκλείσματα</li> <li>● πορώδες</li> <li>● κ.ά.</li> </ul>
Χημική ανάλυση	<ul style="list-style-type: none"> <li>● σύσταση</li> <li>● στοιχειακή ανάλυση</li> <li>● μέγεθος κόκκου</li> <li>● εγκλείσματα</li> <li>● επιφανειακές ατέλειες</li> <li>● πορώδες</li> <li>● αναγνώριση κραμάτων</li> <li>● κ.ά.</li> </ul>

Κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες: α) πηγή ενέργειας ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες X, 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 X, ανάκλαση των υπερήχων), γ) μέσο ανίχνευσης ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων (π.χ. πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι), δ) μέθοδοι καταγραφής των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπερέθρου), ε) ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ποσοτική ή ποιοτική).

Αντικείμενο της κάθε μεθόδου είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω παραμέτρους των υλικών:

1. ασυνέχειες και διαχωρισμοί (ρωγμές, αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά.)
2. δομή (κρυσταλλικό πλέγμα, μέγεθος κόκκου, κ.ά.)
3. διαστάσεις και μετρολογία (πάχος, διάμετρος, κ.ά.)
4. φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, μέτρο ελαστικότητας, κ.ά.)
5. σύνθεση και χημική ανάλυση (ταυτοποίηση κράματος, προσμείξεις κ.ά.)
6. στατική και δυναμική απόκριση (εναπομένουσες τάσεις, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής, φθορά από τριβή κ.ά.)
7. ανάλυση υπογραφής «signature analysis» (συχνότητα φάσματος, περιεχόμενο εικόνας κ.ά.)
8. μη φυσιολογικές κατανομές θερμοκρασίας

Παρακάτω περιγράφονται σε συντομία μερικές από τις πιο βασικές μη καταστροφικές μεθόδους.

### 2.2.1. Οπτικός έλεγχος και διεισδυτικά υγρά

Ο οπτικός έλεγχος είναι η παρατήρηση ενός αντικειμένου είτε άμεσα με τα μάτια είτε έμμεσα χρησιμοποιώντας οπτικά όργανα (ενδοσκόπιο) για την αποτίμηση της επιφανειακής κατάστασης ενός υλικού. Αποτελεί τον πρώτο μη καταστροφικό έλεγχο και μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση επιφανειακών ασυνεχειών που σχετίζονται με μηχανισμούς δομικής αστοχίας. Επίσης είναι πολύ σημαντικός γιατί μπορεί να συνδυαστεί με όλες τις μη καταστροφικές τεχνικές και να δώσει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα [3].

Τα διεισδυτικά υγρά είναι μια ταχεία, απλή, φθηνή, και ευαίσθητη μη καταστροφική μέθοδος. Επιτρέπει την επιθεώρηση μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, τμήματα δομών και συστήματα για ασυνέχειες που φθάνουν στην επιφάνεια τους. Οι συγκεκριμένες ατέλειες μπορεί να προϋπάρχουν σε ένα υλικό ή να είναι αποτέλεσμα των διεργασιών της παρασκευής τους ή να προέρχονται από τη χρήση του. Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά αποτελεί μία φορητή μέθοδο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως στο πεδίο [4]. Η διαδικασία για τον έλεγχο απαιτεί τον αρχικό καθαρισμό της επιφάνειας, την εφαρμογή του διεισδυτικού υγρού και την απομάκρυνση του πλεονάζοντος διεισδυτή. Ακολούθως εφαρμόζεται μια λευκή εμφανιστική σκόνη για την εξόγκωση του διεισδυτή και την εμφάνιση των ατελειών. Η τελική ενέργεια είναι ο μετέπειτα καθαρισμός της επιφάνειας που εξετάστηκε.

### 2.2.2. Μαγνητικά σωματίδια

Οι μαγνητικές μέθοδοι βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών του υλικού. Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια αναπτύχθηκε το 1930. Η μέθοδος βασίζεται στο ότι τα μαγνητικά σωματίδια τείνουν να συσσωρεύονται κοντά σε μία υπό-επιφανειακή ατέλεια. Ο έλεγχος αυτός είναι αξιόπιστος για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών ή ατελειών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού και μπορεί να δώσει μία ένδειξη της τοποθεσίας και του μεγέθους της ατέλειας. Το βασικότερο μειονέκτημα του είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά [3].

### 2.2.3. Ραδιογραφία

Η ραδιογραφία είναι η μέθοδος που βασίζεται στην απορρόφηση των διεισδυτικών ακτινοβολιών όπως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, οι ακτίνες  $\chi$ , οι ακτίνες  $\gamma$  και ακτινοβολία νετρονίων από το υπό εξέταση υλικό. Η απορρόφηση ποικίλει λόγω κάποιων φυσικών χαρακτηριστικών, διαφορετικού πάχους και διαφορετικής πυκνότητας. Οι διακυμάνσεις στην απορρόφηση της ακτινοβολίας μπορούν να αποτιμηθούν με την ανίχνευση της ακτινοβολίας που δεν απορροφήθηκε και να

απεικονιστούν μέσω ευαίσθητων φιλμ ή άλλων αισθητήρων. Οι ατέλειες που μπορούν να ανιχνευθούν με τη μέθοδο της ραδιογραφίας ποικίλουν και κάποιες από αυτές είναι, ρωγμές, οξείδωση, πορώδες, διόδους διαρροής κ.ά. [3].

#### 2.2.4. Δινορεύματα

Ο έλεγχος με δινορεύματα χρησιμοποιεί εναλλασσόμενα ρεύματα μέσω αγωγίμου πηνίου και εφαρμόζεται κοντά στην υπό εξέταση επιφάνεια. Στην επιφάνεια του υλικού δημιουργούνται εσωτερικά δινορεύματα αντίθετα με το εναλλασσόμενο ρεύμα του πηνίου. Τα παραγόμενα δινορεύματα μπορεί να μετρηθούν μέσω ενός πηνίου ή κατάλληλων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου. Οι μεταβολές που παρατηρούνται στα επαγόμενα δινορεύματα μπορούν να αποδοθούν σε μεταβολές των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού ή και σε άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως ρωγμές και ασυνέχειες. Ο έλεγχος με δινορεύματα είναι αποτελεσματικός στον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών καθώς και για την εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του πάχους των επιστρώσεων. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ηλεκτρομαγνητικά υλικά [3].

#### 2.2.5. Υπέρηχοι

Ο έλεγχος με υπέρηχους είναι μία μη καταστροφική μέθοδος κατά την οποία ακουστικά κύματα υψηλής συχνότητας εισάγονται στα υλικά για την ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ατελειών. Τα ακουστικά κύματα ταξιδεύουν διαμέσου του υλικού χάνοντας κάποια ενέργεια και ανακλώνται όπου υπάρχουν διεπιφάνειες μεταξύ υλικών με διαφορετική ακουστική εμπέδιση. Οι ανακλάσεις αυτές μπορούν να ανιχνευθούν με πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους και η περαιτέρω ανάλυση τους οδηγεί στον εντοπισμό της θέσης αλλά και του μεγέθους των ατελειών που υπάρχουν εσωτερικά σε ένα υλικό. Ο έλεγχος με υπέρηχους είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος και οι εφαρμογές της ποικίλουν, λόγω του ότι μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλα τα υλικά. Μερικές από τις εφαρμογές της μεθόδου των υπέρηχων είναι η ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών, ανίχνευση αποκολλήσεων, εύρεση ελαστικών ιδιοτήτων (μέτρα ελαστικότητας), αποκάλυψη εγκλεισμάτων, ανίχνευση πορώδους και άλλα [3].

Στην παρούσα μελέτη, η ακουστική εκπομπή και η υπέρυθη θερμογραφία χρησιμοποιήθηκαν για το μη καταστροφικό χαρακτηρισμό της βλάβης προηγμένων υλικών μέσω ανάλυσης της θέρμο-μηχανικής τους συμπεριφοράς. Ως εκ τούτου, γίνεται εκτενέστερη αναφορά των μεθόδων αυτών στα Κεφάλαια 2.3 και 2.4.

### 2.3. Ακουστική Εκπομπή

Ο όρος «Ακουστική Εκπομπή» (ΑΕ) αναφέρεται στα μεταβατικά ελαστικά κύματα που διαδίδονται σε συνεχές στερεό μέσο λόγω απότομης απελευθέρωσης ενέργειας από την έναρξη ή την διάδοση αστοχίας στο υλικό. Είναι γνωστό από την καθημερινή εμπειρία ότι τα περισσότερα υλικά κατά το τελικό στάδιο της αστοχίας τους (κυρίως ψαθυρή θραύση) εκπέμπουν τασικά κύματα τα οποία τελικά γίνονται αντιληπτά και από τον άνθρωπο λόγω δημιουργίας ηχητικών κυμάτων στον αέρα.

#### 2.3.1. Ιστορική αναδρομή

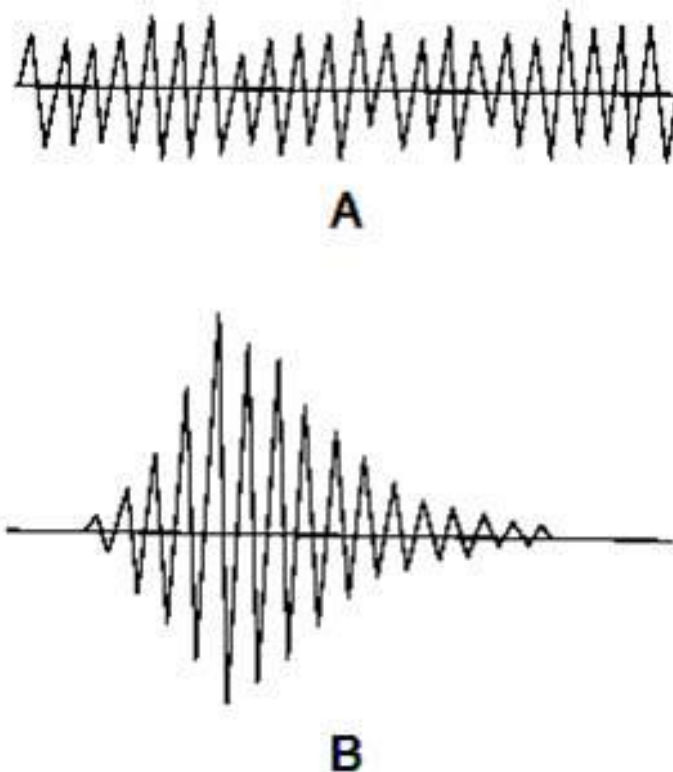
Οι πρώτες δημοσιευμένες έρευνες σχετικά με την ακουστική εκπομπή εμφανίστηκαν το 1940 με θέμα το πρόβλημα στην πρόβλεψη της διάρρηξης των πετρωμάτων στα ορυχεία [5]. Η πρώτη σημαντική έρευνα σχετικά με την ακουστική εκπομπή στα μέταλλα (χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός, μόλυβδος) διεξάχθηκε από τον Kaiser [6] όπως αναφέρθηκε στο [5]. Ο Kaiser από την έρευνα του διαπίστωσε ότι για την παραγωγή ακουστικής δραστηριότητας θα πρέπει η ασκούμενη δύναμη να είναι μεγαλύτερου μεγέθους από την όποια άλλη δύναμη έχει ήδη ασκηθεί στο σώμα στο παρελθόν (γνωστό ως φαινόμενο Kaiser) [7]. Με άλλα λόγια, οι ήδη υπάρχουσες ασυνέχειες στη δομή ενός υλικού δεν μεγαλώνουν εάν η ασκούμενη σε αυτά δύναμη δεν υπερβαίνει σε τιμή την όποια δύναμη έχει ήδη ασκηθεί στο σώμα.

Η πρώτη έρευνα ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια σκυροδέματος υπό τάση πραγματοποιήθηκε από τον Rüschi [8] όπως αναφέρθηκε στο [5], ο οποίος διαπίστωσε ότι κατά την φόρτιση και αποφόρτιση περίπου από 70-85% της αντοχής του σκυροδέματος, δραστηριότητα ακουστικής εκπομπής εμφανιζόταν μόνο όταν το δοκίμιο έφτανε στο προηγούμενο επίπεδο φόρτισης (φαινόμενο Kaiser). Επίσης, ο L'Hermite [9, 10] όπως

αναφέρθηκε στο [5] μέτρησε την ακουστική εκπομπή σε σκυρόδεμα βρίσκοντας ότι η ακουστική δραστηριότητα αυξάνεται απότομα όταν ο λόγος Poisson αρχίζει να αυξάνεται. Το 1965 ο Robinson [11] όπως αναφέρθηκε στο [5] παρατήρησε χρησιμοποιώντας πιο ευαίσθητο εξοπλισμό, ότι ακουστική δραστηριότητα μπορεί να προκύψει και σε πολύ χαμηλά επίπεδα φόρτισης με αποτέλεσμα να μπορούν να ανιχνευθούν μικρορωγμές. Ο Green [12] όπως αναφέρθηκε στο [5] διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων στα οποία κατέγραφε ακουστικά σήματα της τάξης των 100kHz. Η έρευνα του Green απέδειξε ότι η ακουστική εκπομπή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη ανίχνευση της επερχόμενης αστοχίας. Στη συνέχεια ακολούθησαν πολλές έρευνες σχετικά με τις τεχνικές καταγραφής των σημάτων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής.

### 2.3.2. Βασικές θεωρητικές αρχές της Ακουστικής Εκπομπής

Όταν ένα συμβάν ακουστικής εκπομπής λαμβάνει χώρα σε ένα υλικό, εξαιτίας της ανελαστικής παραμόρφωσης ή ρωγμάτωσης του, τα τασικά κύματα ταξιδεύουν κατευθείαν από την πηγή στο δέκτη ως κύματα σώματος. Επίσης, μπορούν να προκύψουν και επιφανειακά κύματα. Όταν τα τασικά κύματα φτάνουν στο δέκτη, ο αισθητήρας ανταποκρίνεται στις επιφανειακές κινήσεις που συμβαίνουν. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σήμα που λαμβάνεται από την συσκευή καταγραφής μπορεί να επηρεαστεί από τη φύση του τασικού παλμού που παράγεται από την πηγή, τη γεωμετρία του δοκιμίου και τα χαρακτηριστικά του δέκτη, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ερμηνεία μίας κυματομορφής. Στην Εικόνα 2.1 απεικονίζονται οι δύο βασικοί τύποι σημάτων ακουστικής εκπομπής.



Εικόνα 2.1. Βασικοί τύποι σημάτων Ακουστικής Εκπομπής

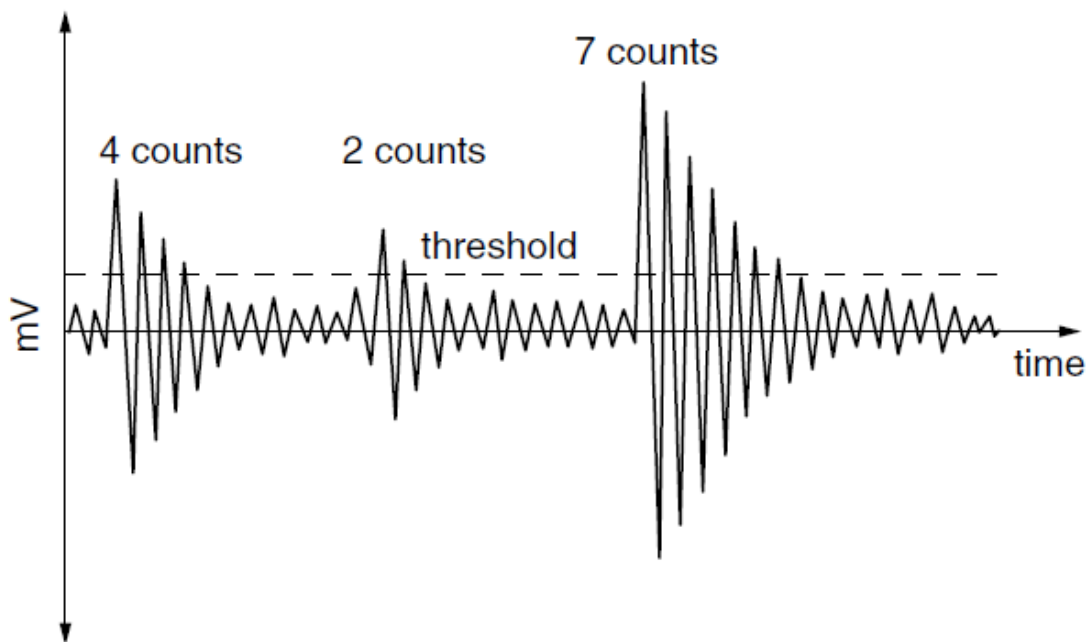
A) Συνεχής εκπομπή είναι «μία ποιοτική περιγραφή ενός σταθερού σήματος που παράγεται από ταχεία γεγονότα ακουστικής εκπομπής» [7]. Αυτά δημιουργούνται από γεγονότα όπως πλαστικές παραμορφώσεις σε μέταλλα.

B) Εκπομπή σε ριπές είναι «η ποιοτική περιγραφή ενός διακριτού σήματος που σχετίζεται με ένα μεμονωμένο γεγονός ακουστικής εκπομπής και συμβαίνει στο εσωτερικό του υλικού» [7], όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια διάδοσης μιας ρωγμής ή θραύσης ενός ψαθυρού υλικού.

### 2.3.3. Αξιολόγηση των σημάτων Ακουστικής Εκπομπής

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύονται οι τρόποι που μπορούν να αξιολογηθούν τα σήματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής. Ο πρώτος τρόπος ονομάζεται «**Μέτρηση της Ακουστικής Δραστηριότητας**» (**Acoustic**

**Emission Counting**). Αποτελεί τον πιο απλό τρόπο χαρακτηρισμού της ακουστικής εκπομπής. Είναι ο αριθμός των χρονικών στιγμών που ένα ακουστικό σήμα υπερβαίνει το κατώφλι που επιλέχθηκε κατά τη διαδικασία του ελέγχου [7] (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2. Αρχή της μέτρησης της Ακουστικής Εκπομπής

Ένα σύστημα καταγραφής συνήθως μπορεί να υπολογίσει α) τον «συνολικό αριθμό» των σημάτων, β) το «ρυθμό» των σημάτων και γ) το «μέσο» εύρος του παλμού. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από αυτόν τον τρόπο ανάλυσης εξαρτώνται από το κατώφλι που έχει οριστεί και επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και της γεωμετρίας του δοκιμίου (λόγω εσωτερικών ανακλάσεων), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη ανάλυση της φύσης των σημάτων της ακουστικής εκπομπής. Ένας δεύτερος τρόπος είναι «η μέτρηση των γεγονότων» (**event counting**). Η μέτρηση αυτή είναι ο αριθμός που προκύπτει από την καταμέτρηση των διακριτών γεγονότων ακουστικής εκπομπής. Στην Εικόνα 2.2, παραδείγματος χάριν, ο αριθμός των γεγονότων είναι 3. Η μέθοδος καταγραφής του αριθμού των γεγονότων είναι πολύ σημαντική αλλά δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με το εύρος των παλμών. Ο «χρόνος ανόδου» (**Rise Time, RT**) είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που εμφανίζεται ένα σήμα και



της στιγμής που μεγιστοποιείται. Ο υπολογισμός του χρόνου ανόδου οδηγεί στον προσδιορισμό του τύπου της μηχανικής βλάβης. Επιπρόσθετα, ένας ακόμη τρόπος ανάλυσης των σημάτων ακουστικής εκπομπής είναι ο υπολογισμός της «**Διάρκειας του Σήματος**» (**Signal Duration**). Αυτή είναι η διάρκεια ενός μεμονωμένου γεγονότος ακουστικής εκπομπής και μπορεί να συσχετιστεί με το είδος της μηχανικής βλάβης. Η «**Κατανομή Εύρους**» (**Amplitude Distribution**) αντιστοιχεί στη κατανομή των κορυφών εύρους που προκύπτουν από τα σήματα ακουστικής εκπομπής. Αυτός ο τρόπος ανάλυσης συνήθως οδηγεί στην αναγνώριση της πηγής εκπομπής των ακουστικών σημάτων. Επίσης, η «**Ανάλυση της Συχνότητας**» (**Frequency Analysis**) αποτελεί έναν ακόμη τρόπο ερμηνείας των ακουστικών σημάτων. Αυτή αναφέρεται στο φάσμα συχνοτήτων των επιμέρους γεγονότων ακουστικής εκπομπής. Κατά την τεχνική αυτή απαιτείται ανάλυση των κυμάτων με μετασχηματισμούς Fourier. Τέλος, μία ακόμη παράμετρος που μπορεί να αξιολογηθεί είναι η «**Ανάλυση της Ενέργειας**» (**Energy Analysis**) και μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη του εύρους σε σχέση με το χρόνο μίας ριπής παλμού.

#### 2.3.4. Οργανολογία Ακουστικής Εκπομπής

Η οργανολογία της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής είναι σχετικά απλή και λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης έχει καταστεί δυνατή η ανάλυση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.3.3. Μία τυπική συνδεσμολογία της ΑΕ αποτελείται από τα παρακάτω μέρη [5]:

1. **Αισθητήρες (transducers)**. Στη διάταξη μετρήσεων ΑΕ χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, συνήθως κατασκευασμένοι από μόλυβδο-ζιρκόνιο-τιτάνιο (PZT), για τη μετατροπή των επιφανειακών μετατοπίσεων (surface displacements) σε ηλεκτρικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από τους αισθητήρες είναι ανάλογο της παραμόρφωσης του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα η οποία εξαρτάται από το εύρος των επιφανειακών κυμάτων. Οι αισθητήρες αυτού του είδους αποτελούν συσκευές υψηλής εμπέδησης με αποτέλεσμα να έχουν την δυνατότητα να παράγουν σχετικά χαμηλά σήματα τυπικά μικρότερα από 100μV. Υπάρχουν δύο είδη αισθητήρων, α) ευρείας ζώνης (wide-band) οι οποίοι είναι ευαίσθητοι σε ακουστικά κύματα με συχνότητες μερικών

εκατοντάδων kHz και β) στενής ζώνης (narrow-band) με δυνατότητα ανίχνευσης μικρού εύρους συχνοτήτων.

2. **Προ-ενισχυτές (preamplifier)**. Λόγω του ότι οι αισθητήρες παράγουν σήματα χαμηλής ηλεκτρικής ισχύος απαιτείται η ύπαρξη προ-ενισχυτών για την ενίσχυση των σημάτων. Τυπικά η ενίσχυση που προσφέρουν οι προ-ενισχυτές είναι της τάξης των 20 - 60 db.

3. **Φίλτρα ζωνών διέλευσης (passband filter)**. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται για την αποκοπή σημάτων ακουστικής εκπομπής μη επιθυμητής συχνότητας.

4. Ο «κύριος ενισχυτής» (**main amplifier**) ενισχύει περαιτέρω τα σήματα επιπλέον 20 – 60 db.

5. Ο «διευκρινιστής» (**discriminator**), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση ενός ορίου στην τάση πάνω από το οποίο ξεκινάει η καταγραφή σημάτων.

#### 2.3.5. Δυνατότητες της μεθόδου της AE [4]

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής έχει εφαρμοστεί σε ποικίλες πειραματικές δοκιμές. Κάποιες από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές της AE, είναι η αξιολόγηση της εξέλιξης μίας βλάβης και η αποτίμηση της δομικής ακεραιότητας των υλικών. Μερικές από τις δυνατότητες της ακουστικής εκπομπής που οδήγησαν στις παραπάνω εφαρμογές αναλύονται παρακάτω.

Η πιο βασική τεχνική της AE είναι η παρακολούθηση της ακουστικής «δραστηριότητας». Για την τεχνική αυτή δεν απαιτείται ούτε καταγραφή ούτε ανάλυση των σημάτων, αντίθετα ο αριθμός των σημάτων αποτελεί μία ποιοτική ένδειξη της βλάβης ή της υποβάθμισης ενός υλικού. Το φαινόμενο Kaiser αποτελεί ένα σημαντικό τρόπο ανάλυσης της ακουστικής δραστηριότητας καθώς παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση βλάβης στην οποία βρίσκεται το υπό εξέταση υλικό.

Επιπλέον, μία άλλη σημαντική δυνατότητα της AE είναι η ανίχνευση της τοποθεσίας της βλάβης (damage location). Για την επίτευξη του εντοπισμού της τοποθεσίας της βλάβης πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά την πειραματική διαδικασία μία συστοιχία αισθητήρων. Οι διαφορές στους χρόνους άφιξης των σημάτων στις διαφορετικές θέσεις των αισθητήρων σε συνδυασμό με τη γνώση της ταχύτητας του ακουστικού κύματος δίνουν τη δυνατότητα να γίνει ακριβής εντοπισμός της θέσης της πηγής αυτού του σήματος. Αυτή η δυνατότητα της AE προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση κόστους

αλλά και χρόνου καθώς μπορεί να εξεταστεί μία μεγαλύτερη περιοχή σε σχέση με τους συμβατικούς σημειακούς αισθητήρες.

Μία ακόμη σημαντική δυνατότητα της ΑΕ είναι η ανίχνευση του μηχανισμού βλάβης. Αυτό αποτελεί το πιο δύσκολο εγχείρημα καθώς κατά τη θραύση ενός υλικού συνυπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί μηχανισμοί βλάβης. Η δυσκολία αυτή έγκειται στις σημαντικές αλλοιώσεις που παρουσιάζονται σε ένα ακουστικό σήμα κατά τη διάδοση του και στο «θόρυβο» που προέρχεται από τους αισθητήρες και την πειραματική διάταξη. Αυτές οι αλλαγές πολλές φορές επισκιάζουν τα χαρακτηριστικά που συσχετίζονται με τους μηχανισμούς βλάβης. Ως εκ τούτου, για την αποτελεσματική ανίχνευση της τοποθεσίας της βλάβης απαιτείται ο «καθαρισμός του θορύβου». Επίσης, απαιτείται λεπτομερείς γνώση των παραμέτρων του ελέγχου όπως, η γεωμετρία και οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού, οι αισθητήρες και η μετρητική διάταξη και καλή γνώση των φαινομένων διάδοσης των κυμάτων.

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της εναπομένουσας ζωής αλλά και αντοχής μίας δομής. Ωστόσο, έχουν προκύψει αρκετά προβλήματα καθώς δεν υπάρχει φυσική σύνδεση ανάμεσα στην αντοχή και στην ακουστική εκπομπή. Η ΑΕ παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αλλά και την τοποθεσία ατελειών εσωτερικά σε μία δομή. Αν οι παραπάνω πληροφορίες είναι ακριβείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης όμοια με αυτά της μηχανικής των θραύσεων. Ωστόσο, η ΑΕ παρέχει λίγες πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και το σχήμα των ατελειών, που είναι κρίσιμοι παράγοντες για την πρόβλεψη της αντοχής. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες έρευνες για την αποτίμηση της αντοχής μέσω ΑΕ στηρίζονται κυρίως σε εμπειρικούς συσχετισμούς. Επίσης, ένα ακόμα πρόβλημα που προκύπτει ξανά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ΑΕ είναι, η σημαντική αλλοίωση των σημάτων λόγω της γεωμετρίας της δομής και των ιδιοτήτων του υλικού με αποτέλεσμα να καθιστούν αναληθείς προηγούμενους συσχετισμούς ανάμεσα στην ΑΕ και την αντοχή.

## 2.4. Υπέρυθρη θερμογραφία

Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα σώματα (με την ευρεία έννοια του όρου) τα οποία έχουν θερμοκρασία ανώτερη από το απόλυτο μηδέν (-273 βαθμούς Κελσίου). Η υπέρυθη θερμογραφία, λοιπόν, είναι η μέθοδος, η οποία ανιχνεύει την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο, το μετατρέπει σε θερμοκρασία, και εμφανίζει την εικόνα (θερμογράφημα) της κατανομής θερμοκρασίας.

### 2.4.1. Εισαγωγικά

#### 2.4.1.1. Ιστορικό της τεχνολογίας υπερύθρου [13]

Πριν από 200 χρόνια, κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί την ύπαρξη του υπερύθρου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η αρχική σημασία του υπερύθρου φάσματος, ή των «υπερύθρων» όπως συχνά ονομάζεται αυτό, ως μια μορφή ακτινοβολίας θερμότητας είναι σήμερα ίσως πιο προφανής από ότι κατά την εποχή της ανακάλυψής του από τον Herschel το 1800.

Η ανακάλυψη έγινε συμπτωματικά κατά τη διάρκεια έρευνας πάνω σε ένα καινούργιο οπτικό υλικό. Ο Sir William Herschel - 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 του μετά από ελάχιστα λεπτά παρατήρησης.

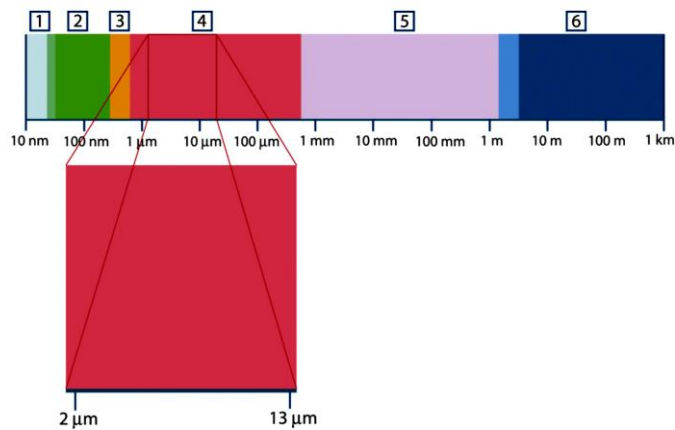
Ωστόσο, ο Herschel ήταν ο πρώτος που αναγνώρισε ότι θα πρέπει να υπάρχει ένα σημείο όπου το φαινόμενο θέρμανσης φτάνει στο μέγιστό του, καθώς και ότι οι μετρήσεις που περιορίζονταν στο ορατό τμήμα του φάσματος δεν είχαν καταφέρει να εντοπίσουν αυτό το σημείο. Μετακινώντας το θερμόμετρο στη σκοτεινή περιοχή πέρα από το ερυθρό άκρο του φάσματος, ο Herschel επιβεβαίωσε ότι η θέρμανση συνέχιζε να αυξάνεται. Το σημείο μεγιστοποίησης, όταν επιτέλους το εντόπισε, βρισκόταν αρκετά πέρα από το

ερυθρό άκρο του φάσματος —στην περιοχή που σήμερα είναι γνωστή ως «υπέρυθρα μήκη κύματος». Όταν ο Herschel αποκάλυψε την ανακάλυψή του, ονόμασε το νέο αυτό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος «θερμομετρικό φάσμα». Την ίδια την ακτινοβολία συχνά την ονόμαζε «σκοτεινή θερμότητα» ή απλώς «αόρατες ακτίνες». Παραδόξως και αντίθετα από αυτό που νομίζουν πολλοί, 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.

Η πρώτη λεγόμενη «θερμική φωτογραφία» κατέστη εφικτή το 1840, ως αποτέλεσμα της εργασίας του Sir John Herschel, γιου του επιστήμονα που ανακάλυψε την υπέρυθη ακτινοβολία και διάσημου αστρονόμου. Σύμφωνα με το φαινόμενο της διαφορικής εξάτμισης ενός λεπτού φιλμ ελαίου όταν αυτό εκτίθεται σε μοτίβο θερμότητας που εστιάζεται πάνω του, η θερμική φωτογραφία καθίσταται ορατή μέσω ανακλώμενου φωτός, όπου τα φαινόμενα συμβολής του φιλμ ελαίου καθιστούσαν την εικόνα ορατή στο ανθρώπινο μάτι. Ο Sir John κατάφερε επίσης να πάρει μια πρωτόγονη καταγραφή της θερμικής φωτογραφίας σε χαρτί, που την ονόμασε «θερμογράφημα».

#### 2.4.1.2. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαιρείται σε διάφορες περιοχές μήκους κύματος (βλέπε Εικόνα 2.3.), που ονομάζονται ζώνες (ή περιοχές ή μπάντες), οι οποίες διακρίνονται μεταξύ τους βάσει των μεθόδων που εφαρμόζονται για την παραγωγή και ανίχνευση της ακτινοβολίας. Δεν υπάρχει θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα στις ακτινοβολίες που αντιστοιχούν στις διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όλες τους διέπονται από τους ίδιους νόμους και οι μόνες τους διαφορές είναι εκείνες που οφείλονται στο διαφορετικό μήκος κύματος.



Εικόνα 2.3. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. 1: Ακτίνες X. 2: Υπεριώδεις (UV). 3: Ορατό. 4: Υπέρυθρες (IR). 5: Μικροκύματα. 6: Ραδιοκύματα

Η θερμογραφία αξιοποιεί τη ζώνη υπερέθρων του φάσματος. Στην πλευρά των μικρότερων μηκών κύματος, το σύνορο της ζώνης υπερέθρων βρίσκεται στο όριο του ορατού φάσματος, στο βαθύ κόκκινο. Στην πλευρά των μεγαλύτερων μηκών κύματος, η ζώνη υπερέθρων συγχωνεύεται με τα μήκη κύματος της ζώνης μικροκυμάτων, της τάξης του χιλιοστόμετρου. Η ζώνη υπερέθρων συχνά υποδιαιρείται σε τέσσερις μικρότερες ζώνες, τα σύνορα των οποίων επίσης έχουν επιλεγεί με αυθαίρετο τρόπο. Αυτές είναι: η ζώνη *εγγύς υπερέθρων* (0,75–3 μm), η ζώνη *μέσων υπερέθρων* (3–6 μm), η ζώνη *άπω υπερέθρων* (6–15 μm) και η ζώνη *απωτάτων υπερέθρων* (15–100 μm). Παρ' όλο που τα μήκη κύματος εκφράζονται σε μm (μικρόμετρα), εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται κι άλλες μονάδες μέτρησης του μήκους κύματος σε αυτήν την περιοχή του φάσματος, π.χ. nm (νανόμετρα) και Å (Ångström).

### 2.4.1.3. Μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας

Για να κατανοηθεί η μέθοδος της θερμογραφίας πρέπει να αναφερθούν οι μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας. Η θερμότητα μπορεί να διαδοθεί από ένα θερμό σε ένα ψυχρό αντικείμενο με αγωγή, με θερμική μεταβίβαση και με ακτινοβολία [14].

#### ➤ Μεταφορά με αγωγή

Η θερμότητα μεταδίδεται δια μέσου της μάζας των σωμάτων. Η δυσκολία της μεταφοράς της θερμότητας δια μέσου των σωμάτων, εξαρτάται από την αγωγιμότητά τους. Παράδειγμα καλών αγωγών θερμότητας είναι τα μέταλλα, ενώ αντίστοιχα παράδειγμα κακών αγωγών είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας. Η μεταφορά με αγωγή έχει σαν συνέπεια, απώλειες θερμότητας από ένα δοκίμιο. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υλικών είναι δείκτης της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας των υλικών διαμέσου της μάζας τους.

Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται διατυπώνεται ως εξής (Σχέση 2.1):

$$Q = \frac{k}{d} * F * (t_1 - t_2) * a \quad (2.1)$$

Όπου :

- Q Η ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται με αγωγή
- k Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού
- F Το εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου
- t<sub>1</sub> Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου
- t<sub>2</sub> Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου
- d Το πάχος του υλικού
- α Ο χρόνος ροής της θερμότητας

Η Σχέση 2.1 είναι γνωστή ως νόμος του Fourier

➤ Μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση

Η θερμότητα σε ένα ρευστό μεταφέρεται μέσω της μάζας του με την κίνηση της. Αν η κίνηση γίνεται σε φυσικό μέσο όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές (ο κρύος αέρας κινείται προς τα κάτω ενώ ο ζεστός αέρας κινείται προς τα πάνω) την κίνηση αυτή την ονομάζουμε φυσική διάχυση ενώ αν η κίνηση γίνεται βεβιασμένα (ανεμιστήρες, ανεμοπίεση) την ονομάζουμε βίαη 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 με θερμική μεταβίβαση παρατηρείται και μεταξύ ρευστού με στερεό σώμα.

➤ Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την θερμοκρασία που βρίσκονται, τον συντελεστή εκπομπής τους, και διάφορες άλλες παραμέτρους. Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στην γη αποκλειστικά με αυτό τον τρόπο μεταφοράς. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτείται η παρουσία ενός ενδιάμεσου μέσου. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε ένα άλλο σώμα ή θα απορροφηθεί ή θα ανακλαστεί ή θα μεταφερθεί. Η θερμότητα που απορροφάται εμφανίζεται ως αύξηση θερμοκρασίας ενός σώματος.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα όταν σε αυτό προσπίπτει ακτινοβολία, εκφράζεται ως εξής :

$$q = \varepsilon * \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.2)$$



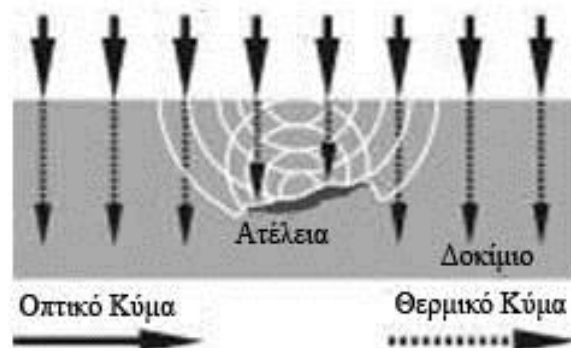
Όπου:

- $q$  Εκπεμπόμενη ενέργεια [ $\text{w/m}^2$ ]
- $\varepsilon$  Συντελεστής εκπομπής υλικού
- $\sigma$  Σταθερά Stefan - Boltzmann
- $T$  Απόλυτη θερμοκρασία  $^{\circ}\text{C}$

Η Σχέση 2.2 είναι γνωστή ως νόμος των Stefan – Boltzmann

#### 2.4.2. Εισαγωγή στη θερμογραφία

Η υπέρυθη θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι οι υπό-επιφανειακές ανωμαλίες σε ένα υλικό οδηγούν στην δημιουργία τοπικών διαφορών στην επιφανειακή θερμοκρασία ενός δοκιμίου. Οι διαφορές αυτές προκαλούνται από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες (Εικόνα 2.4). Η θερμογραφία ανιχνεύει αυτομάτως την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του υλικού και παράγει μια οπτική εικόνα από το θερμικό σήμα η οποία μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος της εσωτερικής ατέλειας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την 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  $10\mu\text{m}$  (στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος).



Εικόνα 2.4. Αρχή της θερμογραφίας

2.4.2.1. Θεωρία θερμικών κυμάτων

Όταν μια επιφάνεια θερμαίνεται τότε συναντώνται εξασθενημένα κύματα διασποράς πολύ κοντά σε αυτή. Τα κύματα αυτά ονομάζονται θερμικά κύματα και ανακαλύφθηκαν από τους J.Fourier και A.J. Angstrom. Το ενδιαφέρον σε αυτά τα κύματα για το Μη Καταστροφικό Έλεγχο είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν και να παρατηρηθούν «από μακριά». Χρήσιμο είναι να αναπτυχθεί η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά αυτών των κυμάτων [15].

Στην περίπτωση που σε ένα δοκίμιο εναποτίθεται θερμότητα από μια ομοιόμορφη περιοδική πηγή είτε με διαμορφωμένη είτε με γωνιακή συχνότητα « $\omega$ », η μαθηματική προσέγγιση γίνεται μονοδιάστατη, και η θερμοκρασία  $T$  εκφράζεται ως συνάρτηση του βάθους « $z$ » και του χρόνου « $t$ » που διαρκεί αυτή η διέγερση και αποτυπώνεται ως εξής :[16]

$$T(x,t) = T_o e^{\frac{-z}{\mu}} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) = T_o e^{\frac{-z}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (2.3)$$

Όπου  $\mu$  είναι το μήκος θερμικής διάχυσης και εκφράζεται :

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho C}} = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (2.4)$$

Όπου

- $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα,
- $\rho$  είναι η πυκνότητα,
- $C$  η θερμοκρασία,
- $\omega = 2\pi f$  (rad\*s<sup>-1</sup>)
- $a$  είναι η θερμική διάχυση
- $\lambda$  το μήκος του θερμικού κύματος  $\lambda = 2\pi * \mu$

Η ταχύτητα διάδοσης αυτών των κυμάτων εκφράζεται ως εξής :

$$u = \lambda \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{2\omega\alpha} \quad (2.5)$$

Από τη Σχέση 2.3 προκύπτει η φάση «φ» του θερμικού κύματος η οποία συνδέεται άμεσα με το βάθος z και μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$\varphi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \quad (2.6)$$

Όπως φαίνεται από τη Σχέση 2.4 το μήκος της θερμικής διάχυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς τη συχνότητα, και αυτό δείχνει πως αυξάνοντας την συχνότητα μειώνεται η ανάλυση στις υποεπιφανειακές περιοχές ενώ μειώνοντας τη συχνότητα των θερμικών κυμάτων υπάρχει βαθύτερη ανάλυση του δοκιμίου αλλά πιο αργή. Για παράδειγμα, κατά την εξέταση μιας χρωματικής επίστρωσης με θέρμανση στα 36 Hz το βάθος παίρνει τιμές μέχρι 40 μm και μεγαλύτερο από 80 μm με θέρμανση στα 2.25 Hz [17]. Ενδιαφέρον έχει ότι η ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί θερμικά κύματα στο έδαφος της Γής. Όταν ο ήλιος προσδίδει θερμότητα για 24 ώρες η διάδοση φτάνει σε βάθος από 5-15 cm για υλικά με μικρή θερμική αγωγιμότητα, ενώ για 365 ημέρες θέρμανσης η διάδοση μικρής συχνότητας κυμάτων είναι μεγαλύτερη, περίπου 1 m μέσα στο έδαφος [18]. Όπως και τα άλλα κύματα, για παράδειγμα κύματα υπερήχων, έτσι και τα θερμικά κύματα ανακλώνται από κάποια υποεπιφανειακά χαρακτηριστικά, όπως οι ατέλειες. Τα ανακλώμενα θερμικά κύματα επιστρέφουν στην επιφάνεια του δοκιμίου όπου η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να ανιχνευθεί από μακριά εξαιτίας της θερμικής υπέρυθρης εκπομπής (υπέρυθρη θερμική κάμερα).

#### 2.4.2.2. Ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τη θερμογραφία

Οι μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας εξαρτώνται από κάποια χαρακτηριστικά των υλικών. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- η ειδική θερμότητα,  $c$ , που είναι το ποσό θερμότητας το οποίο απορροφάται από την μάζα του υλικού για ένα δεδομένο εύρος θερμοκρασίας.
- η πυκνότητα,  $\rho$ , που είναι η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου.
- η θερμική αγωγιμότητα,  $k$ , που είναι το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται σε μια δεδομένη κατεύθυνση όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας στο υλικό σε εκείνη την κατεύθυνση.
- η θερμική διάχυση,  $\alpha$ , που είναι η ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η θερμότητα από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας στο περιβάλλον υλικό.
- ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,  $h$ , είναι ένα μέτρο για το πόσο αποτελεσματικά η θερμότητα ανταλλάσσεται μεταξύ μιας επιφάνειας και μιας ροής αέριου ή υγρού.
- η θερμοκρασία,  $T$ , είναι το μέτρο της θερμικής ενέργειας που περιέχεται σε οποιοδήποτε σημείο του δοκιμίου.
- ο συντελεστής εκπομπής,  $\epsilon$ , ο συντελεστή εκπομπής δείχνει την αποδοτικότητα μιας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η θερμογραφία εξαρτάται από τις διαφορές σε αυτά τα χαρακτηριστικά των υλικών για να καθιερώσει ένα μετρήσιμο, και συνήθως εντοπισμένο, διαφορικό θερμοκρασίας. Για παράδειγμα όταν ένα δοκίμιο που η πυκνότητα του δεν είναι ίδια στο σύνολο του, θερμαίνεται ή ψύχεται, 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.

#### ➤ **Συντελεστής εκπομπής, $\epsilon$**

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη διάδοση της θερμότητας και είναι ένα χαρακτηριστικό των υλικών, είναι ο συντελεστής εκπομπής,  $\epsilon$ , 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 1.0 ενώ όλα τα υπόλοιπα έχουν κάτω από 1.0. Ενδεικτικά παραδείγματα του συντελεστή εκπομπής κάποιων γνωστών υλικών φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από πολλές μεταβλητές όπως, το χρώμα και η τραχύτητα των δοκιμίων [16].

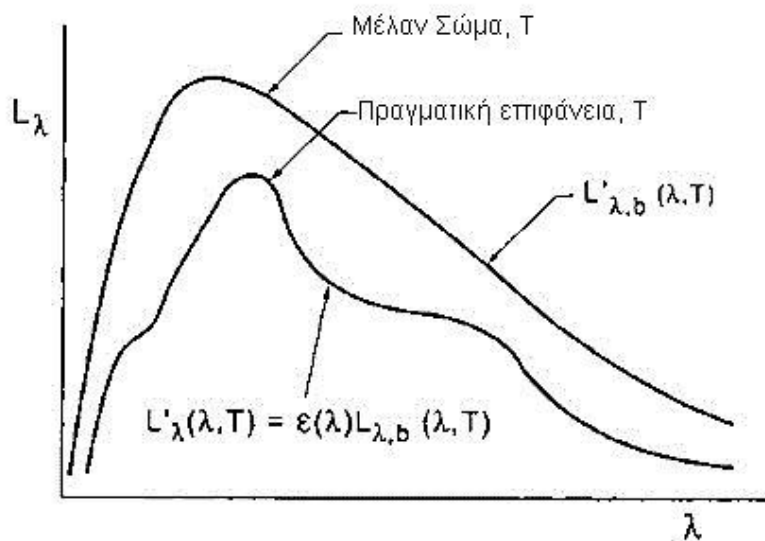
Πίνακας 2.2. Τιμές συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$ 

Υλικά	Συντελεστής εκπομπής $\epsilon$
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

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι γενικά ο συντελεστής εκπομπής δεν είναι μία σταθερά αφού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Ο  $\epsilon$  μιας πραγματικής επιφάνειας διαφέρει από αυτόν του μέλανος σώματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5. Ο φασματικός συντελεστής εκπομπής μιας επιφάνειας σε θερμοκρασία  $T$  με εκπομπή μήκους κύματος  $\lambda$  στην κατεύθυνση  $(\theta', \varphi')$  ορίζεται ως :

$$\epsilon(\lambda, T, \theta', \varphi') = \frac{L'_{\lambda}(\lambda, T, \theta', \varphi')}{L'_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.7)$$

Για τα μέταλλα, ο συντελεστής εκπομπής αυξάνεται με τη θερμοκρασία και μένει σταθερός πάνω από μια τιμή  $\theta$ , ενώ για τα μη μεταλλικά υλικά αυτό δεν ισχύει.



Εικόνα 2.5. Διάγραμμα μέλαν σώματος και πραγματικής επιφάνειας [15]

Για πρακτικούς λόγους δεν είναι πάντα αναγκαίο να χρησιμοποιούνται όλοι οι παράγοντες του  $\epsilon$ . Για παράδειγμα, αντικείμενα που ο συντελεστής εκπομπής τους δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος ονομάζονται «γκρι σώματα», ενώ για τα «χρωματιστά σώματα» ο  $\epsilon$  εξαρτάται από όλους τους παράγοντες  $\epsilon(\lambda, T, \theta, \varphi)$ . Για οπτικά ομοιογενή υλικά με λεία επιφάνεια ο  $\epsilon$  είναι ιστροπικός  $\epsilon(\lambda, T, \theta)$ . Τελικά, ο φασματικός συντελεστής εκπομπής  $\epsilon(\lambda, 2\pi)$  (με χρήση ημισφαιρικού κατόπτρου) αναφέρεται σε ένα μέσο  $\epsilon$  όλων των κατευθύνσεων ( $\theta: \{0-\pi/2\}$   $\varphi: \{0-2\pi\}$ ) μέσα στον ημισφαιρικό χώρο της επιφάνειας αλλά και ο συνολικός ημισφαιρικός  $\epsilon(t, 2\pi)$  αναφέρεται σε ένα μέσο  $\epsilon$  όλων των κατευθύνσεων και για όλα τα πιθανά μήκη κύματος:

$$\epsilon(t, 2\pi) = \frac{M(T)}{M_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \epsilon(\lambda, 2\pi) M_b(\lambda, T) d\lambda}{M_b(T)} \quad (2.8)$$

➤ **Λύσεις προβλημάτων του συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  [15]**

Η χρήση μη καταστροφικών ελέγχων είναι δύσκολη έως αδύνατη για υλικά με μικρό συντελεστή εκπομπής. Είναι αδύνατον να μετρηθεί η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα υλικό όταν ο  $\epsilon$  είναι μικρότερος κατά 20% από τον  $\epsilon$  του μέλανος σώματος.

Γυαλισμένες μεταλλικές επιφάνειες έχουν μικρή απορροφητικότητα και έτσι έχουν μικρό συντελεστή εκπομπής περίπου 5% του  $\epsilon$  του μέλανος σώματος. Συνεπώς η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τέτοιες μεταλλικές επιφάνειες είναι αδύναμη και παρέχει ασαφείς υπέρυθρες εικόνες. Επίσης, η παρουσία λιπαντικών κηλίδων μπορεί να αλλάξει το συντελεστή  $\epsilon$  κατά 5,10 ή 20% του  $\epsilon$  του μέλανος σώματος. Εξαιτίας των παραπάνω λόγων, στις εικόνες θερμικής απεικόνισης εμφανίζονται ζεστά σημεία που δίνουν εσφαλμένα αποτελέσματα για την παρουσία ατελειών σε ένα δοκίμιο.

Επίσης μια άλλη ανησυχία είναι ότι ο συντελεστής  $\epsilon$  ποικίλει ανάλογα με τη γωνία εξέτασης. Για ομαλές μεταλλικές επιφάνειες ο  $\epsilon$  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  $\epsilon$  είναι οι εξής:

- ✓ Καθαρισμός επιφάνειας. Για να αποφευχθεί η μείωση του  $\epsilon$  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  $\epsilon$  είναι η κάλυψη μεταλλικών επιφανειών με χρώμα υψηλού συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  πριν τη λήψη αποτελεσμάτων. Τέτοιο χρώμα είναι το μαύρο με υψηλό  $\epsilon$  από 0,9 έως 0,98 το οποίο έχει πολύ χαμηλή ανάκλαση.

### 2.4.3. Τεχνικές Θερμογραφίας

Τα τελευταία χρόνια, η υπέρυθρη θερμογραφία έχει προκύψει ως μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για μη καταστροφικό έλεγχο. Η θερμογραφία προσφέρει ανίχνευση σε μεγάλου εύρους περιοχές των υποεπιφανειακών ατελειών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση ή να συμπληρώσει τις συμβατικές τεχνολογίες επιθεώρησης. Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, **την παθητική** και την **ενεργητική**.

Η παθητική θερμογραφία αναφέρεται στον έλεγχο των υλικών και των κατασκευών τα οποία βρίσκονται «φυσικά» σε διαφορετική θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος, ενώ στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογραφίας απαιτείται η ύπαρξη εξωτερικής πηγή θέρμανσης ώστε να προκύψουν σχετικές θερμικές διακυμάνσεις. Η παθητική θερμογραφία εφαρμόζεται κυρίως σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες όπου η θερμοκρασία αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της σωστής λειτουργίας. Μερικές σημαντικές εφαρμογές της παθητικής θερμογραφίας είναι η χρήση της στην προληπτική συντήρηση, στη φαρμακευτική, στην ανίχνευση πυρκαγιών, στην ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων κ.ά. Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές οι ασυνήθιστες, μη-φυσιολογικές θερμοκρασιακές διαφορές αποτελούν ένδειξη για ύπαρξη κάποιου προβλήματος.

Αντίθετα, στην ενεργητική θερμογραφία οι σχετικές θερμικές αντιθέσεις που θα επιβεβαιώσουν την ύπαρξη υποεπιφανειακών ατελειών προκαλούνται από ένα εξωτερικό ερέθισμα. Ανάλογα λοιπόν με το ερέθισμα που προκαλεί αυτές τις θερμικές αντιθέσεις υπάρχουν τα παρακάτω είδη θερμογραφίας : α) Θερμογραφία παλμού (PT), β) Θερμογραφία Lock-in (LT), γ) Θερμογραφία φάσης παλμού δ) Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (SH), ε) Θερμογραφία με δονήσεις (VT) [19].

#### 2.4.3.1. Θερμογραφία παλμού (PT)

Στη θερμογραφία παλμού, ένας παλμός ενέργειας εφαρμόζεται στο υπό-εξέταση υλικό δημιουργώντας ένα θερμικό μέτωπο το οποίο διαδίδεται, κάτω από την επιφάνεια, με διάχυση σύμφωνα με την εξίσωση του Fourier [20] όπως αναφέρθηκε στο [21]. Αυτός ο παλμός ενέργειας μπορεί να δημιουργηθεί από λάμπες πυρακτώσεως, δέσμη λέιζερ, αέρα



και από δέσμη νερού [22] όπως αναφέρθηκε στο [21]. Η θερμική διέγερση μπορεί να είναι είτε «θερμή» είτε «ψυχρή» διότι αυτό που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στη θερμογραφία παλμού είναι η θερμοκρασιακή διαφορά που προκύπτει [23]. Η διάρκεια του παλμού ποικίλει από μερικά  $\mu\text{s}$  για υλικά μικρού πάχους και θερμικά αγωγίμα (π.χ. μέταλλα) έως λίγα δευτερόλεπτα για υλικά με μικρή αγωγιμότητα (π.χ. πλαστικά) και μεγάλο πάχος. Η συμπεριφορά του δοκιμίου αναλύεται είτε κατά τη διάρκεια της αύξησης της θερμοκρασίας του [24] είτε κατά τη διάρκεια αποθέρμανσης του [23, 25-27]. Η θερμογραφία παλμού μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο, η πηγή θερμικής διέγερσης και η υπέρυθη κάμερα είναι τοποθετημένα μπροστά από το δοκίμιο και η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη θερμότητα που «αντανακλάται» [28]. Κατά τη δεύτερη περίπτωση, η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη διάδοση [28] της θερμότητας διαμέσου 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 των εικόνων [28, 29]. Στη μέθοδο αυτή ο χρόνος διάδοσης της θερμότητας « $t$ » μπορεί να συσχετιστεί με το βάθος « $z$ » της υπό-επιφανειακής ατέλειας [23] (Σχέση 2.9).

$$t \sim \frac{z^2}{a} \quad (2.9)$$

όπου  $a$  είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης ( $\text{m}^2\text{sec}^{-1}$ ).

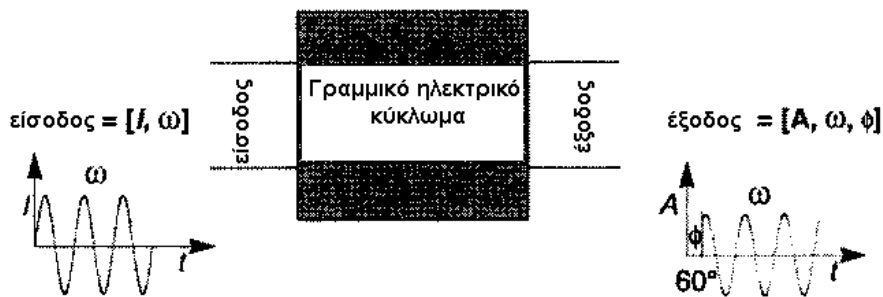
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα [28] της θερμογραφίας παλμού είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και γρήγορα στο πεδίο καθώς μπορεί να επιτευχθούν θερμικές αντιθέσεις σε πολύ γρήγορο χρονικό διάστημα. Η δυσκολία στην PT είναι ο υπολογισμός της θερμικής αντίθεσης « $C$ », το οποίο απαιτεί τον υπολογισμό των θερμικών διαφορών σε σχέση με τις υγιείς περιοχές στο θερμογράφημα. Ο υπολογισμός της « $C$ » προκύπτει από τη Σχέση 2.10 .

$$C(t) = \frac{T_i(t) - T_i(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad (2.10)$$

όπου  $i$  αναφέρεται σε μία περιοχή με πιθανή ατέλεια και όπου  $s$  σε μία υγιή περιοχή.

2.4.3.2. Θερμογραφία lock-in (LT)

Η οπτική θερμογραφία lock-in βασίζεται στην δημιουργία θερμικών κυμάτων που δημιουργούνται από μια περιοδική (συνήθως ημιτονοειδή) θερμική διέγερση. 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. Ο όρος 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  $\omega$  και μέτρο  $E_1$ , παρατηρείται έξοδος  $E_0$  με ίδια ημιτονοειδή συχνότητα  $\omega$  αλλά με μέγεθος  $A$  και φάση  $\phi$  (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6. Η έννοια του lock-in κατά αναλογία με ένα γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα

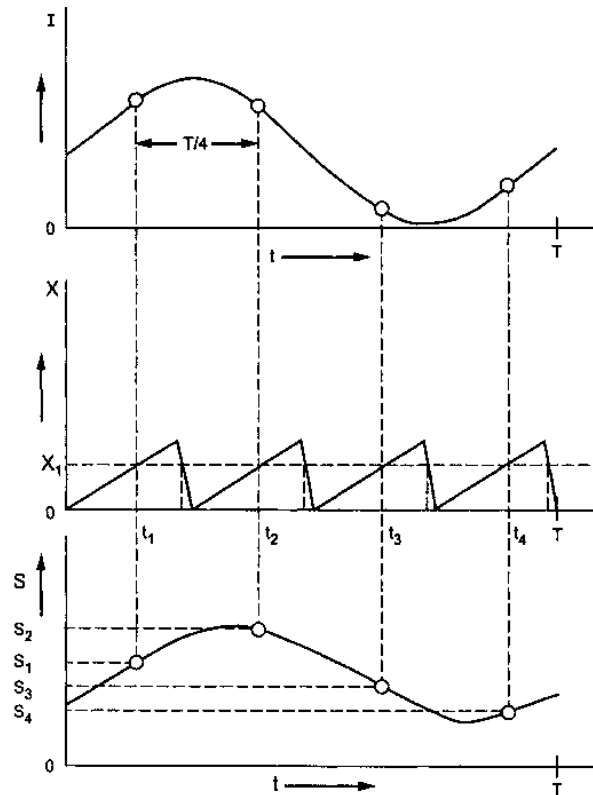
Στην περίπτωση των Μη Καταστροφικών Ελέγχων η παραπάνω έννοια εφαρμόζεται ως εξής, με το δοκίμιο να αντικαθιστά το γραμμικό κύκλωμα. Θερμότητα με μέγεθος  $Q$  εναποτίθεται στην επιφάνεια του δοκιμίου με γωνιακή συχνότητα  $\omega$ . Αυτή η θερμότητα δημιουργεί θερμικό κύμα το οποίο προωθείται μέσα στο 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:

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

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  $\varphi$  για τέσσερα ισαπέχοντα σημεία θερμοκρασίας  $S_1, S_2, S_3$  και  $S_4$  (Εικόνα 2.7) που καταγράφηκαν στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου (1 περίοδος ημιτονοειδούς καμπύλης).

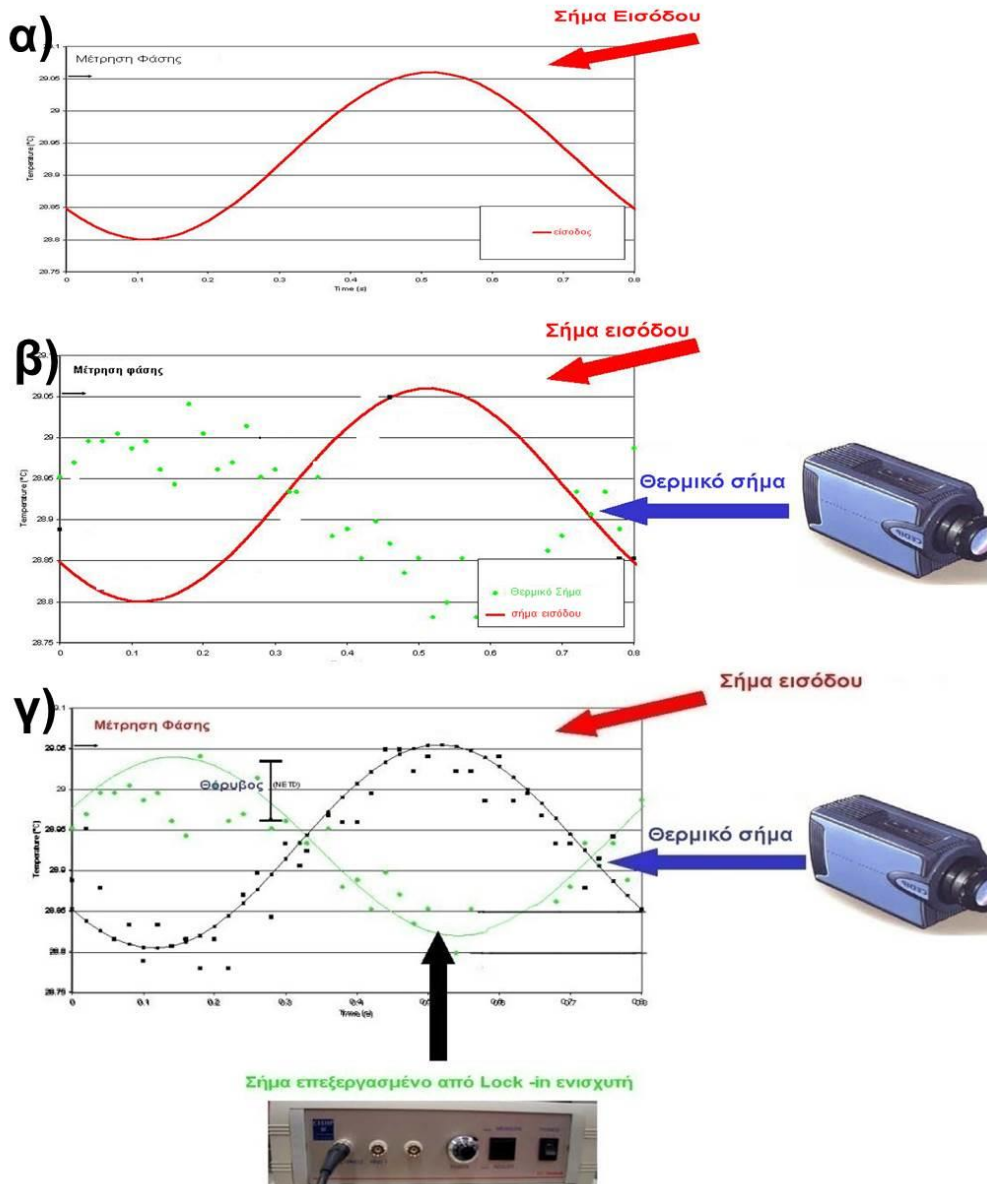
$$\varphi = \alpha \tan \frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4} \quad (2.11)$$

$$\text{και} \quad A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (2.12)$$



Εικόνα 2.7. Αρχή του υπολογισμού των εικόνων "φάσης", "εύρους", και "θερμοκρασίας"

Τέσσερα σημεία, συνήθως, επιτρέπουν τον υπολογισμό του  $A$  και  $\varphi$ , ενώ περισσότερα σημεία επιτρέπουν και την αποφυγή «θορύβου» που προκύπτει από τη διαδικασία. Η μέθοδος lock-in παρέχει τρεις εικόνες: φάση  $\varphi$ , 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.



Εικόνα 2.8. Λειτουργία του lock-in ενισχυτή

Σημαντικό στη lock-in θερμογραφία είναι η διάρκεια της θερμικής διέγερσης η οποία πρέπει να είναι το λιγότερο ένα κύκλο, για παράδειγμα, για συχνότητα 1Hz απαιτείται χρόνος το λιγότερο 1 δευτερόλεπτο και για 0.1Hz απαιτείται χρόνος τουλάχιστον 10 δευτερόλεπτα. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ένα από τα κυριότερα σημεία της οπτικής lock-in θερμογραφίας είναι η συσκευή lock-in. Για το λόγο αυτό πρέπει να κατανοηθεί η λειτουργία και η χρησιμότητα μιας τέτοιας συσκευής. Η λειτουργία του ενισχυτή lock-in παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8 κάθε σήμα που λαμβάνεται χαρακτηρίζεται από «θόρυβο». Όταν λοιπόν ένα σήμα επεξεργαστεί από έναν ενισχυτή lock-in τότε το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 2.8γ όπου το σήμα πλέον εμφανίζεται χωρίς «θόρυβο».

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 (βλέπε Εικόνα 2.9):

- **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 (νέα τεχνική, αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 3.5)**



Εικόνα 2.9. Είδη lock-in θερμογραφίας

### 2.4.3.3. Θερμογραφία φάσης παλμού (PPT)

Η θερμογραφία φάσης παλμού 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 (Σχέση 2.13) για κάθε εικονοστοιχείο (pixel x,y) των θερμογραφημάτων κατά την αποθέρμανση του υλικού.

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k)e^{2\pi i k n / N} = Re_n + iIm_n \quad [30] \quad (2.13)$$

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» [3].

#### *2.4.3.4. Θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση (SH)*

Η θερμογραφία με κλιμακωτή θέρμανση δεν διαφέρει ιδιαίτερα από τη θερμογραφία με παλμούς. Το μέσο διέγερσης είναι πάλι θερμικοί παλμοί αλλά σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου καθώς πραγματοποιείται κλιμακωτή 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. [24, 31].

#### *2.4.3.5. Θερμογραφία με δονήσεις (VT)*

Η θερμογραφία με δονήσεις [3, 32, 33] είναι τεχνική ενεργητικής θερμογραφίας κατά την οποία, προκαλούνται εξωτερικές μηχανικές δονήσεις. 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.

#### 2.4.4. Θερμικές κάμερες υπέρυθρου

Οι περισσότερες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούν μια υπέρυθρη κάμερα (Εικόνα 2.10) συνδεδεμένη με ένα υπέρυθρο ανιχνευτή που απεικονίζει τις διαφορές θερμικής ακτινοβολίας. 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 2.10. Υπέρυθρες θερμικές κάμερες

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 [19]:

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

Οι ανιχνευτές φράγματος Schottky έχουν διαστάσεις 512X512 (pixels) και είναι κατασκευασμένοι από υλικό PtSi και το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 3 μm έως 5 μm. Επίσης είναι κατασκευασμένοι από GaSi και το φάσμα που ανιχνεύουν είναι από 8 μm έως 14 μm και 8 μm έως 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 μm έως 2,6 μm. Για τη σωστή λειτουργία τους απαιτείται σύστημα ψύξης ώστε να επιτευχθούν θερμοκρασίες από 50K έως 70 K.

Οι ενδογενείς ανιχνευτές έχουν διαστάσεις 128X128, ανιχνεύουν φάσμα από 8 μm έως 12 μm και είναι κατασκευασμένοι από HgSdTe. Επίσης κάποιοι ανιχνευτές είναι κατασκευασμένοι από InGaAs και λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου.

Ανιχνευτές Z-επιπέδου . Κυκλώματα πυριτίου είναι κατεργασμένα πάνω σε μια μικροσκοπική επιφάνεια μαζί με έναν εγκατεστημένο ανιχνευτή στη μία άκρη της. Αυτές οι επιφάνειες ενωμένες συνθέτουν τον τελικό ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές αυτοί χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σταγόνων μέσα σε δοκίμια.

Οι ανιχνευτές συστοιχίας μικροβολομέτρων έχουν διαστάσεις 320X240 (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 του υπέρυθρου φάσματος ακτινοβολίας (μήκος κύματος).

Αυτές κατανέμονται ως εξής:

- SWIR (Short-Wave Infra Red), από 1.0 μm έως 3.0 μm. Με αισθητήρες που χρησιμοποιούν υλικό InGaAs.
- MWIR (Mid-Wave Infra Red), από 3.0 μm έως 5.0 μm. Με αισθητήρες υλικού InSb, HgCdTe και σπανιότερα PbSe.
- LWIR (Long-Wave Infra Red), από 8.0 μm έως 12.0 μm ή από 7.0 μm έως 14.0μm. Με αισθητήρες υλικού HgCdTe.

## 2.5. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Nondestructive Testing Handbook, Nondestructive Testing Overview. Second Edition ed. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing; 1996.
- [2] Nondestructive Testing Methods, TO33B-1-1 (NAVAIR 01-1A-16) TM43-0103. Washington, DC: Department of Defence; 1984.
- [3] Maldague XPV, Moore PO. Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing: American Society for Nondestructive Testing; 2001.
- [4] Nondestructive Evaluation, Theory Techniques, and Applications. New York: Marcel Dekker, Inc.; 2001.
- [5] Malhotra VM, Carino NJ. CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete: CRC Press; 1990.
- [6] Kaiser J. Untersuchungen über dem auftreten Geräuschen beim Zugversuch. Munich 1950.
- [7] ASTM E 1316-02a. Standard Terminology for Nondestructive Examinations. Section B: Acoustic Emission. Annual Book of ASTM Standards. ASTM. West Conshohocken, PA; 2003.
- [8] Rüsç H. Physical problems in the testing of concrete: Cement and Concrete Association; 1960.
- [9] L'Hermite, R.G., Volume changes of concrete, in Proc. 4th Int. Symp. on Chemistry of Cement, Vol. II, Washington, National Bureau of Standards, Washington, D.C., NBS, Monograph, No. 32; 1960.
- [10] L'Hermite, R.G..What we know about the plastic deformation and creep of concrete? RILEM Bull.,1, 21; 1959.
- [11] Robinson, G.S., Methods of detecting the formation and propagation of microcracks in concrete, in Proc. Int. Symp. on the Structure of Concrete, Brooks, A.E. and Newman, K., Eds., London, 1965, Cement and Concrete Association, London;1968.
- [12] Green, A.T., Stress wave emission and fracture of prestressed concrete reactor vessel materials, in Proc. 2nd Interamerican Conf. on Materials Technology, American Society of Mechanical Engineers, Vol. I; 1970.
- [13] Εγχειρίδιο Χρήστη Flir B Series και T Series. Publ. No. 1558798 Rev. a288 GREEK (EL); 2008.
- [14] Nondestructive Evaluation and Quality Control. 9th ed. Vol. 17. 1992: ASM International; 1989.
- [15] Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing: Wiley; 2001.
- [16] Favro LD, Han X. Thermal wave material characterization and thermal wave imaging: ASNT TONES; 1998.
- [17] Busse G. Nondestructive evaluation of polymer materials. NDT and E International. 1994;27(5):253-62.

- [18] Del Grande NK, Clark GA, Durbin PF, Fields DJ, Hernandez JE, Sherwood RJ. Buried object remote detection technology for law enforcement. Orlando, FL, USA: Publ by Int Soc for Optical Engineering; 1991. p. 335-51.
- [19] Maldague XPV. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*. 2002;60(9):1060-73.
- [20] Carslaw HS, Jaeger JG. *Conduction of Heat in Solids*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press; 1959.
- [21] Pulse phase infrared thermography : Maldague, X.; Marinetti, S. *Journal of Applied Physics*, Vol. 79, No. 5, pp. 2694–2698 (1 Mar. 1996). *NDT & E International*. 1996;29(6):391.
- [22] *Infrared Methodology and Technology*. New York: Gordon and Breach; 1994.
- [23] Thermographic nondestructive evaluation of industrial materials and structures : Cielo, P.; Maldague, X.; Deom, A.A.; Lewak, R. *Materials Evaluation*, Vol. 45, No. 4, pp. 452–460 (Apr. 1987). *NDT & E International*. 1993;26(2):107.
- [24] Maclachlan Spicer JW, Kerns WD, Aamodt LC, Murphy JC. Time-resolved infrared radiometry of multilayer organic coatings using surface and subsurface heating. 1991:311-21.
- [25] W. P. Winfree, in *Review of Progresses in Quantitative Non Destructive Evaluation*, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 11A, p. 471, Plenum, New York; 1992.
- [26] Almond DP, Lau SK. Defect sizing by transient thermography. I: An analytical treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1994;27(5):1063-9.
- [27] Cielo P. Pulsed photothermal evaluation of layered materials. *Journal of Applied Physics*. 1984;56(1):230-4.
- [28] *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography* : Maldague, X.P.V. Springer-Verlag, 207pp. (1993). ISBN 0-387-19769-9. *NDT & E International*. 1996;29(6):396.
- [29] Grinzato EG, Vavilov VP, Bison PG, Marinetti S, Bressan C. Methodology of processing experimental data in transient thermal nondestructive testing (NDT). 1995:167-78.
- [30] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. Advances in pulsed phase thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2002;43(3–5):175-81.
- [31] Osiander R, Maclachlan Spicer JW, Amos JM. Thermal inspection of SiC/SiC ceramic matrix composites. 1998:339-49.
- [32] Tenek LH, Henneke Ii EG. Flaw dynamics and vibrothermographic-thermoelastic nondestructive evaluation of advanced composite materials. 1991:252-63.
- [33] Mignogna RB, Green Jr RE, Duke Jr JC, Henneke Ii EG, Reifsnider KL. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials. *Ultrasonics*. 1981;19(4):159-63.

# Κεφάλαιο 3

---

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**  
*Ανάπτυξη μη καταστροφικών μεθόδων*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### Ανάπτυξη μη καταστροφικών μεθόδων

#### 3.1. Παρακολούθηση Ρωγμής

##### 3.1.1. Σκοπός – Αντικείμενο

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.1.3 ασχολείται με τον προσδιορισμό του ρυθμού διάδοσης ρωγμής συνδυάζοντας τη θερμογραφία με την ακουστική εκπομπή. Μία νέα μεθοδολογία βασισμένη στη lock-in θερμογραφία, αναπτύχθηκε με σκοπό τον υπολογισμό του ρυθμού ανάπτυξης μίας ρωγμής και την πρόβλεψη της διαδρομής της. Τα θερμικά κύματα που δημιουργούνται από τη θερμομηχανική σύζευξη και τη διαχεόμενη εσωτερική ενέργεια κατά τη διάρκεια κυκλικής φόρτισης του δοκιμίου ανιχνεύθηκαν με θερμική κάμερα υπέρυθρου. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της θερμοελαστικότητας μετασχηματίστηκε η θερμοκρασιακή κατανομή σε τασικό πεδίο.

Η ανάπτυξη της μεθόδου βασίστηκε στην αναμενόμενη αύξηση των τάσεων, που καταγράφηκαν ως συνάρτηση του χρόνου (κύκλοι κόπωσης), στην περιοχή που η ρωγμή πλησιάζει στη γραμμή αναφοράς, με το μέγιστο να συμβαίνει όταν η ακμή της ρωγμής αγγίζει τη γραμμή. Λόγω του ότι η διαδρομή της ρωγμής ακολουθεί τυχαία διαδρομή και όχι κατ'ανάγκη μία ευθεία γραμμή, επιλέχθηκε δισδιάστατο πλέγμα παραλλήλων γραμμών αναφοράς συγκεκριμένου μήκους για την απεικόνιση των τάσεων. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυτή, προβλέφθηκε με ακρίβεια η διαδρομή της ρωγμής, χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τιμή των τάσεων σε κάθε γραμμή αναφοράς του πλέγματος. Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας lock-in για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής συγκρίθηκαν και συμφωνούν με τις αντίστοιχες μετρήσεις της συμβατικής μεθόδου της ενδοτικότητας (compliance method).

Επιπλέον, η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή διαφορετικών τύπων θραύσης. Ο ρυθμός των εισερχόμενων σημάτων καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που βασίζονται στο είδος της κυματομορφής, συγκρίθηκαν με μηχανικές παραμέτρους όπως το φορτίο και ο ρυθμός διάδοσης μίας ρωγμής. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε τύπος θραύσης έχει διαφορετική «ακουστική υπογραφή», ταυτοποιήθηκε ο τύπος θραύσης σε πραγματικό χρόνο.

Ο σκοπός του Κεφαλαίου 3.1.4 είναι η εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας, για την ανάλυση, σε πραγματικό χρόνο, των θερμικών φαινομένων που παρατηρούνται σε σύνθετα υλικά με κεραμική μήτρα όταν υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση. Οι μηχανικές τάσεις που προκαλούνται λόγω της κυκλικής φόρτισης προκαλούν απελευθέρωση θερμότητας που οφείλεται στην αστοχία της διεπιφάνειας μεταξύ μήτρας και ενίσχυσης. Τα θερμικά κύματα, που προκαλούνται λόγω θερμομηχανικής σύζευξης, και η εσωτερική διαχεόμενη ενέργεια που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μηχανική κυκλικής φόρτισης προκαλούν αύξηση θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υλικού. Παράλληλα με την υπέρυθρη θερμογραφία, εφαρμόστηκε και η ακουστική εκπομπή για την παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται λόγω των συσσωρευμένης βλάβης στα υλικά.

Αντικείμενο του Κεφαλαίου 3.1.4.1 είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών με μήτρα «βορίου – μαγνησίου – αλουμινίου – πυριτίου» (BMAS) ενισχυμένη με συνεχείς ίνες καρβιδίου του πυριτίου (continuous SiC - fibre). Η γεωμετρία των δοκιμίων στο Κεφάλαιο 3.1.4.1 ήταν τύπου «DEN» (Double Edge Notched) με δύο διαφορετικούς λόγους εγκοπής/πλάτους με σκοπό να περιοριστεί η βλάβη σε μία προκαθορισμένη περιοχή. Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικοί λόγοι για να ερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της υπέρυθρης θερμογραφίας στην ανίχνευση της ανάπτυξης μία ρωγμής. Για την ανίχνευση και τη διάδοση μίας ρωγμής, η προκαθορισμένη περιοχή ελέγχθηκε ταυτόχρονα με δύο μη καταστροφικές μεθόδους την υπέρυθρη θερμογραφία και την ακουστική εκπομπή.

Σκοπός του Κεφαλαίου 3.1.4.2 είναι η ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας βασισμένη στην υπέρυθρη θερμογραφία για τη μελέτη του τρόπου διάδοσης μίας ρωγμής και για τον προσδιορισμό του μήκους της σε δοκίμια γεωμετρίας τύπου «CT» (compact tension). Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σύνθετα κεραμικά με ενίσχυση ιών καρβιδίου του πυριτίου. Για την επίτευξη των παραπάνω εφαρμόστηκαν δύο μη καταστροφικοί μέθοδοι (υπέρυθρη θερμογραφία και ακουστική εκπομπή) και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους με τις μετρήσεις της συμβατικής μεθόδου για την μέτρηση μήκους ρωγμής (επιμηκυνσιόμετρο τύπου «COD» (Crack Opening Displacement)).



### 3.1.2. Εισαγωγή

Η θραύση των υλικών και των δομών είναι ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει η κοινωνία μας από τότε που ξεκίνησαν να δημιουργούνται κατασκευές από τον άνθρωπο. Το πρόβλημα αυτό έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια λόγω των όλο και πιο περίπλοκων κατασκευών. Μία από τις κύριες αιτίες που μια δομή μπορεί να οδηγηθεί σε κατάρρευση είναι, η ανάπτυξη επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ρωγμών. Ως εκ τούτου η μελέτη για την ανάπτυξη, διάδοση και κρισιμότητα των ρωγμών αποτελεί το κλειδί για τον σχεδιασμό πιο ασφαλών κατασκευών.

Τα τελευταία χρόνια η NASA εφαρμόζει προηγμένες μη καταστροφικές μεθόδους αξιολόγησης όπως, η θερμογραφία, οι υπέρηχοι, η ακουστική εκπομπή, η ραδιογραφία, η τομογραφία, και τα δινορεύματα για την ανίχνευση βλαβών σε φτερά, σε πηδάλια αεροπλάνων και ουρές, σε θαλάμους ώθησης, σε δεξαμενές καυσίμων και γενικά σε τμήματα αεροσκαφών και διαστημοπλοίων [1-5]. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων και της υπολογιστικής ισχύος κατέστησαν τη θερμογραφία ως την πιο αξιόπιστη μέθοδο για τον έλεγχο βλάβης σε προηγμένα κεραμικά υλικά [6]. Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει ακρίβεια, εφαρμόζεται εύκολα, είναι ευρέως πεδίου, είναι γρήγορη και δεν απαιτεί επαφή. Ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες τεχνικές η NASA πρόσφατα χρησιμοποιεί τη θερμογραφία για τον αρχικό έλεγχο των πάνελ που απαρτίζουν τα συστήματα θερμικής προστασίας των διαστημικών λεωφορείων [4]. Η Astrium, η ευρωπαϊκή διαστημική εταιρία χρησιμοποιεί επίσης τη θερμογραφία, τις ακτίνες χ, τους υπέρηχους και πρόσφατα την ακουστική εκπομπή ως τυπικούς ελέγχους για τη δομική ακεραιότητα των υλικών που χρησιμοποιεί [7].

Η θερμογραφία lock-in αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την κατανόηση της θερμο-μηχανικής συμπεριφοράς. Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους θερμογραφίας όπου αποτυπώνεται απλά η αύξηση της θερμοκρασίας που είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, η lock-in εντοπίζει και μετρά τις θερμικές διαφοροποιήσεις που είναι ανάλογες της θερμο-μηχανικής ενέργειας που προκαλείται λόγω αρμονικής κυκλικής φόρτισης υπό αδιαβατικές συνθήκες [8]. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην άμεση συσχέτιση των θερμοκρασιακών διαφορών, που προκαλούνται από τη θερμική διέγερση λόγω μηχανικής καταπόνησης, και των θερμικών τάσεων που προκύπτουν εφαρμόζοντας τις αρχές της θερμο-ελαστικότητας [9, 10]. Επιπρόσθετα, η ποσοτική υπέρυθρη θερμογραφία έχει χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της εκδήλωσης φυσικών φαινομένων

λόγω κόπωσης και για τη γρήγορη εύρεση του ορίου κόπωσης των υλικών και των εξαρτημάτων [8, 11-13].

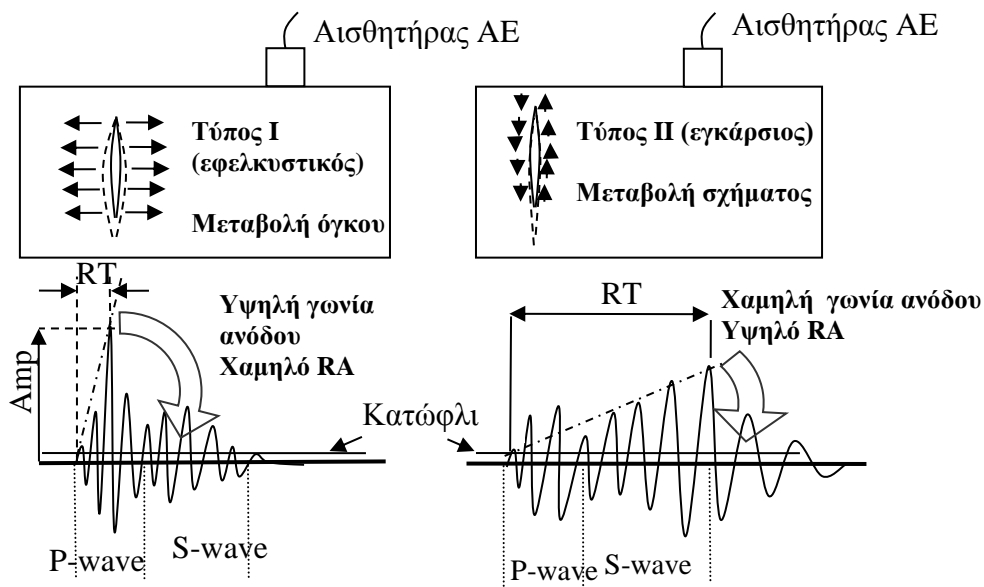
Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι η ανίχνευση και η παρακολούθηση των υπό-επιφανειακών ρωγμών. Η οπτική θερμογραφία έχει χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του μήκους ρωγμής σε δοκίμια γεωμετρίας «CT» (compact tension) με σκοπό τον υπολογισμό του Συντελεστή Έντασης Τάσης (stress intensity factor,  $\Delta K$ ) [14]. Συγκεκριμένα οι Yang κ.ά. [14] χρησιμοποίησαν τη θερμογραφία για την παρατήρηση πλαστικών παραμορφώσεων όπως, οι ζώνες ολισθήσεως και οι πλαστικές ζώνες. Επίσης χρησιμοποίησαν θεωρητικά μοντέλα για την ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ των θερμοκρασιακών διαφορών που παρατηρούνται στην επιφάνεια ενός υλικού και της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια κόπωσης. Επιπρόσθετα, η θερμογραφία έχει εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό του σημείου εκκίνησης και της διαδρομής μίας ρωγμής σε χάλυβα γεωμετρίας «dog bone» [15]. Ο Aouit και ο Ouahabi [16] μελέτησαν το ρυθμό ανάπτυξης μιας ρωγμής σε δοκίμια μονής εγκοπής εφαρμόζοντας την οπτική θερμογραφία, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει κάποιους περιορισμούς για το λόγο ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Πολλές μη καταστροφικοί μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν με την υπέρυθρη θερμογραφία για να ενισχύσουν ή και για να επαληθεύσουν τα ευρήματα της. Στο Κεφάλαιο 3.1 η υπέρυθρη θερμογραφία και η ακουστική εκπομπή συνδυάστηκαν για την καλύτερη αξιολόγηση των επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ρωγμών.

Η ακουστική εκπομπή (AE) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο της δομικής κατάστασης υλικών και κατασκευών. Βασίζεται στην ελαστική ενέργεια που απελευθερώνεται μετά από κάθε γεγονός διάδοσης ρωγμής. Αυτή η ενέργεια διαδίδεται μέσω του υλικού υπό μορφή ελαστικών κυμάτων και μπορεί να ανιχνευθεί από τους κατάλληλους αισθητήρες στην επιφάνεια του υλικού [17, 18]. Η αθροιστική δραστηριότητα που καταγράφεται από τους αισθητήρες είναι ενδεικτική της δριμύτητας της ρωγμάτωσης, δεδομένου ότι η ύπαρξη των ρωγμών είναι συνήθως η προϋπόθεση για την παραγωγή AE. Υψηλός ρυθμός εισερχόμενων σημάτων AE καταδεικνύει την ύπαρξη πολλών ενεργών ρωγμών ενώ χαμηλός ή μηδενικός υποδεικνύει υγιές υλικό. Όταν χρησιμοποιούνται πολλοί αισθητήρες, εκτός από τον αριθμό των σημάτων AE, σημαντική πληροφορία μπορεί να εξαχθεί σχετικά με τις γεωμετρικές θέσεις των πηγών των γεγονότων βάσει της χρονικής καθυστέρηση μεταξύ της λήψης των

αντίστοιχων σημάτων στους διαφορετικούς αισθητήρες [19, 20]. Αυτό επιτρέπει την εκτίμηση σχετικά σε ποιο μέρος του υλικού χρειάζεται επισκευή, πληροφορία που είναι κρίσιμη για τις κατασκευές μεγάλης κλίμακας.

Εντούτοις, υπάρχουν άλλες σημαντικές πτυχές των μετρήσεων ΑΕ, οι οποίες είναι βασισμένες στις ποιοτικές παραμέτρους των λαμβανόμενων σημάτων. Το σχήμα των κυματομορφών είναι ενδεικτικό του τύπου ρωγμής, κάτι πολύ σημαντικό για την ταξινόμηση των ρωγμών στα διαφορετικά υλικά [21-23]. Οι διατμητικές ρωγμές ακολουθούν τις εφελκυστικές καθώς το υλικό αστοχεί. Επομένως, ο χαρακτηρισμός του τύπου ρωγμής μπορεί να ενεργήσει ως προειδοποίηση ενάντια στην τελική αστοχία. Σε γενικές γραμμές, όταν παρατηρείται ένα εφελκυστικό γεγονός διάδοσης ρωγμής, οι πλευρές της ρωγμής απομακρύνονται μεταξύ τους, οδηγώντας σε μια παροδική ογκομετρική αλλαγή στο υλικό και επομένως, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απελευθερώνεται υπό μορφή διαμήκους κύματος και μικρό ποσό υπό μορφή εγκάρσιων κυμάτων που διαδίδονται με χαμηλότερη ταχύτητα. Επομένως, το σημαντικότερο μέρος της ενέργειας καταγράφεται αρκετά νωρίς μέσα στο κυματομορφή. Η Εικόνα 3.1.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα κυματομορφής ΑΕ που εκπέμπεται από ένα εφελκυστικό γεγονός. Ο χρόνος μεταξύ της αρχής του σήματος και της υψηλότερης κορυφής, που ονομάζεται χρόνος ανόδου (Rise Time, RT) είναι μικρός και οδηγεί σε υψηλή γωνία ανόδου του σήματος (Rise Angle). Στην περίπτωση διατμητικής ρωγμής συμβαίνει κυρίως παραμόρφωση και όχι αλλαγή όγκου που εκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας σε μορφή εγκάρσιων κυμάτων ενώ μόνο ένα μικρό ποσό ενέργειας εκπέμπεται υπό τη μορφή διαμήκους. Επομένως, το σημαντικότερο μέρος της ενέργειας (μέγιστο εύρος) φθάνει πολύ αργότερα από την αρχική διαταραχή του διαμήκους που είναι γρηγορότερη, οδηγώντας σε μακροχρόνιο RT και κατά συνέπεια σε χαμηλότερη γωνία ανόδου, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος της Εικόνας 3.1.1. Πρόσφατα η μορφή αυτή του αρχικού μέρους της κυματομορφής εξετάζεται από το δείκτη RA που είναι ο χρόνος ανόδου (RT) προς το εύρος (A) και μετράται σε  $\mu\text{s}/V$ , όπως προτείνεται από τις σχετικές συστάσεις [24]. Επιπλέον, τα εφελκυστικά γεγονότα εκπέμπουν χαρακτηριστικά υψηλότερης συχνότητας από ότι τα εγκάρσια, όπως εκφράζεται από τη μέση συχνότητα (AF), η οποία είναι ο αριθμός υπερβάσεων κατωφλίου προς τη διάρκεια του σήματος [24]. Αναφέρεται ότι οι μετρήσεις της ΑΕ εξαρτώνται από το «κατώφλι» που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη τάση για έναρξη της καταγραφής, που τίθεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκλειστεί ο χαμηλός περιβαλλοντικός θόρυβος.

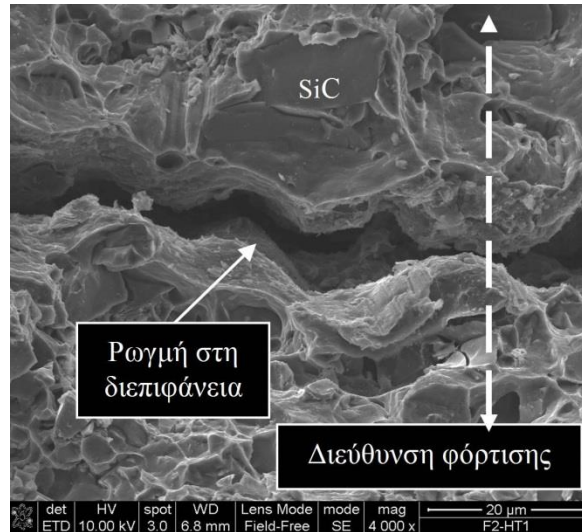


Εικόνα 3.1.1. Τύποι ρωγμών και αντίστοιχα σήματα AE

Αυτό το είδος ταξινόμησης έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμο σε εργαστηριακές εφαρμογές σχετικά με τη ρωγμάτωση από διάβρωση σε σκυρόδεμα [23], τη θραύση πολύστρωτων πλακών [21, 25], καθώς επίσης και τη διάκριση μεταξύ εφελκυστικών ρωγμών και εξόλκευσης ινών κατά τη διάρκεια κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος (steel fibre reinforced concrete, SFRC) [26]. Η συνολική δραστηριότητα AE έχει συσχετιστεί με τη διάδοση ρωγμής σε δοκίμια χάλυβα με εγχοπές και με την εκτίμηση της διάρκειας ζωής, χωρίς να ληφθούν υπ' όψιν χαρακτηριστικά κυματομορφών [27, 28].

Οι μη καταστροφικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν για την ανίχνευση ατελειών σε όλα σχεδόν τα υλικά όπως, κράματα αλουμινίου, σύνθετα με μεταλλική μήτρα και σύνθετα με κεραμική μήτρα. Τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή στη διάβρωση, και καλή μηχανική συμπεριφορά σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά τα σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα (MMC) και ενίσχυση καρβιδίων του πυριτίου, έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες έρευνες οι οποίες έχουν εστιάσει στην κατανόηση της επιρροής του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής [29-31] και της ενίσχυσης, στη μικροδομή και στη μηχανική συμπεριφορά των MMCs [32-36]. Μία ρωγμή μπορεί να διαδοθεί εσωτερικά στα MMCs με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να διαδοθεί μέσα στη μήτρα, ο δεύτερος είναι να διαδοθεί διά μέσου της ενίσχυσης και ο τρίτος ανάμεσα στη διεπιφάνεια

της μήτρας με την ενίσχυση (βλέπε Εικόνα 3.1.2). Στην πρώτη περίπτωση, η ρωγμή κινείται πολύ εύκολα ενώ στην δεύτερη και στην τρίτη η διάδοση της είναι πολύ πιο δύσκολη. Για να διαδοθεί μια ρωγμή ανάμεσα στη διεπιφάνεια απαιτείται περισσότερη ενέργεια με αποτέλεσμα τα υλικά με ενίσχυση να αντιστέκονται περισσότερο στη θραύση.



Εικόνα 3.1.2. Απεικόνιση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης της ρωγμής στη διεπιφάνεια μήτρας/ενίσχυσης [37]

Τα σύνθετα υλικά με κεραμική μήτρα που η βασική τους χρήση είναι οι εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε αεροπορικές και διαστημικές κατασκευές λόγω της αυξημένης τους ανοχής σε βλάβη, της αντοχής σε θραύση και την αντίσταση στη φθορά και στη διάβρωση σε αντίθεση με τα μονολιθικά υλικά που είναι επιρρεπή στη καταστροφική βλάβη λόγω των κοιλοτήτων αέρα, τους πόρους και των μικρορωγμών που συχνά συναντώνται στη δομή τους [38-40]. Αυξημένο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά που έχουν ως μήτρα γυαλί και ενίσχυση ίνες καρβιδίων του πυριτίου αφού παρουσιάζουν επιπλέον ιδιότητες όπως, αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία, χαμηλή πυκνότητα και χημική αδράνεια σε συμβατικό αλλά και οξειδωτικό περιβάλλον [41, 42]. Λόγω της ανισοτροπίας και της ανομοιογένειας τους η διασφάλιση της ποιότητας τους αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές [6, 43]. Το ατύχημα του διαστημικού λεωφορείου Columbia το 2003 οδήγησε στην ανάγκη για επανεξέταση της αποτελεσματικότητας των διαθέσιμων μη καταστροφικών τεχνικών για την ανίχνευση ατελειών και ρωγμών κατά την διαδικασία της κατασκευής των υλικών και για την αξιολόγηση της κατάστασης των τμημάτων μιας αεροδιαστημικής κατασκευής εν

λειτουργία [44, 45]. Αν και υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνικές για την ανίχνευση ατελειών στα προηγμένα κεραμικά, η διάδοση των ρωγμών και η επίδραση τους στη μακροσκοπική μηχανική συμπεριφορά και στη θραύση δεν έχουν ακόμη κατανοηθεί πλήρως. Πολλές μη καταστροφικές μέθοδοι έχουν συνδυαστεί με τη θερμογραφία για την αξιολόγηση βλάβης σε σύνθετα κεραμικά υλικά. Συγκεκριμένα οι Sfarra κ.ά. [46] χρησιμοποίησαν θερμογραφία και συμβολομετρία σε προηγμένα κεραμικά υλικά ενώ οι Liu κ.ά. [47] συνδύασαν την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την ακουστική εκπομπή και τη θερμογραφία με σκοπό την αξιολόγηση βλάβης σε δισδιάστατα σύνθετα C/SiC. Επιπλέον, οι Reis κ.ά. [48] εφάρμοσαν τη θερμογραφία και την ακουστική εκπομπή για να ερμηνεύσει τους μηχανισμούς θραύσης που προκαλεί η κόπωση σε σύνθετα υλικά πολυπροπυλενίου με ενίσχυση ίνες γυαλιού [49, 50]. Η ακουστική εκπομπή και η θερμογραφία έχουν συνδυαστεί επίσης και για τη μέτρηση της ενέργειας που εκλύεται από διάφορα σύνθετα κεραμικά και για την ανίχνευση βλάβης σε σύνθετα κεραμικά ενισχυμένα με ίνες «Blackglas<sup>TM</sup>» [51].

### 3.1.3. Συμπεριφορά ανάπτυξης ρωγμής

Στο Κεφάλαιο 3.1.3 δοκίμια αλουμινίου (AA 7075-T6) αλλά και σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα (A359/SiC<sub>p</sub>) γεωμετρίας «τύπου CT» υποβλήθηκαν σε εφελκυστική κόπωση μέχρι την τελική τους αστοχία. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η συσσωρευμένη βλάβη στα υλικά μελετήθηκε ταυτόχρονα με θερμογραφία lock-in και ακουστική εκπομπή. Η νέα μεθοδολογία θερμογραφίας που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε επίσης και για τη μελέτη της επιρροής των διαφορετικών τύπων θερμικής κατεργασίας στη θραύση των υλικών. Η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιήθηκε και για τον έλεγχο της πιθανής μετάβασης των χαρακτηριστικών της, καθώς αυξάνεται ο ρυθμός διάδοσης μίας ρωγμής και συσσωρεύεται βλάβη στο υλικό.

#### 3.1.3.1. Θεωρία απεικόνισης τάσεων με θερμογραφία lock-in

Στο Κεφάλαιο 3.1.3, με τη βοήθεια της υπέρυθρης θερμογραφίας lock-in παρατηρήθηκε η διάδοση της ρωγμής και χρησιμοποιώντας τη θεωρία της θερμο-

ελαστικότητας απεικονίστηκε το τασικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από τη ρωγή. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όταν ένα στερεό υλικό δεχθεί έντονη τάση από εσωτερική ή εξωτερική δύναμη τότε παρατηρούνται θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια του. Όταν ένα στερεό υλικό υπόκειται σε εφελκυστική δύναμη η θερμοκρασία του μειώνεται αναλογικά με τη δύναμη, ωστόσο όταν αυτό υπόκειται σε θλιπτική δύναμη η θερμοκρασία του αυξάνεται αναλογικά με τη δύναμη αυτή. Η συμπεριφορά αυτή είναι γνωστή ως το φαινόμενο της θερμοελαστικότητας.

Το φαινόμενο της θερμο-ελαστικότητας αναφέρεται στη θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της διαφοράς τάσης που δημιουργείται λόγω ελαστικής φόρτισης και των θερμοκρασιακών διαφορών που αναπτύσσονται. Η διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) είναι ανάλογη της διαφοράς των τάσεων ( $\Delta \sigma$ ), αν ισχύουν οι αδιαβατικές συνθήκες. Συνδυάζοντας, τον πρώτο και δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο οι τοπικές διαφορές θερμοκρασίας περιγράφονται από την Σχέση (3.1.1).

$$\rho C T - k \nabla^2 T = r + s_{the} + d_1 \quad (3.1.1)$$

Στη Σχέση 3.1.1 το « $\rho$ » αναφέρεται στην πυκνότητα, το « $C$ » είναι η ειδική θερμότητα και το « $k$ » είναι η θερμική αγωγιμότητα. Οι διαφορετικές πηγές θερμότητας περιγράφονται στη σχέση με τους όρους « $r$ » από εξωτερική πηγή θέρμανσης, « $s_{the}$ » από θερμο-ελαστική πηγή και « $d_1$ » από ενδογενή διάχυση. Η Σχέση 3.1.1 μπορεί να απλοποιηθεί αν υποθεθούν τα παρακάτω: α) ότι η πυκνότητα και η ειδική θερμότητα είναι σταθερές του υλικού, β) ότι ο όρος της επιτάχυνσης εκ μεταφοράς (convective term) είναι αμελητέος λόγω μικρής ταχύτητας, γ) ότι το υλικό είναι ισότροπο όσον αφορά τη θερμική αγωγιμότητα και δ) ότι οι εξωτερικές πηγές θέρμανσης είναι χρονικά ανεξάρτητες και δίνουν τη θερμοκρασία ισορροπίας του δοκιμίου ( $T_0$ ). Η απλοποιημένη σχέση διάχυσης θερμότητας είναι η παρακάτω:

$$\rho C \Theta - k \nabla^2 \Theta = s_{the} + d_1 \quad (3.1.2)$$

Όπου  $\Theta = T - T_0$  διαφορά θερμοκρασίας.

Για να απλοποιηθεί η Σχέση 3.1.2 θα πρέπει να θεωρηθεί ότι ο ρυθμός της διαφοράς θερμοκρασίας ( $\Theta$ ) είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τον ( $\nabla^2 \Theta$ ) όρο «Laplace». Έτσι η Σχέση 3.1.2 μπορεί να απλοποιηθεί στη Σχέση 3.1.3:

$$\rho C\theta = s_{the} + d_1 \quad (3.1.3)$$

Για μικρά επίπεδα τάσεων, η έκλυση ενέργειας είναι αμελητέα σε σχέση με τη θερμότητα λόγω θερμοελαστικότητας. Ως εκ τούτου η Σχέση 3.1.3 μπορεί να απλοποιηθεί στη Σχέση 3.1.4:

$$\rho C\theta = s_{the} \quad (3.1.4)$$

Για ισοτροπικά υλικά, υπό επίπεδη τάση, η θερμοελαστική ενέργεια μπορεί να γραφτεί ως:

$$s_{the} = -\alpha T_0 \sigma \quad (3.1.5)$$

όπου «σ» είναι το σύνολο κυρίων τάσεων. Τέλος από τις Σχέσεις 3.1.4 και 3.1.5 προκύπτει η Σχέση 3.1.6 που αποτελεί την σχέση της θερμο-ελαστικότητας και έχει περιγραφεί από τον Lord Kelvin [52]:

$$\rho C\theta = -\alpha T_0 \sigma \quad (3.1.6)$$

Η Σχέση 3.1.6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το υλικό είναι ισότροπο, ομογενές, και ισχύουν οι αδιαβατικές συνθήκες. Η διαφορά θερμοκρασίας είναι ανάλογη του συνόλου των κυρίων τάσεων.

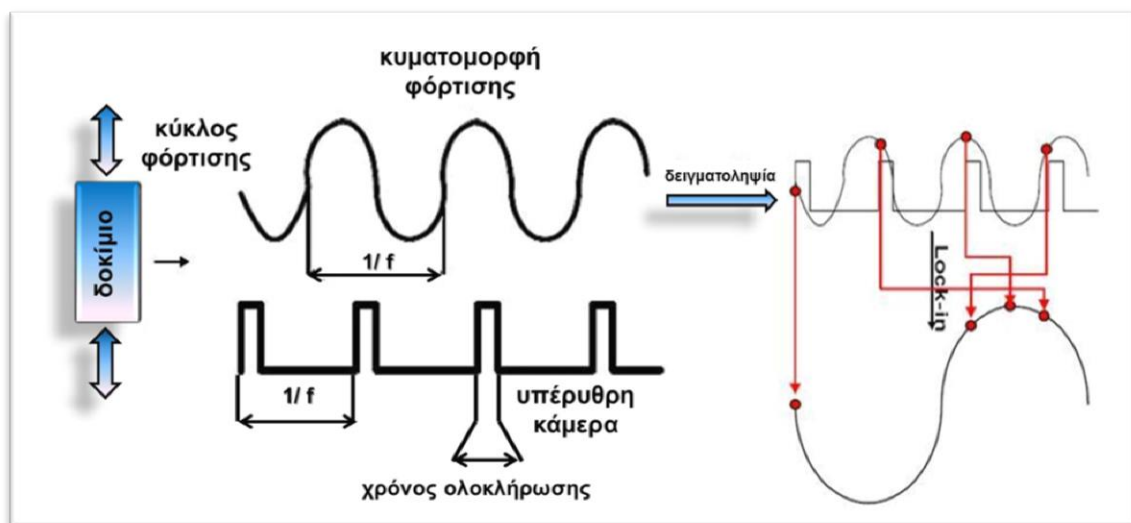
Επίσης, η Σχέση 3.1.6, όταν υπάρχει ημιτονοειδής διέγερση, μπορεί να διαμορφωθεί στη Σχέση 3.1.7:

$$\Delta\theta = -\frac{\alpha}{\rho C} T_0 \Delta\sigma = K_m T_0 \Delta\sigma \quad (3.1.7)$$



όπου  $K_m$  είναι ο συντελεστής θερμοελαστικότητας [53].

Η υπέρυθη θερμογραφία είναι μια μη καταστροφική μέθοδος που βασίζεται στην ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η θερμογραφία lock-in είναι μια ενεργητική τεχνική στην οποία το δοκίμιο υπόκειται σε θερμική διέγερση. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη δημιουργία θερμικών κυμάτων στο εσωτερικό ενός υλικού και στην ανίχνευση τους από απόσταση με τη βοήθεια υπέρυθρης θερμικής κάμερας. Η απεικόνιση της κατανομής των τάσεων σε ένα υλικό μπορεί να επιτευχθεί με μία πειραματική διάταξη η οποία περιλαμβάνει μία κάμερα υπέρυθρου και ένα συσχετιστή (correlator) σε πραγματικό χρόνο (lock-in ενισχυτής) που μετρά την ελάχιστη μεταβολή θερμοκρασίας «καθαρίζοντας» το σήμα από το θόρυβο. Η αρχή λειτουργίας της θερμογραφίας lock-in (βλέπε Εικόνα 3.1.3.) βασίζεται στο συγχρονισμό της υπέρυθρης κάμερας με την πηγή της θερμικής διέγερσης η οποία μπορεί να είναι οπτική (λαμπτήρες πυρακτώσεως), υπέρηχοι, κυκλική μηχανική φόρτιση κ.ά. Στην περίπτωση που το δοκίμιο υπόκειται σε κυκλική μηχανική φόρτιση δημιουργούνται θερμικά κύματα και το θερμοκρασιακό πεδίο που προκύπτει αποτυπώνεται σε θερμογράφημα. Η συχνότητα της θερμικής διέγερσης ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα της ατέλειας που εξετάζεται. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή ελαττώνεται η επιρροή του συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon$ ) και τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω μη σωστά κατανεμημένης θέρμανσης, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η επιθεώρηση μεγάλων επιφανειών με ακρίβεια. Ο όρος lock-in αναφέρεται στην ανάγκη να απεικονιστεί η ακριβής εξάρτηση χρόνου ανάμεσα στο σήμα εξόδου και στο σήμα εισόδου [9].



Εικόνα 3.1.3. Αρχή λειτουργίας θερμογραφίας lock-in

Το παραπάνω επιτυγχάνεται με τη χρήση lock-in ενισχυτών με αποτέλεσμα να προκύπτουν θερμογραφήματα «φάσης» και «μεγέθους». Η παραμόρφωση των στερεών υλικών συνοδεύεται συνήθως από έκλυση θερμότητας. Όταν ένα υλικό παραμορφωθεί, καταστραφεί ή υποστεί θραύση ένα μέρος της ενέργειας, που είναι απαραίτητη, για την έναρξη και τη διάδοση της βλάβης μετατρέπεται με μη αναστρέψιμο τρόπο σε θερμότητα [9].

### 3.1.3.2. Υλικά και μηχανικές δοκιμές

Ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3.1.3 είναι ένα κράμα αλουμινίου και συγκεκριμένα το AA 7075-T6 (AlZnMgCu1,5F53). Ο συγκεκριμένος τύπος αλουμινίου παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εξαρτήματα και δομές που υποβάλλονται σε υψηλές μηχανικές τάσεις. Ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως, εξαρτήματα αεροσκαφών, γρανάζια και άξονες, εξαρτήματα πυραύλων, και για αεροδιαστημικές και αμυντικές εφαρμογές. Αναλυτικά η χημική σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.1.1. και 3.1.2. αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1.1. Χημική σύσταση AA 7075

Στοιχεία (κ.β. %)								
AA 7075 – T6 En 573-3 (AlZnMgCu1,5F53)	Cu	Si	Zn	Pb	Fe	Mg	Mn	Ti
	1,20		5,10	1,00		2,10		
	-	0,40		-	0,50	-	0,30	0,20
	2,00		6,10	2,50		2,90		

Πίνακας 3.1.2. Μηχανικές ιδιότητες AA 7075

Υλικό	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	HV <sub>10</sub>
AA 7075 – T6 En 573-3 (AlZnMgCu1,5F53)	460	530	5	158

Το δεύτερο υλικό που εξετάστηκε στο κεφάλαιο αυτό είναι ένα σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση 31% καρβιδίων του πυριτίου (A359/SiC 31%). Αυτό το υλικό παρουσιάζει αυξημένες μηχανικές ιδιότητες. Συχνά χρησιμοποιείται για την κατασκευή φρένων αεροσκαφών, αναρτήσεων, εξαρτημάτων αυτοκινήτων, κ.ά., λόγω της καλής συμπεριφοράς του σε υψηλές θερμοκρασίες και διάφορους τύπους φόρτισης. Στους Πίνακες 3.1.3. και 3.1.4. παρουσιάζονται, η χημική σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες του A359/SiC.

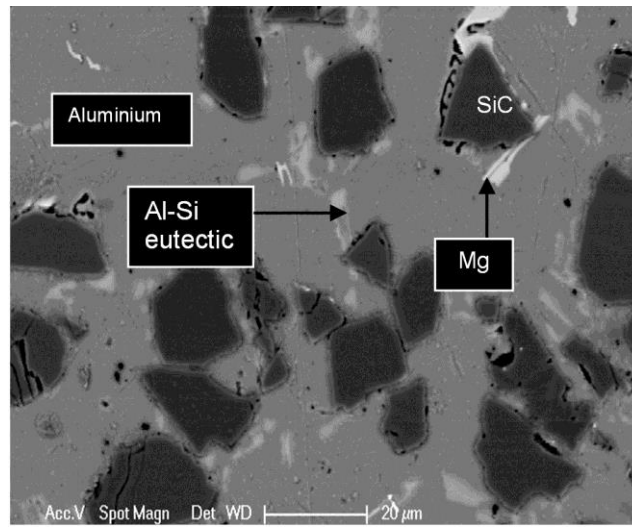
Πίνακας 3.1.3. Χημική σύνθεση του A359/SiC

Στοιχεία (κ.β. %)						
Υλικό	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn
A359/SiC <sub>p</sub> (31%)	8,5-9,5	0,5-0,7	0,1	0,2	0,2	0,1

Πίνακας 3.1.4. Μηχανικές ιδιότητες του A359/SiC

Υλικό	Θερμική κατεργασία	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	E	HV <sub>0.5</sub>
A359/SiC/31p	T1	158	168	1	108	150
	HT1	155	187	2	110	182
	T6	321	336	1.3	116	236

Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας που μελετήθηκαν, αποτελούνται από μήτρα αλουμινίου A359 – αλουμίνιο – πυρίτιο - μαγνήσιο (Al-Si-Mg) και ενίσχυση καρβιδίων του πυριτίου με μέγεθος  $17\pm 1$   $\mu\text{m}$  (βλέπε Εικόνα 3.1.4 [54]). Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν υποβλήθηκαν σε δύο διαφορετικές θερμικές κατεργασίες, T6 και HT1. [37, 55]. Ο χαρακτηρισμός T1 αντιστοιχεί στα δοκίμια που δεν υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία.



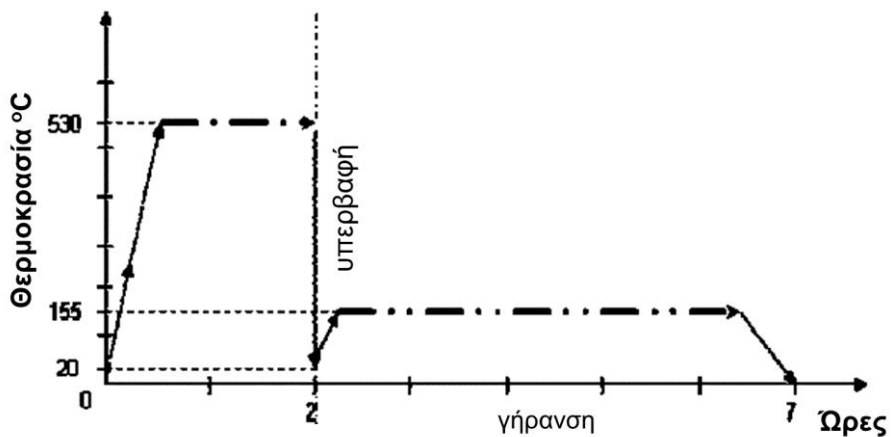
Εικόνα 3.1.4. Σύνθετο κράμα αλουμινίου/SiC [54]

Οι θερμικές κατεργασίες T6 και HT1 πραγματοποιήθηκαν σε φούρνο thermo-scientific εύρους θερμοκρασιών από 300 έως 1300 βαθμούς  $^{\circ}\text{C}$  (βλέπε Εικόνα 3.1.5)



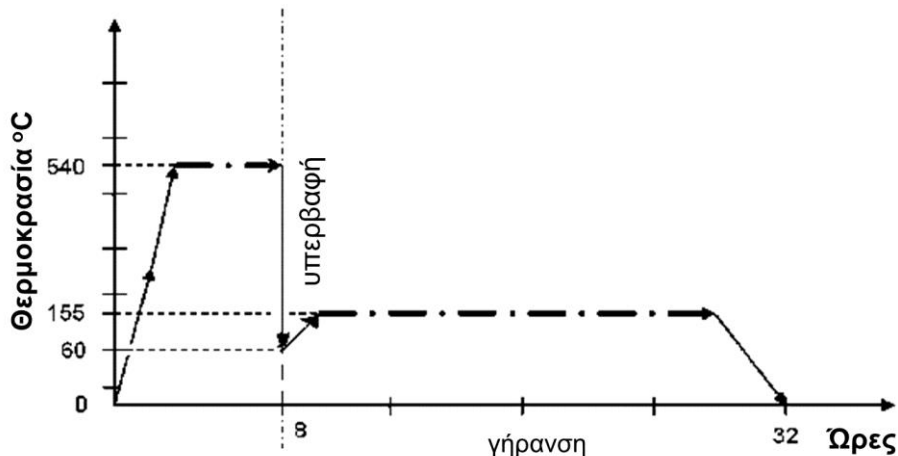
Εικόνα 3.1.5. Φούρνος υψηλών θερμοκρασιών

Κατά την T6 θερμική κατεργασία το σύνθετο υλικό θερμαίνεται αρχικά σε μία θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης του κράματος ( $530^{\circ}\text{C}$  για 2 ώρες), στη συνέχεια υπόκειται σε υπερβαφή και έπειτα το σύνθετο υλικό περνάει στο στάδιο της γήρανσης όπου και θερμαίνεται σε μια ενδιάμεση θερμοκρασία ( $155^{\circ}\text{C}$  για το διάστημα των 5 ωρών). (Εικόνα 3.1.6).



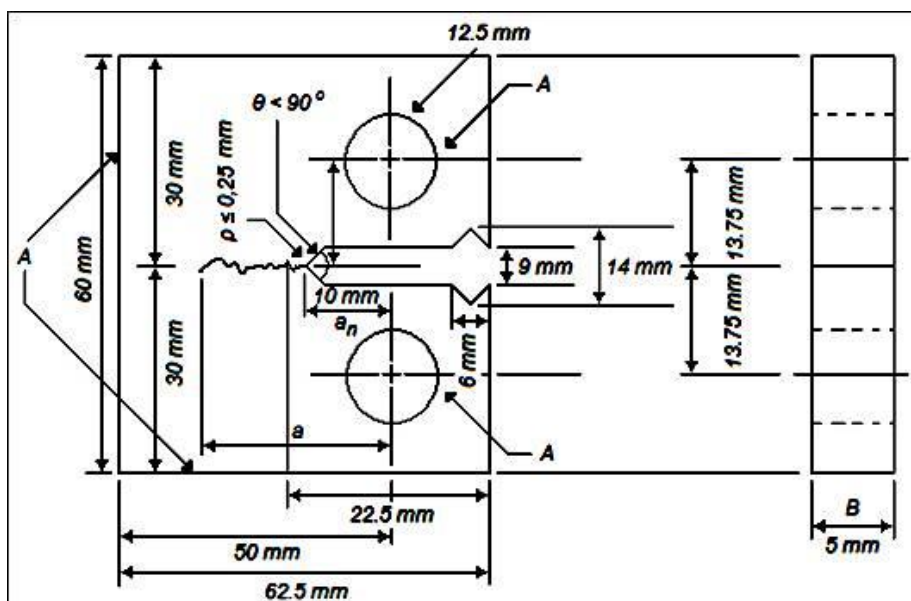
Εικόνα 3.1.6. Διαδικασία θερμικής κατεργασίας «T6»

Κατά την HT2 θερμική κατεργασία το σύνθετο υλικό θερμαίνεται αρχικά σε μία θερμοκρασία (540°C για 8 ώρες), στη συνέχεια υπόκειται σε βαφή σε ζεστό νερό θερμοκρασίας 60 °C και έπειτα το σύνθετο υλικό περνάει στο στάδιο της γήρανσης όπου και θερμαίνεται σε μια ενδιάμεση θερμοκρασία (155°C για διάστημα 24 ωρών) (Εικόνα 3.1.7).



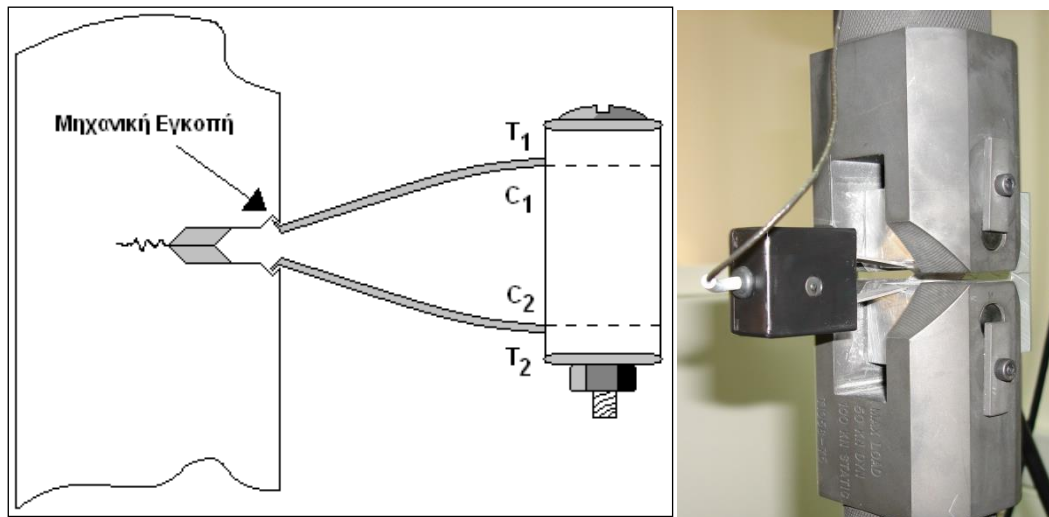
Εικόνα 3.1.7. Διαδικασία θερμικής κατεργασίας «HT2»

Τα δοκίμια AA 7075 – T6 και A359/SiC που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.1. κατασκευάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E399 - 09e1 [56]. Οι διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στην Εικόνα 3.1.8.



Εικόνα 3.1.8. Γεωμετρία δοκιμίου

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής με την συμβατική μέθοδο (compliance method) τοποθετήθηκε επιμηκυνσιόμετρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.9. Το δοκίμιο σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η τοποθέτηση του επιμηκυνσιόμετρου. Ένα ζεύγος εγκοπών χαραχθήκε στο δοκίμιο, για να στηρίζονται οι βραχίονες του επιμηκυνσιόμετρου.

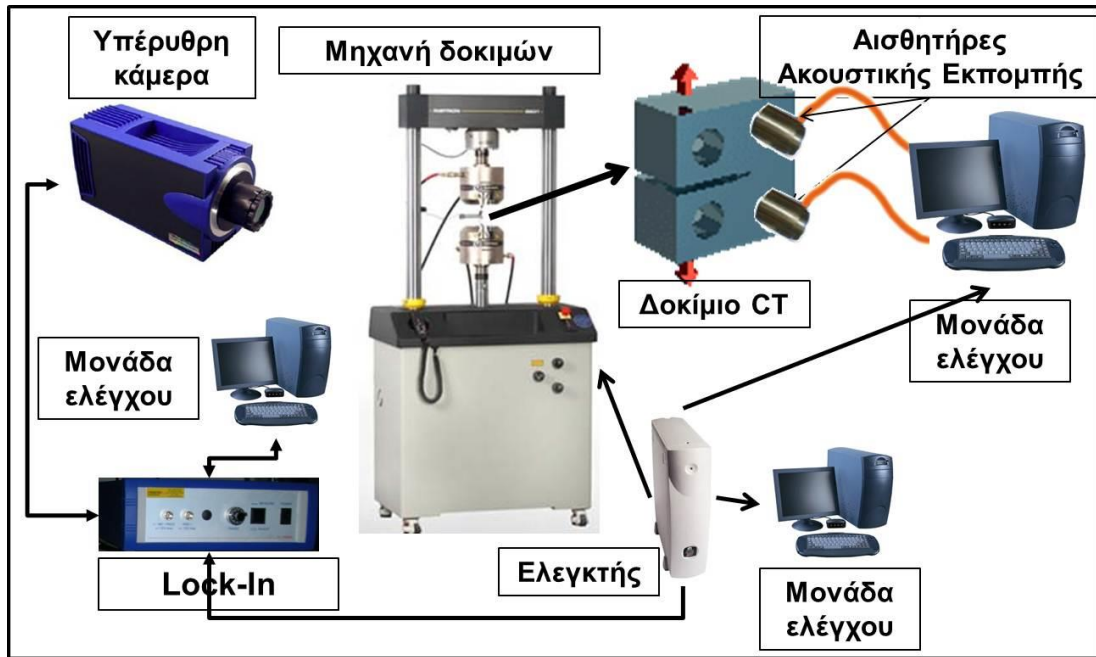


Εικόνα. 3.1.9. Σχηματική λειτουργία επιμηκυνσιόμετρου (Extensometer) και πραγματική φωτογραφία της διάταξης.

Ο προσδιορισμός του ρυθμού διάδοσης ρωγμής αλλά και η δημιουργία προκαταρκτικής ρωγμής με κόπωση σε δοκίμια CT πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E647 - 08e1 [57]. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε σερβο-υδραυλική μηχανή INSTRON με μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο  $\pm 100$  KN. Κατά τη δοκιμή κόπωσης στο δοκίμιο εφαρμόστηκε ημιτονοειδές κυκλικό φορτίο συχνότητας 3 HZ με λόγο τάσεων  $R=0.2$  και εύρος 4 KN.

### 3.1.3.3. Μεθοδολογία θερμογραφίας lock-in

Με σκοπό την ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθόδου ευρέος πεδίου για τον καθορισμό του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής κατά τη διάρκεια της κόπωσης και την απεικόνιση της διαδρομής της ρωγμής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της Εικόνας 3.1.10.



Εικόνα 3.1.10. Πειραματική διάταξη

Χρησιμοποιήθηκε υπέρυθρη θερμική κάμερα Cedip Jade 510 (βλέπε Εικόνα 3.1.11), με εστιακό φακό μεγέθους 320 x 240 pixels (MWIR), η οποία συνδέθηκε με τον lock-in ενισχυτή. Στη συνέχεια ο lock-in ενισχυτής συνδέθηκε με τον ελεγκτή της σερβο-υδραυλική μηχανής ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός της υπέρυθρης κάμερας με την πηγή της θερμικής διέγερσης που στην προκειμένη περίπτωση είναι η κυκλική μηχανική φόρτιση. Στον Πίνακα 3.1.5 φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της υπέρυθρης θερμικής κάμερας που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 3.1.11. Υπέρυθρη θερμική κάμερα

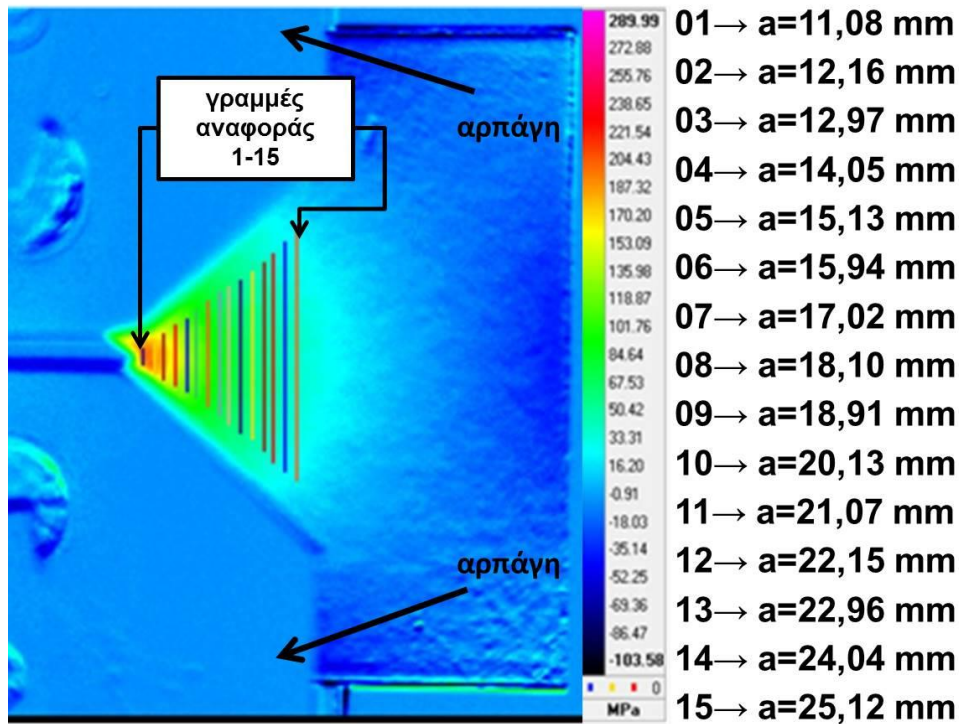


Πίνακας 3.1.5. Χαρακτηριστικά υπέρυθρης κάμερας Cedip Jade 510

<b>Χαρακτηριστικά Cedip Jade 510</b>	
Φασματικό εύρος	3-5 $\mu\text{m}$
Τύπος αισθητήρα	Ψυχώμενος, 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

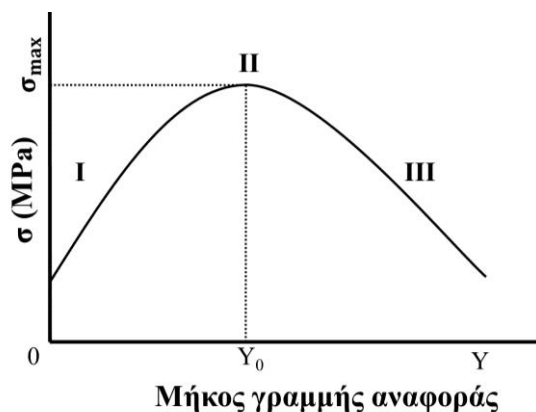
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής (da/dN) και την πρόβλεψη της διαδρομής της ρωγμής περιγράφεται παρακάτω.

- ◆ Η κατανομή των θερμοκρασιών και των τάσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης.
- ◆ Τα θερμογραφήματα αποθηκεύτηκαν ως συνάρτηση του χρόνου (κύκλοι κόπωσης) σε μορφή βίντεο για εκ των υστέρων επεξεργασία (post processing).
- ◆ Μετά το τέλος του πειράματος, σχεδιάστηκαν μέσω λογισμικού επεξεργασίας εικόνας δεκαπέντε γραμμές αναφοράς, οι οποίες τοποθετήθηκαν στα θερμογραφήματα μπροστά από το σημείο έναρξης της ρωγμής σε συγκεκριμένες αποστάσεις (Εικόνα 3.1.12.α).

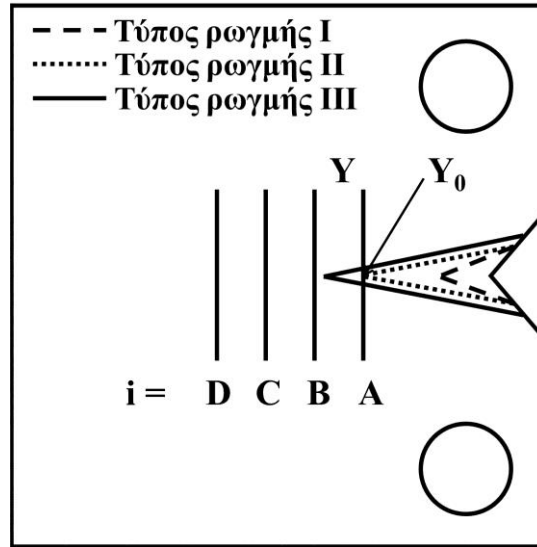


Εικόνα 3.1.12.α. Θερμογράφημα με γραμμές αναφοράς

- ◆ Κατά μήκος των γραμμών αυτών υπολογίστηκαν οι τάσεις που προέκυψαν από τα δεδομένα των θερμογραφημάτων για ένα συγκεκριμένο κύκλο κόπωσης. Η ιδέα αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι, η τάση που καταγράφηκε σε συγκεκριμένο σημείο μίας γραμμής αναφοράς σε σχέση με το χρόνο αυξάνεται όταν η ρωγμή πλησιάζει τη γραμμή αυτή (τύπος ρωγμής 1). Στη συνέχεια, η τάση μεγιστοποιείται όταν η ρωγμή φθάσει στη γραμμή (σημείο  $Y_0$ , τύπος ρωγμής 2) και τελικά μειώνεται όταν η ρωγμή προσπεράσει τη γραμμή (τύπος ρωγμής 3), όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.1.12.β και 3.1.12.γ.

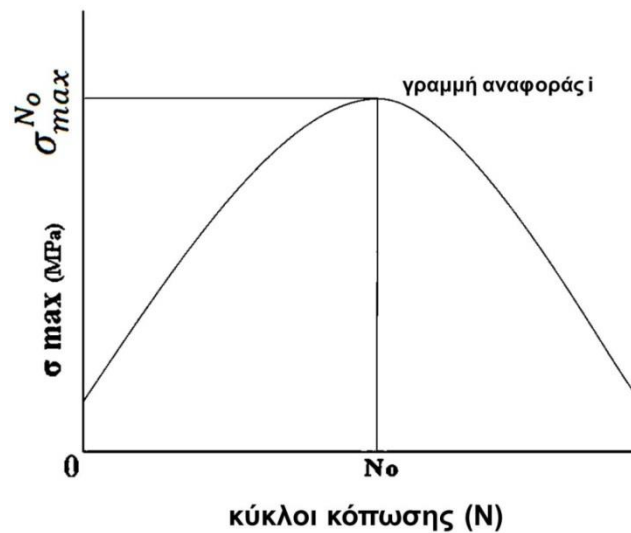


Εικόνα 3.1.12.β. Διάγραμμα τάσης σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής αναφοράς



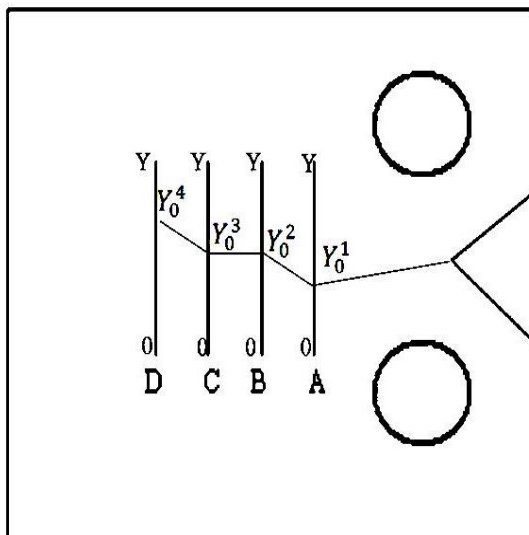
Εικόνα 3.1.12.γ. Σχηματική αναπαράσταση των 3 τύπων ρωγμής σε δοκίμιο «CT»

- ◆ Οι τάσεις υπολογίστηκαν επίσης για όλους τους κύκλους κόπωσης. Στην 3.1.12.δ απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων κατά μήκος μιας γραμμής αναφοράς σε συνάρτηση με το συνολικό αριθμό των κύκλων κόπωσης. Στον κύκλο  $N_0$ , όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση, αντιστοιχεί εκείνη η χρονική στιγμή όπου η ρωγμή έχει φθάσει τη γραμμή αναφοράς.



Εικόνα 3.1.12.δ. Διάγραμμα μέγιστης τάσης κατά μήκος μιας γραμμής σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης

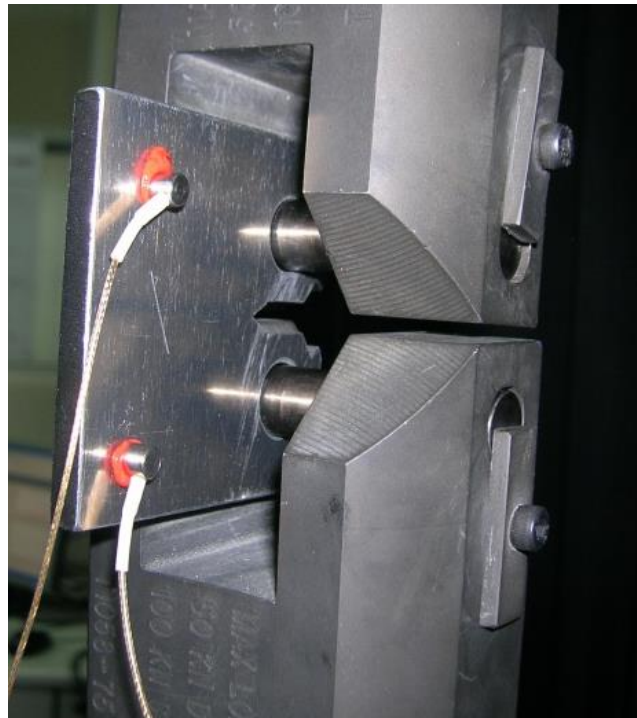
- ◆ Με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω, τα σημεία  $Y_0^i$  (σημεία που η ρωγή φθάνει τη γραμμή αναφοράς «i» για συγκεκριμένο κύκλο κόπωσης, απεικονίστηκαν σε ένα δυσδιάστατο πλέγμα με αποτέλεσμα την ακριβή πρόβλεψη της διαδρομής της ρωγμής Εικόνα 3.1.12.ε.



Εικόνα 3.1.12.ε. Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου «CT» που απεικονίζει τη διαδρομή της ρωγμής

#### 3.1.3.4. Μεθοδολογία Ακουστικής Εκπομπής

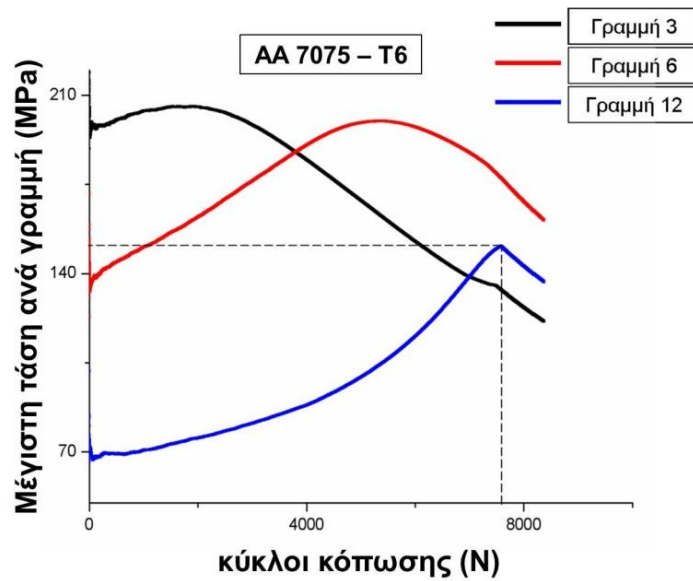
Ταυτόχρονα με τη θερμογραφική απεικόνιση, εφαρμόστηκε και η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής. Δύο πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες AE (Pico, Physical Acoustics Corp., PAC) τοποθετήθηκαν στην μία πλευρά του δοκιμίου (βλέπε Εικόνα. 3.1.13). Οι αισθητήρες κολλήθηκαν με κερί που εκτός από καλή ακουστική σύζευξη, προσέφεραν και την κατάλληλη στήριξη στους αισθητήρες κατά τη διάρκεια της κόπωσης. Το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων είναι περίπου μεταξύ 50 και 800 kHz και ως εκ τούτου, είναι κατάλληλοι για την παρακολούθηση των σημάτων από διαφορετικές πηγές. Τα σήματα καταγράφηκαν από δύο κανάλια σε κάρτα PCI-2, PAC με ρυθμό δειγματοληψίας 5 MHz. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το AE Win, PAC. Η ακουστική δραστηριότητα εμφανίζεται σε πραγματικό χρόνο, όπως και οι περισσότερες παράμετροι των σημάτων. Είναι δυνατό βέβαια να γίνει και εκ των υστέρων ανάλυση αφού τα χαρακτηριστικά των σημάτων αποθηκεύονται.



Εικόνα 3.1.13. Φωτογραφία των αισθητήρων πάνω στο δοκίμιο

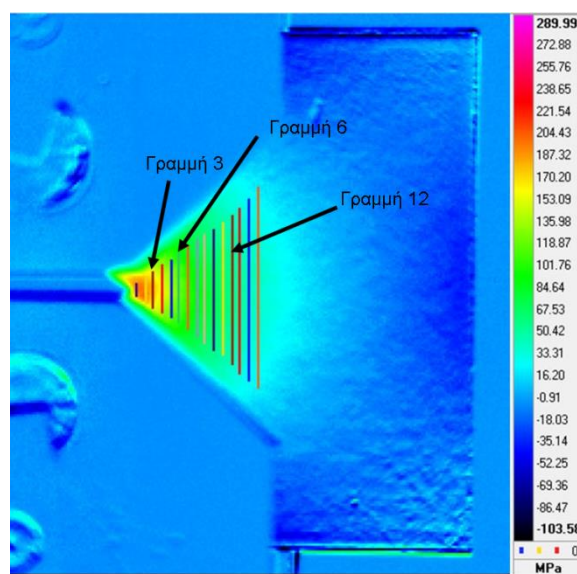
#### 3.1.3.5. Αποτελέσματα και συζήτηση

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω ακολουθήθηκε σε δοκίμια αλουμινίου AA 7075 – T6 και σύνθετα A359/SiC 31% ίδιας γεωμετρίας. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής ( $da/dN$ ) αρχικά υπολογίστηκαν οι μέγιστες τοπικές τάσεις κατά μήκος κάθε γραμμής αναφοράς, που είχαν τοποθετηθεί μπροστά από την «V» εσοχή του δοκιμίου, σε συνάρτηση με το χρόνο (κύκλοι κόπωσης).



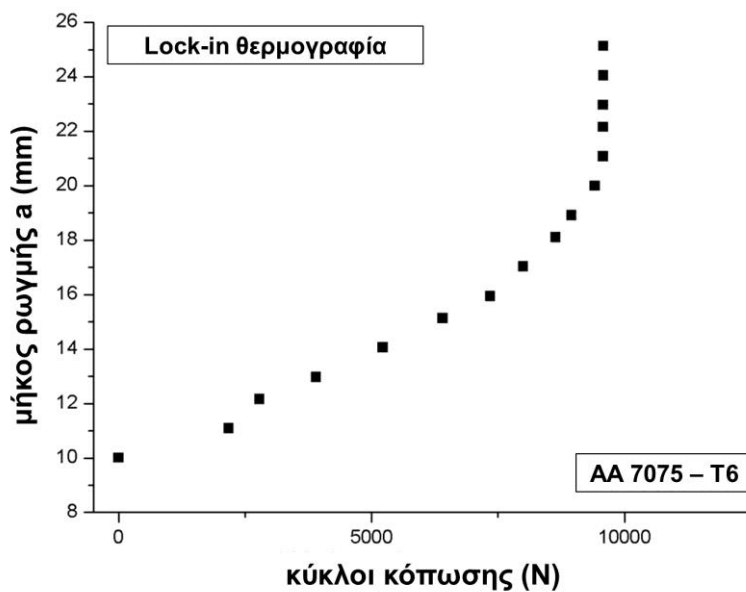
Εικόνα 3.1.14. Διάγραμμα μέγιστης τάσης κατά μήκος μιας γραμμής σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης

Στην Εικόνα 3.1.14 απεικονίζονται ενδεικτικά οι μέγιστες τοπικές τάσεις για τρεις γραμμές αναφοράς από τις δεκαπέντε που σχεδιάστηκαν συνολικά στο θερμογράφημα (Εικόνα 3.1.15). Από την Εικόνα 3.1.14 φαίνεται πώς όταν η ρωγμή πλησιάζει τη γραμμή αναφοράς τότε οι τάσεις αυξάνονται, μέγιστη τιμή τάσης παρατηρείται τη στιγμή που η ρωγμή φθάσει στη γραμμή και τέλος όταν η ρωγμή προσπεράσει τη γραμμή παρατηρείται μείωση των τάσεων.



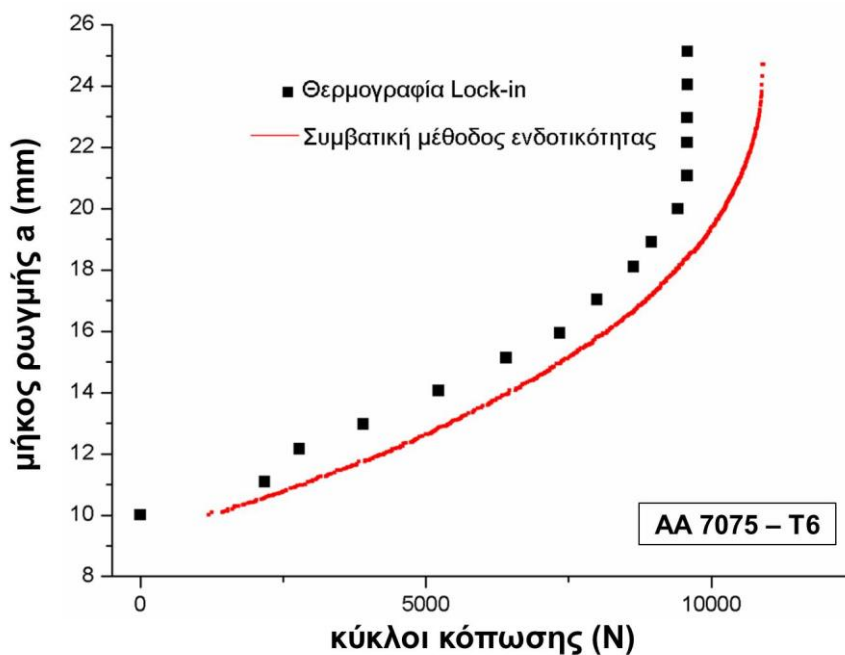
Εικόνα 3.1.15. Θερμογράφημα με δεκαπέντε γραμμές αναφοράς

Στη συνέχεια αναλύοντας το διάγραμμα της Εικόνας 6 προσδιορίστηκε η ακριβής χρονική στιγμή (κύκλος κόπωσης) που κάθε γραμμή αναφοράς παρουσιάζει μέγιστη τιμή τάσης. Η συγκεκριμένη χρονική στιγμή αντιστοιχεί στον κύκλο κόπωσης όπου η ρωγμή έχει φθάσει τη γραμμή αναφοράς. Κάθε γραμμή αναφοράς σχεδιάστηκε στο θερμογράφημα σε συγκεκριμένη θέση μπροστά από την «V» εσοχή. Γνωρίζοντας λοιπόν τη θέση των γραμμών αναφοράς αλλά και τον κύκλο κόπωσης όπου η ρωγμή φθάνει την κάθε γραμμή προσδιορίστηκε ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής «da/dN» (Εικόνα 3.1.16).



Εικόνα 3.1.16. Διάγραμμα μήκους ρωγμής σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης

Τα αποτελέσματα της θερμογραφίας lock-in για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής για το αλουμίνιο AA 7075 – T6, συγκρίθηκαν με μετρήσεις της συμβατικής μεθόδου της ενδοτικότητας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.1.17.

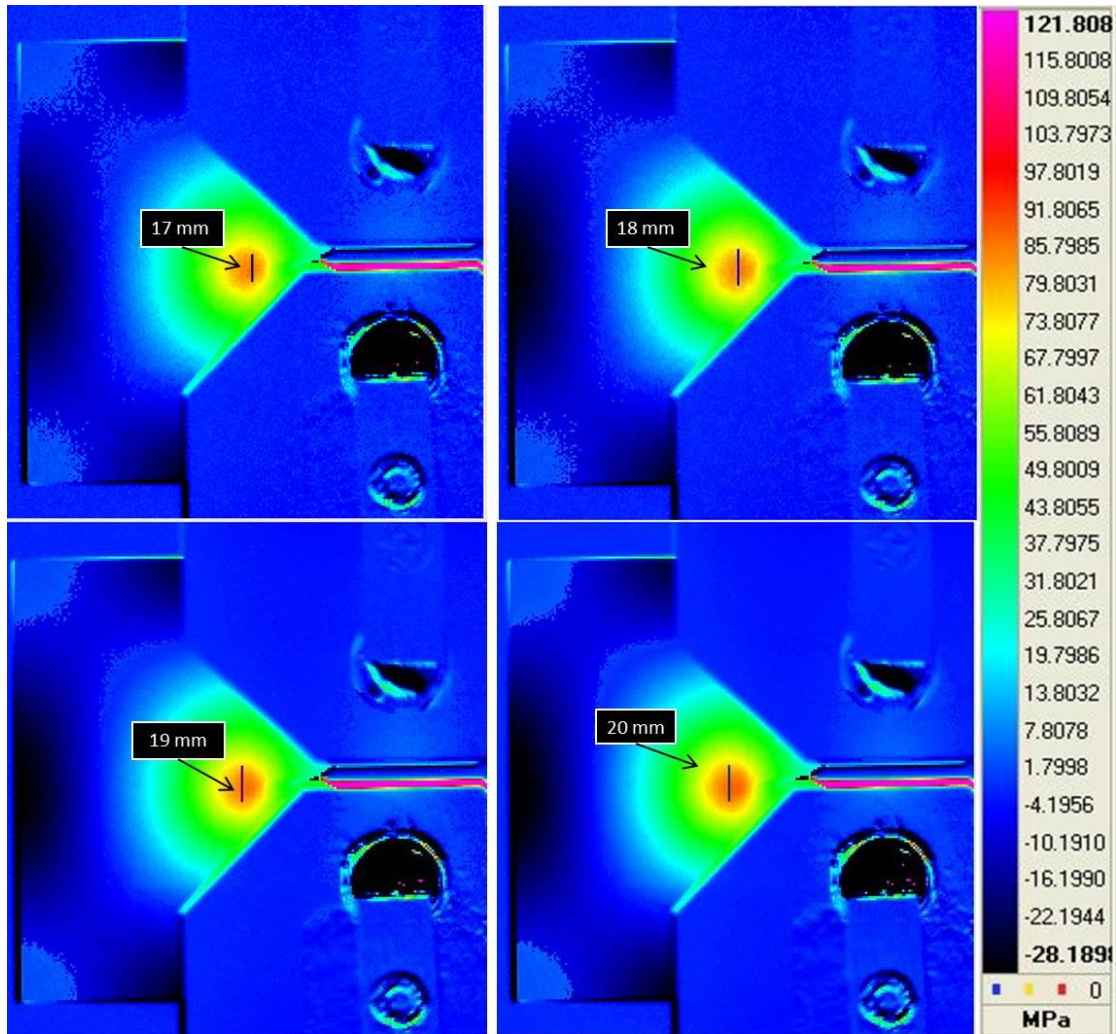


Εικόνα 3.1.17. Σύγκριση θερμογραφίας lock-in με τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας για το AA 7075 – T6

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, είναι εμφανές πως η θερμογραφία lock-in μπορεί να προβλέψει τη διάδοση της ρωγμής περίπου χίλιους κύκλους πριν από τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας. Τα αποτελέσματα ήταν επαναλήψιμα για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν. Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε και για τα δοκίμια του σύνθετου υλικού A359 SiC 31% με διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες.

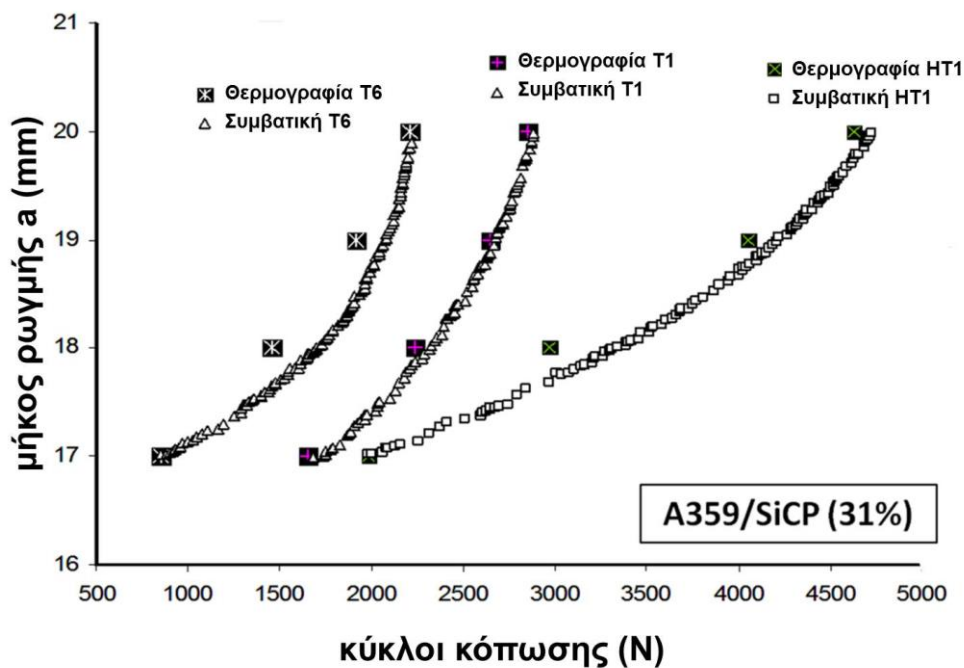
Στην Εικόνα 3.1.1.18 απεικονίζεται το τασικό πεδίο μπροστά από την εσοχή «V» καθώς διαδίδεται η ρωγμή σε δοκίμιο A359/SiC. Από τα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.1.18 φαίνεται πώς κινείται η «κόκκινη περιοχή», που αντιστοιχεί σε αυξημένες τάσεις, καθώς η ρωγμή από 17mm γίνεται 20mm.





Εικόνα 3.1.18. Θερμογραφήματα που απεικονίζουν το τασικό πεδίο και την διάδοση της ρωγμής

Από τις μέγιστες τάσεις για κάθε γραμμή αναφοράς υπολογίστηκε το μήκος της ρωγμής σε σχέση με το συνολικό αριθμό των κύκλων κόπωσης και για τις τρεις διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες για το υλικό A359/SiC. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη νέα μεθοδολογία της θερμογραφίας lock-in συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.1.19.

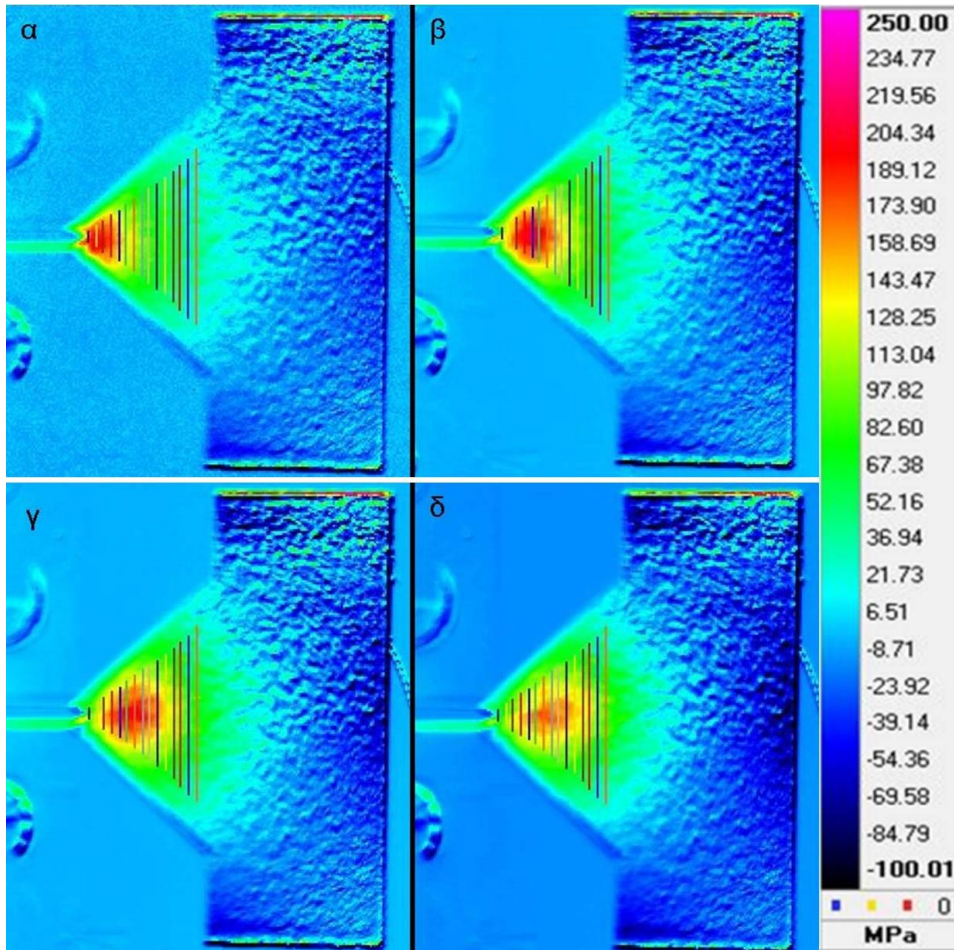


Εικόνα 3.1.19. Σύγκριση θερμογραφίας lock-in με τη συμβατική μέθοδο της ενδοτικότητας για το A359/SiC για της θερμικές κατεργασίες T6, HT1 και T1

Στην Εικόνα 3.1.19 παρατηρείται, πως ο ρυθμός αύξησης της ρωγμής είναι σχεδόν γραμμικός παρά μόνο στην περίπτωση της θερμικής κατεργασίας HT-1 όπου αλλάζει η κλίση. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί στο συμπέρασμα πως το υλικό με τη θερμική επεξεργασία HT-1 αποκτά μεγαλύτερη ολκιμότητα, καθώς για να διαδοθεί η ρωγή απαιτείται περισσότερος χρόνος (κύκλοι κόπωσης). Αντίθετα στην περίπτωση της θερμικής κατεργασίας T6 το υλικό παρουσιάζει αυξημένη ψαθυρότητα, καθώς η ρωγή διαδίδεται πιο γρήγορα σε σχέση με αυτό που δεν έχει υποστεί καμία θερμική επεξεργασία. Επίσης, από την Εικόνα 3.1.19 εξάγεται το συμπέρασμα πως οι δύο διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής έχουν καλή συσχέτιση.

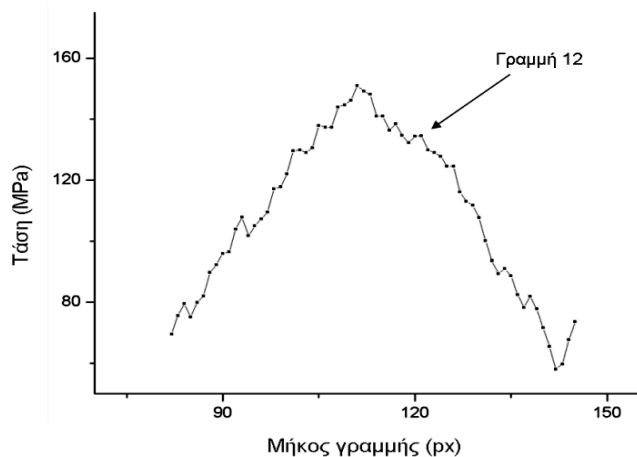
Εκτός του προσδιορισμού του ρυθμού ανάπτυξης μίας ρωγμής, με τη μέθοδο θερμογραφίας lock-in που αναπτύχθηκε μπορεί να παρατηρηθεί και ο τρόπος διάδοσης μίας ρωγμής και να προβλεφτεί η ακριβής διαδρομή της. Στην Εικόνα 3.1.20 απεικονίζεται η διάδοση της ρωγμής σε δοκίμιο αλουμινίου AA7075 – T6. Καθώς η ρωγή διαδίδεται από τα αριστερά προς τα δεξιά, η «κόκκινη περιοχή», το τασικό πεδίο δηλαδή στην ακμή της ρωγμής κινείται και αυτό. Όπως παρατηρείται από τα θερμογραφήματα της Εικόνας

3.1.20 (α-δ), η ένταση της κόκκινης περιοχής συνεχώς μειώνεται και γίνεται σχεδόν πορτοκαλί, γεγονός που δείχνει πως ενώ αρχικά στο δοκίμιο παρατηρούνται τάσεις της τάξης των 200 MPa (καθώς η ρωγμή έχει μικρό μήκος), όταν αυξάνεται το μήκος της το τασικό πεδίο μπροστά από τη ρωγμή μειώνεται περίπου στα 140 MPa.



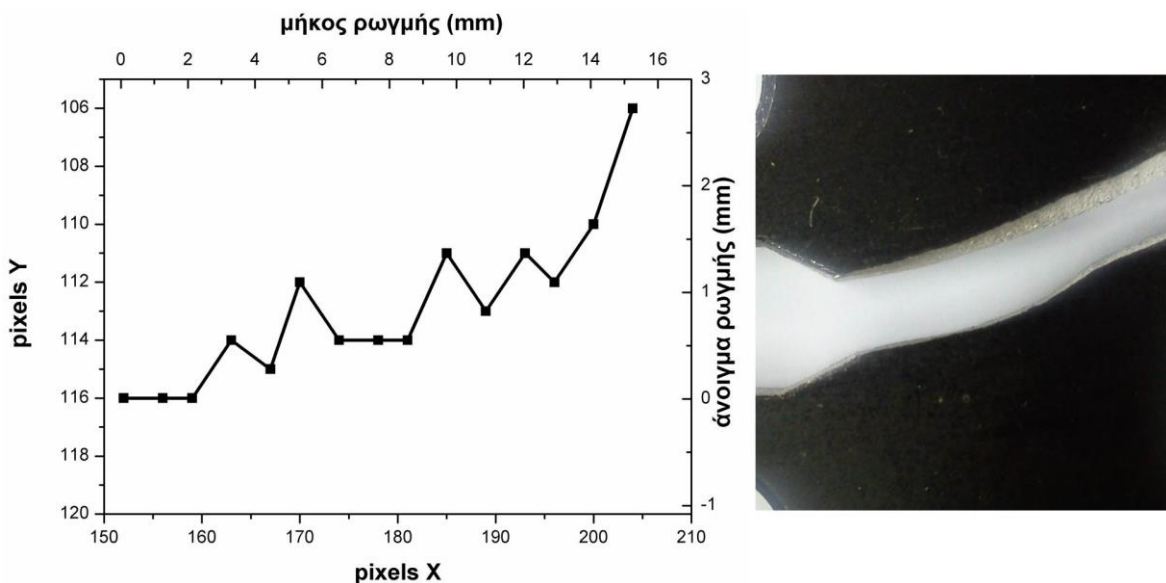
Εικόνα 3.1.20. Απεικόνιση ρωγμής α) στους 2000 κύκλους, β) στους 6320 κύκλους, γ) στους 6420 κύκλους και δ) στους 9763 κύκλους

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω, κατασκευάστηκε ένα δισδιάστατο πλέγμα που αποτελούνταν από τις γραμμές αναφοράς. Για τον ακριβή προσδιορισμό της διαδρομής της ρωγμής, για κάθε γραμμή αναφοράς αναλύθηκαν οι μέγιστες τάσεις που προέκυψαν σε συγκεκριμένο κύκλο κόπωσης σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής (Εικόνα 3.1.21).



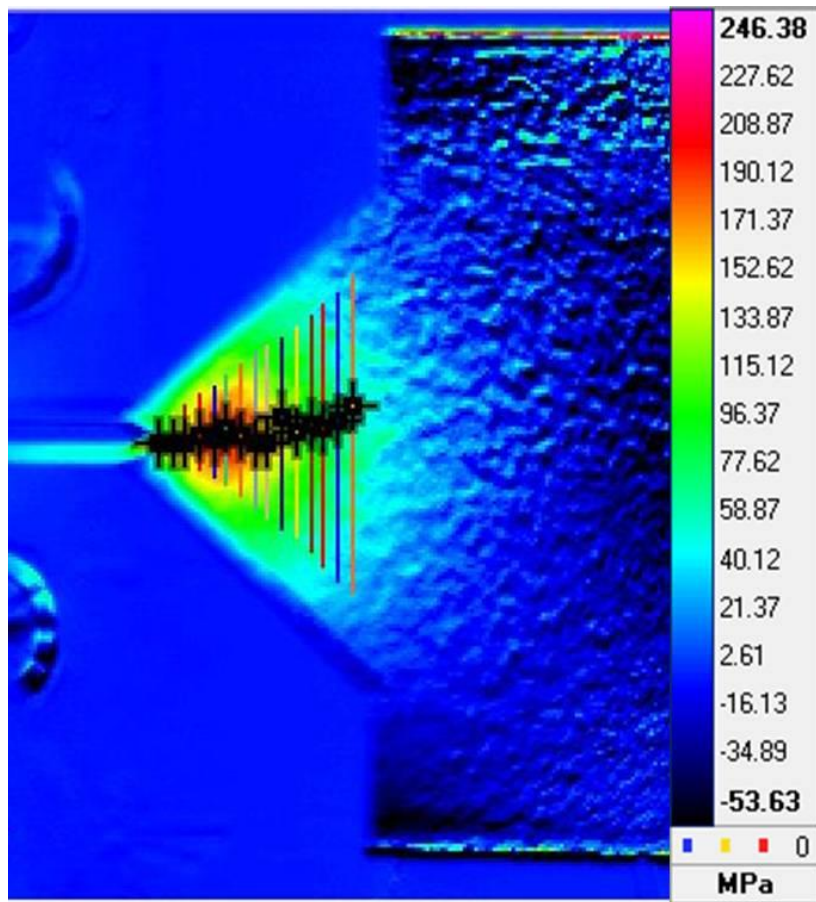
Εικόνα 3.1.21. Διάγραμμα τάσης σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής αναφοράς «12» για τον 9583 κύκλο κόπωσης

Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.1.21 το σημείο όπου παρουσιάζεται μέγιστη τιμή τάσης είναι εκείνο το σημείο όπου η ρωγμή έχει φθάσει στη γραμμή αναφοράς. Ως εκ τούτου, βρέθηκε για κάθε γραμμή αναφοράς ο συγκεκριμένος κύκλος κατά τον οποίο οι τάσεις στη γραμμή αναφοράς μεγιστοποιούνται. Από την ανάλυση για κάθε γραμμή αναφοράς προβλέφθηκε με ακρίβεια η διαδρομή της ρωγμής και συγκρίθηκε με την πραγματική φωτογραφία της ρωγμής του δοκιμίου (Εικόνα 3.1.22 α και β). Η διαδρομή της ρωγμής φαίνεται και στο θερμογράφημα της Εικόνας 3.1.23. Τα σημεία που διαδίδεται η ρωγμή επισημαίνονται στο θερμογράφημα με μαύρους σταυρούς.



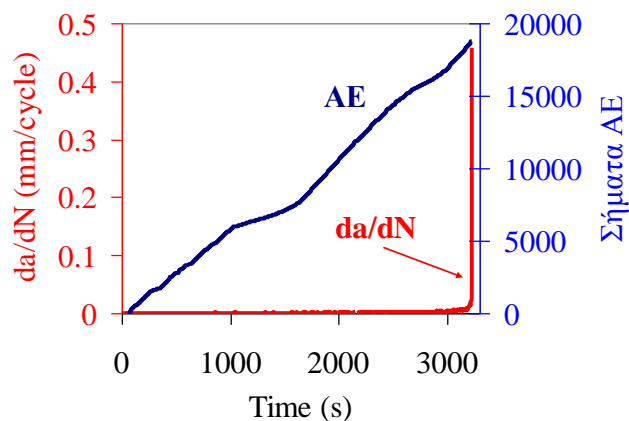
Εικόνα 3.1.22. Απεικόνιση ρωγμής με τη μέθοδο της θερμογραφίας lock-in και σύγκριση με την πραγματική ρωγμή.





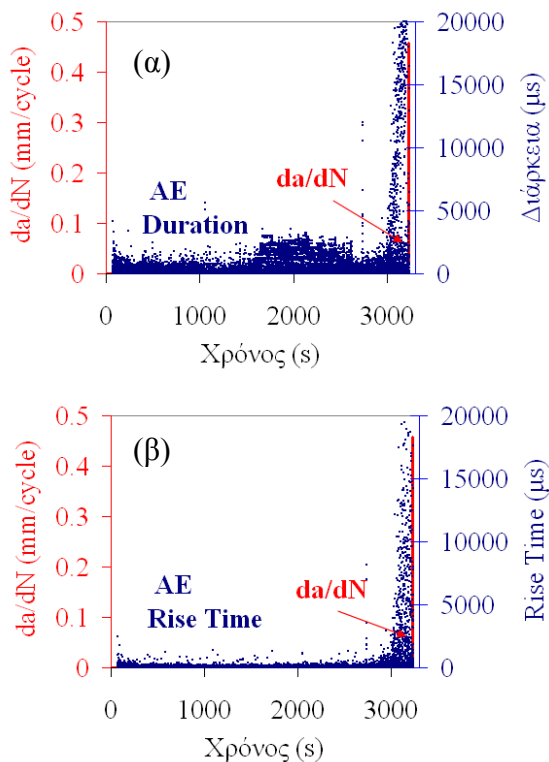
Εικόνα 3.1.23. Θερμογράφημα απεικόνισης διαδρομής της ρωγμής

Ταυτόχρονα με τη θερμογραφία lock-in εφαρμόστηκε και η ακουστική εκπομπή σε δοκίμια αλουμινίου AA 7075 – T6. Στην Εικόνα 3.1.24 φαίνεται η πορεία του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής ( $da/dN$ ). Είναι σαφές ότι ο ρυθμός αυξάνει εκθετικά όπως είναι αναμενόμενο. Η θραύση του δοκιμίου επήλθε μετά από 3231 s. Η παρακολούθηση της ΑΕ κατέδειξε έναν περίπου σταθερό ρυθμό εκπομπής σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Ένα τυπικό παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 3.1.24. Σήματα ΑΕ αρχίζουν να καταγράφονται σχεδόν αμέσως μετά την έναρξη της κόπωσης. Με ελάχιστες διακυμάνσεις ο ρυθμός θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σταθερός φτάνοντας σχεδόν τα 19000 σήματα.



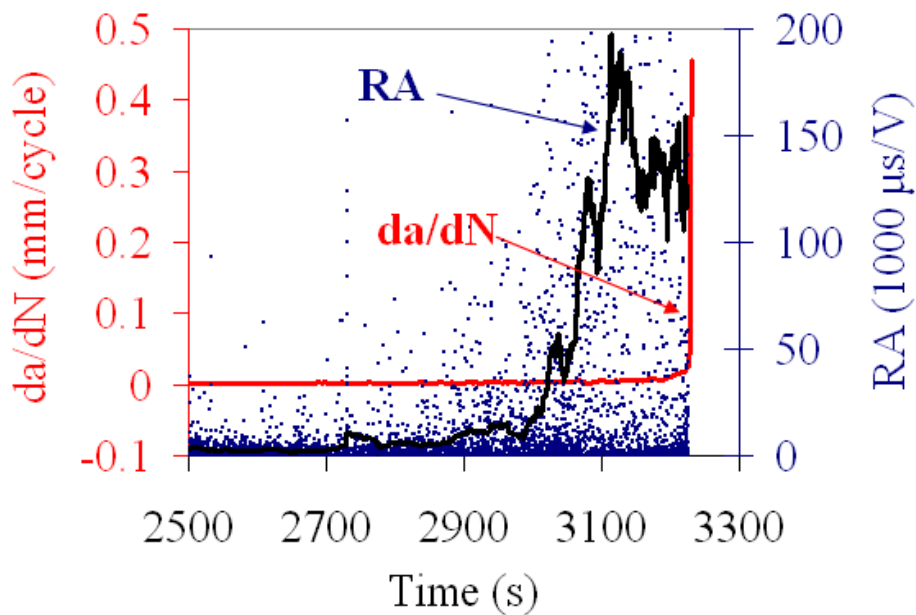
Εικόνα 3.1.24. Ιστορικό ρυθμού διάδοσης ρωγμής και σημάτων AE

Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με τις ποιοτικές παραμέτρους της AE. Στην Εικόνα 3.1.25 παρουσιάζονται η διάρκεια και ο χρόνος ανύψωσης των σημάτων. Είναι σαφές ότι περίπου 200 με 300 δευτερόλεπτα πριν την θραύση του δοκιμίου και ενώ τα σήματα μέχρι τότε παρουσίαζαν διάρκεια μέχρι 2000  $\mu\text{s}$  και RT μέχρι 500  $\mu\text{s}$ , αρχίζουν να καταγράφονται σήματα με πολύ υψηλότερη διάρκεια και RT (ακόμα και πάνω από 20000  $\mu\text{s}$ ).



Εικόνα 3.1.25. Ιστορικό ρυθμού διάδοσης ρωγμής και (α) διάρκειας σημάτων AE, (β) χρόνου ανύψωσης

Η αυξημένη διάρκεια και χρόνος ανύψωσης υποδεικνύουν πιθανή αλλαγή του τύπου της ρωγμής από εφελκυστική σε διατμητική. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω αυτή η μεταβολή του τύπου ρωγμής παρακολουθείται από την παράμετρο RA που λαμβάνει υπ' όψιν και το εύρος των σημάτων. Το ιστορικό του RA σε σχέση πάντα με το ρυθμό διάδοσης της ρωγμής φαίνεται στην Εικόνα 3.1.26 για το τελευταίο στάδιο της ζωής του δοκιμίου (μετά τα 2500 s).



Εικόνα 3.1.26. Ιστορικό ρυθμού διάδοσης ρωγμής και της τιμής RA

Μετά από τα 2900 s αρχίζουν να παρατηρούνται σταθερά σήματα με RA άνω των 75 ms/V. Η συμπαγής καμπύλη είναι ο κυλιόμενος μέσος όρος των 150 πρόσφατων σημάτων που δείχνει σαφή τάση ανόδου στα 3000 s, πολύ νωρίτερα από τη θραύση του δοκιμίου. Αυτή η μεταβολή ορισμένων παραμέτρων AE μπορεί να ερμηνευθεί μέσω της αλλαγής του κύριου τύπου ρωγμής από εφελκυστικές σε διατμητικές. Αυτή είναι στην πραγματικότητα η αλληλουχία της θραύσης σε ένα τυπικό δοκίμιο. Στην Εικόνα 3.1.27 φαίνεται φωτογραφία της επιφάνειας θραύσης μετά το πείραμα.

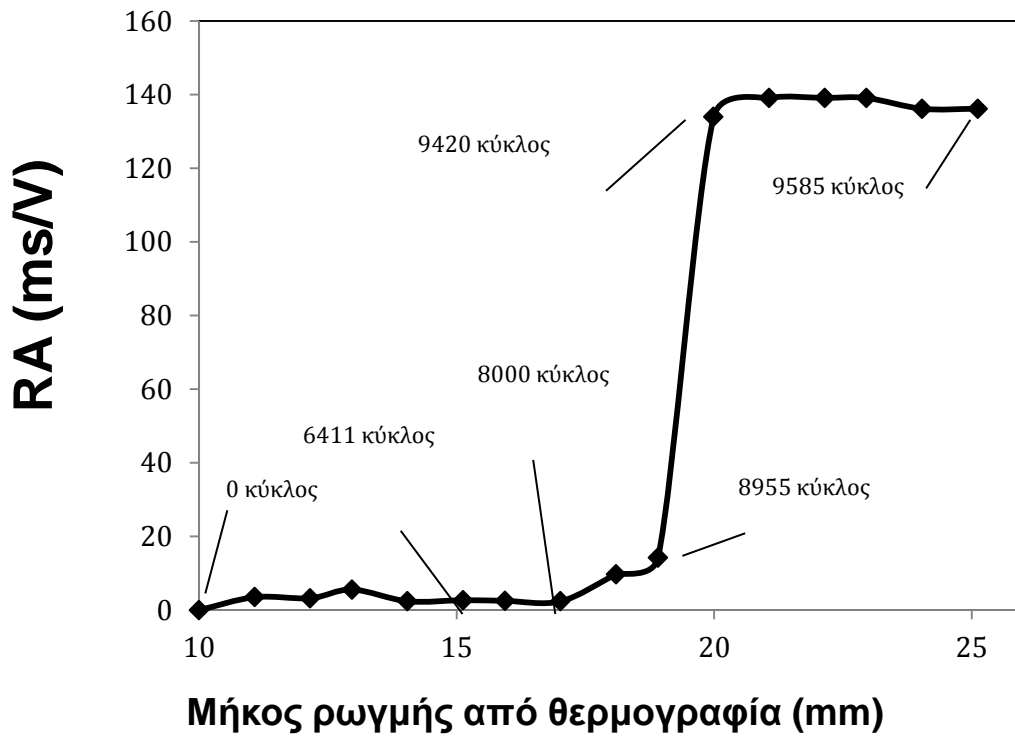


Εικόνα 3.1.27. Δοκίμιο μετά την αστοχία

Η ρωγή διαδίδεται επίπεδα για περίπου 2 cm, ενώ αργότερα και καθώς πλησιάζει το τέλος της διάρκειας ζωής δημιουργεί καμπύλη επιφάνεια που οφείλεται σε ισχυρή διάτμηση. Αυτή λοιπόν η διαφοροποίηση του τύπου ρωγμής, επιφέρει διαφοροποιήσεις και στην ακουστική εκπομπή, με αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές να είναι μετρήσιμες.

Αρκετά ενδιαφέρον αποτελεί η συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο μη καταστροφικές μεθόδους. Η Εικόνα 3.1.28 απεικονίζει τη συσχέτιση των τιμών RA με τις τιμές που προέκυψαν από τη θερμογραφία lock-in για το μήκος της ρωγμής. Καθώς η ρωγή διαδίδεται ομαλά μέχρι το μήκος των 15-17 mm, οι τιμές RA παραμένουν σχετικά χαμηλές της τάξης των 3 ms/V. Μετά τα 17 mm μήκος ρωγμής, οι τιμές RA παρουσιάζουν αυξητική τάση της τάξης των 15 ms/V, ενώ όταν η ρωγή πλησιάζει τα 20 mm οι τιμές RA φθάνουν τα 140 ms/V.





Εικόνα 3.1.28. Τιμές RA σε σχέση με το μήκος ρωγμή υπολογισμένο από τη θερμογραφία lock-in

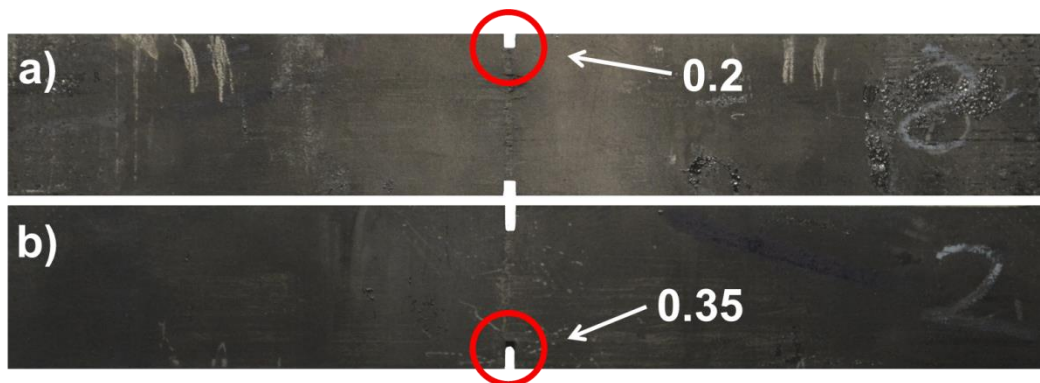
### 3.1.4. Χαρακτηρισμός της θραύσης σε πραγματικό χρόνο

#### 3.1.4.1. Μελέτη θραύσης σύνθετων κεραμικών υλικών γεωμετρίας DEN

##### A. Υλικά και γεωμετρία δοκιμίων

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο αυτό είναι ένα σύνθετο κεραμικό «cross-ply SiC/BMAS» σε πλάκα πάχους 3mm κατασκευασμένο από την εταιρία AEA Technology (Harwell Ltd, United Kingdom). Η ενίσχυση της κεραμικής μήτρας είναι ίνες καρβιδίου του πυριτίου τύπου «Tyranpo» με μέτρο ελαστικότητας 190 GPa και αντοχή στον εφελκυσμό 3,3 GPa (όπως αυτά αναφέρονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της εταιρίας UBE Industries Ltd., Japan).

Στην Εικόνα 3.1.29 απεικονίζονται οι δύο διαφορετικές γεωμετρίες των δοκιμίων α) με λόγο 0.2 εγκοπή/πλάτος και β) με λόγο 0.35 εγκοπή/πλάτος.



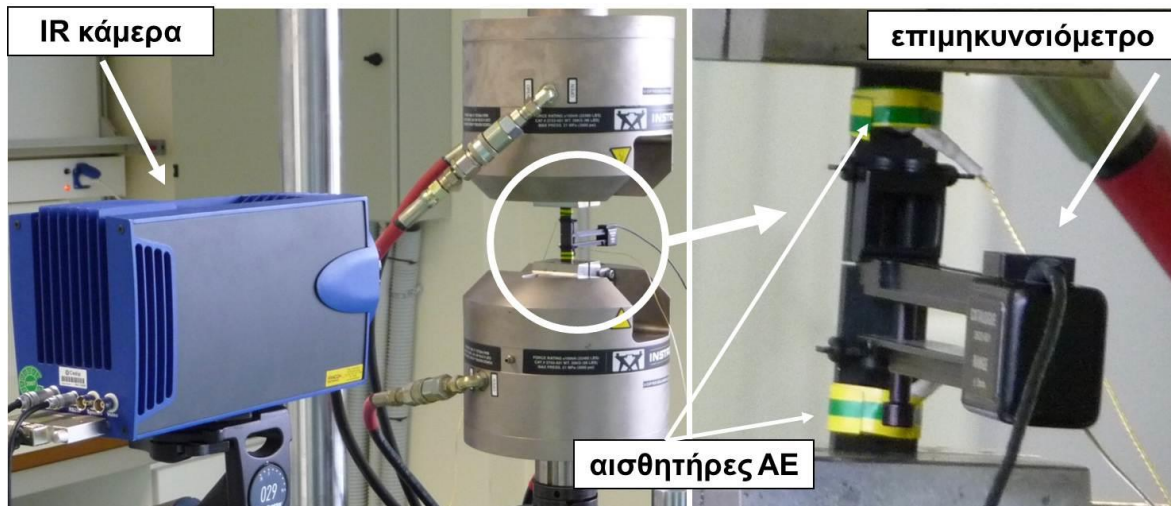
Εικόνα 3.1.29. Γεωμετρία δοκιμίων τύπου «DEN»

##### B. Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Οι δοκιμές της κυκλικής φόρτισης πραγματοποιήθηκαν σε μία σέρβο-υδραυλική μηχανή «Instron» με δυνατότητα μέγιστου φορτίου  $\pm 100$  kN. Η παραμόρφωση μετρήθηκε με εξωτερικό επιμηκυνσιόμετρο. Η μία πλευρά του δοκιμίου ελέγχθηκε με μία υπέρυθρη κάμερα της εταιρίας «Cedip» (τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται λεπτομερώς στον Πίνακα 3.1.5) η οποία τοποθετήθηκε σε απόσταση 35 εκατοστά από το δοκίμιο ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο πεδίο εστίασης. Ταυτόχρονα στην άλλη πλευρά του δοκιμίου τοποθετήθηκαν δύο αισθητήρες ακουστικής εκπομπής αφήνοντας κενό μεταξύ τους 40

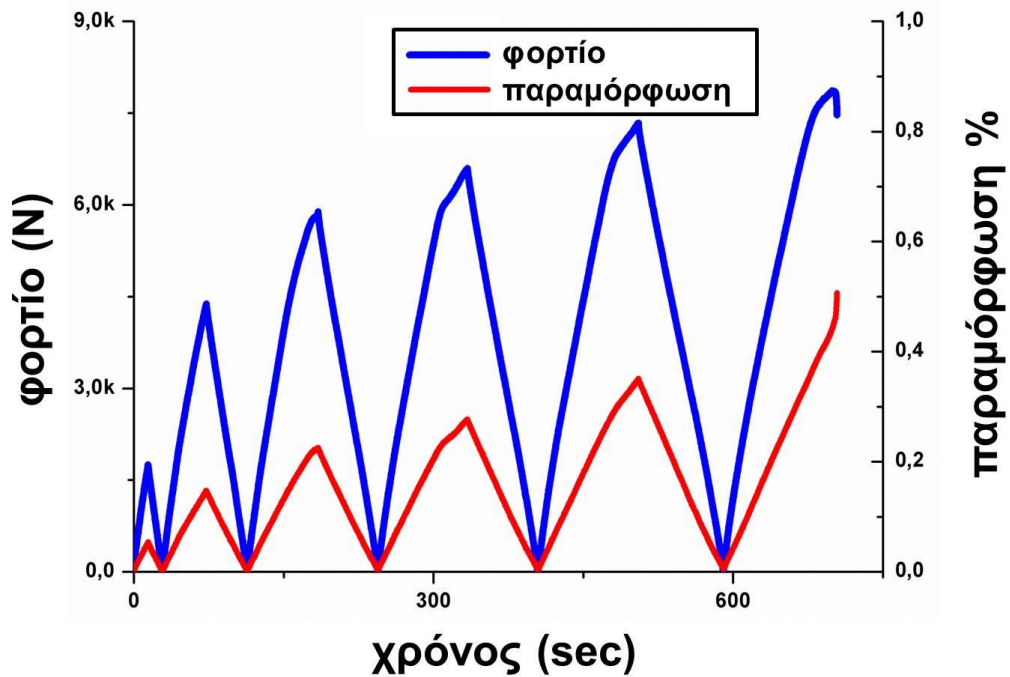
mm. Το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων είναι περίπου μεταξύ 50 και 800 kHz και τα σήματα καταγράφηκαν από δύο κανάλια σε κάρτα PCI-2, PAC με ρυθμό δειγματοληψίας 5 MHz και κατώφλι 45 db.

Στην Εικόνα 3.1.30 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη που περιλαμβάνει την υπέρυθρη κάμερα, το δοκίμιο, το επιμηκυνσιόμετρο, τη μηχανή μηχανικών δοκιμών και τους αισθητήρες ακουστικής εκπομπής.



Εικόνα 3.1.30. Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο των δοκιμών τύπου «DEN»

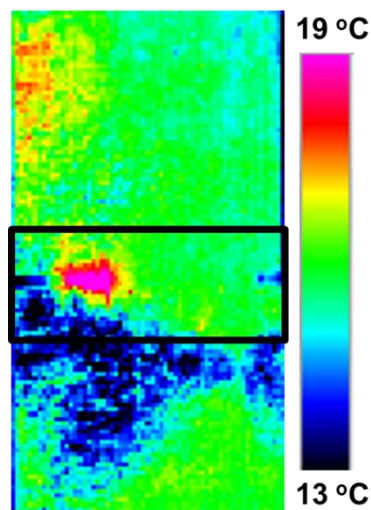
Δύο σειρές των πέντε δοκιμών, κάθε σειρά για τον κάθε διαφορετικό λόγο εγκοπής/πλάτους, υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση έως την τελική τους αστοχία. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ρυθμό μετατόπισης του εμβόλου 0.4mm/min. Στην Εικόνα 3.1.31 απεικονίζεται μία τυπική καμπύλη του φορτίου και της παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2.



Εικόνα 3.1.31. Τυπική καμπύλη φορτίου και παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2

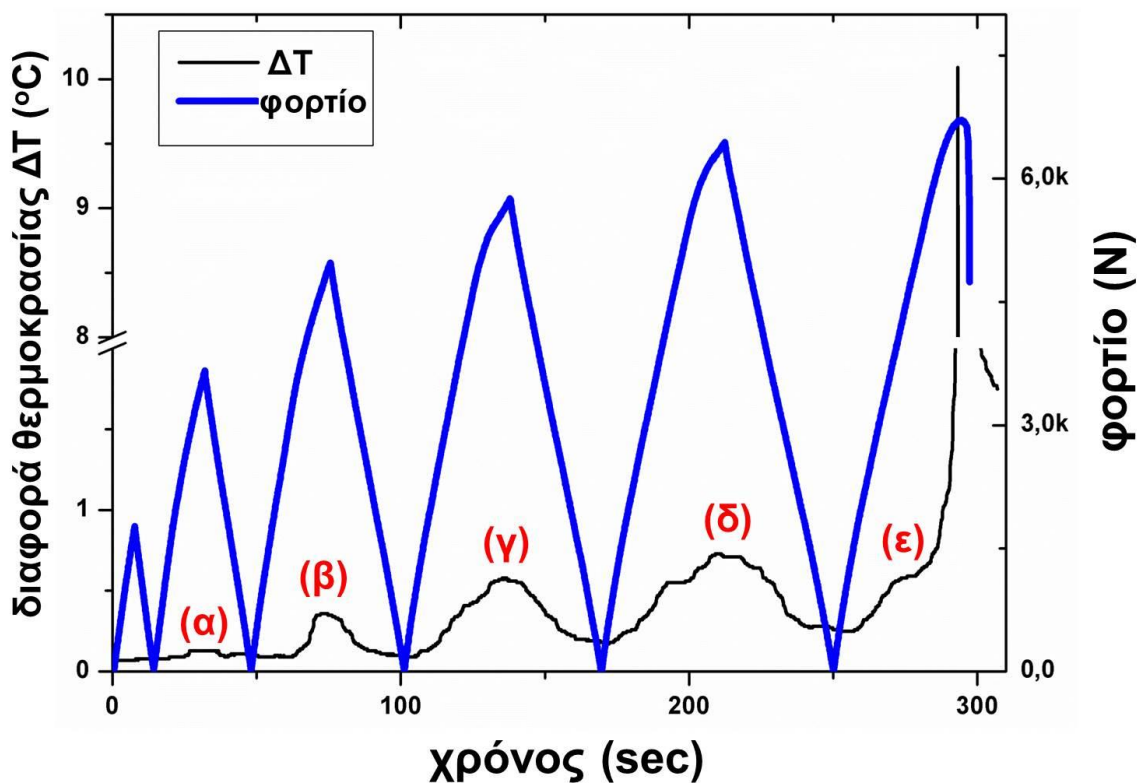
### Γ. Αποτελέσματα και συζήτηση

Καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, η επιφανειακή θερμοκρασία των δοκιμίων καταγραφόταν από την υπέρυθρη κάμερα. Η θερμογραφική απεικόνιση πραγματοποιήθηκε στην περιοχή κοντά στις εσοχές όπου αναπτύσσονται και οι μεγαλύτερες τάσεις (βλέπε Εικόνα 3.1.32).

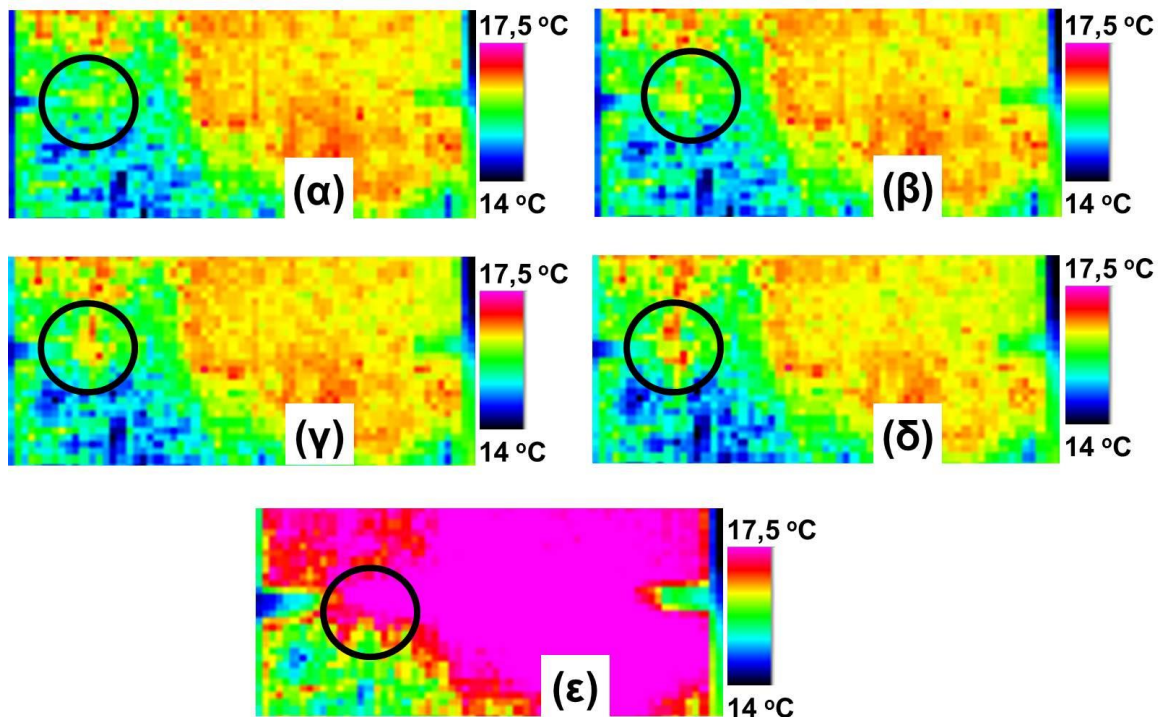


Εικόνα 3.1.32. Τυπικό θερμογράφημα δοκιμίου με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35

Στην Εικόνα 3.1.33 απεικονίζονται γραφικά η διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ), που καταγράφηκε από την υπέρυθη κάμερα, στην επιφάνεια του δοκιμίου με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35 και το φορτίο σε συνάρτηση με το χρόνο. Στον άξονα του χρόνου τα σύμβολα  $\alpha - \varepsilon$  αντιστοιχούν στα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.34. Από το γράφημα της Εικόνας 3.1.33 παρατηρείται πως όταν το φορτίο μεγιστοποιείται σε κάθε κύκλο τότε το  $\Delta T$  παρουσιάζει και αυτό μέγιστο. Το γεγονός ότι οι κορυφές της καμπύλης  $\Delta T$  γίνονται πιο διακριτές από τον δεύτερο κύκλο και μετά οφείλεται στη ρηγμάτωση της μήτρας και της αντίστοιχης διεπιφανειακής βλάβης που συμβαίνει κάθε φορά που η ρωγμή συναντά μια νέα ίνα. Στον τελευταίο κύκλο φόρτισης, η καμπύλη  $\Delta T$  δεν ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με τους προηγούμενους κύκλους, δηλαδή να αυξάνει ομαλά και μετά να μειώνεται, αλλά αντίθετα η κλίση της καμπύλης αλλάζει απότομα δείχνοντας πως το δοκίμιο οδηγείται σε καταστροφική θραύση.



Εικόνα 3.1.33. Διάγραμμα  $\Delta T$  και φορτίου σε σχέση με το χρόνο για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35



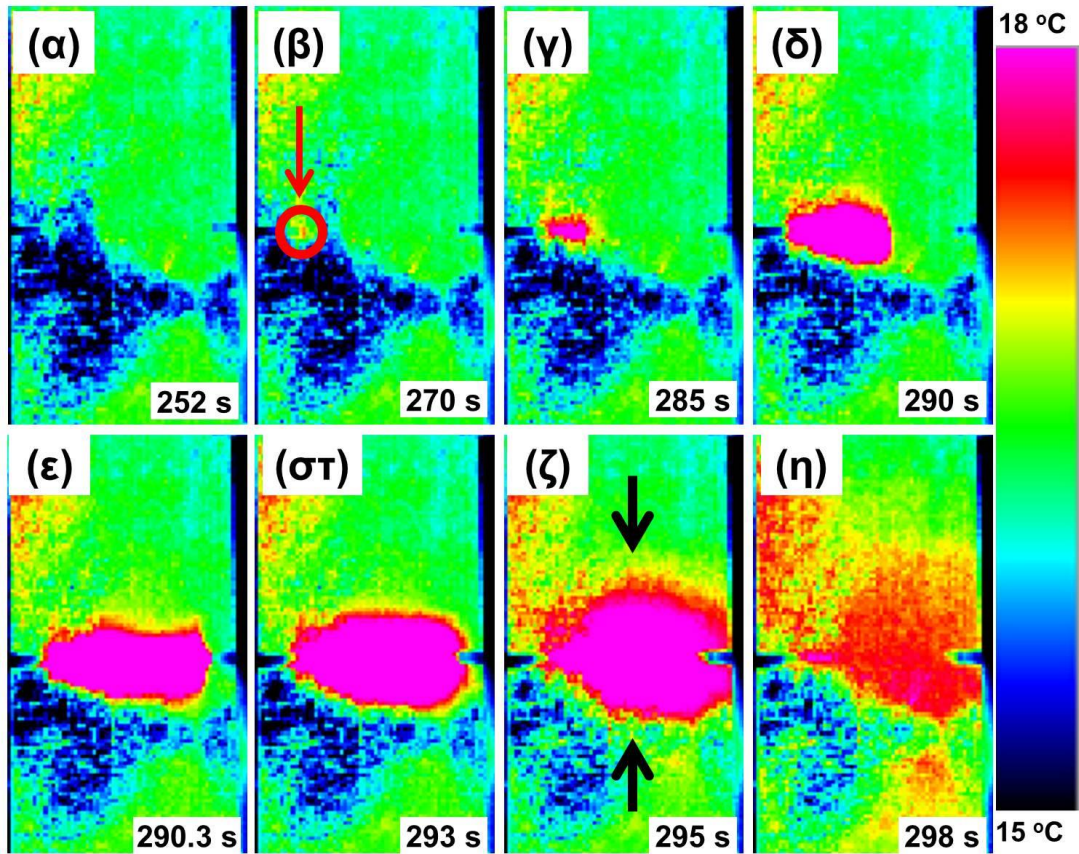
Εικόνα 3.1.34 Θερμογραφήματα για κάθε κύκλο φόρτισης για δοκίμιο λόγου εσοχής/πλάτους 0.35

Στην Εικόνα 3.1.34 απεικονίζονται τα θερμογραφήματα που αντιστοιχούν στις κορυφές της καμπύλης  $\Delta T$  της Εικόνας 3.1.35. Σύμφωνα με το ότι η περιοχή που ελέγχθηκε με την υπέρυθη θερμογραφία ήταν αυτή κοντά στις εσοχές όπου και εμφανίζονται οι περισσότερες τάσεις, οι μαύροι κύκλοι στα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.34 δείχνουν την τοποθεσία της έναρξης της ρωγμής. Η περιοχή με το πορτοκαλί χρώμα δεξιά των μαύρων κύκλων είναι ένα μοτίβο το οποίο εμφανίζεται και πριν την διεξαγωγή της δοκιμής και παραμένει μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται στο «θόρυβο» που προκαλεί η κατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου και δεν είναι κάποια εσωτερική ατέλεια. Στο θερμογράφημα α της Εικόνας 3.1.34, το οποίο αντιστοιχεί σε χρόνο πειράματος 32 sec δεν υπάρχει κάποια αξιοσημείωτη διαφορά θερμοκρασίας. Στον τρίτο κύκλο φόρτισης στα 73 sec (θερμογράφημα β) παρατηρούνται μικρές διαφορές θερμοκρασίας. Αν και οι διαφορές θερμοκρασίας είναι πολύ μικρές, αποκαλύπτουν την έναρξη της ρωγμής. Αυτό γίνεται πιο εμφανές στο τρίτο θερμογράφημα στα 135 sec. Στο θερμογράφημα δ στα 209 sec οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι πιο αισθητές και δείχνουν ότι η βλάβη στο υλικό αυξάνεται. Τελικά, στον τελευταίο κύκλο στα 285 sec παρατηρείται

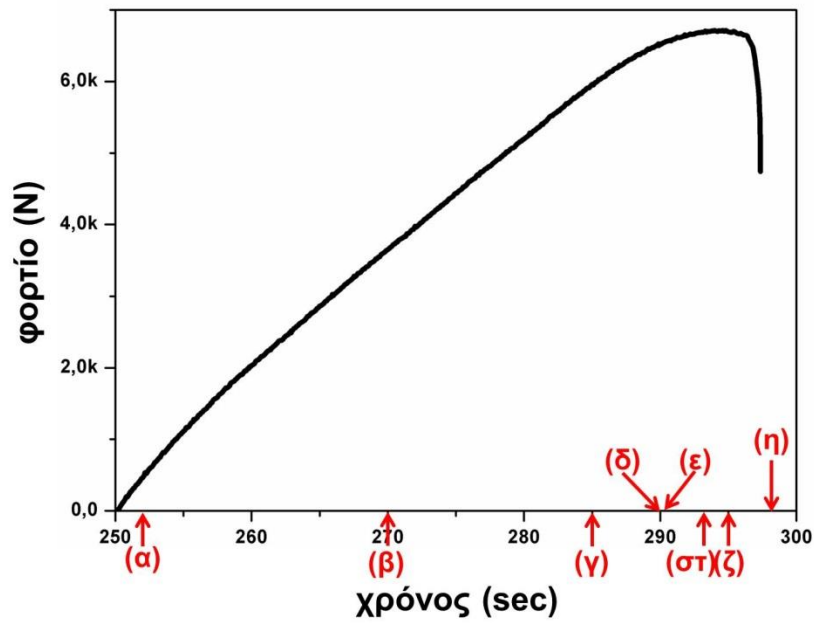


μία πολύ σημαντική αλλαγή στη θερμοκρασιακή κατανομή το οποίο σημαίνει πως το δοκίμιο οδεύει σε τελική θραύση.

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος διάδοσης μια ρωγμής, στην Εικόνα 3.1.35 παρουσιάζεται η θερμογραφική απεικόνιση του τελευταίου κύκλου φόρτισης για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35. Τα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.35 (i) αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές που επισημαίνονται στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου της Εικόνας 3.1.35 (ii). Στο θερμογράφημα 3.1.35 (α) δεν εμφανίζονται θερμές περιοχές μπροστά από τις εσοχές, ενώ στο δεύτερο παρατηρείται καθαρή ένδειξη της έναρξης της ρωγμής μπροστά από την αριστερή εσοχή (κόκκινο βέλος). Σημαντική διαφορά θερμοκρασίας παρατηρείται στα 285 δευτερόλεπτα, χρόνος που αντιστοιχεί και στην αλλαγή της κλίσης της καμπύλης της Εικόνας 3.1.35 (ii). Από αυτό το χρονικό σημείο και μετά, η υπό-επιφανειακή ρωγμή αρχίζει να διαδίδεται από τα αριστερά προς τα δεξιά του δοκιμίου. Ο προσδιορισμός αυτής της χρονικής στιγμής είναι πολύ σημαντικός γιατί επιτρέπει την έγκαιρη πρόβλεψη της αστοχίας του υλικού. Αυτό το σημείο, επίσης, αντιστοιχεί στο 73% της διάρκειας του τελευταίου κύκλου. Πέντε δευτερόλεπτα αργότερα (θερμογράφημα δ) η υπό-επιφανειακή ρωγμή φθάνει στο κέντρο του δοκιμίου, και μόλις 300 msec μετά διαδίδεται ακαριαία μέχρι την εσοχή στα δεξιά. Περαιτέρω αύξηση του φορτίου, οδηγεί στη μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που αποκτά η επιφάνεια του δοκιμίου (θερμογράφημα στ) και η οποία εμφανίζεται στο μέγιστο σημείο της καμπύλης της Εικόνας 3.1.35 (ii). Αυτή η μέγιστη θερμοκρασία συνδέεται με την ολοκλήρωση της θραύσης της μήτρας και τη μεταφορά όλων των τάσεων πλέον στις ίνες που αποτελούν την ενίσχυση του υλικού. Στο επόμενο θερμογράφημα (Εικόνα 3.1.35 (ζ)), η θερμοκρασία φαίνεται ότι μειώνεται στην αριστερή πλευρά, όπου και ξεκίνησε η ρωγμάτωση, και αυξάνεται στην πάνω και κάτω πλευρά της υπό-επιφανειακής ρωγμής (μαύρα βέλη). Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με τη συνεχή θραύση των ινών. Λόγω της σταδιακής μείωσης του αριθμού των άθραυστων ινών, οι εναπομένουσες ίνες δεν μπορούν να αντέξουν το φορτίο και αποτυγχάνουν μαζικά. Αυτό παρατηρείται στο τελευταίο θερμογράφημα ως πτώση της θερμοκρασίας. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί, πως ακόμη και αν η μήτρα αστοχήσει, οι ίνες αντιστέκονται στο διαχωρισμό του δοκιμίου σε δύο κομμάτια.



(i)



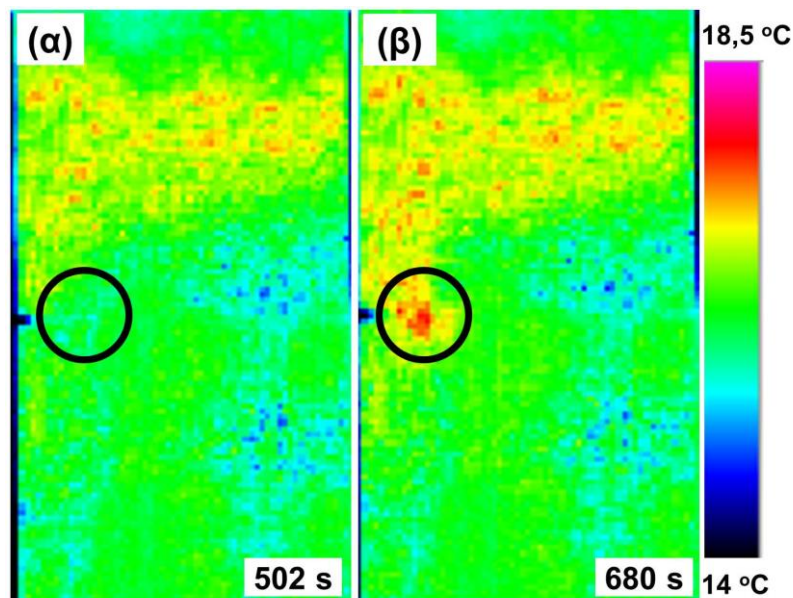
(ii)

Εικόνα 3.1.35 (i,ii). Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής και διάγραμμα φορτίου – χρόνου του τελευταίου κύκλου φόρτισης (δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.35)

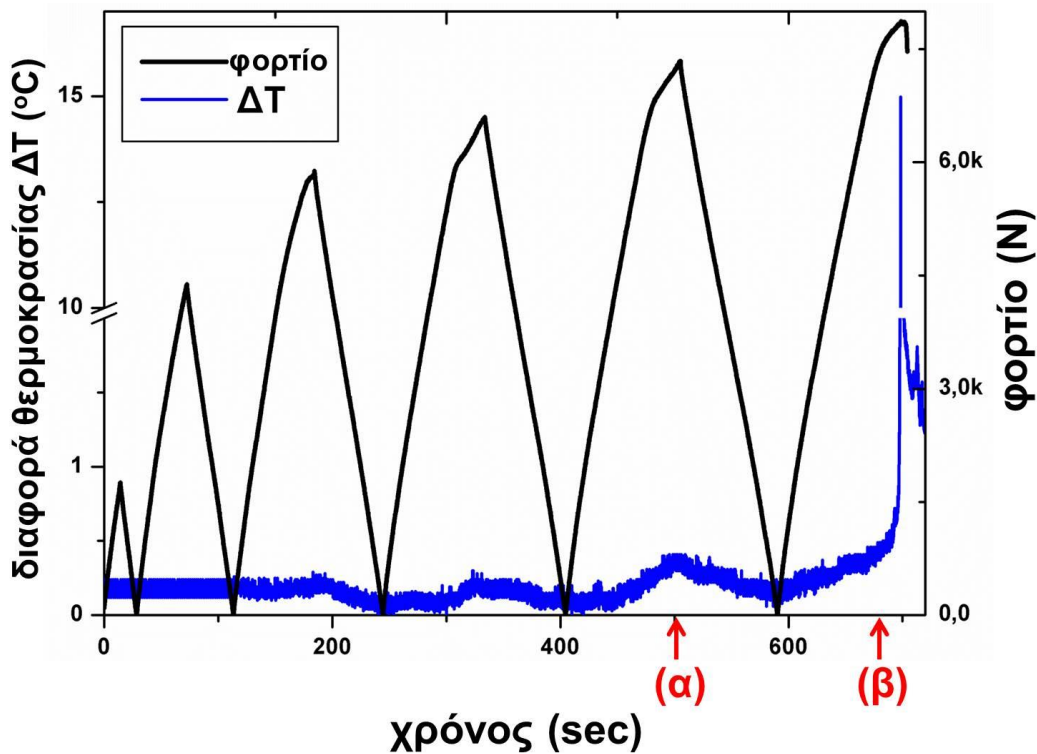


Η Εικόνα 3.1.36 απεικονίζει τα θερμογραφήματα και της καμπύλες διαφοράς θερμοκρασίας και φορτίου σε σχέση με το χρόνο για δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2. Στην περίπτωση του δοκιμίου με λόγο 0.2, τα θερμογραφήματα δεν παρουσιάζουν σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές εκτός του θερμογραφήματος 3.1.36 β, το οποίο αντιστοιχεί στον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Ως εκ τούτου, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα θερμογραφήματα που αντιστοιχούν στους δύο τελευταίους κύκλους της κυκλικής φόρτισης. Στο θερμογράφημα α, το οποίο αντιστοιχεί σε χρόνο πειράματος 502 sec, δεν παρατηρούνται θερμοκρασιακές διαφορές μπροστά από τις εσοχές, ενώ αντίθετα στο θερμογράφημα β στα 680 sec εμφανίζεται διαφορά (βλέπε μαύρο κύκλο) που αντιστοιχεί στην έναρξη της ρωγμής στη αριστερή εσοχή του δοκιμίου.

Αντίθετα, το διάγραμμα διαφοράς θερμοκρασίας – χρόνου (Εικόνα 3.1.36 (ii)), το οποίο προέκυψε από τα δεδομένα της θερμογραφίας, παρουσιάζει περισσότερες πληροφορίες. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ακόμη και από τον τρίτο κύκλο φόρτισης υπάρχει μία κορυφή στην καμπύλη της  $\Delta T$ . Για κάθε κύκλο φόρτισης παρουσιάζεται μια κορυφή όταν μεγιστοποιείται το φορτίο γεγονός που παρατηρήθηκε και για το δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.32. Στον τελευταίο κύκλο (Εικόνα 3.1.36 (ii)) η κλίση της καμπύλης  $\Delta T$  αλλάζει απότομα προειδοποιώντας ότι το δοκίμιο οδηγείται σε αστοχία.



(i)

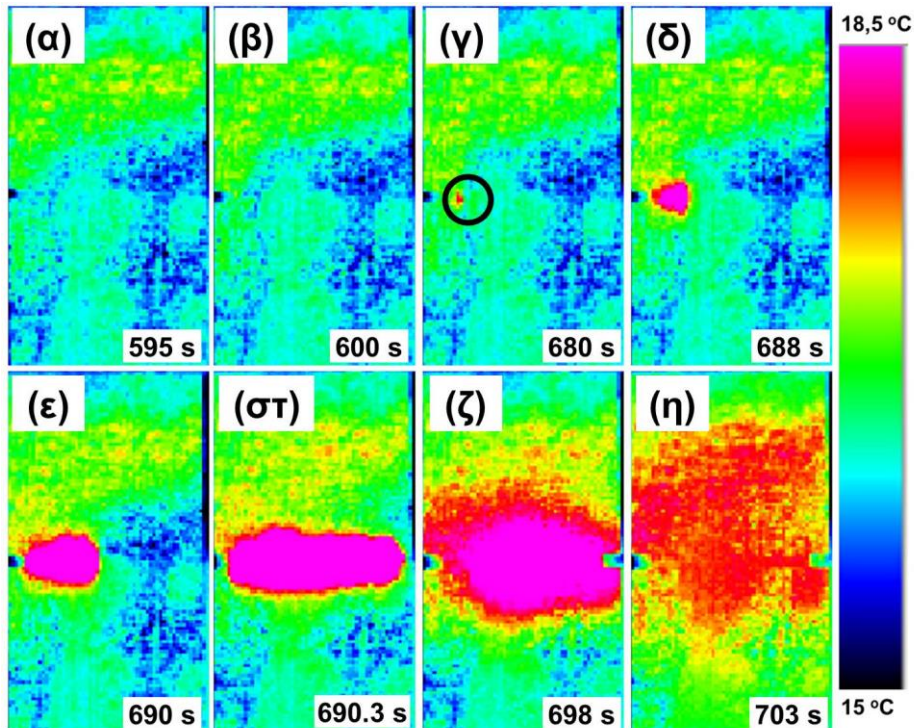


(ii)

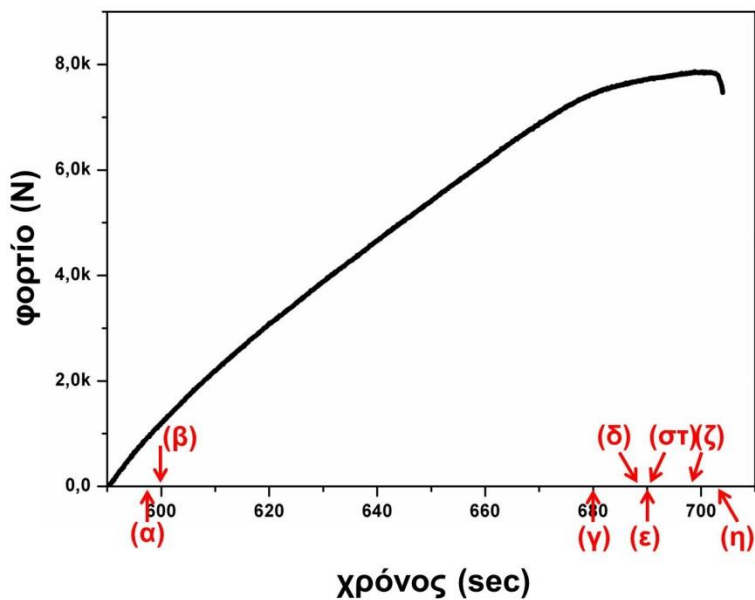
Εικόνα 3.1.36. (i,ii). Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής και διάγραμμα φορτίου – χρόνου του τελευταίου κύκλου φόρτισης (δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2)

Όπως προέκυψε από τα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.36 οι πιο εμφανείς θερμοκρασιακές διαφορές εμφανίζονται στον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Ως εκ τούτου, στην Εικόνα 3.1.37 απεικονίζεται ο θερμογραφικός έλεγχος του τελευταίου κύκλου φόρτισης για δοκίμιο με λόγο 0.2. Στην Εικόνα 3.1.37 (i) παρουσιάζονται τα θερμογραφήματα που αντιστοιχούν στα σημεία α – η της καμπύλης φορτίου σε συνάρτηση με το χρόνο (Εικόνα 3.1.37 (ii)) για την αποτίμηση της διάδοσης της ρωγμής. Στα θερμογραφήματα της Εικόνα 3.1.37 α και β στα 595 sec και 600 sec αντίστοιχα δεν εμφανίζεται κάποια «θερμή» περιοχή κοντά στις εσοχές. Η ύπαρξη της ρωγμής γίνεται αισθητή στο θερμογράφημα γ (μαύρος κύκλος) που αντιστοιχεί και στην αλλαγή της κλίσης της καμπύλης φορτίου χρόνου (Εικόνα 3.1.37 (ii)). Το χρονικό σημείο αυτό αποτελεί και πρόβλεψη της αστοχίας του υλικού περίπου στο 80% της συνολικής διάρκειας του τελευταίου κύκλου. Η περαιτέρω αύξηση του φορτίου, θερμογραφήματα δ και ε, έχει ως αποτέλεσμα τη διάδοση της υπό-επιφανειακής ρωγμής από την αριστερή εσοχή στο κέντρο του δοκιμίου. Στη συνέχεια, η ρωγμή διαδίδεται ταχύτατα προς τη δεξιά

εσοχή λόγω της ασταθούς διάδοσης της μέσα στη μήτρα. Στο τελευταίο θερμογράφημα δεν παρατηρούνται έντονες θερμοκρασιακές διαφορές και το δοκίμιο αστοχεί χωρίς να διαχωριστεί σε δύο κομμάτια.



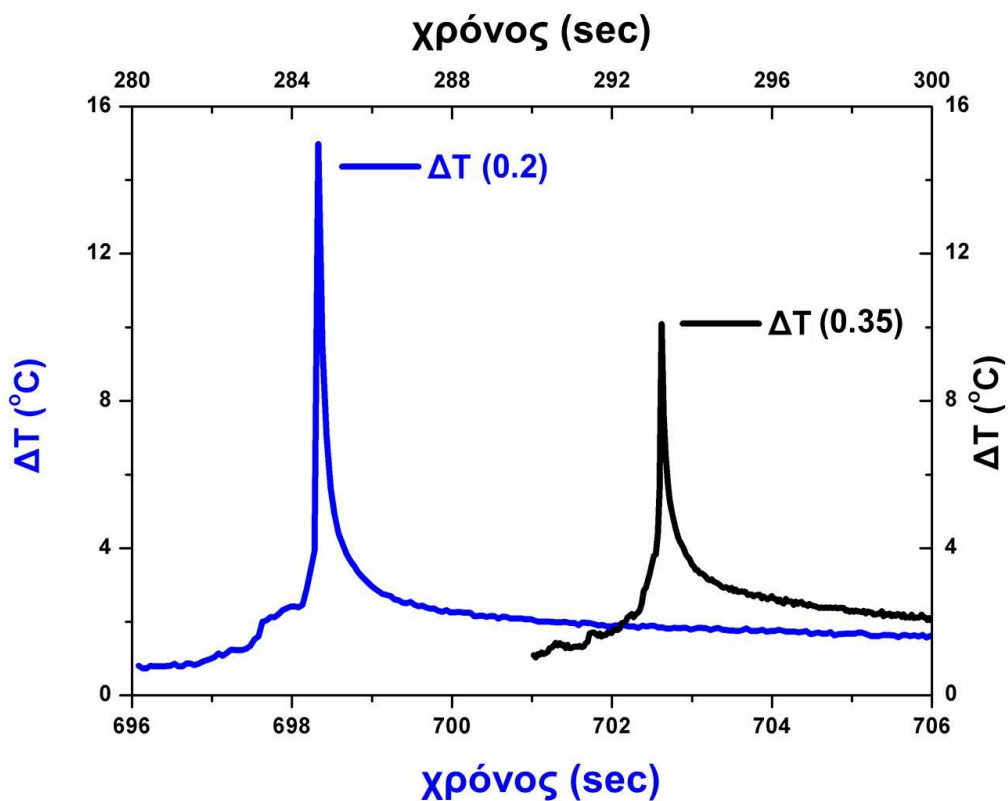
(i)



(ii)

Εικόνα 3.1.37. (i,ii). Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής και διάγραμμα φορτίου – χρόνου του τελευταίου κύκλου φόρτισης (δοκίμιο με λόγο εσοχής/πλάτους 0.2)

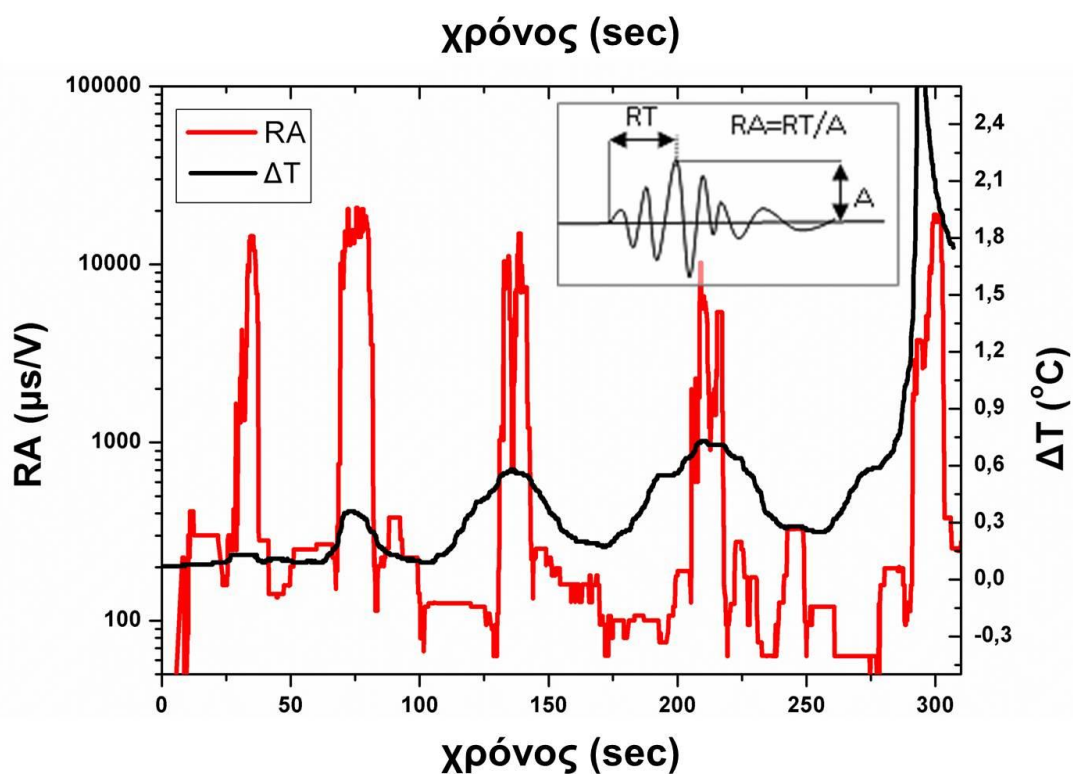
Στην Εικόνα 3.1.38 απεικονίζονται τα μέγιστα των καμπύλων  $\Delta T$  σε σχέση με το χρόνο και για τους δύο λόγους εσοχής/πλάτους. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο δοκίμιο με τις μικρότερες εσοχές κατά τη στιγμή της θραύσης η επιφανειακή του διαφορά θερμοκρασία φτάνει στους 15 °C, ενώ αντίθετα το δοκίμιο με λόγο 0.35 φτάνει μόνο στους 10 °C  $\Delta T$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μέγεθος των εσοχών. Στο δοκίμιο με μικρές εσοχές η βλάβη εξελίσσεται σε μια ευρεία περιοχή υλικού σε ολόκληρη τη δοκιμή και έτσι η μέγιστη θερμοκρασία στο κρίσιμο φορτίο είναι υψηλή. Ενώ, στο δοκίμιο με λόγο 0.35 η βλάβη συσσωρεύεται και εκτονώνεται λιγότερο δραστικά σε ένα δείγμα με λιγότερο υλικό που υπάρχει στην ενδιάμεση περιοχή των εσοχών.



Εικόνα 3.1.38. Μέγιστες διαφορές θερμοκρασίες για τους δύο τύπους εσοχών

Η βλάβη στο υλικό επίσης ελέγχθηκε και με ακουστική εκπομπή και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με αυτά της θερμογραφίας για δοκίμιο με λόγο 0.35. Στην Εικόνα 3.1.39 παρουσιάζονται οι καμπύλες των τιμών RA και  $\Delta T$  σε σχέση με το χρόνο. Η RA είναι ο χρόνος ανόδου (RT) προς το εύρος (A) και μετράται σε  $\mu s/V$ . Η συμπαγής καμπύλη RA είναι ο κυλιόμενος μέσος όρος 70 σημάτων. Είναι εμφανές πως η RA

παρουσιάζει μέγιστα όταν μεγιστοποιείται και η  $\Delta T$ . Σε χαμηλές παραμορφώσεις η μέση τιμή RA φτάνει μέχρι τα 1000  $\mu\text{s/V}$ . Αντίθετα, όταν η παραμόρφωση αυξάνεται τότε η τιμή RA ξεπερνά τα 10000  $\mu\text{s/V}$ . Είναι γνωστό πως υψηλές τιμές RA συνδέονται με διατμητική θραύση ή με άλλες διατμητικές τάσεις όπως αυτές που προκύπτουν από αποκολλήσεις και εξόλκευση ινών σε διάφορα υλικά [52]. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι υψηλές τάσεις οδηγούν σε αυξημένες θερμοκρασίες. Την ίδια λοιπόν χρονική στιγμή που εμφανίζονται υψηλές τάσεις, παρατηρούνται και αλλαγές στην ακουστική εκπομπή όπως φαίνεται από τις διακυμάνσεις της RA (Εικόνα 3.1.39).



Εικόνα 3.1.39. Διάγραμμα RA και  $\Delta T$  σε σχέση με το χρόνο



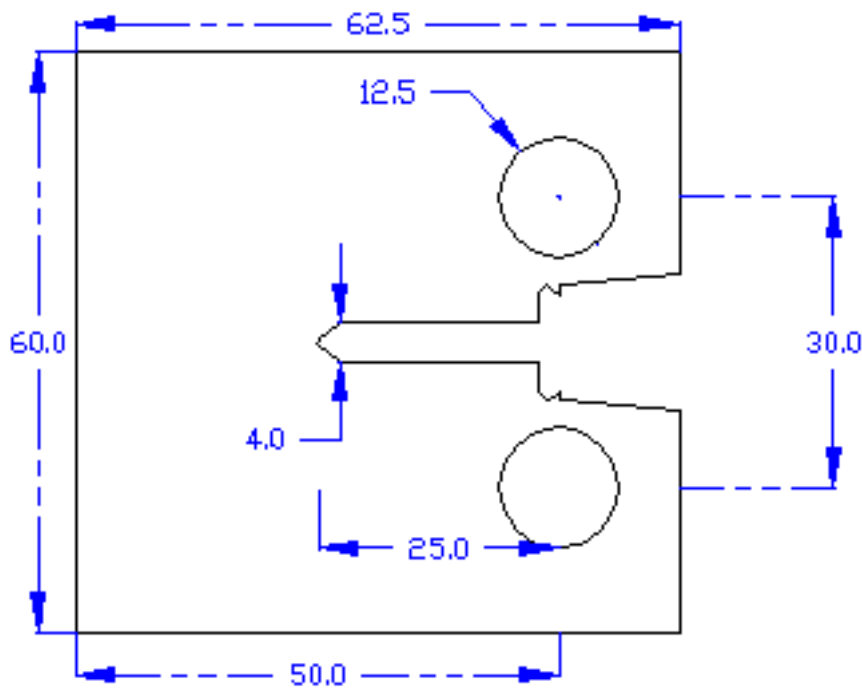
3.1.4.2. Μελέτη θραύσης σύνθετων κεραμικών υλικών γεωμετρίας CT

**A. Υλικά και γεωμετρία δοκιμίων**

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3.1.4.2 είναι ένα σύνθετο κεραμικό «cross-ply SiC/BMAS» σε πλάκα πάχους 3mm κατασκευασμένο από την εταιρία AEA Technology (Harwell Ltd, United Kingdom). Η ενίσχυση της κεραμικής μήτρας είναι ίνες καρβιδίου του πυριτίου τύπου «Tyranno». Η διαδικασία κατασκευής του υλικού «cross-ply SiC/BMAS» περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- ◆ Απομάκρυνση της κόλλας «desizing» από τις δέσμες ινών σε «φούρνο»
- ◆ Διαβροχή των ινών σε έναν πολτό πρόδρομου υαλοτρίματος
- ◆ Στέγνωμα των ινών σε καλούπια για 20 min
- ◆ Τεμαχισμός και οργάνωση των ινών σε στρώσεις για την παρασκευή διαποτισμένων φύλλων
- ◆ Τοποθέτηση των φύλλων σε διάταξη (0,90) 4s
- ◆ Καύση για την απομάκρυνση του συνθετικού
- ◆ Θερμή συμπίεση σε μήτρα γραφίτη στους ~1,200°C για 10 min
- ◆ Τελική κρυστάλλωση στους 1,300°C

Στην Εικόνα 3.1.40 απεικονίζεται η γεωμετρία των δοκιμίων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1820-01 [58].



Εικόνα 3.1.40. Γεωμετρία CMC τύπου CT

## Β. Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Οι δοκιμές της κυκλικής φόρτισης πραγματοποιήθηκαν σε μία σέρβο-υδραυλική μηχανή «Instron» με δυνατότητα μέγιστου φορτίου  $\pm 100$  kN. Η μία πλευρά του δοκιμίου ελέγχθηκε με μία υπέρυθρη κάμερα της εταιρίας «Cedip» (τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται λεπτομερώς στον Πίνακα 3.1.5). Ταυτόχρονα στην άλλη πλευρά του δοκιμίου τοποθετήθηκαν δύο αισθητήρες ακουστικής εκπομπής. Το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων είναι περίπου μεταξύ 50 και 800 kHz και τα σήματα καταγράφηκαν από δύο κανάλια σε κάρτα PCI-2, PAC με ρυθμό δειγματοληψίας 5 MHz και κατάφωλι 45 db.

Για την μέτρηση του μήκους της ρωγμής με την συμβατική μέθοδο (compliance method) τοποθετήθηκε επιμηκυσσιόμετρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.9. Το δοκίμιο σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η τοποθέτηση του επιμηκυσσιόμετρου. Ένα ζεύγος εγκοπών χαραχθηκε στο δοκίμιο, για να στηρίζονται οι βραχίονες του επιμηκυσσιόμετρου.

Η μέτρηση του μήκους ρωγμής αλλά και η δημιουργία προκαταρκτικής ρωγμής με κόπωση σε δοκίμια CT πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1820-01 και η σχέση που χρησιμοποιήθηκε είναι η παρακάτω:

$$a_i/W = [1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5] \quad (3.1.8)$$

Όπου 
$$u = \frac{1}{[B_e E C_{c(i)}]^{1/2} + 1}$$

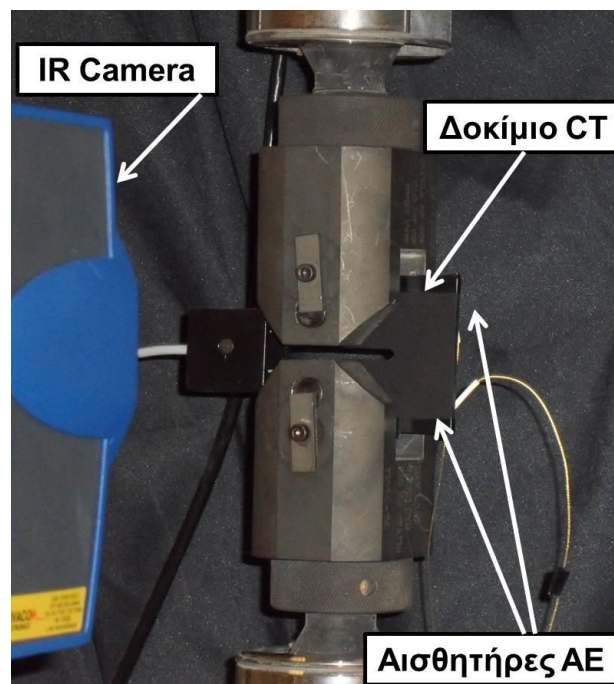
$a$  είναι το μήκος ρωγμής

$W$  είναι το πλάτος του δοκιμίου

$C_c$  είναι η ελαστική ενδοτικότητα (elastic compliance)

### Γ. Μεθοδολογία χαρακτηρισμού με θερμογραφία

Με σκοπό την ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθόδου για την μέτρηση του μήκους ρωγμής κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη της Εικόνας 3.1.41.

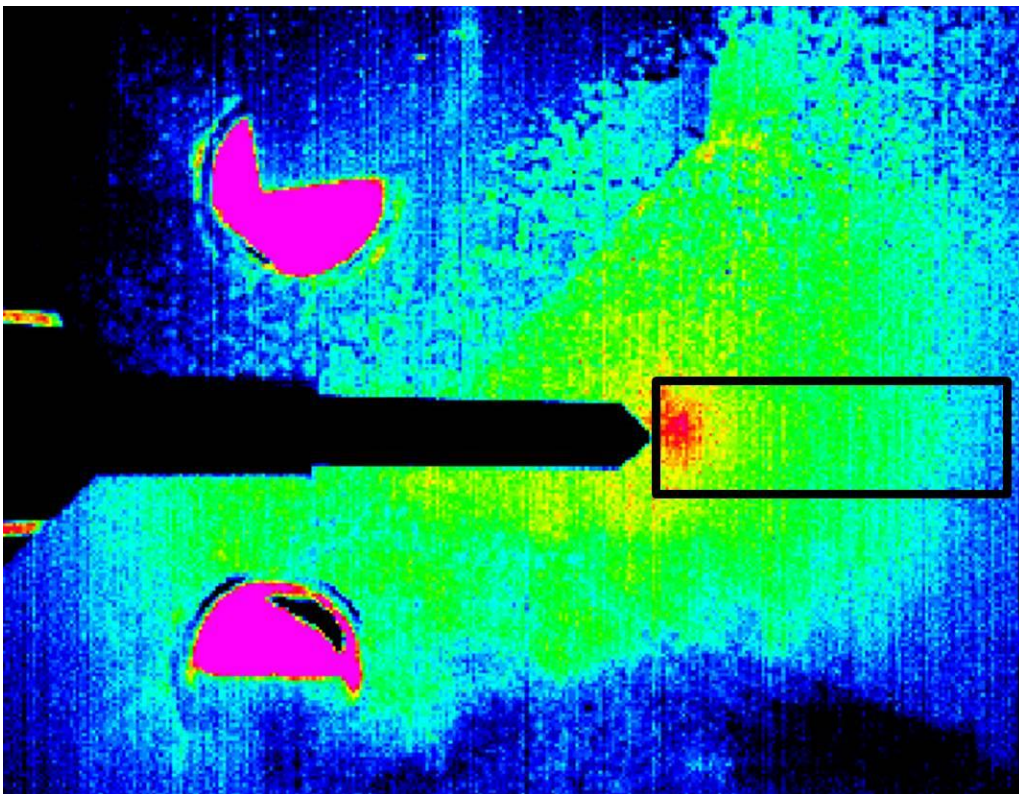


Εικόνα 3.1.41. Πειραματική διάταξη προσδιορισμού μήκους ρωγμής



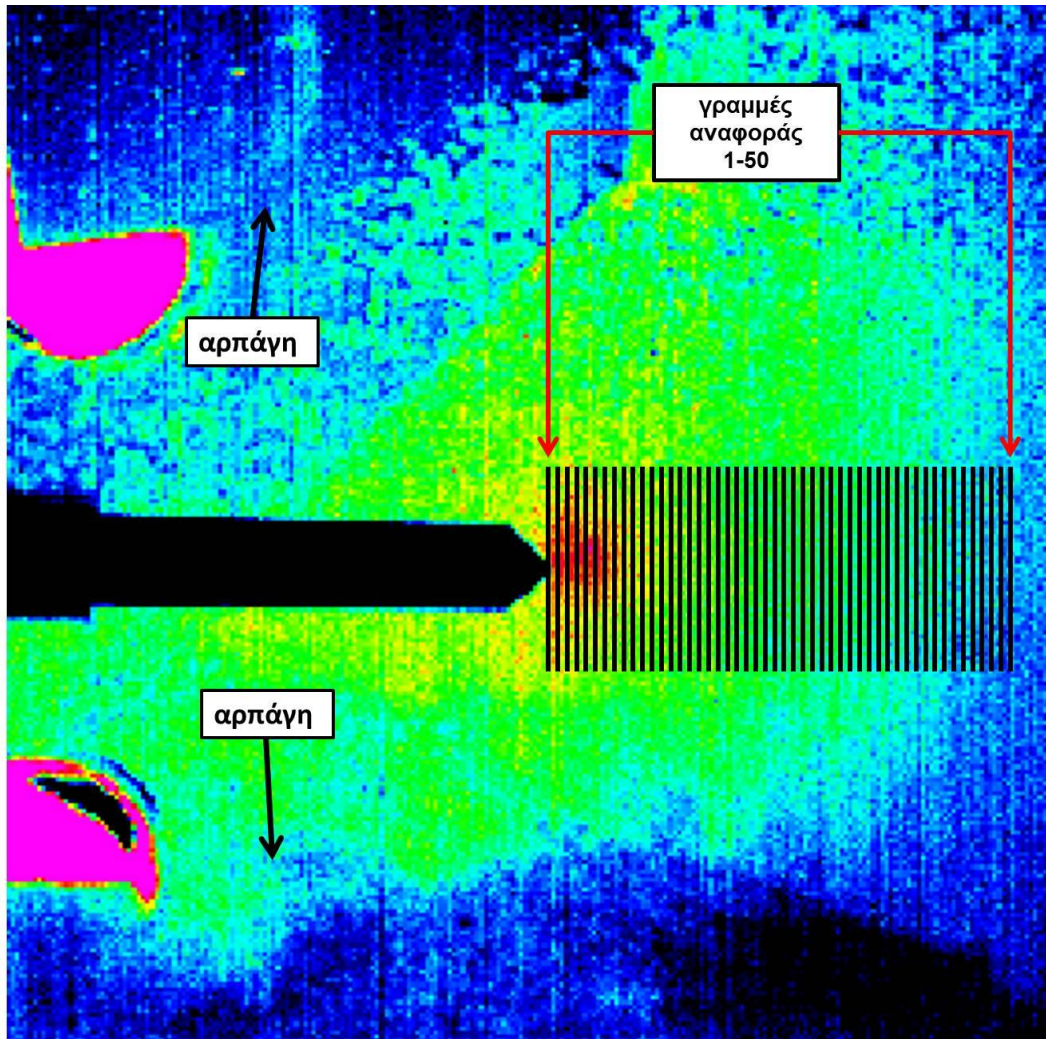
Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε με βάση την υπέρυθρη θερμογραφία περιλαμβάνει την παρακάτω διαδικασία:

- ◆ Κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης καταγράφηκε η κατανομή των θερμοκρασιών στην επιφάνεια του δοκιμίου.
- ◆ Τα θερμογραφήματα αποθηκεύτηκαν ως συνάρτηση του χρόνου σε μορφή βίντεο για εκ των υστέρων επεξεργασία (post processing).
- ◆ Μετά το τέλος του πειράματος, σχεδιάστηκε μία καμπύλη θερμοκρασίας χρόνου και βρέθηκαν τα χρονικά σημεία που η επιφανειακή θερμοκρασία στην περιοχή μπροστά από την εσοχή «V» (Εικόνα 3.1.42) μεγιστοποιείται.



Εικόνα 3.1.42. Τυπικό θερμογράφημα δοκιμίου γεωμετρίας «CT»

- ◆ Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού «Altair» 50 γραμμές αναφοράς μπροστά από την περιοχή της εσοχής «V». Οι γραμμές αναφοράς τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία πάνω στο δοκίμιο, τα οποία αντιστοιχούν στην πραγματικότητα στο μήκος ρωγμής. (Εικόνα 3.1.43). Καθώς μία ρωγή διαδίδεται κατά μήκος του δοκιμίου δημιουργεί αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Έχοντας τοποθετήσει τις γραμμές αναφοράς σε καθορισμένα σημεία και γνωρίζοντας πότε ακριβώς μεγιστοποιείται η θερμοκρασία μπορεί να βρεθεί το ακριβές μήκος της ρωγμής. Η ιδέα αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι, η θερμοκρασία που καταγράφηκε σε συγκεκριμένο σημείο μίας γραμμής αναφοράς σε σχέση με το χρόνο αυξάνεται όταν η ρωγή πλησιάζει τη γραμμή αυτή. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία μεγιστοποιείται όταν η ρωγή φθάσει στη γραμμή και τελικά μειώνεται όταν η ρωγή προσπεράσει τη γραμμή.

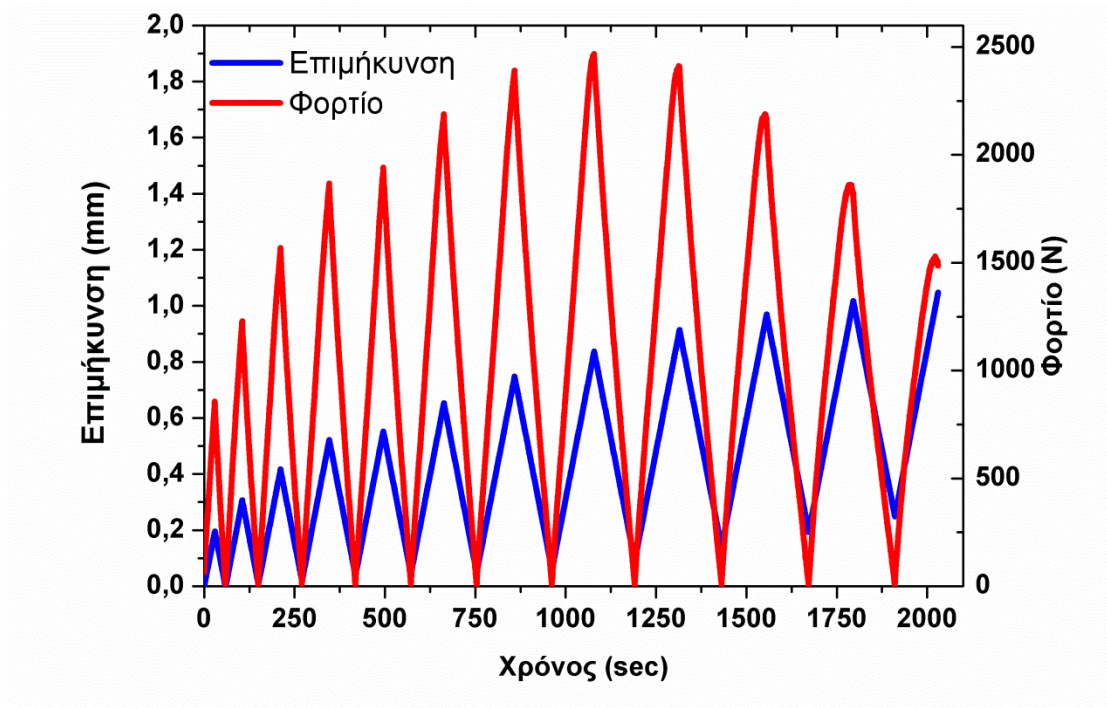


01→a=0,23 mm	16→a=3,64 mm	31→a=7,04 mm	46→a=10,45 mm
02→a=0,45 mm	17→a=3,86 mm	32→a=7,27 mm	47→a=10,68 mm
03→a=0,68 mm	18→a=4,09 mm	33→a=7,50 mm	48→a=10,91 mm
04→a=0,91 mm	19→a=4,32 mm	34→a=7,72 mm	49→a=11,13 mm
05→a=1,14 mm	20→a=4,54 mm	35→a=7,95 mm	50→a=11,36 mm
06→a=1,36 mm	21→a=4,77 mm	36→a=8,18 mm	
07→a=1,59 mm	22→a=5,00 mm	37→a=8,41 mm	
08→a=1,82 mm	23→a=5,23 mm	38→a=8,63 mm	
09→a=2,04 mm	24→a=5,45 mm	39→a=8,86 mm	
10→a=2,27 mm	25→a=5,68 mm	40→a=9,09 mm	
11→a=2,50 mm	26→a=5,91 mm	41→a=9,32 mm	
12→a=2,73 mm	27→a=6,13 mm	42→a=9,54 mm	
13→a=2,95 mm	28→a=6,36 mm	43→a=9,77 mm	
14→a=3,18 mm	29→a=6,59 mm	44→a=10,00 mm	
15→a=3,41 mm	30→a=6,82 mm	45→a=10,22 mm	

Εικόνα 3.1.43. Θερμογράφημα με 50 γραμμές αναφοράς



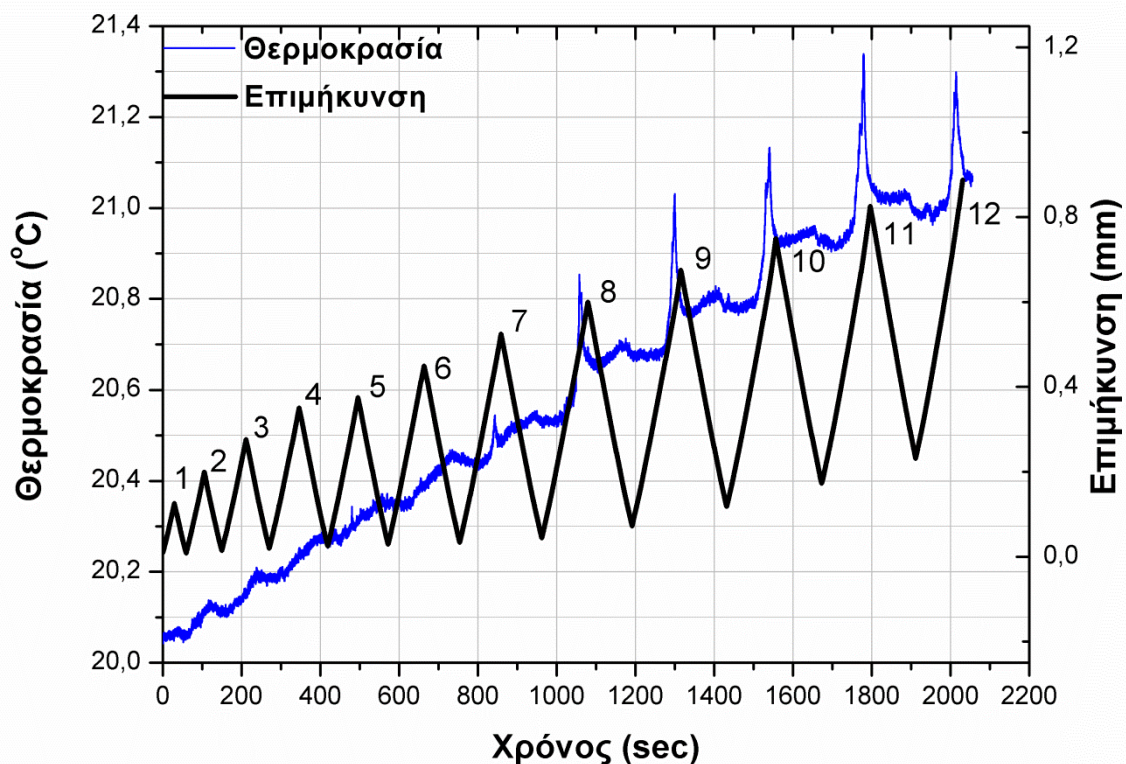
Πέντε δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση έως την τελική τους αστοχία. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ρυθμό μετατόπισης του εμβόλου 0.4mm/min. Στην Εικόνα 3.1.44 απεικονίζεται μία τυπική καμπύλη του φορτίου και της επιμήκυνσης σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 3.1.44. Τυπική καμπύλη φορτίου και επιμήκυνσης σε σχέση με το χρόνο για την κυκλική φόρτιση δοκιμίου τύπου «CT»

#### Δ. Αποτελέσματα και συζήτηση

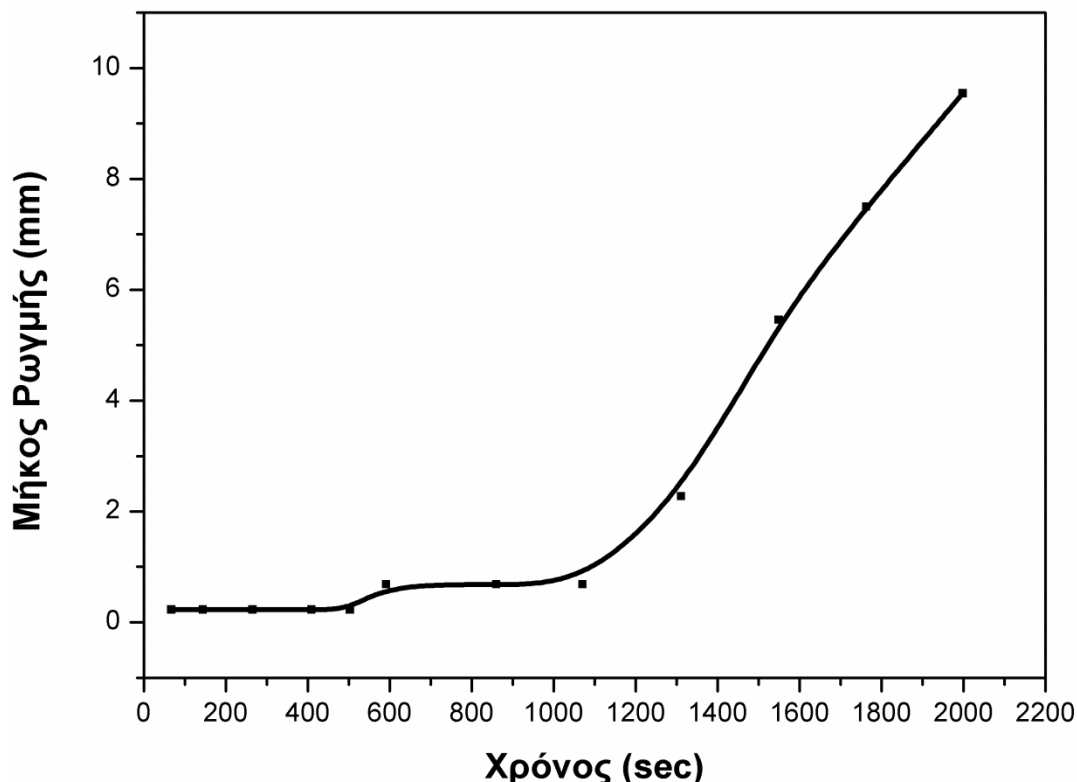
Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω ακολουθήθηκε σε σύνθετα κεραμικά «cross-ply SiC/BMAS» δοκίμια. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που αναπτύχθηκε για την μέτρηση του μήκους ρωγμής αρχικά υπολογίστηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στην περιοχή που φαίνεται στην Εικόνα 3.1.42 στο μαύρο πλαίσιο. Οι μέγιστες θερμοκρασίες απεικονίζονται στην Εικόνα 3.1.45 σε σχέση με το χρόνο. Επίσης συσχετίστηκαν με το διάγραμμα επιμήκυνσης σε σχέση με το χρόνο. Στην Εικόνα 3.1.45 παρατηρείται πως για κάθε κύκλο φόρτισης η καμπύλη της θερμοκρασίας εμφανίζει ένα μέγιστο. Μέχρι τον πέμπτο κύκλο φόρτισης τα μέγιστα της καμπύλης θερμοκρασίας χρόνου είναι λιγότερο προφανή από αυτά που αντιστοιχούν στους κύκλους 7-12. Από το διάγραμμα αυτό στη συνέχεια βρέθηκαν ακριβώς τα χρονικά σημεία που αντιστοιχούν στα μέγιστα που παρουσιάζει η καμπύλη της θερμοκρασίας.



Εικόνα 3.1.45. Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών και επιμήκυνσης σε σχέση με το χρόνο

Λαμβάνοντας υπόψη τα χρονικά σημεία που η θερμοκρασία μεγιστοποιείται, προσδιορίστηκε για κάθε χρονικό σημείο μια από τις 50 γραμμές αναφοράς παρουσιάζει μέγιστο. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε γραμμή αναφοράς τοποθετήθηκε σε συγκεκριμένο

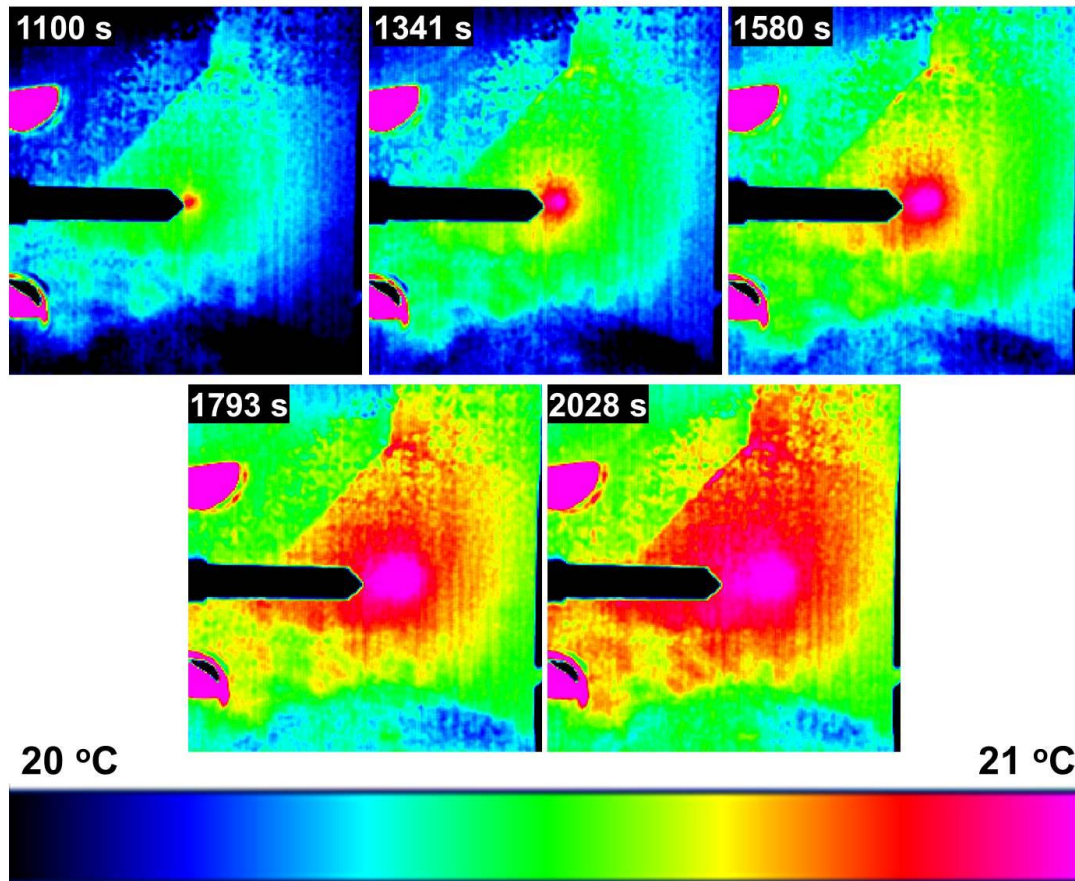
σημείο μπροστά από την εσοχή «V», περιοχή όπου διαδίδεται μια ρωγμή, και αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος ρωγμής. Ως εκ τούτου, γνωρίζοντας μια γραμμή αναφοράς παρουσιάζει μέγιστο σε κάθε χρονικό σημείο αλλά και σε πιο μήκος ρωγμής αντιστοιχεί κάθε γραμμή αναφοράς απεικονίστηκε γραφικά το μήκος της ρωγμής σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 3.1.46. Απεικόνιση μήκους ρωγμής με τη μέθοδο της θερμογραφίας

Στην Εικόνα 3.1.46 απεικονίζεται το μήκος της ρωγμής σε σχέση με το χρόνο υπολογισμένο με τη μέθοδο της θερμογραφίας που αναπτύχθηκε σε αυτό το κεφάλαιο. Αρχικά στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται πως για 500 περίπου δευτερόλεπτο η ρωγμή δεν έχει ξεκινήσει να διαδίδεται, Στη συνέχεια στα επόμενα 500 δευτερόλεπτα φαίνεται πως το μήκος της ρωγμής αυξήθηκε ελάχιστα και από τα 1000 δευτερόλεπτα και μετά παρατηρείται μια αλλαγή στο ρυθμό διάδοσης της ρωγμής που αντιστοιχεί στην ραγδαία αύξηση του μήκους της ρωγμής από περίπου 1 mm σε 10 mm.

Η διάδοση της ρωγμής επίσης παρατηρήθηκε και στα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.47.



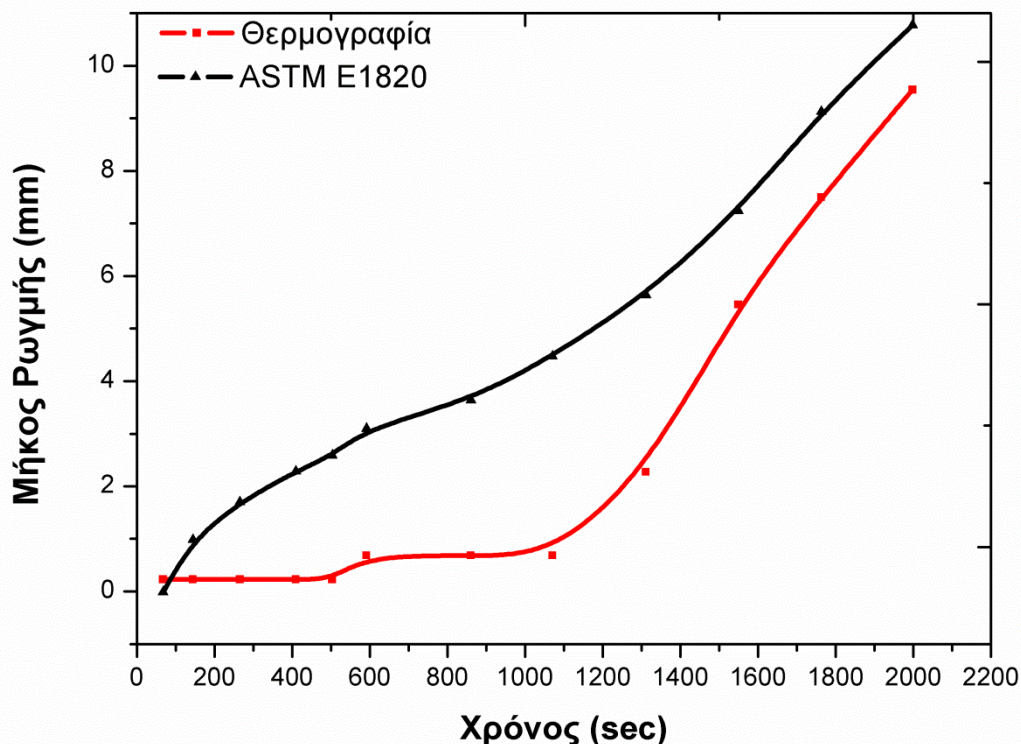
Εικόνα 3.1.47. Θερμογραφήματα διάδοσης ρωγμής για σύνθετα κεραμικά «cross-ply SiC/BMAS»

Στην Εικόνα 3.1.47 παρουσιάζονται τυπικά θερμογραφήματα που απεικονίζουν τη διάδοση της ρωγμής. Στο θερμογράφημα που αντιστοιχεί στα 1100 sec παρατηρείται πως η ρωγμή έχει ξεκινήσει να διαδίδεται μπροστά από την εσοχή «V». Η κόκκινη περιοχή στα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.1.47 αντιστοιχούν σε αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας που σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε αυτό το κεφάλαιο αντιστοιχεί στη διάδοση της ρωγμής. Καθώς λοιπόν, η ρωγμή διαδίδεται από τα αριστερά προς τα δεξιά, η «κόκκινη περιοχή», στην ακμή της ρωγμής κινείται και αυτή με τον ίδιο τρόπο. Επίσης, με την αύξηση του μήκους ρωγμής παρατηρείται και αύξηση της θερμοκρασιακής κατανομής στην επιφάνεια του δοκιμίου, γεγονός που οφείλεται στη μεταφορά τάσεων από την ακμή της ρωγμής στη γύρω περιοχή της.

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε με βάση τη θερμογραφία συγκρίθηκαν με τον υπολογισμό του μήκους ρωγμής σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1820-01 [58] και τη Σχέση 3.1.8. Η σύγκριση των δύο μεθόδων



απεικονίζεται στο γράφημα της Εικόνας 3.1.48. Όπως είναι εμφανές οι μετρήσεις του μήκους ρωγμής με τις δύο μεθόδους, παρότι ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, δεν συμπίπτουν. Αυτό συμβαίνει διότι η σχέση του προτύπου ASTM E1820-01 αναφέρεται κυρίως σε μεταλλικά υλικά των οποίων οι μηχανισμοί θραύσης διαφέρουν κατά πολύ από αυτούς για τα σύνθετα κεραμικά. Παρατηρώντας την καμπύλη που προέκυψε από το πρότυπο φαίνεται πως το μήκος ρωγμής αυξάνεται συνεχώς σχεδόν ομαλά, γεγονός το οποίο δεν μπορεί να ισχύει σε τόσο ψαθυρά υλικά όπως τα σύνθετα SiC/BMAS διότι μόλις το μήκος της ρωγμής φθάσει σε μία κρίσιμη τιμή τότε αυτή διαδίδεται ακαριαία όπως διαπιστώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.



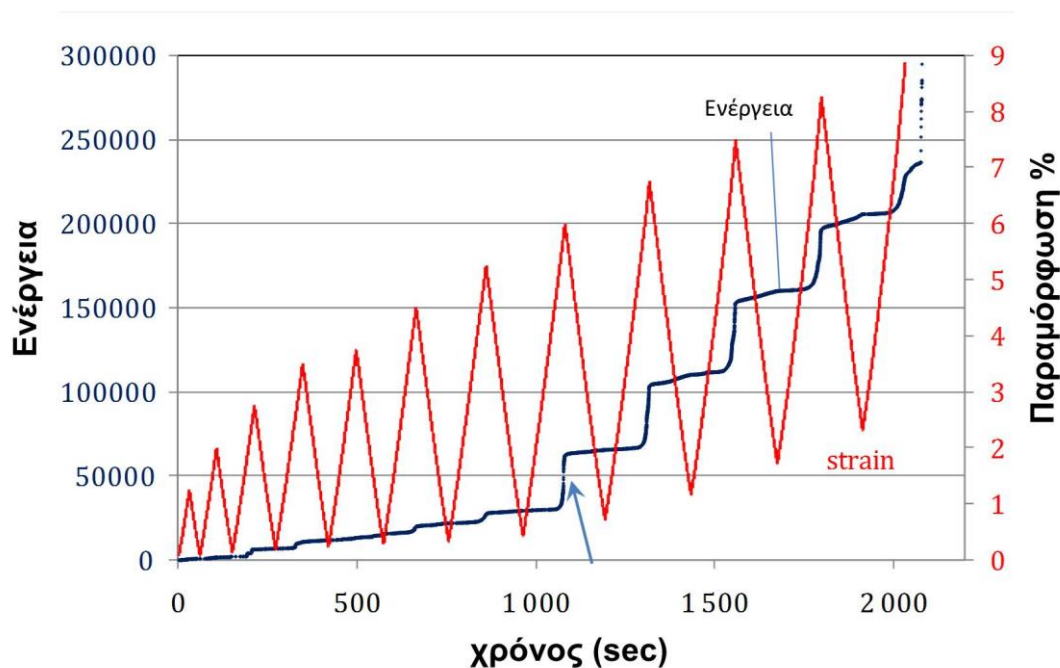
Εικόνα 3.1.48. Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού μήκους ρωγμής

Ως εκ τούτου η καμπύλη που προέκυψε από τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε με βάση την υπέρυθη θερμογραφία φαίνεται πως είναι έγκυρη αν ληφθεί υπόψη ότι τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής συμφωνούν με αυτά της θερμογραφίας.

Στο Κεφάλαιο 3.1.4.2 μελετήθηκε ο τρόπος διάδοσης μίας ρωγμής σε δοκίμια γεωμετρίας τύπου «CT» και με ακουστική εκπομπή. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 3.1.41.



Η Εικόνα 3.1.49 απεικονίζει τη συσσωρευμένη ενέργεια των ακουστικών σημάτων και την παραμόρφωση σε σχέση με το χρόνο. Ο ρυθμός της συσσωρευμένης ενέργειας αυξάνεται καθώς η παραμόρφωση μεγιστοποιείται σε κάθε κύκλο φόρτισης. Στον 8<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης παρατηρείται μία απότομη αύξηση της ακουστικής εκπομπής, επισημαίνεται με μπλε βέλος, η οποία επαληθεύεται και από την καμπύλη μήκους ρωγμής σε σχέση με το χρόνο όπως υπολογίστηκε από τη θερμογραφία (βλέπε Εικόνα 3.1.48). Όπως φαίνεται, η αύξηση της συσσωρευμένης ενέργειας των ακουστικών σημάτων ακολουθεί την ανάπτυξη της βλάβης γεγονός που επιτρέπει τον χαρακτηρισμό της διάδοσης μίας ρωγμής.



Εικόνα 3.1.49. Διάγραμμα της συσσωρευμένης ενέργειας των ακουστικών σημάτων και της παραμόρφωσης σε σχέση με το χρόνο

### 3.1.5. Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.1 αφορά την ανάπτυξη καινοτόμων μεθοδολογιών βασισμένες στην υπέρυθρη θερμογραφία για τη μελέτη της συμπεριφοράς θραύσης μονολιθικών αλλά και σύνθετων υλικών. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου Κεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στα [37, 59-76]

Στο Κεφάλαιο 3.1.3, με τη μεθοδολογία της θερμογραφίας lock-in που αναπτύχθηκε, προσδιορίστηκε επιτυχώς ο ρυθμός ανάπτυξης μίας ρωγμής τόσο σε δοκίμια αλουμινίου όσο και σε σύνθετα μεταλλικά με μήτρα αλουμινίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέθοδο της θερμογραφίας ήταν σε συμφωνία με αυτά της συμβατικής μεθόδου για τον προσδιορισμό ανάπτυξης ρωγμής (da/dN). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση της ανάπτυξης μίας ρωγμής και την πλήρη πρόβλεψη της διαδρομής της ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η ρωγμάτωση δεν είναι ορατή στην επιφάνεια του δοκιμίου αλλά διαδίδεται εσωτερικά στο υλικό. Επίσης, επιτρέπει την έγκαιρη πρόβλεψη της επερχόμενης θραύσης του δοκιμίου περίπου στο 80% της συνολικής του ζωής. Παρουσιάζει ένα μεγάλο πλεονέκτημα, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε οποιαδήποτε γεωμετρία δοκιμίου αλλά και σε περιπτώσεις που ο προσδιορισμός του ρυθμού ανάπτυξης μίας ρωγμής με τη συμβατική μέθοδο είναι αδύνατος.

Επιπλέον στο Κεφάλαιο 3.1.3 χρησιμοποιήθηκε και η ακουστική εκπομπή και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με αυτά της lock-in θερμογραφίας. Πολλές παράμετροι της ακουστικής εκπομπής παρουσίασαν σαφείς αλλαγές πολύ νωρίτερα από την τελική θραύση του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων, η ενέργεια, ο χρόνος ανόδου και τιμή RA αυξήθηκαν έντονα περίπου 1000 κύκλους πριν την αστοχία του υλικού. Η απότομη αλλαγή των παραπάνω δεικτών της ΑΕ οφείλεται κυρίως στην αλλαγή των τύπων θραύσης. Αρχικά παρατηρήθηκε εφελκυστική και έπειτα διατμητική θραύση, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την οπτική παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης των μεταλλικών δοκιμίων.

Στο Κεφάλαιο 3.1.4.1 εφαρμόστηκε μία μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας και συσχετίστηκε με μετρήσεις ακουστικής για τη μελέτη έναρξης μίας ρωγμής και τον τρόπο διάδοσής της. Από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 3.1.4.1, συμπεραίνεται πως η υπέρυθρη θερμογραφία ως μέθοδος ευρέος πεδίου και με δυνατότητα εφαρμογής κατά τη λειτουργία μίας δομής, μπορεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια να προβλέψει τόσο το χρόνο αλλά

και την ακριβή τοποθεσία έναρξης μίας ρωγμής σε σύνθετα δοκίμια με κεραμική μήτρα που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση. Επίσης, προβλέφθηκε ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του σύνθετου υλικού στο 73% του τελευταίου κύκλου φόρτισης και η διαδρομή της ρωγμής. Τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής ήταν σε πλήρη συμφωνία με αυτά της θερμογραφίας γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως η υπέρυθη θερμογραφία αποτελεί μία ισχυρή μέθοδο για τον χαρακτηρισμό της βλάβης και τη μελέτη του τρόπου διάδοσης μίας ρωγμής.

Στο Κεφάλαιο 3.1.4.2 αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας για τον υπολογισμό του μήκους της ρωγμής σε δοκίμια συνθέτων υλικών γεωμετρίας τύπου «CT» που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση. Λόγω της ιδιομορφίας των συγκεκριμένων υλικών είναι αδύνατον να εφαρμοστεί η συμβατική μέθοδος για τον υπολογισμό του μήκους ρωγμής με τη χρήση επιμηκυνσιομέτρου τύπου COD. Η μεθοδολογία λοιπόν που αναπτύχθηκε στη συγκεκριμένη έρευνα αποδείχθηκε πως έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια το μήκος της ρωγμής και ξεπερνά τα προβλήματα που προκύπτουν με τη χρήση της συμβατικής μεθόδου. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα ενισχύεται αν ληφθεί υπόψη ότι και τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής συμφωνούν απόλυτα με αυτά της θερμογραφίας.

3.1.6. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Winfree WP, Madaras EI, Cramer KE, Howell PA, Hodges KL, Seebo JP, et al. NASA Langley Inspection of Rudder and Composite Tail of American Airlines Flight 587. AIAA 2005-2253. April 2005.
- [2] Sun JG, Deemer CM, Ellingson WA, Wheeler J. NDT technologies for ceramic matrix composites: Oxide and nonoxide. Mater Eval. 2006;64(1):52-60.
- [3] Mei H, Xu YD, Cheng LF, Zhang LT. Nondestructive evaluation and mechanical characterization of a defect-embedded ceramic matrix composite laminate. International Journal of Applied Ceramic Technology. 2007;4(4):378-86.
- [4] Madaras EI, Winfree WP, Prosser WH, Wincheski RA, Cramer KE. Nondestructive Evaluation for the Space Shuttle's Wing Leading Edge. AIAA 2005-3630. July 2005.
- [5] Sun JG, Verrilli MJ, Stephan R, Barnett TR, Ojard G. Nondestructive Evaluation of Ceramic Matrix Composite Combustor Components. NASA/TM-2003-212014. April 2003.
- [6] Mei H. Current development in non-destructive testing and damage evaluation for ceramic matrix composites. Advances in Applied Ceramics. 2009;108(2):84-91.
- [7] Levallois F, Sobeczko A, Proust A, Marlot D, Lenain J-C. Non-destructive testing of GAIA frame by means of acoustic emission monitoring during launch simulation tests. 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission. University of Granada, Spain2012.
- [8] Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures. In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. Orlando, FL2001. p. 560-6.
- [9] Choi M-Y, Park J-H, Kang K-S, Kim W-T. Application of thermography to analysis of thermal stress in the NDT for compact tensile specimen. Proc 12th PCNDT 2006. 2006.
- [10] Kim W-T, Choi M-Y, Huh Y-H, Eom S-J. Measurement of thermal stress and prediction of fatigue for STS using Lock-in thermography. Proc 12th PCNDT 2006. 2006.
- [11] Luong MP. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. Mechanics of Materials. 1998;28(1-4):155-63.
- [12] Krapez JC, Pacou D, Gardette G. Lock-in thermography and fatigue limit of metals. Proc QIRT'2000. 2000:277-82.
- [13] La Rosa G, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. International Journal of Fatigue. 2000;22(1):65-73.
- [14] Yang B, Liaw PK, Wang G, Peter WH, Buchanan RA, Yokoyama Y, et al. Thermal-Imaging Technologies for Detecting Damage during High-Cycle Fatigue. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2004;35 A(1):15-23.
- [15] Plekhov O, Palin-Luc T, Saintier N, Uvarov S, Naimark O. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2005;28(1-2):169-78.

- [16] Aouit DA, Ouahabi A. Monitoring crack growth using thermography. *Cr Mecanique*. 2008;336(8):677-83.
- [17] Mindess S. Acoustic Emission Methods. In *CRC Handbook of Nondestructive Testing of Concrete*. 2 ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2003.
- [18] Grosse CU, Ohtsu M. *Acoustic Emission Testing*. Heidelberg: Springer; 2008.
- [19] Aggelis DG, Shiotani T, Momoki S, Hiramata A. Acoustic emission and ultrasound for damage characterization of concrete elements. *ACI Materials Journal*. 2009;106(6):509-14.
- [20] Grosse C, Reinhardt H, Dahm T. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques. *NDT & E International*. 1997;30(4):223-30.
- [21] Anastassopoulos AA, Philippidis TP. Clustering methodology for the evaluation of acoustic emission from composites. *NDT and E International*. 1997;30(2):108-.
- [22] Shiotani T, Ohtsu M, Ikeda K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation. *Construction and Building Materials*. 15(5-6):235-46.
- [23] Ohtsu M, Tomoda Y. Phenomenological model of corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission. *ACI Materials Journal*. 2008;105(2):194-9.
- [24] Committee RT. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete\*. *Materials and Structures*. 2010;43(9):1187-9.
- [25] Aggelis DG, Barkoula NM, Matikas TE, Paipetis AS. Acoustic emission monitoring of degradation of cross ply laminates. *J Acoust Soc Am*. 2010;127(6):EL246.
- [26] Soulioti D, Barkoula NM, Paipetis A, Matikas TE, Shiotani T, Aggelis DG. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending. *Construction and Building Materials*. 2009;23(12):3532-6.
- [27] Roberts TM, Talebzadeh M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003;59(6):695-712.
- [28] Roberts TM, Talebzadeh M. Fatigue life prediction based on crack propagation and acoustic emission count rates. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003;59(6):679-94.
- [29] Christman T, Suresh S. Effects of SiC reinforcement and aging treatment on fatigue crack growth in an Al/SiC composite. *Materials Science and Engineering: A*. 1988;102(2):211-6.
- [30] Srivatsan TS, Al-Hajri M. The fatigue and final fracture behavior of SiC particle reinforced 7034 aluminum matrix composites. *Composites Part B: Engineering*. 2002;33(5):391-404.
- [31] Taya M, Arsenault RJ. *Metal matrix composites: thermomechanical behavior*. Elmsford, New York: Pergamon Press; 1989.
- [32] Manoharan M, Lewandowski JJ. Crack initiation and growth toughness of an aluminum metal-matrix composite. *Acta Metallurgica Et Materialia*. 1990;38(3):489-96.
- [33] Davidson DL. Fatigue and fracture toughness of aluminium alloys reinforced with SiC and alumina particles. *Composites*. 1993;24(3):248-55.

- [34] Zhang RJ, Wang Z, Simpson C. Fatigue fractography of particulate-SiC-reinforced Al (A356) cast alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 1991;148(1):53-66.
- [35] Srivatsan TS. The low-cycle fatigue behaviour of an aluminium-alloy-ceramic-particle composite. *International Journal of Fatigue*. 1992;14(3):173-82.
- [36] Jian Ku S, Yu W, Ritchie RO. Role of silicon carbide particles in fatigue crack growth in SiC-particulate-reinforced aluminum alloy composites. *Materials Science and Engineering: A*. 1988;102(2):181-92.
- [37] Myriounis DP, Kordatos EZ, Hasan ST, Matikas TE. Crack-Tip Stress Field and Fatigue Crack Growth Monitoring Using Infrared Lock-In Thermography in A359/SiCp Composites. *Strain*. 2011;47:e619-e27.
- [38] Schmidt S, Beyer S, Immich H, Knabe H, Meistring R, Gessler A. Ceramic matrix composites: A challenge in space-propulsion technology applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2005;2(2):85-96.
- [39] Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Compos Sci Technol*. 2004;64(2):155-70.
- [40] Mei H, Cheng LF, Luan XG, Zhang LT, Xu YD, Wang D. Simulated environments testing system for advanced ceramic matrix composites. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2006;3(3):252-7.
- [41] Prewo KM, Brennan JJ, Layden GK. Fiber Reinforced Glasses and Glass-Ceramics for High-Performance Applications. *Am Ceram Soc Bull*. 1986;65(2):305-&.
- [42] Brennan JJ, Prewo KM. Silicon-Carbide Fiber Reinforced Glass-Ceramic Matrix Composites Exhibiting High-Strength and Toughness. *J Mater Sci*. 1982;17(8):2371-83.
- [43] Schmidt S, Beyer S, Knabe H, Immich H, Meistring R, Gessler A. Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications. *Acta Astronaut*. 2004;55(3-9):409-20.
- [44] NASA. Columbia Accident Investigation Board Final Report, August 26, 2003. 2003.
- [45] Mei H, Xu Y, Cheng L, Zhang L. Nondestructive evaluation and mechanical characterization of a defect-embedded ceramic matrix composite laminate. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2007;4(4):378-86.
- [46] Sfarra S, Ibarra-Castaneda C, Bendada A, Maldague X, Ambrosini D, Paoletti D. Comparative study for the nondestructive testing of advanced ceramic materials by infrared thermography and holographic interferometry. Orlando, FL2010.
- [47] Liu C, Cheng L, Luan X, Li B, Zhou J. Damage evolution and real-time non-destructive evaluation of 2D carbon-fiber/SiC-matrix composites under fatigue loading. *Materials Letters*. 2008;62(24):3922-4.
- [48] Reis P, Ferreira J, Richardson M. Fatigue Damage Characterization by NDT in Polypropylene/Glass Fibre Composites. *Applied Composite Materials*. 2011;18(5):409-19.
- [49] Kim J. Analysis of heat generation during fracture in ceramic matrix composites. *Key Engineering Materials*. 2008;385-387:689-92.
- [50] Li B, Tong X, Feng Z, Yao L. Infrared thermography and acoustic emission in 2D plain woven C/Sic composites under tensile-tensile fatigue loading. *Advanced Materials Research*. 2010;118-120:251-5.

- [51] Kim J, Liaw PK. Monitoring tensile damage evolution in Nextel 312/Blackglas (TM) composites. *Mat Sci Eng a-Struct.* 2005;409(1-2):302-8.
- [52] Thomson W. On the dynamical theory of heat. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh.* 1853;20:261-83.
- [53] Bremond P. New developments in thermoelastic stress analysis by infrared thermograph. *IV Conferencia Panamericana de END.* 2007.
- [54] MC-21, Inc, Carson City, NV, USA, Technical Report, [www.mc21inc.com](http://www.mc21inc.com).
- [55] Merle P. Thermal Treatments of Age Hardenable Metal Matrix Composites. MMC-Assess Thematic Network. 2000;2.
- [56] ASTM E399-09e1. Standard test method for linear-elastic plane strain fracture toughness  $K_{Ic}$  of metallic materials. American Society for Testing and Materials. 2009.
- [57] ASTM Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, pp. 615-657, ASTM E-647. 2008.
- [58] ASTM E1820-01. Standard test method for measurement of fracture toughness. American Society for Testing and Materials. 2001.
- [59] Aggelis DG, Kordatos EZ, Matikas TE. Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates. *Mechanics Research Communications.* 2011;38(2):106-10.
- [60] D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas. Acoustic emission for fatigue damage characterization on metal Plates. 7th National Conference in Nondestructive Testing. Athens, Greece2010.
- [61] E. Z. Kordatos, N. M. Mparkoula, A. Paipetis, T. E. Matikas. Characterization of crack growth in metallic materials by non-destructive full field method. 7th National Conference in Nondestructive Testing. Athens, Greece2010.
- [62] K. G. Dassios, E. Z. Kordatos, D. G. Aggelis, T. E. Matikas. Crack growth monitoring in ceramic matrix composites by combined infrared thermography and acoustic emission. Submitted for publication. 2013.
- [63] Dassios KG, Aggelis DG, Kordatos EZ, Matikas TE. Cyclic loading of a SiC-fiber reinforced ceramic matrix composite reveals damage mechanisms and thermal residual stress state. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2013;44(0):105-13.
- [64] Kordatos EZ, Aggelis DG, Dassios KG, Matikas TE. In-Situ Monitoring of Damage Evolution in Glass Matrix Composites during Cyclic Loading using Nondestructive Techniques. *Applied Composite Materials.* 2013:1-13.
- [65] Kordatos EZ, Aggelis DG, Matikas TE. Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. *Composites Part B: Engineering.* 2012;43(6):2676-86.
- [66] D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas. Monitoring of Acoustic Emission During Fatigue of Metal Plates. 20th International Acoustic Emission Symposium. Kumamoto, Japan2010. p. 73-8.
- [67] D. G. Aggelis, K. G. Dassios, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas. Monitoring of damage accumulation in cyclically-loaded BMAS/SiC glass-ceramic matrix composites. Submitted for publication. 2013.

- [68] Kordatos EZ, Aggelis DG, Matikas TE. Monitoring of fatigue damage in metal plates by acoustic emission and thermography. San Diego, CA2011.
- [69] E. Z. Kordatos, D. G. Aggelis, T. E. Matikas. Monitoring of Fracture Behaviour in Structural Materials by Thermography and Acoustic Emission. Micromechanics and Modeling of Multifunctional Materials 2011 (MMMM11). Thessaloniki, Greece2011.
- [70] E. Z. Kordatos, D. G. Aggelis, K. G. Dassios, T. E. Matikas. Monitoring of glass-ceramic composites under static and dynamic loading by combined NDE methods. SPIE - The International Society for Optical Engineering. San Diego, CA, USA2013.
- [71] D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas. Monitoring of Metal Fatigue Damage Using Acoustic Emission and Thermography. Journal of Acoustic Emission. 2011;29:113-22.
- [72] Kordatos EZ, D, Myriounis P, S, Hasan T, Matikas TE. Monitoring the fracture behavior of SiCp/Al alloy composites using infrared lock-in thermography. In: Wu HF, Diaz AA, Shull PJ, Vogel DW, editors. 1 ed. San Diego, CA, USA: SPIE; 2009. p. 72940X-12.
- [73] K. G. Dassios, E. Z. Kordatos, D. G. Aggelis, T. E. Matikas. Non-Destructive Damage Evaluation in Ceramic Matrix Composites for Aerospace Applications Submitted for publication. 2013.
- [74] Kordatos EZ, Aggelis DG, Dassios KG, Lagari PLI, Matikas TE. Real-time characterization of damage in ceramic matrix composites using IR thermography and acoustic emission. Proc SPIE 8346 "Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration". San Diego CA2012. p. 834617.
- [75] D. G. Aggelis, K. G. Dassios, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas. A Study on the Acoustic Emission Behavior of Ceramic Matrix Composites During Cyclic Loading. 10th International Conference on Durability of Composite Systems (DURACOSYS 2012). Brussels, Belgium2012.
- [76] Kordatos EZ, Aggelis DG, Matikas TE. Thermography and acoustic emission for monitoring the fracture of aluminium plates. In: Buyukozturk O, editor.2012. p. 519-24.



### 3.2. Ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθοδολογίας για την ποσοτικοποίηση της βλάβης μεταλλικών υλικών

#### 3.2.1. Σκοπός - Αντικείμενο

Αντικείμενο του Κεφαλαίου 3.2 είναι η ανάπτυξη καινοτόμου μη καταστροφικής μεθοδολογίας βασισμένης στην υπέρυθη θερμογραφία για την ανάλυση των θερμικών φαινομένων που προκαλούνται από κυκλικές μηχανικές καταπονήσεις σε μεταλλικά υλικά. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω κόπωσης οφείλεται στην εκλυόμενη ενέργεια λόγω των μικροδομικών μεταβολών (διαταραχές, κλπ.) που προκαλεί η επαναλαμβανόμενη μηχανική καταπόνηση. Στην παρούσα έρευνα η εκλυόμενη ενέργεια ποσοτικοποιήθηκε σαν συνάρτηση των κύκλων μηχανικής κόπωσης σε επίπεδα δοκίμια χάλυβα (τύπου “Dog bone”). Φαινόμενα πιθανής μηχανικής υστέρησης αναλύθηκαν ώστε να προσδιοριστούν οι μετρικές της βλάβης, δηλαδή οι θερμικές παράμετροι εκείνες που χαρακτηρίζουν το επίπεδο βλάβης στο υλικό σαν συνάρτηση των κύκλων κόπωσης.

#### 3.2.2. Εισαγωγή

Η υπέρυθη ενεργητική θερμογραφία έχει πρόσφατα αναδειχθεί ως μία καινοτόμος μη-καταστροφική μέθοδος για την ανάλυση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς των υλικών. Αποτελεί μέθοδο μη-επαφής, με δυνατότητα ανίχνευσης υπό-επιφανειακών ατελειών σε μεγάλες επιφάνειες και μπορεί να αντικαταστήσει αλλά και να συμπληρώσει συμβατικές μη καταστροφικές μεθόδους [1].

Υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον τελευταία σχετικά με τις εφαρμογές της θερμογραφίας και τις διαθέσιμες μεθοδολογίες της. Συγκεκριμένα, η lock-in θερμογραφία έχει εφαρμοστεί για την ανάλυση και την αξιολόγηση των θερμό-μηχανικών μηχανισμών που συναντώνται στα υλικά που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση [2]. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην άμεση συσχέτιση των θερμοκρασιακών διαφορών με τις θερμικές τάσεις που προκύπτουν από τη θεωρία της θερμοελαστικότητας λόγω της θερμικής διέγερσης που προκαλεί η μηχανική κόπωση [3-5].

Θα πρέπει επίσης να τονιστεί πως η υπέρυθρη θερμογραφία έχει εφαρμοστεί για την αξιολόγηση της βλάβης και της υποβάθμισης των υλικών που προκαλείται λόγω μηχανικής καταπόνησης [6-9]. Έχει αναφερθεί σε έρευνες πως όταν αυξάνεται η βλάβη σε ένα υλικό λόγω κόπωσης υψηλών κύκλων [10, 11] ή χαμηλών [12] τότε παρατηρείται και αύξηση της θερμοκρασίας του.

Αναλυτικά, οι Muzia κ.ά. [13], αξιολόγησαν την υποβάθμιση λόγω κόπωσης σύνθετων υλικών εποξειδικών υάλων χρησιμοποιώντας την υπέρυθρη θερμογραφία και κατέληξαν σε μία σχέση όπου η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με τον αριθμό των κύκλων της κόπωσης. Ακόμη, οι Risitano κ.ά. [14] ανέπτυξαν μία μεθοδολογία βασισμένη στη θερμογραφία για την αξιολόγηση της συσσωρευμένης βλάβης που προκαλείται στα υλικά λόγω προηγούμενης φόρτισης τους. Επίσης, οι M. Braunovic κ.ά. [15] εκτίμησαν την εναπομένουσα ζωή ηλεκτρικών συνδέσεων αναπτύσσοντας μία παράμετρο που συσχετίζει την αύξηση της θερμοκρασίας, που καταγράφεται με υπέρυθρη κάμερα, με την ζωή των ηλεκτρικών επαφών. Επιπλέον, οι M. Amiri και M. M. Khonsari κ.ά. [16] υποβάλλοντας δοκίμια χάλυβα 304L σε κυκλικές φορτίσεις, προσπάθησαν να αναπτύξουν μία μεθοδολογία για να υπολογίζουν την εναπομένουσα ζωή ενός υλικού χρησιμοποιώντας ως παράμετρο τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας. Η μεγάλη αξία της αποτίμησης της κατάστασης βλάβης ενός υλικού ή μίας δομής είναι εμφανής και σε μία πρόσφατη έρευνα όπου ο Matsumoto [17] συνδύασε τρεις διαφορετικές μη καταστροφικές μεθόδους για το έλεγχο της ακεραιότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται σε εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας.

### 3.2.3. Υλικά

Το υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι ο ανθρακούχος χάλυβας «AISI 1006». Είναι ένα μονολιθικό υλικό, μαλακό και αρκετά όλκιμο με πολύ καλή διαμορφωσιμότητα και συγκολλησιμότητα. Ως εκ τούτου, έχει ποικίλες εφαρμογές και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για την κατασκευή αλυσίδων, καλωδίων, σωληνώσεων και πλαισίων αυτοκινήτων. Ο σκοπός της έρευνας αυτής, είναι να παρουσιαστεί η θερμομηχανική συμπεριφορά του υλικού αυτού κατά τη διάρκεια μηχανικής κυκλικής φόρτισης. Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής,

κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν όχι μόνο οι θερμικές αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες καθώς και η χημική του σύνθεση.

Πίνακας 3.2.1. Μηχανικές ιδιότητες AISI 1006 χάλυβα

Υλικό	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	HB
<b>Ανθρακούχος χάλυβας AISI 1006</b>	<b>285</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	<b>86</b>

Στον Πίνακα 3.2.1 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του AISI 1006 όπως προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα των εφελκυστικών δοκιμών. Στους Πίνακες 3.2.2 και 3.2.3 εμφανίζονται οι θερμικές ιδιότητες αλλά και η χημική σύνθεση του από τη βιβλιογραφία [18].

Πίνακας 3.2.2. Χημική σύνθεση του AISI 1006 χάλυβα

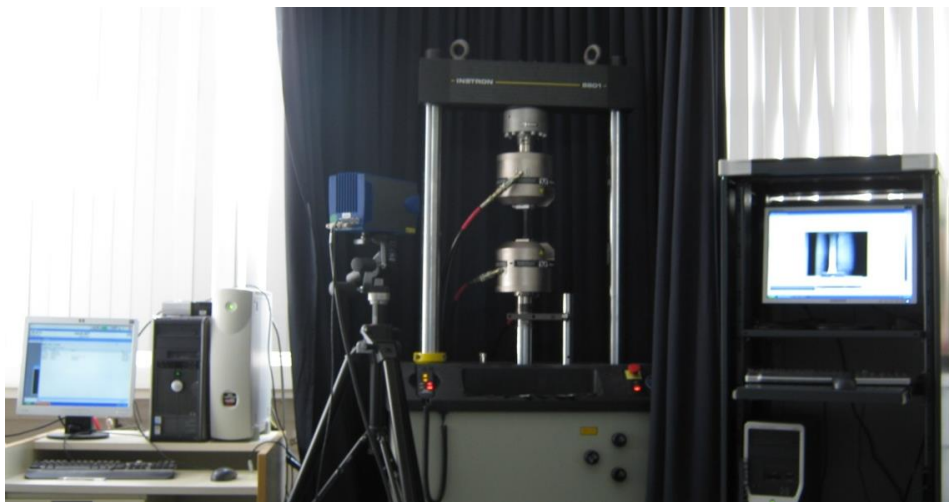
Υλικό	Στοιχεία (% κατά βάρος)			
	C (άνθρακας)	S (θειό)	P (φώσφορος)	Mn (μαγγάνιο)
<b>Ανθρακούχος χάλυβας AISI 1006</b>	<b>έως 0,08</b>	<b>έως 0,05</b>	<b>έως 0,04</b>	<b>έως 0,35</b>

Πίνακας 3.2.3. Θερμικές ιδιότητες του AISI 1006 χάλυβα

Υλικό	Συντελεστής θερμικής διαστολής ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	Ειδική θερμότητα (J/kgK)
<b>Ανθρακούχος χάλυβας AISI 1006</b>	<b>12,6</b>	<b>481</b>

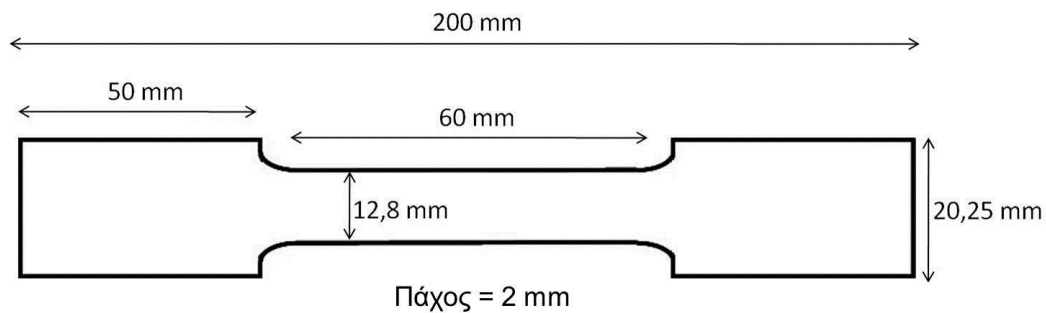
#### 3.2.4. Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Οι δοκιμές εφελκυσμού για την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και η κυκλική μηχανική κόπωση πραγματοποιήθηκαν σε σερβο-υδραυλική μηχανή INSTRON μεγίστου φορτίου  $\pm 100\text{KN}$ . Όσον αφορά στο θερμογραφικό έλεγχο η υπέρυθρη κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι μέσου υπέρυθρου φάσματος. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της υπέρυθρης κάμερας αλλά και της μηχανής δοκιμών αναφέρονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.1. Στην Εικόνα 3.2.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη η οποία αποτελείται από τη μηχανή δοκιμών και τη μονάδα καταγραφής δεδομένων και την υπέρυθρη κάμερα με τη δικιά της μονάδα καταγραφής δεδομένων.



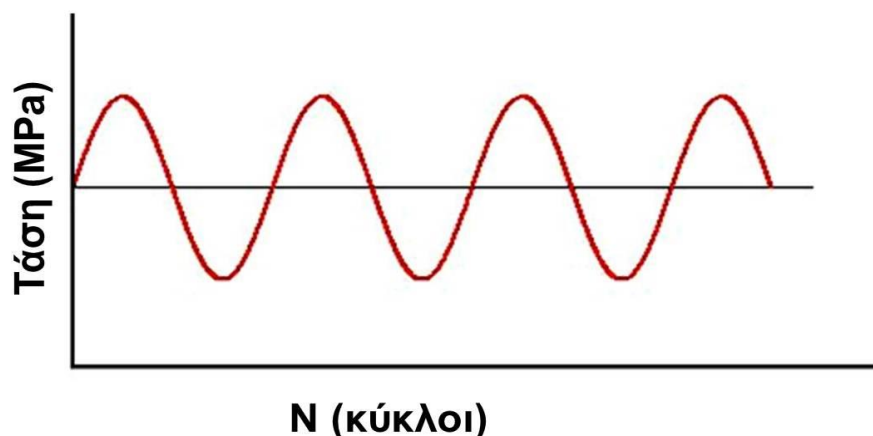
Εικόνα 3.2.1. Πειραματική διάταξη

Στην παρούσα μελέτη, η γεωμετρία των δοκιμίων ανθρακούχου χάλυβα που υποβλήθηκαν σε μηχανικές δοκιμές φαίνεται στην Εικόνα 3.2.2. Η γεωμετρία «dog bone» επιλέχθηκε ώστε να διασφαλιστεί πως η αστοχία θα επέλθει στην κεντρική περιοχή (gauge area) του δοκιμίου. Όλα τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με μία λεπτή στρώση μαύρης ματ βαφής ώστε κατά τον θερμογραφικό έλεγχο να απαλειφθούν οι αρνητικές επιπτώσεις του χαμηλού συντελεστή εκπομπής του χάλυβα.



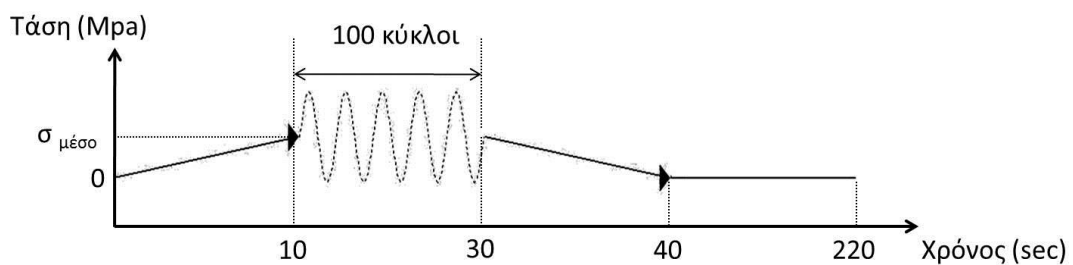
Εικόνα 3.2.2. Γεωμετρία δοκιμίου «dog bone»

Αρχικά διεξήχθησαν οι δοκιμές εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υπό εξέταση χάλυβα. Η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 2 mm/min με έλεγχο μετατόπισης του εμβόλου. Για την αξιολόγηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων χάλυβα, ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες όσον αφορά τη μηχανική κυκλική κόπωση. Στην πρώτη περίπτωση τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε συνεχόμενη κυκλική φόρτιση μέχρι την αστοχία τους (βλέπε Εικόνα 3.2.3). Η κυματομορφή της κυκλικής φόρτισης ήταν ημιτονοειδής με συχνότητα 5 Hz και αναλογία τάσεων (ελάχιστη προς μέγιστη)  $R = 0,1$ . Η μέγιστη τάση της κυκλικής φόρτισης επιλέχθηκε να είναι το 95% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα που μελετήθηκε και συγκεκριμένα 313,5 MPa. Κατά την πρώτη περίπτωση τα δοκίμια υποβάλλονταν ταυτόχρονα και σε θερμογραφικό έλεγχο με ταχύτητα λήψεις εικόνων 100 Hz.



Εικόνα 3.2.3. Συνεχής κυκλική φόρτιση

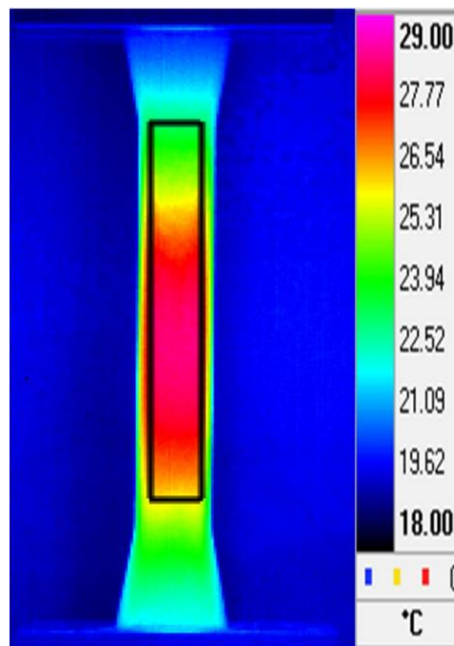
Στη δεύτερη πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκε ένα τελείως διαφορετικό πρωτόκολλο κυκλικής φόρτισης σε σχέση με τη συνηθισμένη δοκιμή κόπωσης (βλέπε Εικόνα 3.2.4). Σε αυτή τη διαδικασία τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις μέχρι την τελική τους αστοχία. Αναλυτικά, το υλικό φορτιζόταν μέχρι τη μέση τάση, στη συνέχεια υποβάλλονταν σε κυκλική φόρτιση για 100 κύκλους, έπειτα αποφορτιζόταν σε μηδενική τάση και παρέμενε σε αυτήν την κατάσταση για 180 δευτερόλεπτα. Ο χρόνος αυτός επιλέχθηκε ώστε η θερμοκρασία που είχε αποκτήσει το δοκίμιο κατά την κόπωση να ελαττωθεί και να εξισορροπήσει με τη θερμοκρασία δωματίου (20 °C). Οι παράμετροι της κυκλικής φόρτισης για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, όπως το επίπεδο φόρτισης, το εύρος, η κυματομορφή και η συχνότητα διατηρήθηκαν όμοια με την πρώτη πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 3.2.4. Επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση

Ο σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας ικανή για την αξιολόγηση της βλάβης σε υλικά που υποβάλλονται σε κόπωση. Η κυκλική κόπωση προκαλεί αλλαγές στη μικροδομή του υλικού με αποτέλεσμα την απαγωγή θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του δοκίμιου. Υποβάλλοντας το δοκίμιο σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις σταθερών κύκλων και αφήνοντας ενδιάμεσα αρκετό χρονικό διάστημα ώστε το υλικό να επανέλθει στην αρχική του θερμοκρασία, η αύξηση της θερμοκρασίας που καταγράφεται από την υπέρυθη κάμερα είναι αποτέλεσμα της συσσωρευμένης βλάβης στο υλικό. Η αύξηση της θερμοκρασίας που καταγράφηκε, χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος βλάβης σε αυτή την έρευνα επιτρέποντας την αξιολόγηση του επιπέδου της βλάβης και την πρόβλεψη της εναπομένουσας ζωής ενός υλικού που υποβάλλεται σε κόπωση.

Η επιφανειακή θερμοκρασία των δοκιμίων παρακολουθήθηκε και καταγράφηκε καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών κόπωσης. Τα θερμογραφήματα που προέκυψαν απεικονίζουν κυρίως την περιοχή του δοκιμίου που εμφανίζονται αυξημένες τάσεις (βλέπε Εικόνα 3.2.5).

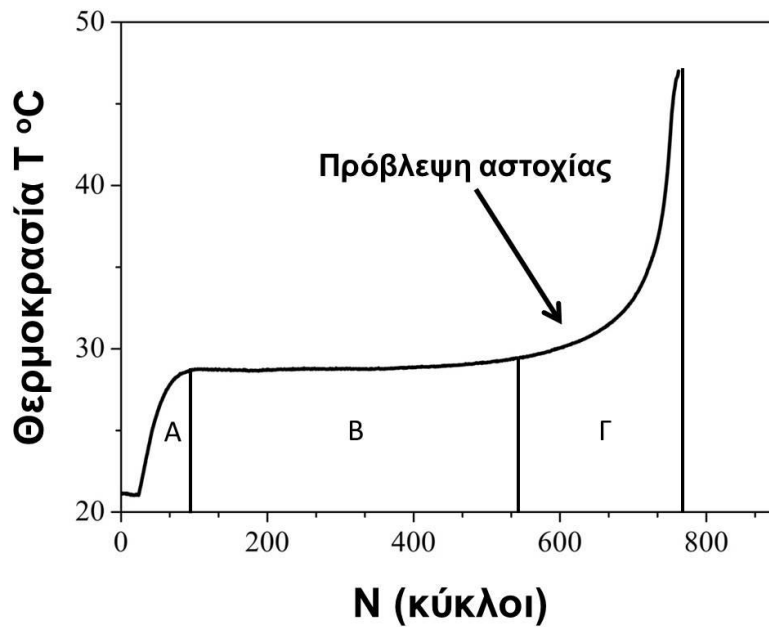


Εικόνα 3.2.5. Περιοχή θερμογραφικού ελέγχου

### 3.2.5. Αποτελέσματα και Συζήτηση

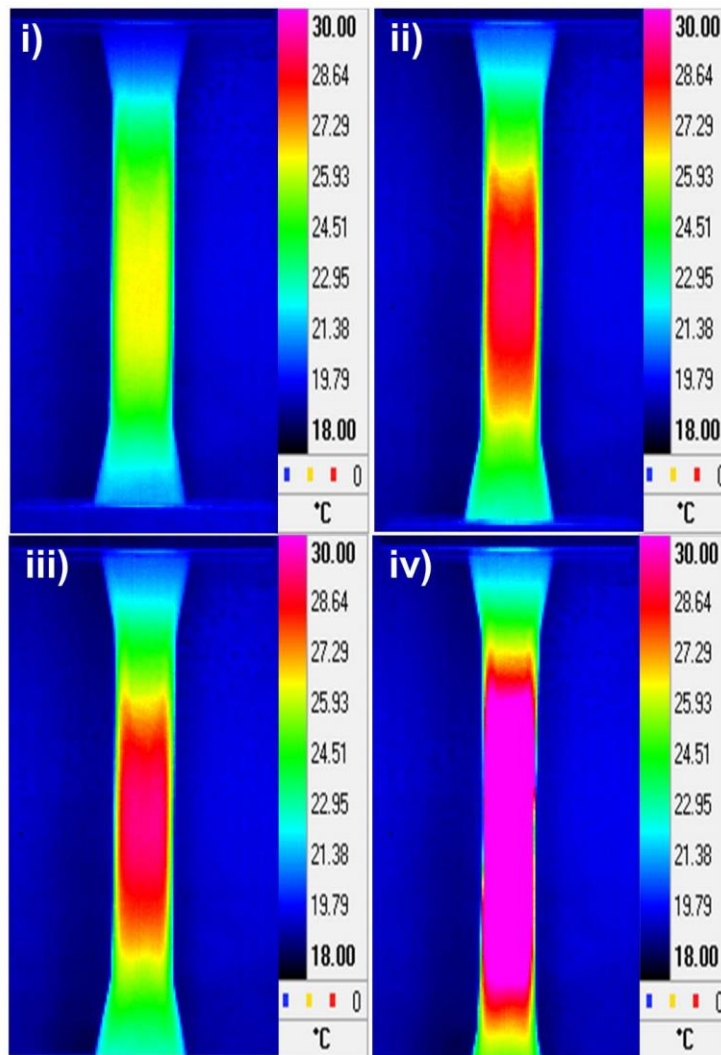
Κατά την πρώτη πειραματική διαδικασία εξετάστηκαν 5 δοκίμια χάλυβα. Στην Εικόνα 3.2.6 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα της μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης. Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.2.6 παρατηρούνται τρεις διαφορετικές περιοχές (Α, Β, Γ). Στην περιοχή Α, η οποία διαρκεί μόνο 80 κύκλους η επιφανειακή θερμοκρασία αυξήθηκε περίπου 8 °C. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στην μετάβαση του δοκιμίου από την ελαστική περιοχή στην πλαστική. Στη δεύτερη περιοχή που περιλαμβάνει και τους περισσότερους κύκλους φόρτισης, περίπου 500 κύκλους, η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή. Τέλος, στην τρίτη περιοχή παρατηρείται μια απότομη αλλαγή στην κλίση της καμπύλης και μία αύξηση της θερμοκρασίας περίπου 15 °C. Η απότομη αλλαγή της κλίσης αποτελεί ένδειξη ότι το υλικό θα οδηγηθεί σε αστοχία. Αυτό λοιπόν, το χρονικό σημείο αποτελεί την

έγκαιρη πρόβλεψη της αστοχίας του δοκιμίου και αντιστοιχεί περίπου στο 77 % της συνολικής ζωής του υλικού.



Εικόνα 3.2.6. Διάγραμμα μέγιστων θερμοκρασιών σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης για την πρώτη πειραματική διάταξη

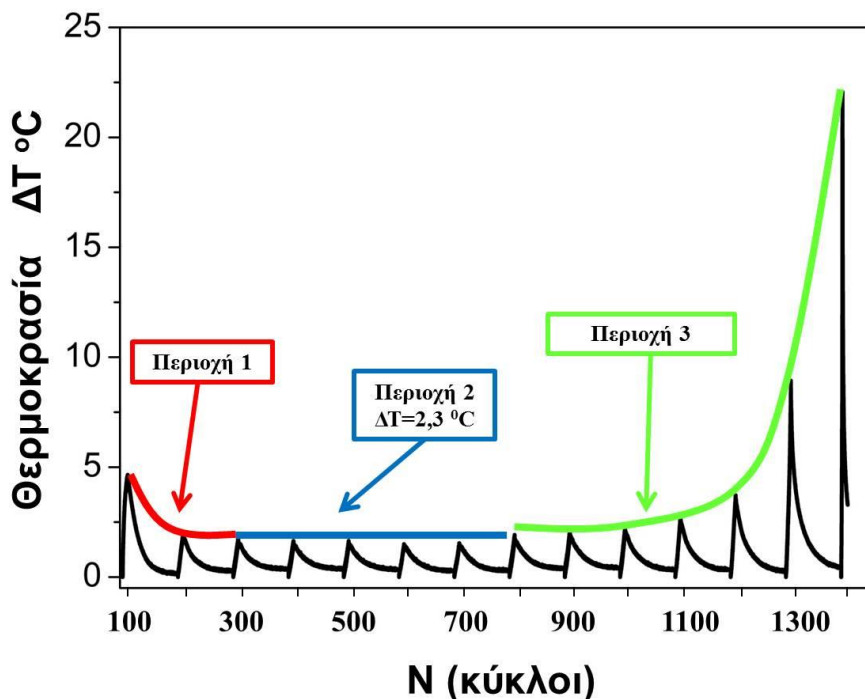




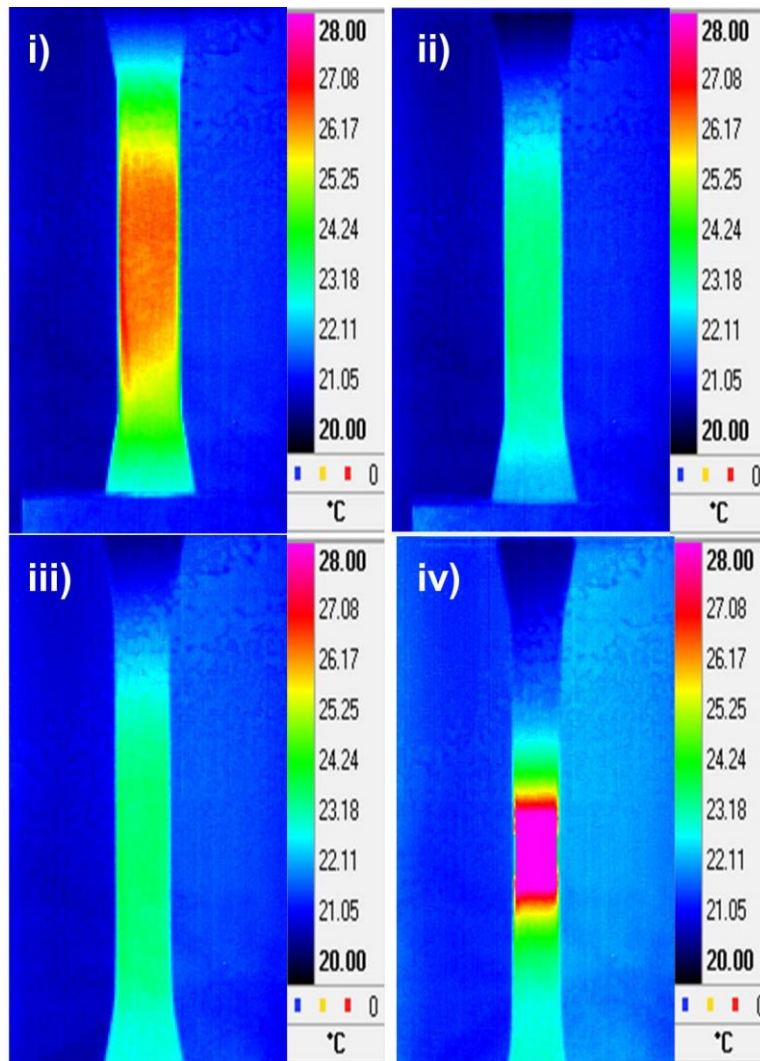
Εικόνα 3.2.7. Θερμογραφήματα των τριών περιοχών. i) Περιοχή Α (50 κύκλοι), ii) Περιοχή Β (200 κύκλοι), iii) Περιοχή Β (400 κύκλοι), iv) Περιοχή Γ (750 κύκλοι)

Στην Εικόνα 3.2.7 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικά θερμογραφήματα των τριών περιοχών θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν κατά το θερμογραφικό έλεγχο των δοκιμίων χάλυβα που υποβλήθηκαν σε συνεχόμενη κόπωση. Στο θερμογράφημα 3.2.7. i παρατηρείται μια μικρή αύξηση θερμοκρασίας στο κέντρο του δοκιμίου. Από τα επόμενα δύο θερμογραφήματα τα οποία αντιστοιχούν σε 200 και 400 κύκλους φόρτισης συμπεραίνεται πως η θερμοκρασία στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου παραμένει σταθερή. Τέλος στο θερμογράφημα 3.2.7.iv που αντιστοιχεί στην περιοχή Γ απεικονίζεται η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας με το μωβ χρώμα.

Η δεύτερη πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εύρεση της μετρικής βλάβης, δηλαδή τη θερμική παράμετρο η οποία θα χαρακτηρίζει το επίπεδο βλάβης στο υλικό σαν συνάρτηση των κύκλων κόπωσης. Στην Εικόνα 3.2.8 απεικονίζεται γραφικά η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που εντοπίστηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου σε συνάρτηση με τους κύκλους κόπωσης. Σε αυτό το διάγραμμα εμφανίζονται πάλι τρεις διακριτές περιοχές αλλά διαφορετικές από αυτές που προέκυψαν από την πρώτη πειραματική διαδικασία. Στην πρώτη περιοχή (Περιοχή 1), η οποία περιλαμβάνει περίπου 300 κύκλους, η διαφορά θερμοκρασία, δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία δωματίου, φαίνεται να ελαττώνεται. Στην δεύτερη περιοχή (Περιοχή 2), παρατηρείται σταθερή διαφορά θερμοκρασίας για περίπου 500 κύκλους. Αντίθετα στην Τρίτη περιοχή (Περιοχή 3) παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας η οποία συνοδεύεται στα τελευταία βήματα από μία ραγδαία αύξηση λίγο πριν τη θραύση του υλικού. Αξίζει να τονιστεί, πως η συμπεριφορά που παρουσιάζεται στις Εικόνες 3.2.8 και 3.2.9 ήταν όμοια για όλα τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε αυτό το πρωτόκολλο κυκλικής φόρτισης.



Εικόνα 3.2.8. Διάγραμμα μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης για τη δεύτερη πειραματική διάταξη



Εικόνα 3.2.9. Θερμογραφήματα των τριών περιοχών κατά την επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση. i) Περιοχή 1 (100 κύκλοι), ii) Περιοχή 2 (200 κύκλοι), iii) Περιοχή 2 (700 κύκλοι), iv) Περιοχή 3 (1350 κύκλοι)

Στην Εικόνα 3.2.9. απεικονίζονται τα θερμογραφήματα που προέκυψαν από τη δεύτερη πειραματική διαδικασία. Από τα θερμογραφήματα 3.2.9.i και 3.2.9.ii φαίνεται πως μειώνεται η θερμοκρασία στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, η κεντρική περιοχή από πορτοκαλί χρώμα (περίπου 26,5 °C) γίνεται ανοιχτό πράσινο (περίπου 23,5 °C). Στο θερμογράφημα 3.2.9.iii παρατηρείται πως η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ενώ στην Εικόνα 3.2.9.iv (1350 κύκλοι, περιοχή 3) απεικονίζεται ξεκάθαρα η αύξηση της θερμοκρασίας καθώς το κεντρικό τμήμα ξεπερνά τους 30 °C και γίνεται από πράσινο μωβ.

Στη δεύτερη πειραματική διαδικασία ο χάλυβας υποβλήθηκε σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις με διάρκεια της κάθε φόρτισης τους 100 κύκλους και η επιφανειακή του θερμοκρασία καταγράφηκε από μία υπέρυθρη κάμερα όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.9. Η αύξηση της διαφοράς της θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) σε σχέση με την αρχική θερμοκρασία του δοκιμίου (θερμοκρασία δωματίου) καταγράφηκε για κάθε βήμα της επαναλαμβανόμενης κόπωσης. Κάθε βήμα περιελάμβανε 100 κύκλους προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα να αξιολογηθούν οι διαφορετικές καταστάσεις συσσωρευμένης βλάβης. Σε αυτήν την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο αστόχησε στο 14<sup>ο</sup> βήμα δηλαδή στους 1400 κύκλους.

Στην Εικόνα 3.2.8. εμφανίζονται 3 διακριτές περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα βλάβης. Κατά τη διάρκεια της πρώτης περιοχής (100 κύκλοι) υπάρχει απότομη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της μετάβασης του υλικού από την ελαστική του περιοχή στην πλαστική. Αυτή η περιοχή περιλαμβάνει επίσης και πτώση της θερμοκρασίας η οποία παρατηρείται στους επόμενους 200 κύκλους. Στη δεύτερη περιοχή η διαφορά θερμοκρασίας παραμένει στους 2,3 °C. Αυτή η σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται σε κατανομή βλάβης (distributed damage) όπως σχηματισμό ασυνεχειών. Στην Περιοχή 3 παρατηρείται μία απότομη και ραγδαία αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας η οποία μπορεί να συσχετιστεί με κορεσμό των ασυνεχειών (saturation of dislocations) και με δημιουργία ατελειών τριών διαστάσεων (volume defects) όπως μικροκοιλότητες (micro cavities) και μικρορωγμές. Η δημιουργία και η διάδοση μικρορωγμών σχετίζονται με την έντονη συγκέντρωση τάσεων η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας. Αυτή η εκλυόμενη θερμότητα ανιχνεύεται από την υπέρυθρη κάμερα ως ραγδαία αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας. Άρα λοιπόν, αυτό αποτελεί μία ένδειξη για την κατάσταση βλάβης που βρίσκεται το υλικό αλλά και για την έγκαιρη ανίχνευση της επερχόμενης αστοχίας του. Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν δημοσιευτεί στο [19].

### 3.2.6. Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε καινοτόμος μη καταστροφική μεθοδολογία βασισμένη στην υπέρυθη θερμογραφία για την αξιολόγηση της βλάβης μεταλλικών υλικών που υποβάλλονται σε κυκλική μηχανική φόρτιση. Για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας αυτής δοκίμια ανθρακούχου χάλυβα υποβλήθηκαν σε δύο διαφορετικά είδη κυκλικής μηχανικής φόρτισης και ταυτόχρονα καταγράφηκε η επιφανειακή τους θερμοκρασία σε συνάρτηση με τους κύκλους της κόπωσης.

Η μεθοδολογία αυτή βασίστηκε στη ανάλυση των θερμικών φαινομένων που προκαλούνται από την κυκλική φόρτιση. Η εκλυόμενη ενέργεια λόγω κόπωσης σχετίστηκε με τη συσσώρευση βλάβης. Η συσχέτιση της αύξησης της θερμοκρασίας του δοκιμίου με τους κύκλους φόρτισης, αποτελεί μία χρήσιμη μετρική της βλάβης του υλικού λόγω κόπωσης επιτρέποντας την έγκυρη πρόβλεψη της εναπομένουσας ζωής του. Με αυτή τη μη καταστροφική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, υποβάλλοντας ένα δοκίμιο ή εξάρτημα σε λίγους κύκλους φόρτισης καθίσταται εφικτό να διαπιστωθεί το επίπεδο βλάβης του, αλλά και για πόσο χρόνο ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε δεδομένες συνθήκες μηχανικής καταπόνησης.

### 3.2.7. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Maldague XPV. Introduction to NDT by active infrared thermography. Mater Eval. 2002;60(9):1060-73.
- [2] Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures. In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. Orlando, FL2001. p. 560-6.
- [3] Choi M-Y, Park J-H, Kang K-S, Kim W-T. Application of thermography to analysis of thermal stress in the NDT for compact tensile specimen. Proc 12th PCNDT 2006. 2006.
- [4] Kim W-T, Choi M-Y, Huh Y-H, Eom S-J. Measurement of thermal stress and prediction of fatigue for STS using Lock-in thermography. Proc 12th PCNDT 2006. 2006.
- [5] Kordatos EZ, Aggelis DG, Matikas TE. Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. Composites Part B: Engineering. 2012;43(6):2676-86.
- [6] Liu C, Cheng L, Luan X, Li B, Zhou J. Damage evolution and real-time non-destructive evaluation of 2D carbon-fiber/SiC-matrix composites under fatigue loading. Materials Letters. 2008;62(24):3922-4.
- [7] Medgenberg J, Ummenhofer T. Detection of localized fatigue damage in steel by thermography. SPIE Thermosense XXIX. Orlando, Florida, USA2007. p. 654117-.
- [8] Fan J, Guo X, Wu C. A new application of the infrared thermography for fatigue evaluation and damage assessment. International Journal of Fatigue. 2012;44(0):1-7.
- [9] Ummenhofer T, Medgenberg J. On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints. International Journal of Fatigue. 2009;31(1):130-7.
- [10] Giancane S, Chrysochoos A, Dattoma V, Wattrisse B. Deformation and dissipated energies for high cycle fatigue of 2024-T3 aluminium alloy. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2009;52(2):117-21.
- [11] Yang B, Liaw PK, Wang G, Peter WH, Buchanan RA, Yokoyama Y, et al. Thermal-Imaging Technologies for Detecting Damage during High-Cycle Fatigue. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2004;35 A(1):15-23.
- [12] Luong MP. Infrared thermography of fatigue in metals. 1992:222-33.
- [13] Muzia G, Rdzawski ZM, Rojek M, Stabik J, Wróbel G. Thermographic diagnosis of fatigue degradation of epoxy-glass composites. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2007;24(2).
- [14] Risitano A, Risitano G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2010;54(2):82-90.
- [15] Braunovic M, Izmailov VV, Naumov AE, Novoselova MV. Estimation of Remaining Lifetime of Power Connections Using Infrared Thermography. Electrical Contacts, 2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on2009. p. 234-9.

- [16] Amiri M, Khonsari MM. Nondestructive Estimation of Remaining Fatigue Life: Thermography Technique. *J Fail Anal and Preven.* 2012;12(6):683-8.
- [17] Matsumoto E. Non-destructive evaluation of fatigue by thermal, acoustic and electromagnetic techniques. *Procedia Engineering.* 2011;10(0):3656-61.
- [18] ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. 10 ed: ASM International; 1990.
- [19] Kordatos EZ, Matikas TE. Developing damage metrics for metallic structures undergoing fatigue using real-time thermographic evaluation. SPIE San Diego, CA 2011.





### **3.3. Ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθοδολογίας για τον ταχύ προσδιορισμό του ορίου κόπωσης**

#### 3.3.1. Σκοπός – Αντικείμενο

Είναι ευρέως γνωστό ότι ο καθορισμός του ορίου κόπωσης με τη συμβατική μέθοδο της καμπύλης «Wöhler» παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα, όπως την ανάγκη μεγάλου αριθμού εξεταζόμενων δοκιμίων καθώς και εκτεταμένο χρόνο πειραμάτων. Στο παρόν Κεφάλαιο αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για τον ταχύ και αξιόπιστο προσδιορισμό του ορίου κόπωσης σε μονολιθικά και σύνθετα υλικά, βασισμένη στο συνδυασμό δύο μη καταστροφικών μεθόδων, της θερμογραφίας lock-in και της ακουστικής εκπομπής. Η υπέρυθη θερμογραφία είναι μία μέθοδος μη-επαφής που επιτρέπει την ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο θερμικών κυμάτων, τα οποία δημιουργούνται από τη θερμό-μηχανική σύζευξη και την εσωτερική διαχεόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της μηχανική κυκλικής φόρτισης του υλικού. Επιπλέον, η ακουστική εκπομπή καταγράφει τα ελαστικά κύματα που προκαλούνται λόγω συσσωρευμένης βλάβης στο υλικό. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού, δοκίμια χάλυβα, αλουμινίου, σύνθετα κεραμικά και σύνθετα μεταλλικά υλικά γεωμετρίας «dog bone», υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση διαφορετικών επιπέδων τάσης και μέσω των μεθόδων της υπέρυθρης θερμογραφίας και της ακουστικής εκπομπής προσδιορίστηκε με ακρίβεια το όριο κόπωσής τους.

#### 3.3.2. Εισαγωγή

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, ο ποιοτικός έλεγχος των υλικών είναι επιτακτική ανάγκη σε όλα τα στάδια παραγωγής. Συγκεκριμένα, η μη καταστροφική αξιολόγηση μίας δομής κατά το σχεδιασμό της, καθιστά δυνατή την επιλογή των κατάλληλων υλικών και των ιδιοτήτων που θα οδηγήσουν σε μία τελική, άριστα λειτουργική δομή. Επίσης, στο συγκεκριμένο τομέα απαιτείται η εφαρμογή γρήγορων και αξιόπιστων μη καταστροφικών μεθόδων.

Η υπέρυθρη θερμογραφία ως μέθοδος ευρέως πεδίου, γρήγορη, αξιόπιστη και εφαρμόσιμη σε πραγματικό χρόνο έχει τη δυνατότητα να εκπληρώσει τις παραπάνω απαιτήσεις. Η αποτελεσματικότητα της για την αποτίμηση της θερμό-μηχανικής συμπεριφοράς υλικών και δομών έχει τεκμηριωθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε πλήθος υλικών, όπως ανθρακούχους χάλυβες [1], κράματα αλουμινίου [2], ινοπλισμένο σκυρόδεμα [3], σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα [4] και σύνθετα κεραμικά [5, 6].

Είναι γνωστό ότι το όριο κόπωσης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των υλικών, που προσδιορίζεται ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δομική ακεραιότητα των δομών. Η τυπική μέθοδος για τον καθορισμό του ορίου κόπωσης είναι η «καμπύλη Wöhler». Ωστόσο, για το σχεδιασμό της καμπύλης απαιτείται μεγάλος αριθμός εξεταζόμενων δοκιμίων και εκτεταμένος χρόνος πειραμάτων. Ως εκ τούτου, μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει αναπτύξει νέες μεθοδολογίες, βασισμένες στην υπέρυθρη θερμογραφία, για τον ταχύ προσδιορισμό του ορίου κόπωσης μειώνοντας τον χρόνο πειραμάτων σε μία ημέρα.

Οι Risitano κ.ά. [7, 8] ανέπτυξαν μία μεθοδολογία, γνωστή ως «Μέθοδος Risitano», για τον καθορισμό του ορίου κόπωσης και τον σχεδιασμό της καμπύλης τάσης-κύκλων (καμπύλη «S-N»). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση της επιφανειακής θερμοκρασίας των υπό-εξέταση δοκιμίων όταν υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση. Όμως ο έλεγχος της επιφανειακής θερμοκρασίας δεν αποτελεί τον μοναδικό τρόπο αποτίμησης της βλάβης λόγω κόπωσης. Οι Luong [9, 10] κ.ά. ανέπτυξαν μία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης, βασιζόμενοι στην ανίχνευση της ύπαρξης της εσωτερικής διαχεόμενης ενέργειας που εκπέμπεται από ένα υλικό κατά την κυκλική του φόρτιση. Οι Brémond κ.ά. [11] βασιζόμενοι στην έρευνα του Luong σχετικά με την εσωτερική διαχεόμενη ενέργεια, ανέπτυξαν ένα λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας (Altair Li, D-Mode) το οποίο επιτρέπει τον διαχωρισμό των μη γραμμικών θερμό-μηχανικών φαινομένων για την εύρεση του ορίου κόπωσης στα υλικά.

Πλήθος ερευνητών έχουν εφαρμόσει τις παραπάνω μεθόδους για τη μη καταστροφική αποτίμηση του ορίου κόπωσης σε πολλά είδη υλικών, όπως χάλυβα [12-14], αλουμίνιο [12, 14] και σκυρόδεμα [15]. Επιπλέον, έχουν εφαρμοστεί σε πολύπλοκες δομές [16], σε περτσινωμένα εξαρτήματα [17] και σε συγκολλήσεις χάλυβα AH36 [18].

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο, παράλληλα με τη μέθοδο της θερμογραφίας εφαρμόστηκε και η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής. Ο σκοπός είναι να ερευνηθούν οι δείκτες της ακουστικής εκπομπής που θα επιβεβαιώσουν τα ευρήματα της θερμογραφίας σχετικά με τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης. Η ακουστική εκπομπή βασίζεται στην εκπομπή ελαστικών κυμάτων που προκύπτουν τη στιγμή της έναρξης μίας ρωγμής. Αυτό ενεργοποιεί τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δοκιμίου, με αποτέλεσμα την καταγραφή και την μετατροπή τους σε ψηφιακές ηλεκτρικές κυματομορφές [19]. Ο πληθυσμός των ακουστικών σημάτων καθώς και η μορφή της κυματομορφής έχει αποδειχθεί ότι σχετίζονται με την κρισιμότητα μίας βλάβης και έχουν συσχετιστεί με το ρυθμό διάδοσης ρωγμής [2, 20] και τον τύπο θραύσης [21, 22].

### 3.3.3. Υλικά

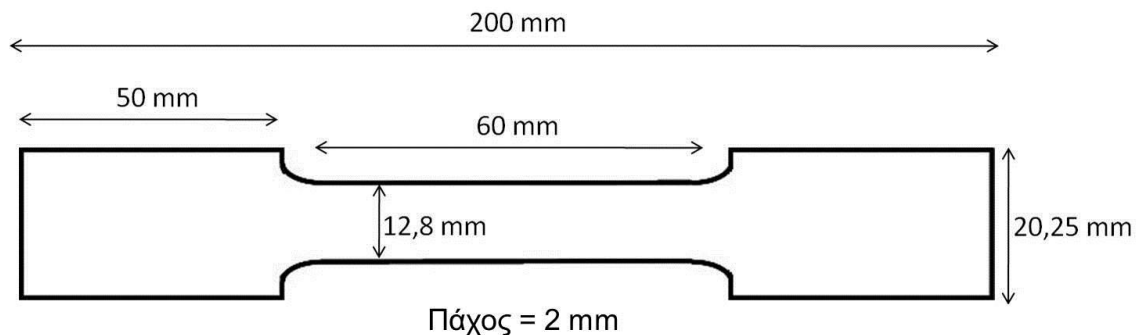
Με σκοπό την ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας βασισμένη στην υπέρυθρη θερμογραφία αρχικά μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά μονολιθικών υλικών και έπειτα η έρευνα εφαρμόστηκε και σε σύνθετα υλικά μεταλλικής αλλά και κεραμικής μήτρας.

Ένα από τα μονολιθικά υλικά που μελετήθηκε είναι ο ανθρακούχος χάλυβας AISI 1006. Το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει καλή διαμορφωσιμότητα, συγκολλησιμότητα και είναι μαλακό και αρκετά όλκιμο. Χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή καλωδίων, σωληνώσεων κ.ά. Οι μηχανικές του ιδιότητες προσδιορίστηκαν πειραματικά και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.1. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη χημική του σύνθεση αλλά και τις θερμικές του ιδιότητες παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 3.2.2 και 3.2.3 του Κεφαλαίου 3.2.

Πίνακας 3.3.1. Μηχανικές ιδιότητες AISI 1006 χάλυβα

Υλικό	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	HB
<b>Ανθρακούχος χάλυβας AISI 1006</b>	<b>285</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	<b>86</b>

Η γεωμετρία όλων των υλικών που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.3 είναι τύπου «dog bone». Συγκεκριμένα η γεωμετρία του χάλυβα και οι διαστάσεις του εμφανίζονται αναλυτικά στην Εικόνα 3.3.1.



Εικόνα 3.3.1. Γεωμετρία δοκιμίου «dog bone» μονολιθικών υλικών

Το δεύτερο υλικό που μελετήθηκε είναι το αλουμίνιο 1050 H16. Παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα διαμόρφωσης και είναι αρκετά όλκιμο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται για την κατασκευή σύνθετων πάνελ αλουμινίου, προσόψεων, φύλλων επένδυσης οροφής, διακοσμητικών υλικών κ.ά. Οι μηχανικές του ιδιότητες αλλά και η χημική του σύνθεση παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.3.2 και 3.3.3 αντίστοιχα. Η γεωμετρία του είναι ίδια με του χάλυβα AISI 1006 (Εικόνα 3.3.1).

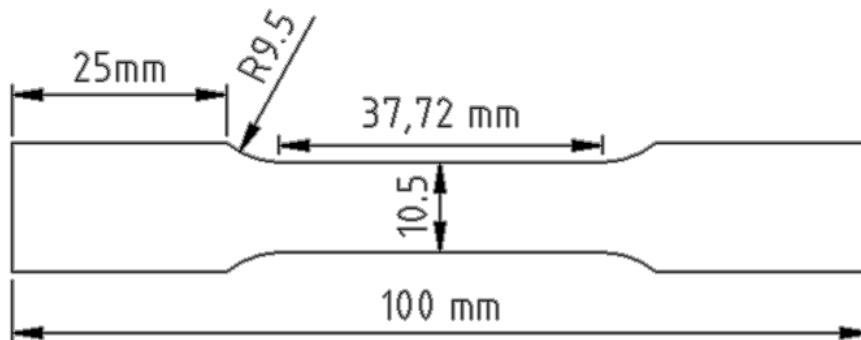
Πίνακας 3.3.2. Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 1050 H16

Υλικό	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	HB
<b>Αλουμίνιο 1050 H16</b>	<b>140.081</b>	<b>8</b>	<b>35</b>

Πίνακας 3.3.3. Χημική σύσταση αλουμινίου 1050 H16

Υλικό	Στοιχεία (κ.β. %)		
<b>Αλουμίνιο 1050 H16</b>	Al	Si	Fe
	<b>99.5</b>	<b>0.25</b>	<b>0.4</b>

Η μελέτη του Κεφαλαίου 3.3 επεκτάθηκε και στα σύνθετα κεραμικά «cross-ply SiC/BMAS» σε πλάκα πάχους 3mm κατασκευασμένα από την εταιρία AEA Technology (Harwell Ltd, United Kingdom). Η ενίσχυση της κεραμικής μήτρας είναι ίνες καρβιδίου του πυριτίου τύπου «Tyranno» με μέτρο ελαστικότητας 190 GPa και αντοχή στον εφελκυσμό 3,3 GPa (όπως αυτά αναφέρονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της εταιρίας UBE Industries Ltd., Japan). Η εφελκυστική του αντοχή υπολογίστηκε στα 293 MPa και η διαδικασία κατασκευής του αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.1.4.2.1. Η γεωμετρία του απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.2.



Εικόνα 3.3.2. Γεωμετρία δοκιμίου «dog bone» σύνθετων υλικών

Επίσης, μελετήθηκαν και σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση καρβίδια του πυριτίου. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 3.3 προσδιορίστηκε με τη μη καταστροφική μέθοδο που αναπτύχθηκε, το όριο κόπωσης των σύνθετων υλικών με μήτρα αλουμίνιο A359 και τρία διαφορετικά ποσοστά ενίσχυσης καρβιδίων του πυριτίου (10%, 15% και 30%). Και τα τρία διαφορετικά υλικά υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία «T6». Κατά τη θερμική κατεργασία τα δοκίμια αρχικά θερμάνθηκαν σε μία θερμοκρασία κάτω από το

σημείο τήξης του κράματος (530 °C για 2 ώρες), στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε υπερβαφή και έπειτα ακολούθησε το στάδιο της γήρανσης όπου και θερμάνθηκαν ξανά σε θερμοκρασία 155 °C για διάστημα 5 ωρών. Η πειραματική διαδικασία της θερμικής κατεργασίας αναλύεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.1. Η εφελκυστική αντοχή των τριών τύπων A359/SiC<sub>p</sub> παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3.4 και η χημική τους σύσταση στον Πίνακα 3.3.5. Η γεωμετρία των δοκιμίων είναι όμοια με των σύνθετων κεραμικών (Εικόνα 3.3.2).

Πίνακας 3.3.4. Εφελκυστική αντοχή A359/SiC<sub>p</sub>

A359/SiC <sub>p</sub>	Ποσοστό ενίσχυσης		
	10%	15%	30%
<b>σ<sub>uts</sub></b>	<b>325,2</b>	<b>330,4</b>	<b>372,87</b>

Πίνακας 3.3.5. Χημική σύνθεση A359/SiC

Υλικό	Στοιχεία (κ.β. %)					
	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn
<b>A359/SiC<sub>p</sub></b>	<b>8,5-9,5</b>	<b>0,5-0,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>

### 3.3.4. Μεθοδολογία προσδιορισμού ορίου κόπωσης – Πειραματική διαδικασία

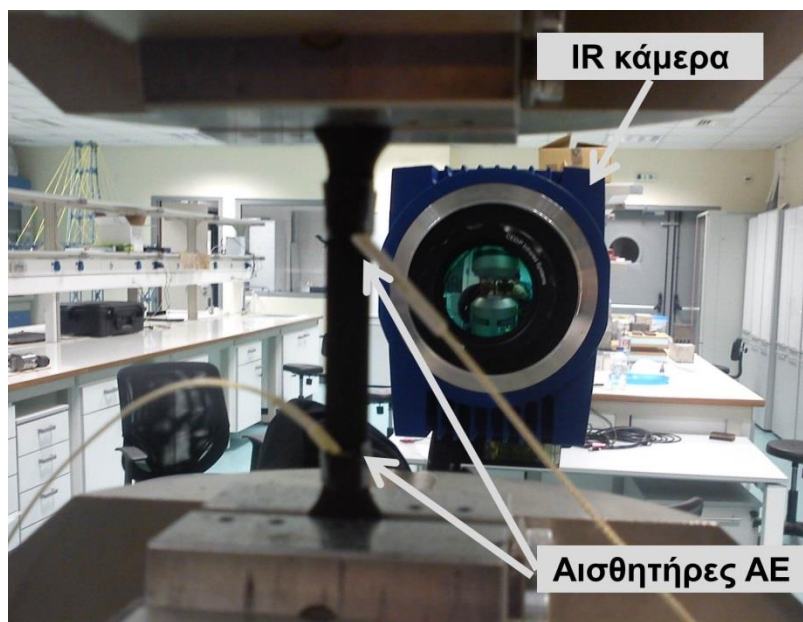
Όπως προαναφέρθηκε, ο σκοπός της μελέτης του συγκεκριμένου κεφαλαίου ήταν η ανάπτυξη μίας μη καταστροφικής μεθοδολογίας για τον ταχύ προσδιορισμό του ορίου κόπωσης των υλικών. Για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της νέα μεθόδου αρχικά προσδιορίστηκε για τα μονολιθικά υλικά το όριο κόπωσης με τη συμβατική μέθοδο και σχεδιάστηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα η καμπύλη τάσης – κύκλων «S-N» γνωστή και ως καμπύλη Wöhler.

Όλες οι δοκιμές κόπωσης πραγματοποιήθηκαν σε σέρβο-υδραυλική μηχανή INSTRON με μέγιστο δυναμικό φορτίο ± 100 kN. Για τον υπολογισμό των καμπυλών «S-

N» πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κόπωσης με συχνότητα 5 Hz για διαφορετικά επίπεδα τάσης, έξι για το χάλυβα AISI 1006 και πέντε για το αλουμίνιο 1050 H16. Αρχικά τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυστική κόπωση με αναλογία τάσης (ελάχιστη / μέγιστη τάση) 0,1 και μέγιστη τάση το 95% της τιμής της εφελκυστικής αντοχής τους. Στη συνέχεια, για κάθε δοκιμή κόπωσης η τιμή της μέγιστης τάσης μειωνόταν κατά 5% του  $\sigma_{\text{uts}}$ . Η πειραματική διαδικασία ολοκληρωνόταν όταν τα δοκίμια έφθαναν στο όριο κύκλων κόπωσης ( $10^6$  κύκλοι) χωρίς να υποστούν θραύση. Για τον υπολογισμό του ορίου κόπωσης του χάλυβα απαιτήθηκαν συνολικά 30 δοκίμια και η διάρκεια των πειραμάτων ήταν περίπου 45 ημέρες. Αντίστοιχα για το αλουμίνιο υποβλήθηκαν σε κόπωση 25 δοκίμια με συνολική διάρκεια πειραμάτων 35 ημέρες.

Ο λόγος που αναφέρθηκαν παραπάνω, η διάρκεια αλλά και το πλήθος των δοκιμίων που απαιτήθηκαν για τον υπολογισμό του ορίου κόπωσης είναι για να τονισθεί το πλεονέκτημα της νέας μεθοδολογίας κατά την οποία απαιτείται ένα μόνο δοκίμιο (πρακτικά 5 για την αποφυγή σφάλματος) και περίπου 5 ώρες πειραματικής διαδικασίας.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης για όλα τα υλικά που προαναφέρθηκαν με τη νέα μεθοδολογία της θερμογραφίας lock-in, η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει σέρβο-υδραυλική μηχανή δοκιμών και μία υπέρυθρη κάμερα της εταιρίας CEDIP με ανιχνευτή 3-5  $\mu\text{m}$ . Η υπέρυθρη κάμερα τοποθετήθηκε σε απόσταση 40 cm για να επιτευχθεί το καλύτερο πεδίο εστίασης. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός της μηχανής δοκιμών με την υπέρυθρη κάμερα χρησιμοποιήθηκε ένας lock-in ενισχυτής ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την κάμερα αλλά και με την μονάδα ελέγχου της μηχανής. Ο συγχρονισμός των δύο σημάτων επιτρέπει την καταγραφή θερμογραφημάτων φάσης. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.3.



Εικόνα 3.3.3. Πειραματική διάταξη

Όλα τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με μία πολύ λεπτή στρώση μαύρου «ματ» χρώματος με συντελεστή εκπομπής 0,95, ώστε να επιτευχθεί μία ομοιόμορφη κατανομή υψηλού συντελεστή εκπομπής στην υπό-εξέταση επιφάνεια των δοκιμίων για την αποφυγή εσφαλμένων αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε σταδιακή κόπωση μέχρι τη θραύση του. Συγκεκριμένα, τα βήματα της νέας μεθοδολογίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Στο πρώτο βήμα το δοκίμιο υποβάλλεται σε εφελκυστική κόπωση με μέγιστη τάση το 10% του  $\sigma_{\text{uts}}$  και με διάρκεια 6000 κύκλους. Στο κάθε επόμενο βήμα η μέγιστη τιμή της τάσης αυξάνεται κατά 10% του  $\sigma_{\text{uts}}$  μέχρι να φτάσει την τιμή του 60% του  $\sigma_{\text{uts}}$ . Από αυτό το σημείο και μετά, η μέγιστη τάση της κόπωσης αυξάνεται κατά 5% του  $\sigma_{\text{uts}}$  μέχρι το δοκίμιο να αστοχήσει καταστροφικά. Η κυματομορφή της κόπωσης είναι ημιτονοειδής, η συχνότητα είναι 10 Hz και το R (αναλογία ελάχιστης/μέγιστης τάσης) ίσο με 0,1. Καθ' όλη τη διάρκεια των βημάτων κόπωσης η υπέρυθρη κάμερα καταγράφει, στη συγκεκριμένη μεθοδολογία, το ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται από το υλικό ως υπέρυθρη ακτινοβολία. Βασιζόμενοι, λοιπόν, στην προσέγγιση του Luong [23] ότι η ενέργεια που καταγράφει η κάμερα αντιστοιχεί στην εσωτερική διαχεόμενη ενέργεια που εκπέμπει το υλικό καθώς καταπονείται, μπορεί να σχεδιαστεί μία καμπύλη όπου για κάθε επίπεδο φόρτισης θα αντιστοιχεί μία τιμή ενέργειας. Σχεδιάζοντας τη συγκεκριμένη



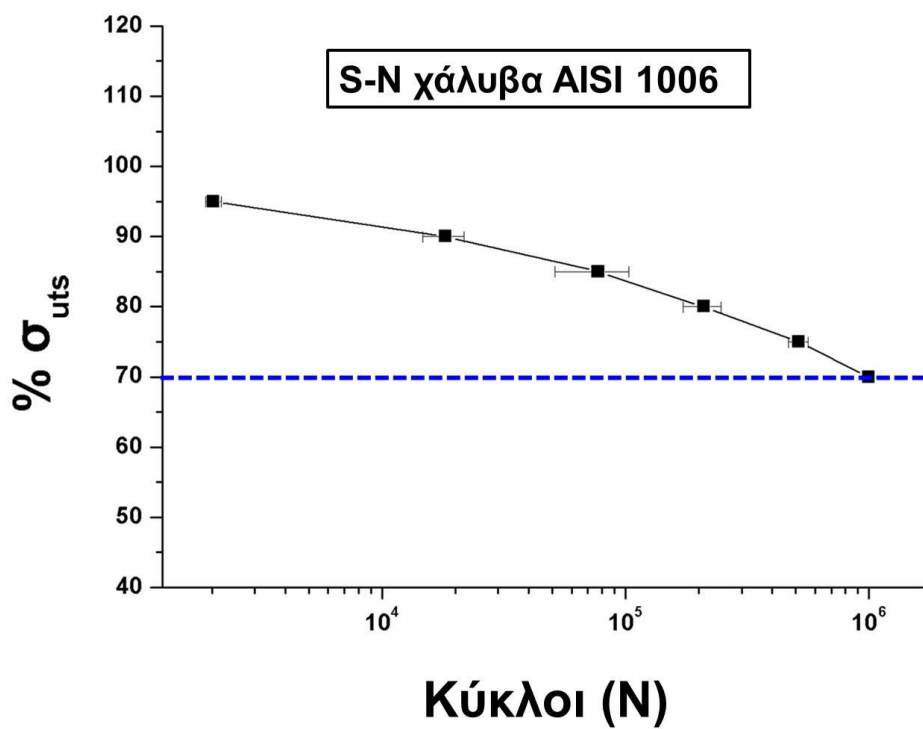
καμπύλη παρατηρείται η εμφάνιση δύο διαφορετικών κλίσεων. Το σημείο που τέμνονται οι δύο κλίσεις αποτελεί το όριο κόπωσης.

Επίσης, στην περίπτωση του αλουμινίου αλλά και του σύνθετου κεραμικού, ταυτόχρονα με την θερμογραφία εφαρμόστηκε και η ακουστική εκπομπή. Δύο πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες AE (Pico, Physical Acoustics Corp., PAC) τοποθετήθηκαν στην μία πλευρά του δοκιμίου (βλέπε Εικόνα.3.3.3). Το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων είναι περίπου μεταξύ 50 και 800 kHz. Τα σήματα καταγράφηκαν από δύο κανάλια σε κάρτα PCI-2, PAC με ρυθμό δειγματοληψίας 5 MHz. Τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής συγκρίθηκαν με της θερμογραφίας ώστε να εξεταστεί περισσότερο η αποτελεσματικότητα της νέας μεθόδου.

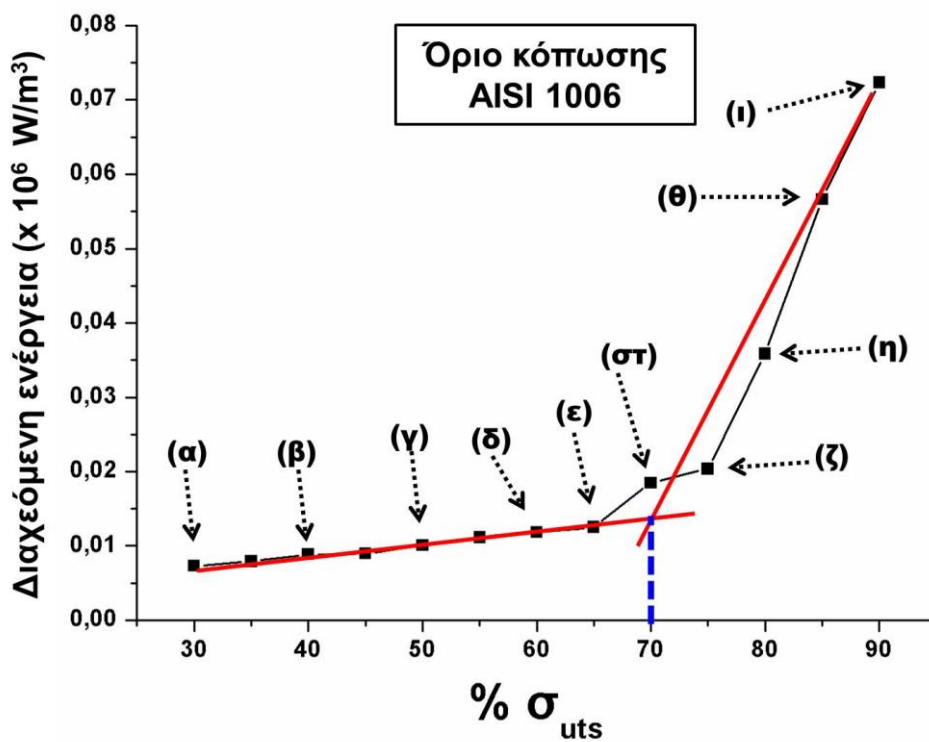
### 3.3.5. Αποτελέσματα και Συζήτηση

#### 3.3.5.1. Χάλυβας AISI 1006

Αρχικά προσδιορίστηκε το όριο κόπωσης του χάλυβα AISI 1006 με τη συμβατική μέθοδο κατασκευάζοντας την καμπύλη Wöhler (καμπύλη S-N). Για κάθε επίπεδο τάσης, 5 δοκίμια υποβλήθηκαν σε κόπωση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στην καμπύλη της Εικόνας 3.3.4. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα για κάθε επίπεδο τάσης εμφανίζεται και η τυπική απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Το κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στον αριθμό κύκλων και στο επίπεδο τάσης (%  $\sigma_{uts}$ ) που επήλθε θραύση στο υλικό. Η υψηλότερη τάση κατά την οποία τα δοκίμια δεν αστόχησαν καταστροφικά (έφθασαν δηλαδή τους  $10^6$  κύκλους) αποτελεί το όριο κόπωσης. Για το χάλυβα AISI 1006 το όριο κόπωσης βρέθηκε στο 70% της εφελκυστικής αντοχής του και συγκεκριμένα στα 231 MPa.

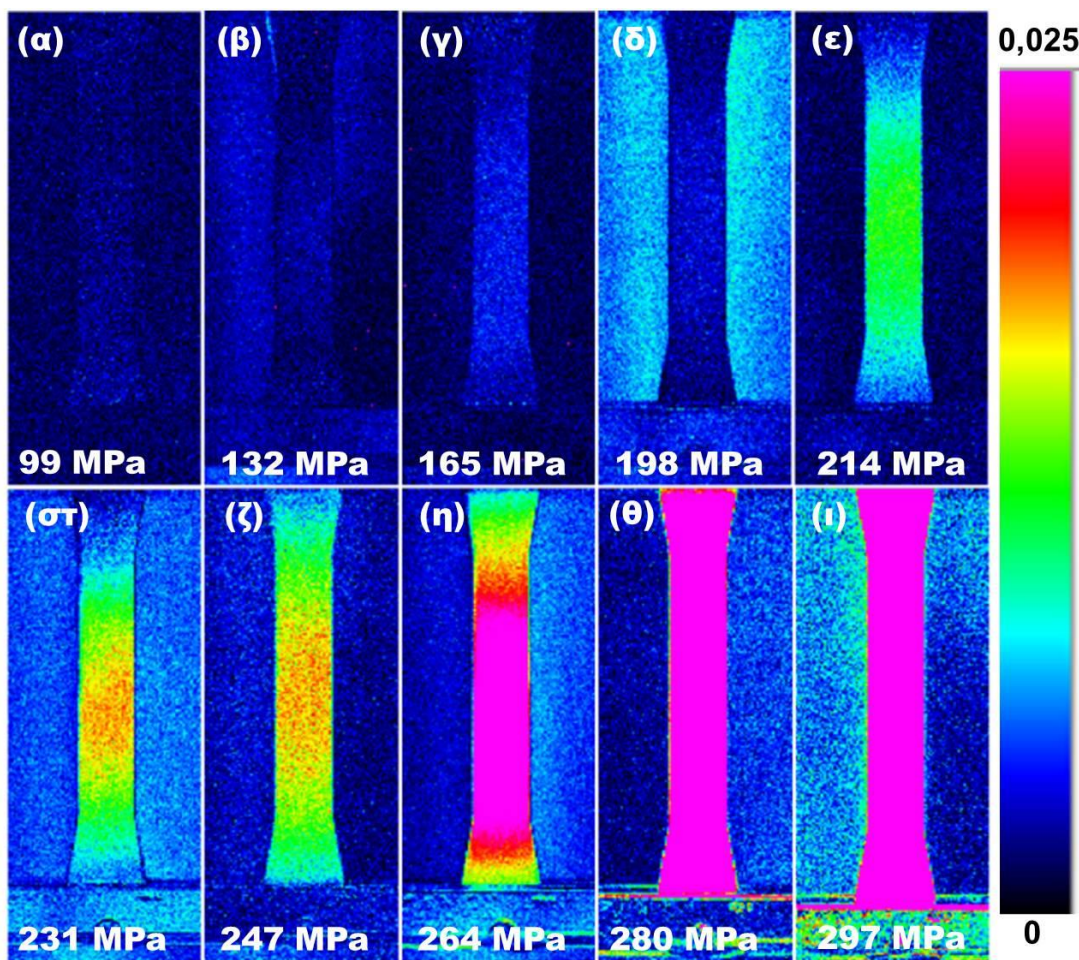


Εικόνα 3.3.4. Καμπύλη Wöhler (χάλυβας AISI 1006)



Εικόνα 3.3.5. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης χάλυβα AISI 1006 με θερμογραφία

Η νέα μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας που περιγράφηκε παραπάνω εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης του χάλυβα AISI 1006. Στην Εικόνα 3.3.5 εμφανίζεται το διάγραμμα της διαχεόμενης ενέργειας για κάθε επίπεδο τάσης της εφελκυστικής αντοχής του υλικού. Παρατηρώντας το διάγραμμα, διακρίνονται δύο διαφορετικές κλίσεις της καμπύλης της ενέργειας. Το σημείο που τέμνονται οι δύο κλίσεις αποτελεί το όριο κόπωσης και αντιστοιχεί στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$ . Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε πλήρη συμφωνία με το αποτέλεσμα της συμβατικής μεθόδου υπολογισμού του ορίου κόπωσης.



Εικόνα 3.3.6. Θερμογραφήματα χάλυβα AISI 1006

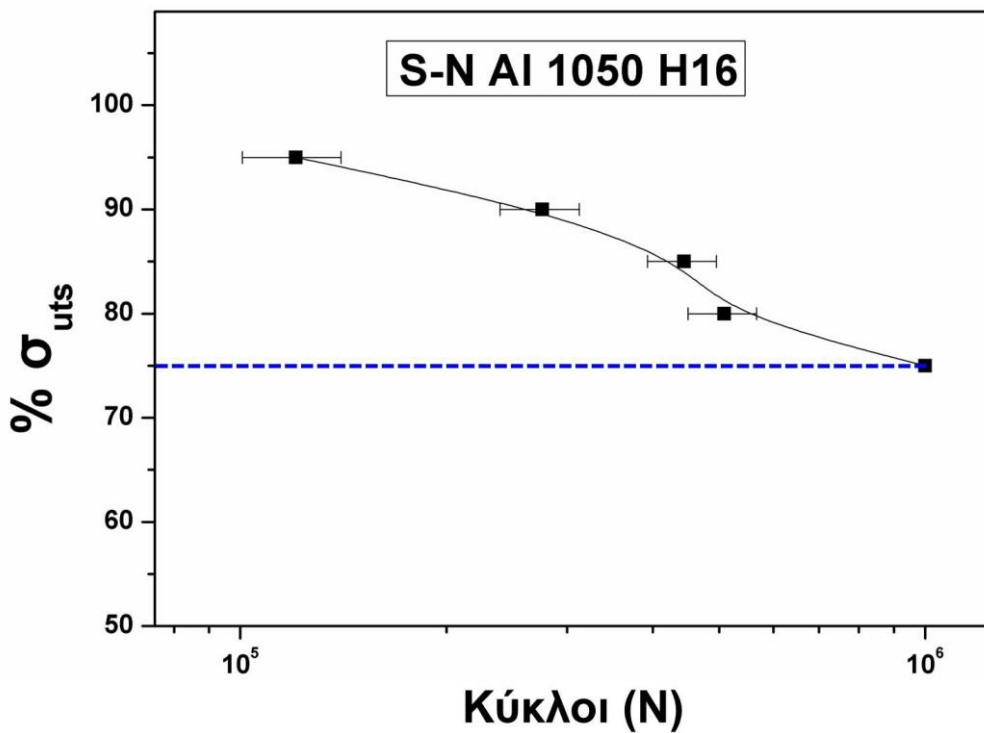
Τα αποτελέσματα του διαγράμματος της Εικόνας 3.3.5 επιβεβαιώνονται και οπτικά από τα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.3.6. Τα 10 θερμογραφήματα απεικονίζουν την διαχεόμενη ενέργεια που εκπέμπεται από τα δοκίμια χάλυβα σε διαφορετικά επίπεδα

τάσης. Στα πρώτα τρία θερμογραφήματα (Εικόνα 3.3.6 α-γ) δεν παρατηρούνται αλλαγές στην ενέργεια. Στα επόμενα δύο θερμογραφήματα που αντιστοιχούν στο 60% και 65% του  $\sigma_{\text{uts}}$  τα δοκίμια διακρίνονται πιο καθαρά λόγω της αύξησης του φορτίου, ενώ στην Εικόνα 3.3.6 στ η διαφορά στην ενέργεια είναι πλέον ορατή και έντονη. Το σημείο που τέμνονται οι δύο κλίσεις της Εικόνας 3.3.5 στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$  που αντιστοιχεί στο όριο κόπωσης, φαίνεται ξεκάθαρα στο θερμογράφημα στ καθώς οι διαφορές στην εκπεμπόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερες. Από το σημείο αυτό και μετά, αυξάνοντας το φορτίο αυξάνεται και η εσωτερική διαχεόμενη ενέργεια λόγω του κορεσμού των διαταραχών (saturation of dislocations) και την ανάπτυξη των μικρορωγμών που οδηγούν στην τελική αστοχία του υλικού. Το παραπάνω καταδεικνύεται στα θερμογραφήματα ζ-ι, με την αύξηση της ενέργειας να αποτυπώνεται με κόκκινο και μωβ χρώμα.

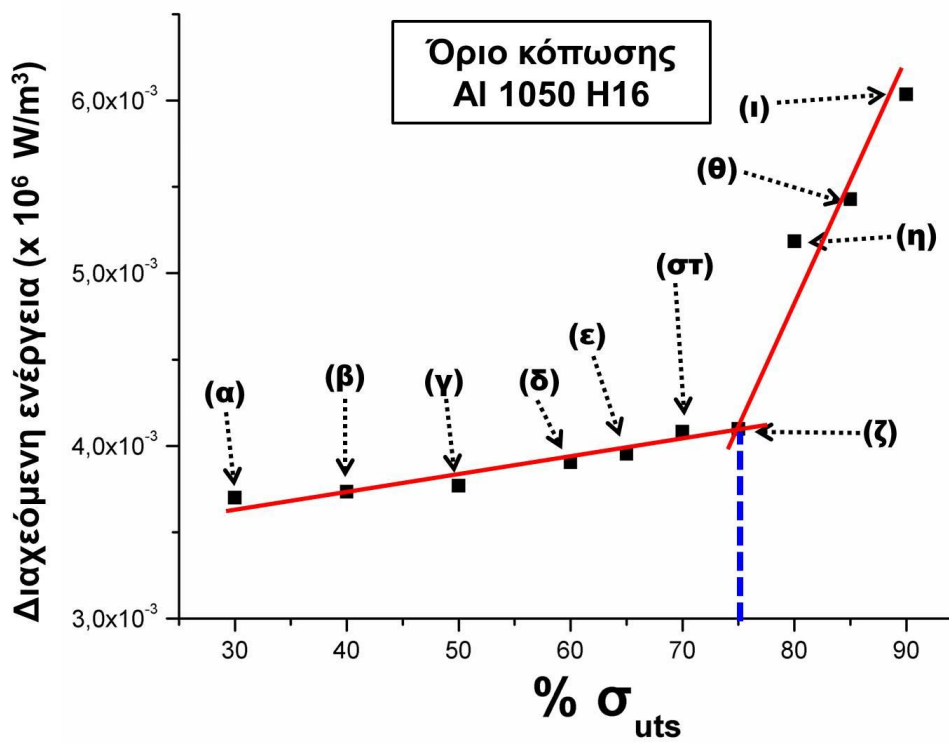
#### 3.3.5.2. Αλουμίνιο 1050 H16

Για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της νέας μεθόδου προσδιορίστηκε επίσης το όριο κόπωσης ενός ακόμη μονολιθικού υλικού του αλουμινίου 1050 H16. Αρχικά, καθορίστηκε η καμπύλη Wöhler (καμπύλη S-N), θέτοντας τους  $10^6$  κύκλους ως όριο μη θραύσης του υλικού, για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης. Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.3.7 παρουσιάζεται η καμπύλη S-N για το αλουμίνιο 1050 H16. Από τη συγκεκριμένη καμπύλη προκύπτει πως το όριο κόπωσης, που προσδιορίστηκε από τη συμβατική μέθοδο, αντιστοιχεί στο 75% της εφελκυστικής αντοχής του αλουμινίου (105 MPa).

Στη συνέχεια, με τη μέθοδο της θερμογραφίας προσδιορίστηκε το όριο κόπωσης για το αλουμίνιο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3.8. Στη συγκεκριμένη εικόνα παρατηρείται το διάγραμμα της εσωτερική διαχεόμενης ενέργειας για κάθε επίπεδο τάσης για το υλικό Al 1050 H16. Παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 3.3.8, εμφανίζονται πάλι δύο διαφορετικές κλίσεις της καμπύλης της ενέργειας. Σύμφωνα, λοιπόν, με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε η τομή των κλίσεων, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, εμφανίζεται στο 75% του  $\sigma_{\text{uts}}$  (105MPa) και αντιστοιχεί στο όριο κόπωσης του Al 1050 H16. Το αποτέλεσμα αυτό συμπίπτει με αυτό που προέκυψε από την καμπύλη S-N της Εικόνας 3.3.7

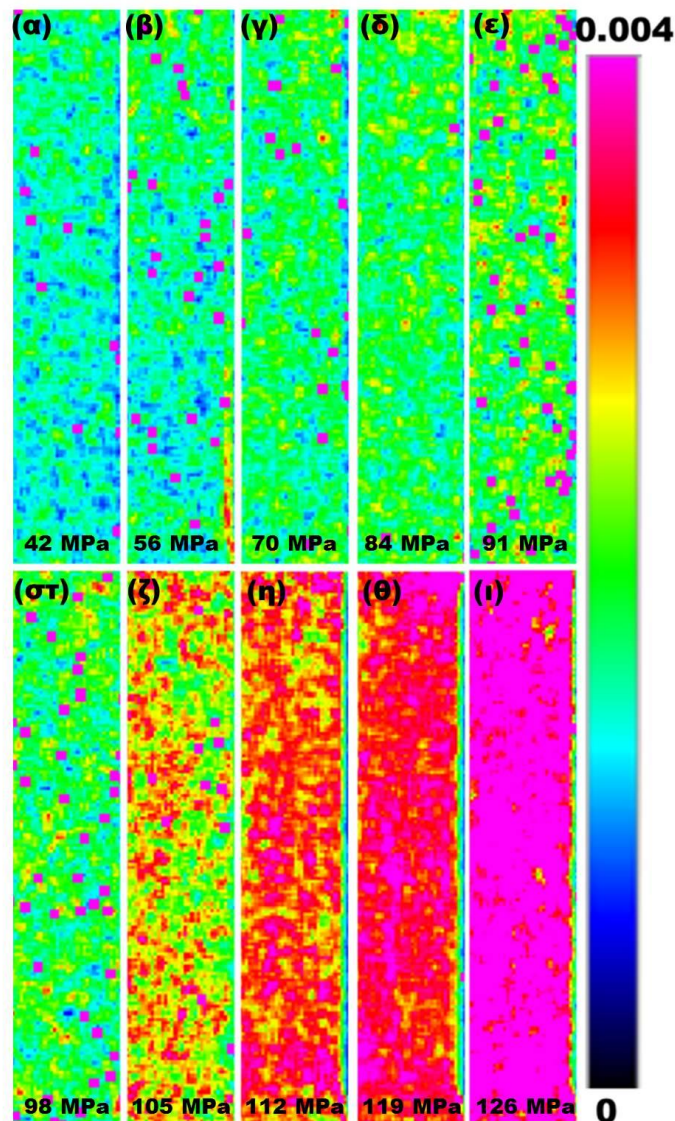


Εικόνα 3.3.7. Καμπύλη Wöhler (αλουμίνιο 1050 H16)



Εικόνα 3.3.8. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης αλουμινίου 1050 H16 με θερμογραφία



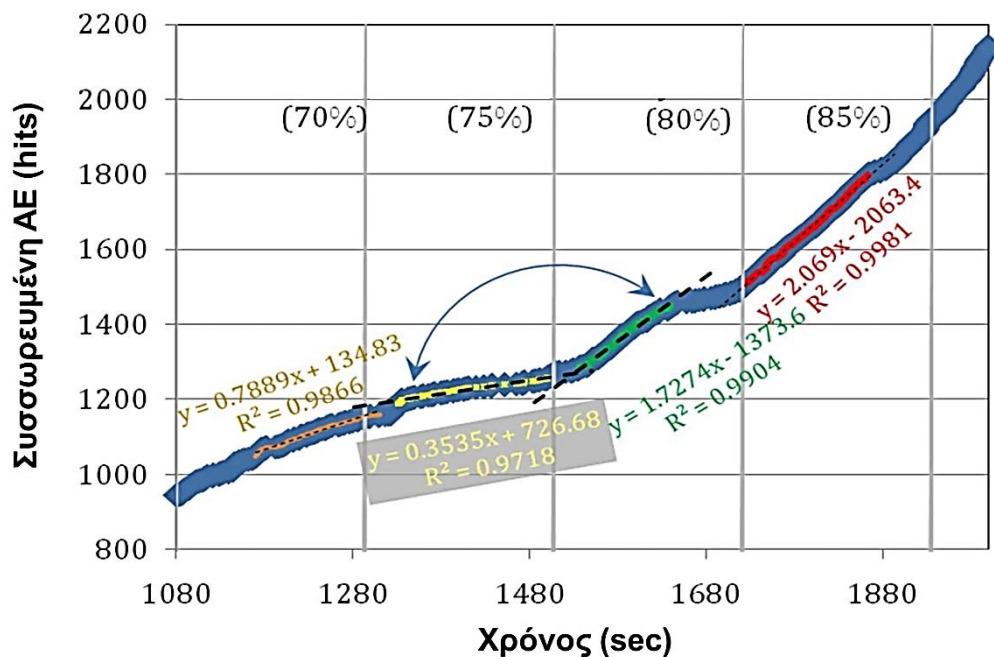


Εικόνα 3.3.9. Θερμογραφήματα αλουμινίου 1050 H16

Στην Εικόνα 3.3.9 παρουσιάζονται τα θερμογραφήματα του αλουμινίου 1050 H16 που αντιστοιχούν στα σημεία α – ι της καμπύλης της Εικόνας 3.3.8. Τα συγκεκριμένα θερμογραφήματα απεικονίζουν τη διαχεόμενη ενέργεια, που καταγράφηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου, για διαφορετικά επίπεδα τάσης (από 42 MPa – 126 MPa). Στα θερμογραφήματα 3.3.9 (α – στ) παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές στην ενέργεια και αποτυπώνονται από την αλλαγή του ανοιχτού μπλε χρώματος σε πράσινο. Η μεγαλύτερη διαφορά στην ενέργεια εμφανίζεται στο θερμογράφημα 3.3.9 ζ στα 105 MPa (75% του  $\sigma_{uts}$ ) το οποίο αντιστοιχεί στην τομή των κλίσεων της καμπύλης της Εικόνας 3.3.8. Σύμφωνα και με τα θερμογραφήματα το όριο κόπωσης προσδιορίστηκε στο 75% του  $\sigma_{uts}$ .

Στα επόμενα θερμογραφήματα η-ι παρατηρείται σταδιακή αύξηση της ενέργειας έως τη θραύση του υλικού.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής με σκοπό την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της θερμογραφικής μεθόδου. Στην Εικόνα 3.3.10 παρουσιάζεται η συσσωρευμένη δραστηριότητα των ακουστικών σημάτων, που καταγράφηκε στο αλουμίνιο, σε σχέση με το χρόνο. Σε κάθε επίπεδο φόρτισης παρατηρείται σταθερή αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας όπως διαπιστώνεται και από τους υψηλούς συντελεστές συσχέτισης. Μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων τάσης εμφανίζονται διακυμάνσεις στις κλίσεις, ενώ η πιο έντονη αλλαγή καταγράφεται σε επίπεδο τάσης 75% του  $\sigma_{ult}$ . Το αποτέλεσμα αυτό συμπίπτει με την τομή των κλίσεων της καμπύλης της διαχεόμενης ενέργειας (Εικόνα 3.3.8) και συνεπώς με το όριο κόπωσης. Στα επίπεδα φόρτισης κάτω από το όριο αυτό, ο ρυθμός ακουστικής δραστηριότητας είναι αρκετά μικρότερος από ότι προκύπτει μετά από το συγκεκριμένο όριο. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η αλλαγή του ρυθμού από 0,35 σήματα/sec σε 1,73 σήματα/sec (σχεδόν πενταπλάσιος) μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων τάσης 75% και 80% του  $\sigma_{ult}$ , αποτελεί ένδειξη των έντονων αλλαγών στη μικροδομή του υλικού που εμφανίζονται σε επίπεδα τάσης υψηλότερα από το όριο κόπωσης.

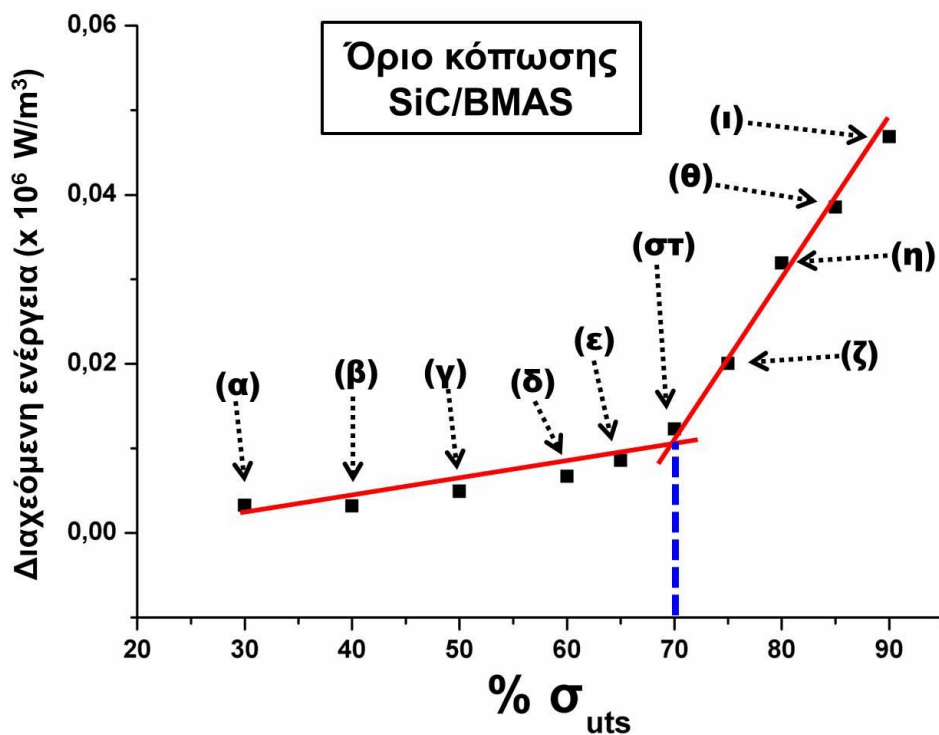


Εικόνα 3.3.10. Συσσωρευμένη ακουστική δραστηριότητα για το Al 1050 H16

### 3.3.5.3. Σύνθετο κεραμικό υλικό SiC/BMAS

Από την παραπάνω έρευνα σε μονολιθικά υλικά εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η μεθοδολογία θερμογραφίας που αναπτύχθηκε είναι ικανή για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης. Ως εκ τούτου η πειραματική μελέτη επεκτάθηκε και στον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης σύνθετων υλικών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε σύνθετο υλικό με κεραμική μήτρα και ενίσχυση ίνες καρβιδίου του πυριτίου, SiC/BMAS.

Στην Εικόνα 3.3.11 παρουσιάζεται η εσωτερική διαχεόμενη ενέργεια που μετρήθηκε με τη μέθοδο που προαναφέρθηκε και εκπέμπεται από το σύνθετο υλικό σε διαφορετικά επίπεδα τάσης.

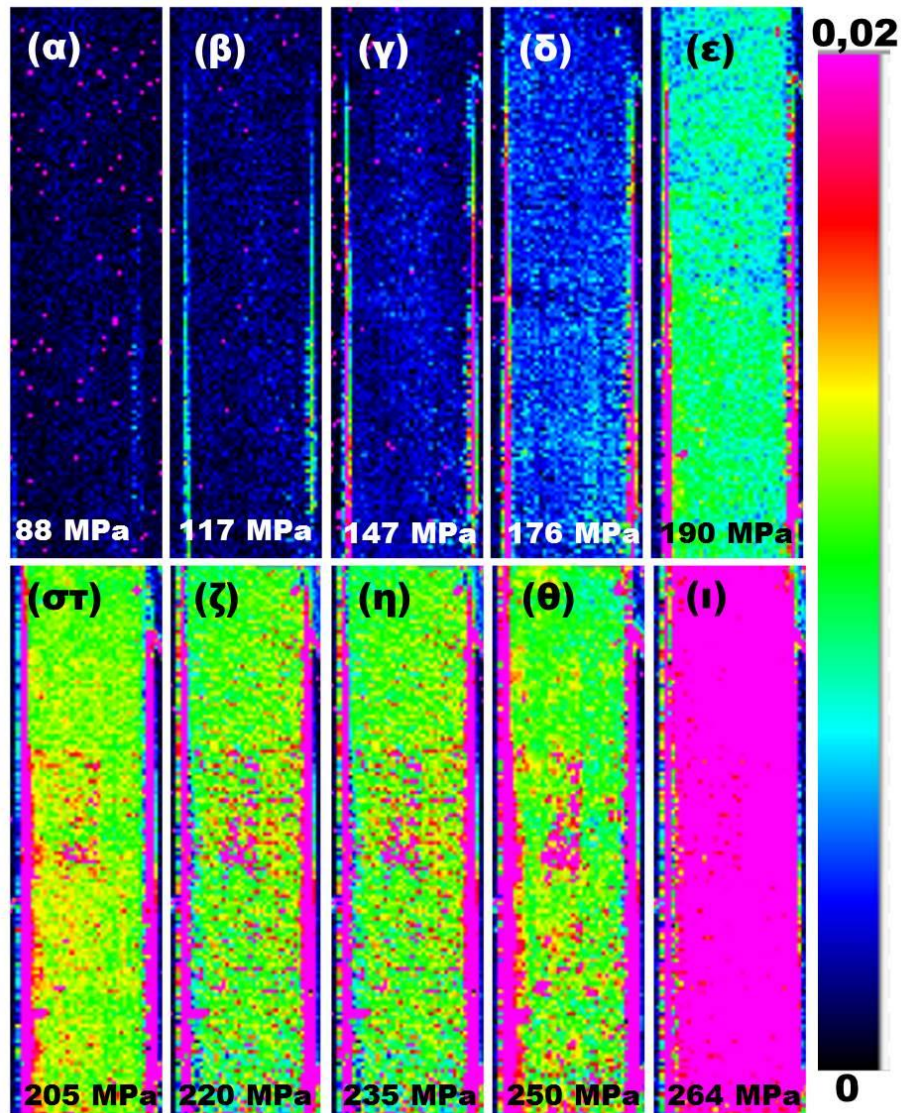


Εικόνα 3.3.11. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης σύνθετου υλικού SiC/BMAS με θερμογραφία

Όπως και στην περίπτωση των μονολιθικών υλικών (Εικόνες 3.3.5 και 3.3.8), η καμπύλη της διαχεόμενης ενέργειας - %  $\sigma_{uts}$  για 10 διαφορετικά επίπεδα τάσης (από 30% έως 90% του  $\sigma_{uts}$ ) εμφανίζει δύο διαφορετικές διακριτές κλίσεις. Στα αρχικά επίπεδα τάσης (από 30% έως 60% του  $\sigma_{uts}$ ) η ενέργεια αυξάνεται με μικρό ρυθμό, ενώ από 70% του  $\sigma_{uts}$



και πάνω αυξάνεται ραγδαία. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το σημείο τομής των δύο κλίσεων αποτελεί το όριο κόπωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του σύνθετου SiC/BMAS προσδιορίστηκε στα 205 MPa που αντιστοιχεί στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$  (Εικόνα 3.3.11).

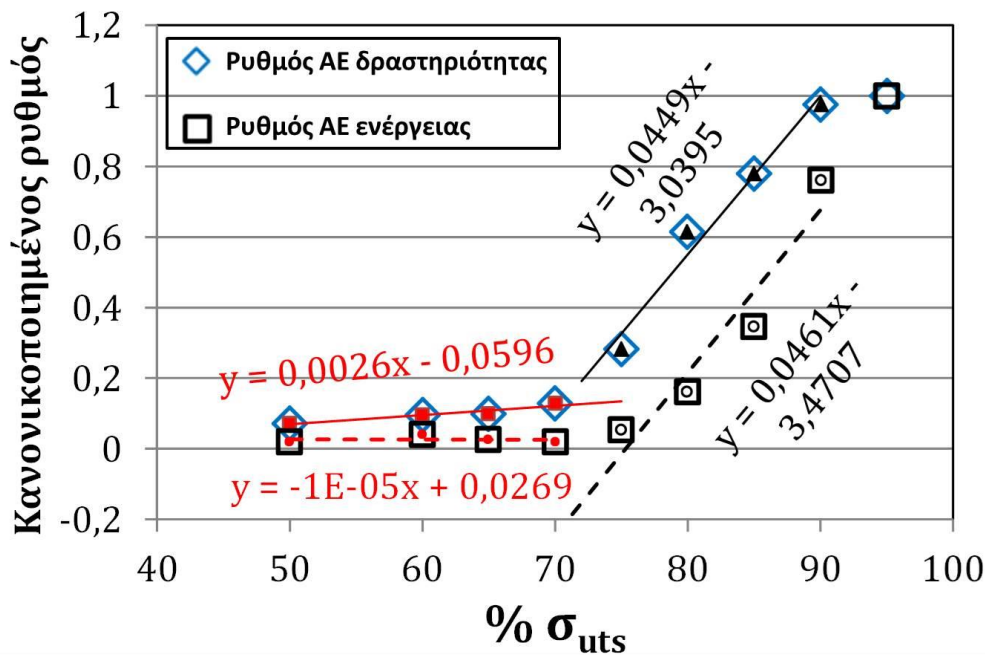


Εικόνα 3.3.12. Θερμογραφήματα σύνθετου SiC/BMAS

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιολόγηση των θερμογραφημάτων του σύνθετου κεραμικού υλικού που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.12. Το όριο κόπωσης του συγκεκριμένου υλικού προσδιορίστηκε στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$  και αντιστοιχεί στο θερμογράφημα της Εικόνας 3.3.12 στ. Τα αρχικά επίπεδα φόρτισης σχετίζονται με ελάχιστη βλάβη στο υλικό και απεικονίζονται με «ψυχρούς» χρωματισμούς (χαμηλή

ενέργεια) στα θερμογραφήματα (α – δ), ενώ η σταδιακή συσσώρευση βλάβης αποτυπώνεται με «θερμούς» χρωματισμούς (υψηλή ενέργεια) στα θερμογραφήματα (ε - ι). Οπότε, στα πρώτα τέσσερα θερμογραφήματα δεν εμφανίζεται αξιόλογη μεταβολή στη διαχεόμενη ενέργεια, ενώ στο πέμπτο θερμογράφημα μια πολύ μικρή αλλαγή των χρωματισμών μπορεί να αποδοθεί στη συσσώρευσης της ελαστικής ενέργειας. Ακολούθως, στο θερμογράφημα 3.3.12 στ εμφανίζεται μία τελείως ανόμοια κατανομή ενέργειας λόγω κάποιων εσωτερικών μηχανισμών όπως η ρωγμάτωση της μήτρας, η διεπιφανειακή αστοχία, η αποκόλληση ίνας-μήτρας, η ολίσθηση των ινών στη διεπιφάνεια αποκόλλησης και η γεφύρωση, η αστοχία και η εξόλκευση των ινών. Στα θερμογραφήματα ζ – ι (75% - 90% του  $\sigma_{\text{uts}}$ ) μπορεί να παρατηρηθεί μία αύξηση στην ενέργεια μέχρι την τελική αστοχία.

Στο σύνθετο κεραμικό υλικό SiC/BMAS εφορμόστηκε και η ακουστική εκπομπή ώστε να εξεταστεί επιπλέον η αποτελεσματικότητα της μεθόδου της θερμογραφίας για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης και σε σύνθετα υλικά. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.3.13 εμφανίζεται ο ρυθμός της δραστηριότητας των ακουστικών σημάτων και ο ρυθμός της ενέργειας (κανονικοποιημένοι με βάση τις μέγιστες τιμές τους), σε σχέση με τα επίπεδα τάσης (%  $\sigma_{\text{uts}}$ ).



Εικόνα 3.3.13. Ρυθμός αύξησης ενέργειας και δραστηριότητας AE

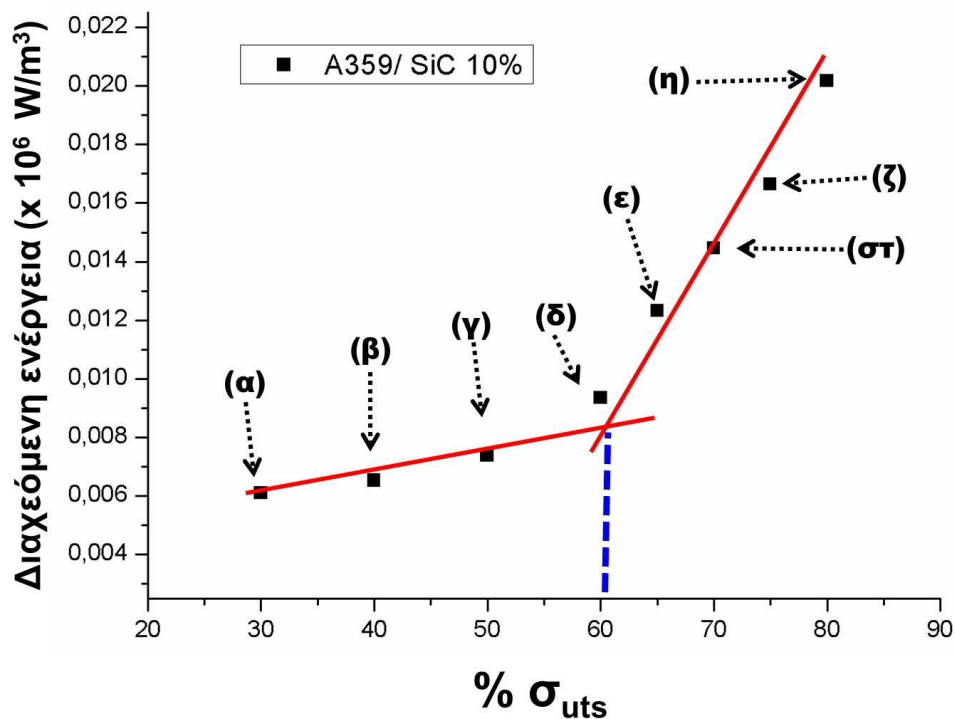
Παρατηρώντας το διάγραμμα, οι κλίσεις των καμπυλών και των δύο παραμέτρων αλλάζουν στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$ . Πριν από το σημείο αυτό, η αύξηση του ρυθμού της ακουστικής δραστηριότητας είναι αμελητέα, ενώ όσον αφορά την ενέργεια είναι σχεδόν μηδενική. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι μέχρι το συγκεκριμένο σημείο η κατάσταση του υλικού είναι σχεδόν σταθερή οποιοδήποτε και αν είναι το επίπεδο φόρτισης με αποτέλεσμα τα επίπεδα φόρτισης από 30% - 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$  να είναι μικρότερα από το όριο της κόπωσης. Καθώς το επίπεδο φόρτισης υπερβαίνει το 70% ο ρυθμός της δραστηριότητας και της ενέργειας αυξάνεται έντονα.

Η αλλαγή των κλίσεων των παραμέτρων της AE για το σύνθετο υλικό είναι πιο εμφανής σε σχέση με το μονολιθικό υλικό (Al 1050 H16, βλέπε Εικόνα 3.3.10). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται πιθανότατα στην ανομοιογένεια και την πολυπλοκότητα της μικροδομής του υλικού καθώς αποτελείται από ίνες, κεραμική μήτρα και διαδοχικές στρώσεις με προσανατολισμούς  $0^\circ$  and  $90^\circ$ . Μπορεί λοιπόν κανείς να συμπεράνει ότι η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης είναι ακόμη πιο αποτελεσματική στα σύνθετα από ότι στα μονολιθικά υλικά.

#### 3.3.5.4. Σύνθετα μεταλλικά υλικά A359/SiC<sub>p</sub>

Η παραπάνω έρευνα συνεχίστηκε και σε σύνθετα μεταλλικά υλικά με μήτρα αλουμινίου και με ενίσχυση καρβιδίων του πυριτίου σε τρία διαφορετικά ποσοστά. Σε μία τυπική καμπύλη Wöhler το όριο κόπωσης προσδιορίζεται στο σημείο εκείνο που η καμπύλη εμφανίζει «πλατό». Όμως στα συγκεκριμένα υλικά λόγω της ιδιαιτερότητας της μικροδομής τους, η καμπύλη Wöhler τους δεν εμφανίζει την τυπική μορφή [24]. Ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός του ορίου κόπωσης είναι ακόμη πιο σύνθετος με την χρήση της συμβατικής μεθόδου. Η χρήση λοιπόν, της θερμογραφικής μεθόδου που αναπτύχθηκε αποκτά μεγάλη αξία καθώς επιλύει τα προβλήματα της συμβατικής μεθόδου.

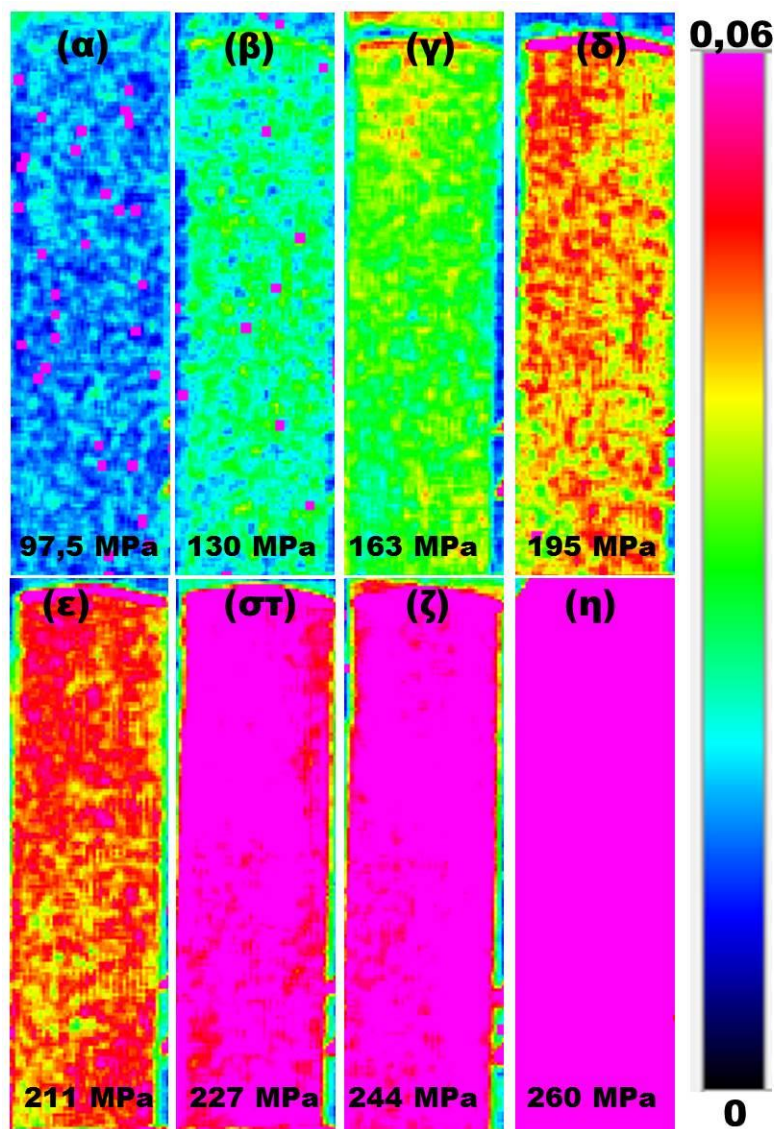
Στην Εικόνα 3.3.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα της εσωτερικής διαχεόμενης ενέργειας σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα τάσης για το σύνθετο A359/SiC 10%. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω η τομή των κλίσεων που ορίζει το όριο κόπωσης είναι περίπου στο 60% του  $\sigma_{\text{uts}}$ , δηλαδή στα 195MPa (Εικόνα 3.3.14).



Εικόνα 3.3.14. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης σύνθετου A359/SiC 10% με θερμογραφία

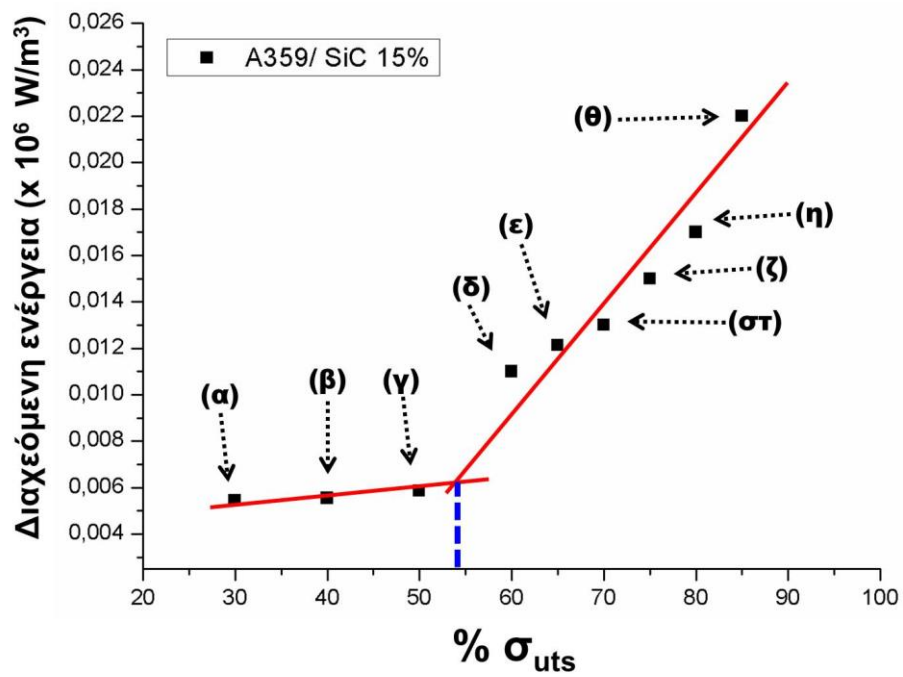
Τα θερμογραφήματα του A359/SiC 10% παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3.15. Όπως παρατηρήθηκε από το παραπάνω διάγραμμα, καθώς αυξάνεται το επίπεδο τάσης από 30% σε 50% του  $\sigma_{uts}$  η ενέργεια που εκπέμπεται από το υλικό αυξάνεται με ομαλό τρόπο. Η κατάσταση αυτή μπορεί να επαληθευτεί και οπτικά από τα θερμογραφήματα (α – γ), όπου οι χρωματισμός ξεκινάει από γαλάζιο στο θερμογράφημα α και αλλάζει σταδιακά σε πράσινο (θερμογράφημα γ). Η μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζεται στο θερμογράφημα δ που αντιστοιχεί και στο όριο κόπωσης του υλικού. Στα επόμενα θερμογραφήματα παρατηρείται η ραγδαία αύξηση της διαχεόμενης ενέργειας.



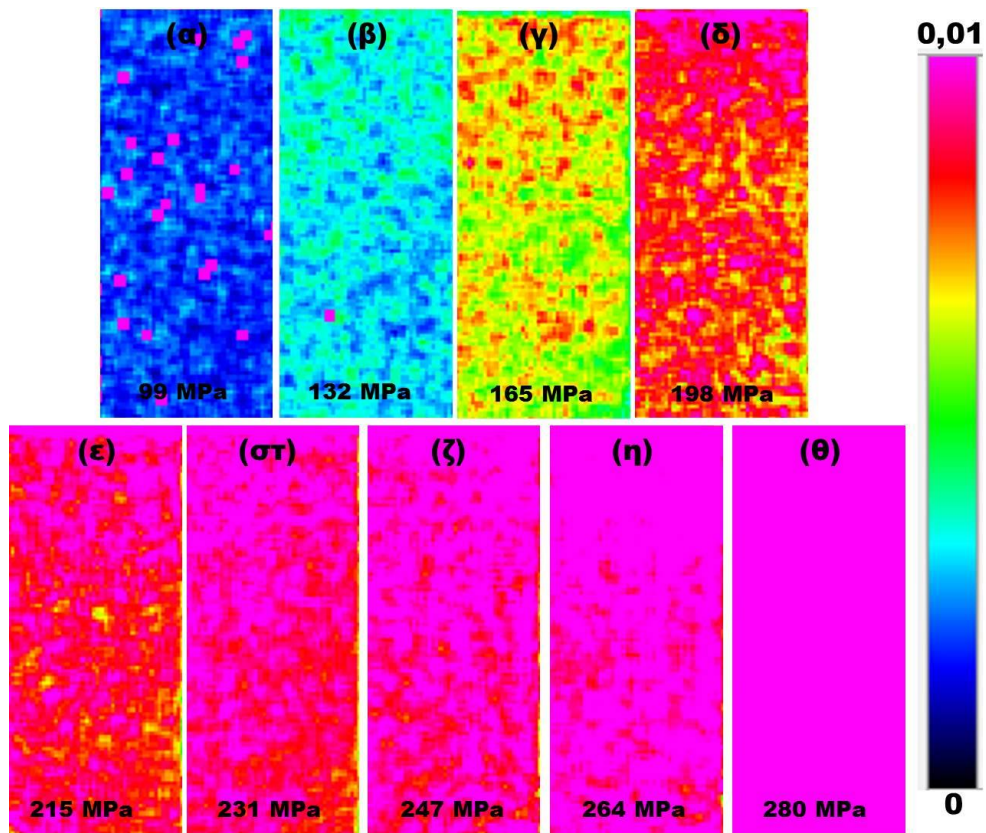


Εικόνα 3.3.15. Θερμογραφήματα συνθέτου υλικού A359/SiC 10%

Ομοίως, στην Εικόνα 3.3.16 απεικονίζεται ο υπολογισμός του ορίου κόπωσης του A359/SiC 15% που προέκυψε από την καμπύλη ενέργειας - %  $\sigma_{\text{uts}}$ . Αντίστοιχα με τα παραπάνω, το όριο κόπωσης καθορίζεται σχεδόν στο 54% του  $\sigma_{\text{uts}}$ , δηλαδή στα 178 MPa. Στα θερμογραφήματα της Εικόνας 3.3.17 αρχικά παρατηρούνται μικρές αλλαγές στη διαχεόμενη ενέργεια (θερμογραφήματα α και β), ενώ όσο το επίπεδο τάσης πλησιάζει το όριο κόπωσης αρχίζουν να εμφανίζονται πιο έντονες αλλαγές (θερμογράφημα γ). Από το θερμογράφημα δ έως θ το όριο κόπωσης έχει ξεπεραστεί με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται πολύ σημαντική αύξηση της ενέργειας.

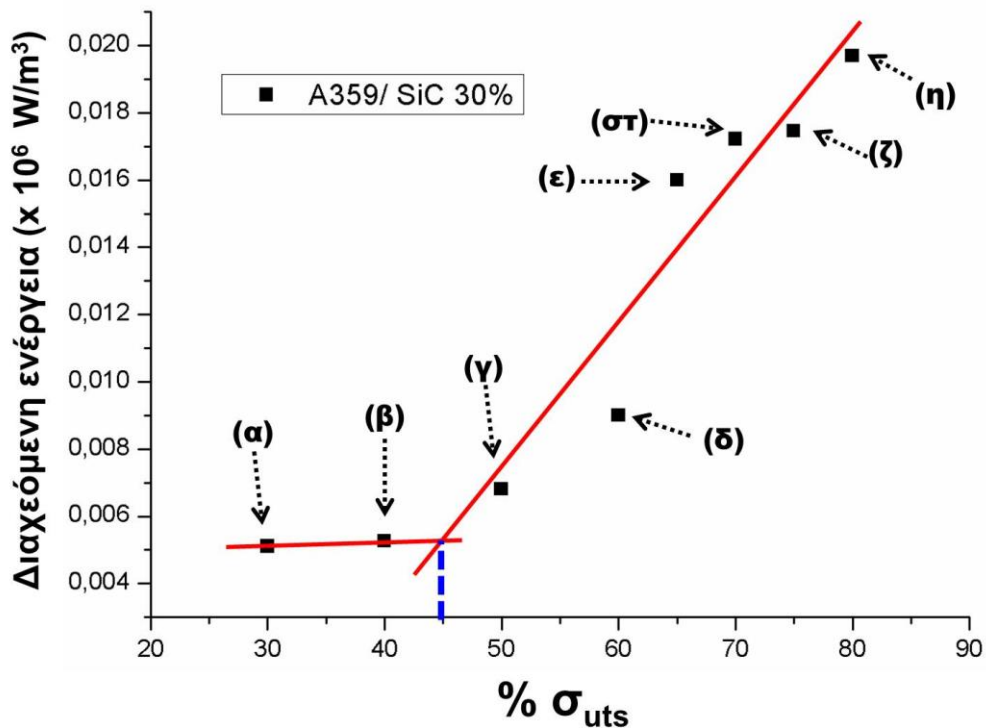


Εικόνα 3.3.16. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης σύνθετου υλικού A359/SiC 15% με θερμογραφία



Εικόνα 3.3.17. Θερμογραφήματα σύνθετου A359/SiC 15%

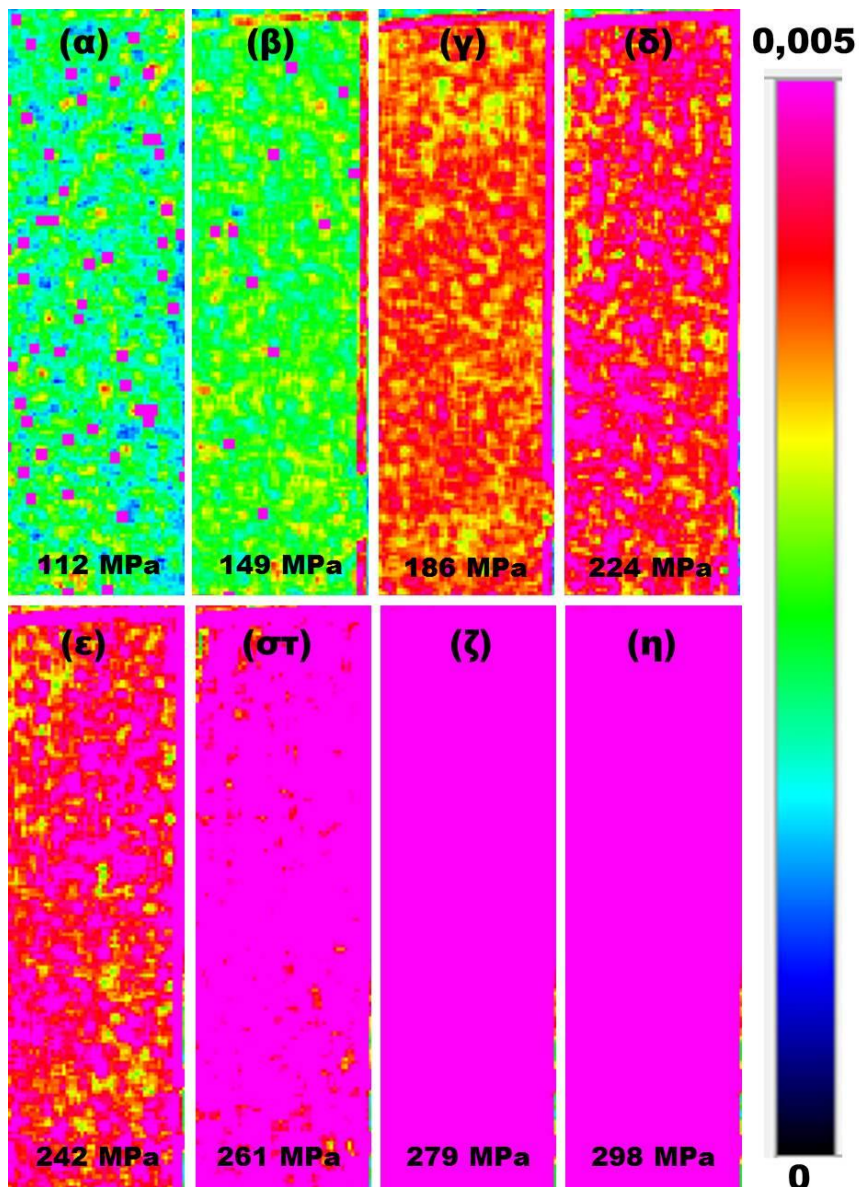
Ο προσδιορισμός του ορίου κόπωσης του συνθέτου υλικού A359/SiC 30% (Εικόνα 3.3.18) επιτεύχθηκε στα 168 MPa (45% του  $\sigma_{uts}$ ). Προκύπτει, λοιπόν, ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό ενίσχυσης των καρβιδίων του πυριτίου στη μήτρα του αλουμινίου A359, το όριο κόπωσης μειώνεται. Συγκεκριμένα από 195 MPa με 10% ενίσχυση μειώνεται σε 168 MPa στην περίπτωση του ποσοστού ενίσχυσης 30%. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της ψαθυρής φάσης (SiC) στη μήτρα αλουμινίου έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ολκιμότητας του υλικού και συνεπώς της ικανότητάς του να φέρει φορτία κόπωσης. Αντίθετα, αυξάνεται σημαντικά η εφελκυστική του αντοχή. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας [24] για τον ίδιο τύπο υλικών, γεγονός που ενισχύει την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου.



Εικόνα 3.3.18. Προσδιορισμός ορίου κόπωσης με θερμογραφία σύνθετου υλικού A359/SiC 30%



Στην Εικόνα 3.3.19 που παρουσιάζονται τα θερμογραφήματα του A359/SiC 30% είναι εμφανής η έντονη αλλαγή στη συμπεριφορά του υλικού μεταξύ των θερμογραφημάτων β και γ. Το όριο κόπωσης σύμφωνα με το γράφημα της Εικόνας 3.3.18 ορίζεται ανάμεσα στα επίπεδα τάσης 40% και 50% του  $\sigma_{\text{uts}}$ , δηλαδή μεταξύ των θερμογραφημάτων β και γ. Στα επόμενα θερμογραφήματα η ενέργεια αυξάνεται αλματωδώς έως την αστοχία του υλικού.



Εικόνα 3.3.19. Θερμογραφήματα του A359/SiC 30%



### 3.3.6. Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 3.3 αναπτύχθηκε μία μη καταστροφική μεθοδολογία για τον ταχύ και αξιόπιστο προσδιορισμό του ορίου κόπωσης των υλικών με τη χρήση τυπικά ενός μοναδικού δοκιμίου. Τμήμα των παραπάνω αποτελεσμάτων δημοσιεύθηκαν στα [25, 26]

Από την παραπάνω έρευνα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία της υπέρυθρης θερμογραφίας μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους υλικών, όπως σε μονολιθικά υλικά (π.χ. μέταλλα) και σε σύνθετα υλικά με κεραμική και μεταλλική μήτρα.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής εμφανίζουν όμοιες τάσεις με τα αντίστοιχα της θερμογραφίας. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός της ακουστικής δραστηριότητας και της ενέργειας των ακουστικών σημάτων αλλάζει στο ίδιο επίπεδο τάσης που η θερμογραφία προσδιορίζει ως όριο κόπωσης.

Το όριο κόπωσης για το χάλυβα AISI 1006 προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της θερμογραφίας στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$ . Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι σε πλήρη συμφωνία με αυτό που προέκυψε από την καμπύλη Wöhler.

Επίσης, όσον αφορά το αλουμίνιο 1050 H16 το όριο κόπωσης του υπολογίστηκε από την καμπύλη S-N στο 70% της μέγιστης εφελκυστικής του αντοχής. Το ίδιο αποτέλεσμα καθορίστηκε τόσο με τη μέθοδο της θερμογραφίας όσο και με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της μεθόδου της θερμογραφίας.

Στη συνέχεια, η νέα μεθοδολογία προσδιορισμού του ορίου κόπωσης εφαρμόστηκε και σε σύνθετα κεραμικά υλικά SiC/BMAS. Το όριο κόπωσης καθορίστηκε στο 70% του  $\sigma_{\text{uts}}$  και επιβεβαιώθηκε και με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής.

Επιπρόσθετα, η παραπάνω έρευνα εφαρμόστηκε και σε σύνθετα μεταλλικά υλικά με μήτρα αλουμινίου με ενίσχυση τριών διαφορετικών ποσοστών καρβιδίων του πυριτίου. Συγκεκριμένα για το A359/SiC 10% το όριο κόπωσης προέκυψε στο 60% του  $\sigma_{\text{uts}}$  (195MPa), για το A359/SiC 15% στο 54% του  $\sigma_{\text{uts}}$  (178 MPa) και για το A359/SiC 30% στο 45% του  $\sigma_{\text{uts}}$  (168 MPa) και παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού ενίσχυσης οδηγεί σε μείωση του ορίου κόπωσης. Λόγω του γεγονότος ότι ο προσδιορισμός του ορίου κόπωσης με τη συμβατική μέθοδο στα υλικά αυτά είναι ακόμη πιο σύνθετος, η μέθοδος

της θερμογραφίας αποκτά μεγάλη αξία καθώς επιλύει τα προβλήματά της καμπύλης Wöhler.

Τέλος, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο προσδιορισμός του ορίου κόπωσης μέσω της θερμογραφίας και της ακουστικής εκπομπής προσφέρει μία νέα, εναλλακτική και αξιόπιστη μεθοδολογία, η οποία μπορεί να ξεπεράσει τα προβλήματα της μεθόδου Vohler (καμπύλη S-N) καθώς μειώνεται ο πειραματικός χρόνος και απαιτείται τυπικά μόνο ένα δοκίμιο για τον προσδιορισμό του σε οποιοδήποτε τύπο υλικού.

### 3.3.7. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Kordatos EZ, Matikas TE. Developing damage metrics for metallic structures undergoing fatigue using real-time thermographic evaluation: SPIE; 2011.
- [2] Aggelis DG, Kordatos EZ, Matikas TE. Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates. *Mechanics Research Communications*. 2011;38(2):106-10.
- [3] Aggelis DG, Kordatos EZ, Soulioti DV, Matikas TE. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Construction and Building Materials*. 2010;24(10):1888.
- [4] Kordatos EZ, Aggelis DG, Matikas TE. Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(6):2676-86.
- [5] Kim J, Liaw PK. Tensile Fracture Behavior of Nicalon/SiC Composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007;38(13):2203-13.
- [6] Dassios KG, Aggelis DG, Kordatos EZ, Matikas TE. Cyclic loading of a SiC-fiber reinforced ceramic matrix composite reveals damage mechanisms and thermal residual stress state. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013;44(0):105-13.
- [7] Fargione G, Geraci A, La Rosa G, Risitano A. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *International Journal of Fatigue*. 2002;24(1):11-9.
- [8] La Rosa G, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*. 2000;22(1):65-73.
- [9] Luong MP. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design*. 1995;158(2-3):363-76.
- [10] Minh Phong L. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mechanics of Materials*. 1998;28(1-4):155-63.
- [11] Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures. In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. Orlando, FL2001. p. 560-6.
- [12] Krapez JC, Pacou D, Gardette G. Lock-in thermography and fatigue limit of metals. *Proc QIRT'2000*. 2000:277-82.
- [13] Curà F, Curti G, Sesana R. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels. *International Journal of Fatigue*. 2005;27(4):453-9.
- [14] Krapez JC, Pacou D. Thermography detection of damage initiation during fatigue tests. In: Maldague XP, Rozlosnik AE, editors. Orlando, FL2002. p. 435-49.
- [15] Luong PM. Nondestructive damage evaluation of reinforced concrete structure using infrared thermography. Newport Beach, CA, USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers; 2000. p. 98-107.

- [16] Arnould O, Brémond P, Hild F. Thermal evaluation of the mean fatigue limit of a complex structure. In: Raymond Peacock G, Burleigh DD, Miles JJ, editors. Orlando, FL2005. p. 255-63.
- [17] Li XD, Zhang H, Wu DL, Liu X, Liu JY. Adopting lock-in infrared thermography technique for rapid determination of fatigue limit of aluminum alloy riveted component and affection to determined result caused by initial stress. *International Journal of Fatigue*. 2012;36(1):18-23.
- [18] Crupi V, Guglielmino E, Maestro M, Marinò A. Fatigue analysis of butt welded AH36 steel joints: Thermographic Method and design S-N curve. *Marine Structures*. 2009;22(3):373-86.
- [19] Grosse CU, Ohtsu M. *Acoustic Emission Testing*. Heidelberg: Springer; 2008.
- [20] Roberts TM, Talebzadeh M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2003;59(6):695-712.
- [21] Ohno K, Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*. 2010;24(12):2339-46.
- [22] Kim KB, Yoon DJ, Jeong JC, Lee SS. Determining the stress intensity factor of a material with an artificial neural network from acoustic emission measurements. *NDT and E International*. 2004;37(6):423-9.
- [23] Luong MP. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mechanics of Materials*. 1998;28(1-4):155-63.
- [24] Myriounis DP, Matikas TE, Hasan ST. Fatigue behaviour of SiC particulate-reinforced A359 aluminium matrix composites. *Strain*. 2012;48(4):333-41.
- [25] E. Z. Kordatos, M. A. Strantza, K. Dassios, P.-L. I. Lagari, T. E. Matikas. Determination of Fatigue Limit in Composite Materials Using Ir Lock-in Thermography. 10th International Conference on Durability of Composite Systems (DURACOSYS 2012)2012.
- [26] E. Z. Kordatos, D. G. Aggelis, K. G. Dassios, T. E. Matikas. Monitoring of glass-ceramic composites under static and dynamic loading by combined NDE methods. SPIE - The International Society for Optical Engineering. San Diego, CA, USA2013.

### **3.4. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον χαρακτηρισμό της υπό-επιφανειακής βλάβης**

#### 3.4.1. Σκοπός – Αντικείμενο

Σκοπός του Κεφαλαίου 3.4 είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας, σε εργαστηριακή κλίμακα, βασισμένη στην υπέρυθη θερμογραφία για τον χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακής βλάβης σε κατασκευές από σκυρόδεμα και η εφαρμογή της σε υφιστάμενη κατασκευή μεγάλης ιστορικής σημασίας για την ελληνική πολιτιστική κληρονομιά.

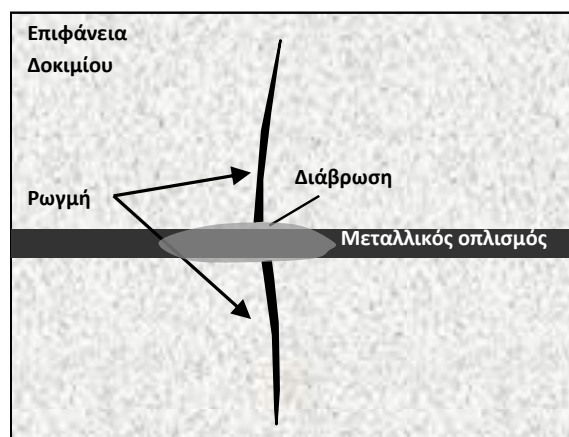
Η διάβρωση του μεταλλικού οπλισμού σε κατασκευές από σκυρόδεμα οδηγεί σε ρωγμές που διαδίδονται προς την επιφάνεια. Οι ρωγμές αυτές δεν είναι εύκολα αντιληπτές μέχρι να εμφανιστούν στην επιφάνεια, εκθέτοντας την κατασκευή σε επιταχυνόμενη υποβάθμιση. Ως εκ τούτου, σκοπός της έρευνας του Κεφαλαίου 3.4.3 είναι η ανάπτυξη μη καταστροφικής μεθοδολογίας που έχει ως βάση τη θερμογραφία υπέρυθρου για το χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακής βλάβης. Στην παρούσα μελέτη, δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος υπεβλήθησαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων με αποτέλεσμα τη δημιουργία υπό-επιφανειακών ρωγμών. Τα διαφορετικά είδη ρωγμών που προέκυψαν ελέγχθηκαν με την υπέρυθη θερμογραφία, ώστε να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε για το βάθος ανίχνευσης των υπό-επιφανειακών ρωγμών.

Έπειτα από την επιτυχημένη ανάπτυξη και την εφαρμογή της μεθοδολογίας για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών κρίθηκε σκόπιμο η έρευνα αυτή να εφαρμοστεί σε μία υφιστάμενη κατασκευή και συγκεκριμένα στη Μονή «Μολυβδοσκεπάστου» που χρονολογείται από τον 6<sup>ο</sup> αιώνα και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς για την Ελλάδα. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 3.4.4 αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας, η «θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση» και εφαρμόστηκαν άλλες δύο θερμογραφικές μέθοδοι, η οπτική θερμογραφία lock-in και η θερμογραφία φάσης – παλμού. Με την χρήση των παραπάνω μεθόδων ανιχνεύθηκαν υπό-επιφανειακές ατέλειες και αποτιμήθηκε η δομική ακεραιότητα των τοιχογραφιών του τρούλου και της κτητορικής επιγραφής της μονής.

### 3.4.2. Εισαγωγή

Η υποβάθμιση των τεχνικών κατασκευών απαιτεί αποτελεσματικές μεθόδους επιτήρησης και επιδιόρθωσης. Η διαδικασία συντήρησης συνήθως περιλαμβάνει ένα συνδυασμό τεχνικών [1]. Αρχικά εφαρμόζεται μία καθολική τεχνική ελέγχου για τη γρήγορη γενική εκτίμηση της δομής. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη σοβαρότητα της κατάστασης και εντοπίζουν τα συγκεκριμένα τμήματα της κατασκευής που απαιτούν πιο λεπτομερή εξέταση. Στη συνέχεια άλλες τεχνικές, όπως για παράδειγμα υπέρηχοι και θερμογραφία μπορούν να εφαρμοστούν τοπικά στις συγκεκριμένες θέσεις για πιο ακριβή χαρακτηρισμό των παραμέτρων της βλάβης [2].

Υπό-επιφανειακές ρωγμές σε κατασκευές σκυροδέματος μπορούν να συμβούν λόγω της διάβρωσης του μεταλλικού οπλισμού όταν περιβαλλοντικοί παράγοντες διεισδύσουν στο υλικό [3]. Το στρώμα οξειδίων που σχηματίζεται στη ράβδο προκαλεί επιπλέον πίεση στη μήτρα του σκυροδέματος με αποτέλεσμα τη ρήξη της (Εικόνα 3.4.1). Αυτές οι ρωγμές επεκτείνονται με την αύξηση της διάβρωσης λόγω θερμικών κύκλων αλλά και εξωτερικών φορτίων. Ωστόσο, η εκτίμησή τους οπτικά δεν είναι δυνατή μέχρι να ρωγατωθεί η επιφάνεια. Μετά τη ρωγμάτωση της επιφάνειας επιταχύνεται η επιδείνωση τους μέσω της άμεσης διάδοσης που παρέχει η ρωγμή στο νερό. Είναι λογικό ότι μία μεθοδολογία ΜΚΕ απαιτείται για την πρόωμη εκτίμηση της κατάστασης του υλικού ώστε να συντηρηθεί και να επισκευαστεί εγκαίρως είτε με ενέσεις ρητίνης ή τσιμέντου στη συγκεκριμένη θέση [4].



Εικόνα 3.4.1. Δημιουργία ρωγμών λόγω διάβρωσης σε μεταλλικό οπλισμό

Η εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας σε κατασκευές είναι μια καθιερωμένη μη καταστροφική μέθοδος για ακριβή και εύκολο έλεγχο της ποιότητας μόνωσης κτιρίων, απώλεια θερμότητας από παράθυρα ή «κρυμμένες λεπτομέρειες» όπως υπό-επιφανειακές βλάβες και αποκολλήσεις [5-7]. Η ροή θερμότητας επηρεάζεται από την παρουσία αλλοιώσεων εντός της μάζας του σκυροδέματος. Οι μεταβολές είναι πιο έντονες όταν οι αλλοιώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια. Οι υπέρυθρες θερμικές κάμερες ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια και δημιουργούν μία θερμική εικόνα που δείχνει την κατανομή θερμοκρασίας της επιφάνειας του σώματος. Αυτή η κατανομή επηρεάζεται από την παρουσία υπό-επιφανειακών ανομοιογενειών, οι οποίες αφήνουν το αποτύπωμά τους στο επιφανειακό θερμοκρασιακό πεδίο.

Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς, αποτελεί σημαντική προσφορά στη προώθηση του πολιτισμού και της ιστορίας της Ελλάδος. Η έγκαιρη αποτίμηση της κατάστασης των τοιχογραφιών, των νωπογραφιών και της τοιχοποιίας μπορεί να αποτρέψει την ανεπανόρθωτη βλάβη τους. Επίσης, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την αποκατάσταση και τη συντήρηση των μνημείων. Ως εκ τούτου, οι μη καταστροφικές μεθοδολογίες είναι οι πιο κατάλληλες για αυτό το σκοπό. Μία από τις μη καταστροφικές τεχνικές για τον εν λειτουργία έλεγχο μίας κατασκευής είναι η υπέρυθρη θερμογραφία. Αποτελεί μία ευρέως πεδίου, μη επαφής και φορητή μέθοδο και η αποτελεσματικότητά της στον έλεγχο των κατασκευών ιστορικής σημασίας είναι επαρκώς τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία. Η θερμογραφία βασίζεται στην ανίχνευση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα υπό εξέταση υλικά. Οι διαφορές θερμοκρασίας που παρατηρούνται στην επιφάνεια τους εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά τους και από κάποιες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η σχετική υγρασία, η ατμοσφαιρική θερμοκρασία, η ανακλώμενη φαινομενική θερμοκρασία και ο συντελεστής εκπομπής «ε» των υλικών.

Ο συντελεστής εκπομπής των υπό εξέταση υλικών αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της θερμογραφίας. Πολλές έρευνες [8-10] έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό τη μελέτη του «ε» των υλικών που χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς. Η υπέρυθρη θερμογραφία έχει χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση της βλάβης σε κατασκευές μεγάλης ιστορικής αξίας [11, 12] αλλά και για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των υλικών και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη συντήρηση των μνημείων, όπως τον επιφανειακό καθαρισμό, την αποκατάσταση της τοιχοποιίας με επισκευή του κονιάματος και τη στερέωση των

πετρών [13-15]. Επίσης, έχει εφαρμοστεί για την ανίχνευση και την αποκάλυψη τεχνητών υπό-επιφανειακών ατελειών, όπως δίσκους από φελλό, πλαστικές σακούλες με αέρα και κύβους πολυστυρενίου [16-18], κρυμμένες κατασκευές όπως κόγχες και θαμμένες καταπακτές [19-21] και υπό-επιφανειακά χαρακτηριστικά, όπως ψηφιδωτά σε γύψινο μωσαϊκό [13-15, 22].

Ένα ακόμη πλεονέκτημα της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι η δυνατότητα ανίχνευσης διαφόρων ειδών υγρασίας σε κτίρια και φέρουσες τοιχοποιίες [12, 20, 23-28]. Επιπλέον, θα πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος της θερμογραφία αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για το χαρακτηρισμό βλάβης, όπως η συνοχή (σωστή πρόσφυση) των τοιχογραφιών [21], η έλλειψη μόνωσης [26].

Στο Κεφάλαιο 3.4.4 χρησιμοποιήθηκε η υπέρυθρη θερμογραφία για τον έλεγχο του ιστορικού μνημείου της Εικόνας 3.4.2. Το μνημείο βρίσκεται βόρεια της πόλης των Ιωαννίνων (Ελλάδα), στην κοιλάδα του ποταμού Αώου και πολύ κοντά στα Ελληνοαλβανικά σύνορα. Το μοναστήρι είναι της «Κοιμήσεως της Θεοτόκου» και είναι γνωστό ως «Μονή Μολυβδοσκεπάστου». Ο χαρακτηρισμός «μολυβδοσκεπάστου» προήλθε λόγω του ότι η σκεπή του μοναστηριού είναι φτιαγμένη από πλάκες μολύβδου [29-31].



Εικόνα 3.4.2. Μονή «Μολυβδοσκεπάστου»



Η ίδρυση της μονής και η δημιουργία της αρχιεπισκοπής συνδέονται με το όνομα του αυτοκράτορα «Κωνσταντίνου IV του Πωγωνάτου» (668-85). Η παράδοση αυτή επιβεβαιώνεται από έγγραφα που πιθανόν να κατασκευάστηκαν για να καλύψουν τις ελλείψεις των ιστορικών [32]. Το καθολικό της μονής έχει ένα αρκετά πολύπλοκο αρχιτεκτονικό ρυθμό. Αποτελείται από έναν τρίκογχο ναό, στο δυτικό μέρος του οποίου προστέθηκαν σταδιακά ένα δωμάτιο με σχήμα σταυρού, ένας νάρθηκας με ξύλινη στέγη και από ένα παρεκκλήσι βόρεια και νότια του καθολικού. Το αρχικό τρίκογχο τμήμα, σύμφωνα με τους ερευνητές, χρονολογείται από τον 11<sup>ο</sup> αιώνα, το τμήμα με σχήμα σταυρού υπολογίζεται περίπου από τα τέλη του 13<sup>ου</sup> ως τις πρώτες δύο δεκαετίες του 14<sup>ου</sup>, και ο νάρθηκας στη δυτική πλευρά (ύστερα από πολλές επισκευές και προσθήκες) από τον 16<sup>ο</sup> αιώνα [33]. Η μονή είναι σταυροπηγική και λογοδοτεί απευθείας στο Οικουμενικό Πατριαρχείο. Από το 14ο αιώνα περιελάμβανε εργαστήριο χειρογράφων. Γενικότερα, ο 16<sup>ος</sup> αιώνας αποτελεί περίοδο μεγάλης ακμής για τη μονή. Την εποχή αυτή το καθολικό επεκτάθηκε δυτικά και τοιχογραφήθηκε δύο φορές, το 1521 και το 1537 [34]. Στη μονή υπάρχει μία κτητορική επιγραφή στη δυτική είσοδο που αποτελείται από εφτά γραμμές κειμένου και χρονολογείται από το 1521. Η μονή «Μολυβδοσκεπάστου» αποτελεί ένα μνημείο μεγάλης ιστορικής σημασίας και η κτητορική επιγραφή μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την χρονολογία κατασκευής και ανακατασκευής της μονής.

#### 3.4.3. Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπέρυθρης θερμογραφίας για το χαρακτηρισμό υπο-επιφανειακών ρωγμών σε σκυρόδεμα

Στο Κεφάλαιο 3.4.3 αναπτύχθηκε μια μη καταστροφική μεθοδολογία με βάση την υπέρυθρη θερμογραφία για το χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακών ρωγμών σε πρισματικούς δοκούς ινοπλισμένου σκυροδέματος. Ως εκ τούτου παρασκευάστηκαν δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος με τεχνητή βλάβη και μελετήθηκαν με υπέρυθρη θερμογραφία.

3.4.3.1. Υλικά και πειραματική διαδικασία

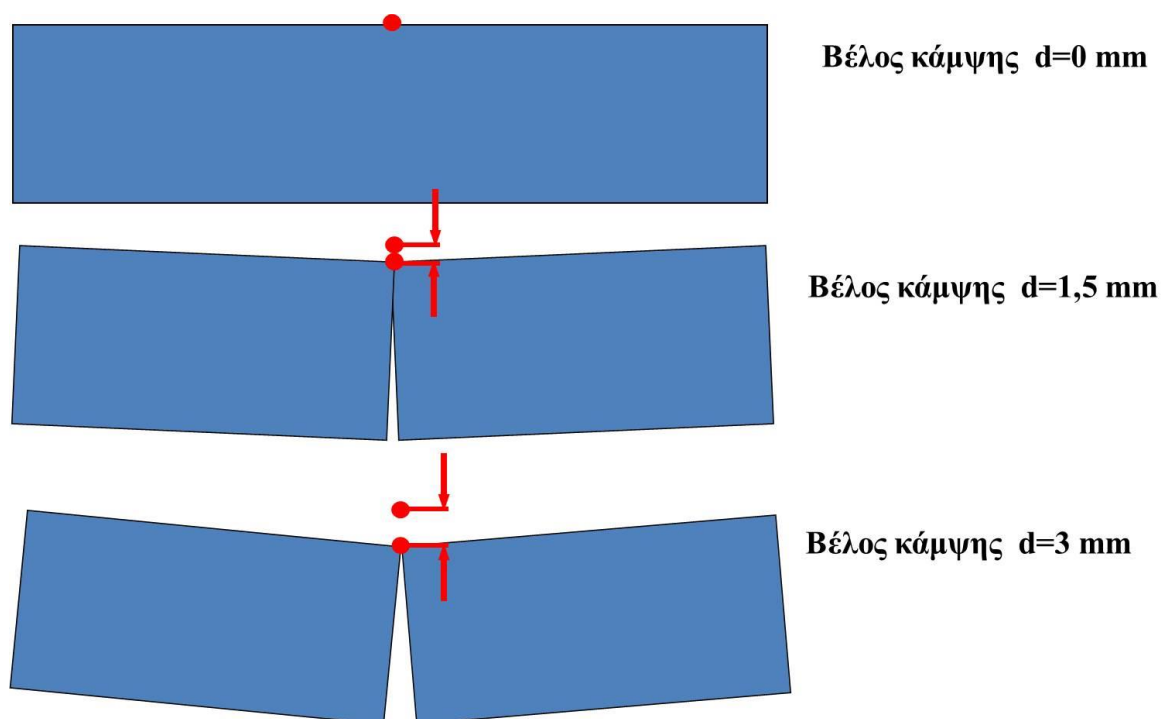
Τα δοκίμια σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν περιείχαν ίνες χάλυβα σε ποσοστό 1% κ.ο. σκυροδέματος (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC). Το μέγεθός τους ήταν 100x100x400 mm. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο ήταν 0,5, ενώ το μέγιστο μέγεθος αδρανών ήταν 10 mm. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων σύμφωνα με το πρότυπο (ASTM C1609 / C 1609M-05 [35]) με αποτέλεσμα περίπου κατακόρυφες ρωγμές που διαδίδονται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια (βλέπε Εικόνα 3.4.3). Για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην ανίχνευση βλάβης, δημιουργήθηκαν 4 είδη ρωγμών που αντιστοιχούσε το καθένα σε διαφορετικά βέλη κάμψης (Εικόνα 3.4.4). Συγκεκριμένα, τα 4 διαφορετικά βέλη κάμψης που επιλέχθηκαν και απόσταση της ρωγμής από την επιφάνεια φαίνονται στον πίνακα 3.4.1.



Εικόνα 3.4.3. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης 4 σημείων

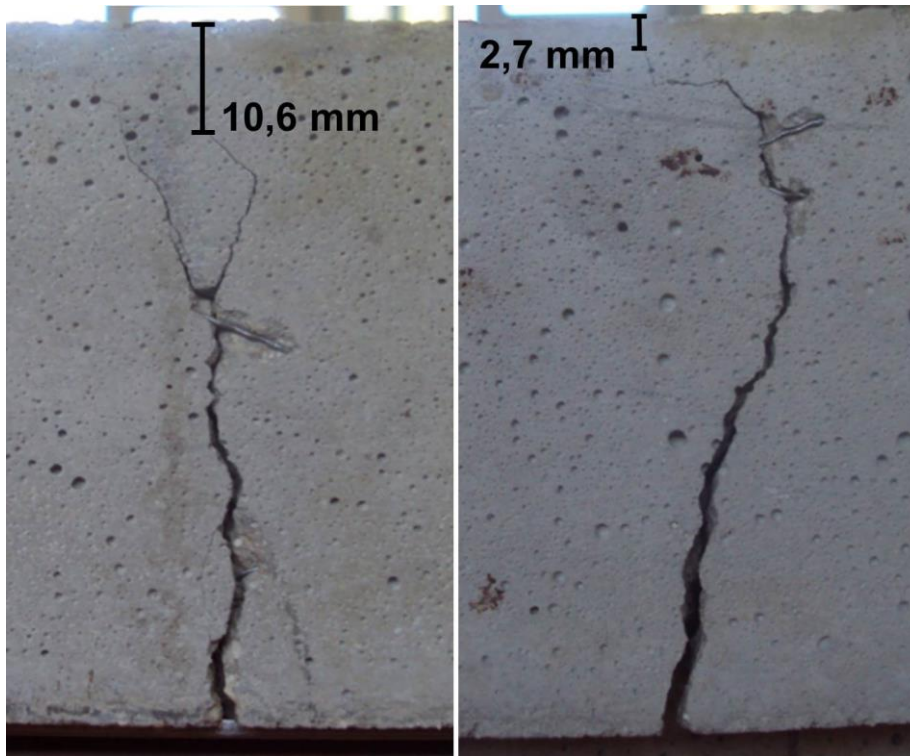
Πίνακας 3.4.1. Αποστάσεις ρωγμών από την επιφάνεια του δοκιμίου για κάθε βέλος κάμψης

Δοκίμιο	Βέλος Κάμψης (mm)	Απόσταση ρωγμής από την επιφάνεια του δοκιμίου (mm)
1	3	2,7
2	2,5	4,1
3	2,2	5,7
4	1,5	10,6



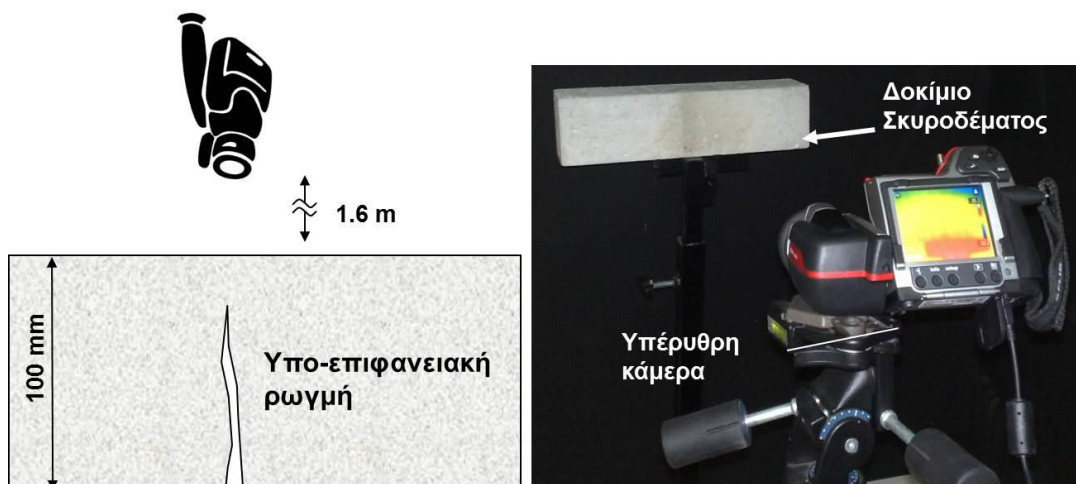
Εικόνα 3.4.4. Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων με διαφορετικά βέλη κάμψης

Στην Εικόνα 3.4.5 φαίνεται μια τυπική ρωγή σε δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος. Λόγω της επίδρασης των ινών, τα δοκίμια δεν διαχωρίστηκαν σε δύο τμήματα και η ρωγή σταμάτησε πριν φθάσει στην επάνω επιφάνεια των δοκιμίων. Η κύρια ρωγή συνοδεύεται από μικρότερες ρωγμές, όπως είναι χαρακτηριστικό για αυτό το είδος του υλικού, αυξάνοντας τη ζώνη θραύσης. Παρά το δίκτυο των ρωγμών, δεν υπάρχει καμία ορατή ένδειξη ρωγμάτωσης από την πλευρά που υπόκειται σε θλίψη.



Εικόνα 3.4.5. Απεικόνιση ρωγμών που αντιστοιχούν σε βέλος κάμψης δοκιμίου 1,5 mm (αριστερά) και 3mm (δεξιά)

Για την ανάπτυξη της μη καταστροφικής μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη της Εικόνας 3.4.6, η οποία αποτελείται από μια υπέρυθη κάμερα και ένα φούρνο. Η υπέρυθη (IR) κάμερα είναι η T360 FLIR. Τα κύρια χαρακτηριστικά της υπέρυθρης κάμερας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.2. Η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για τη θέρμανση των δοκιμίων είναι ένας φούρνος με εύρος θερμοκρασίας 20 - 200 °C.



Εικόνα 3.4.6. Πειραματική διάταξη μελέτης με υπέρυθρη θερμογραφία

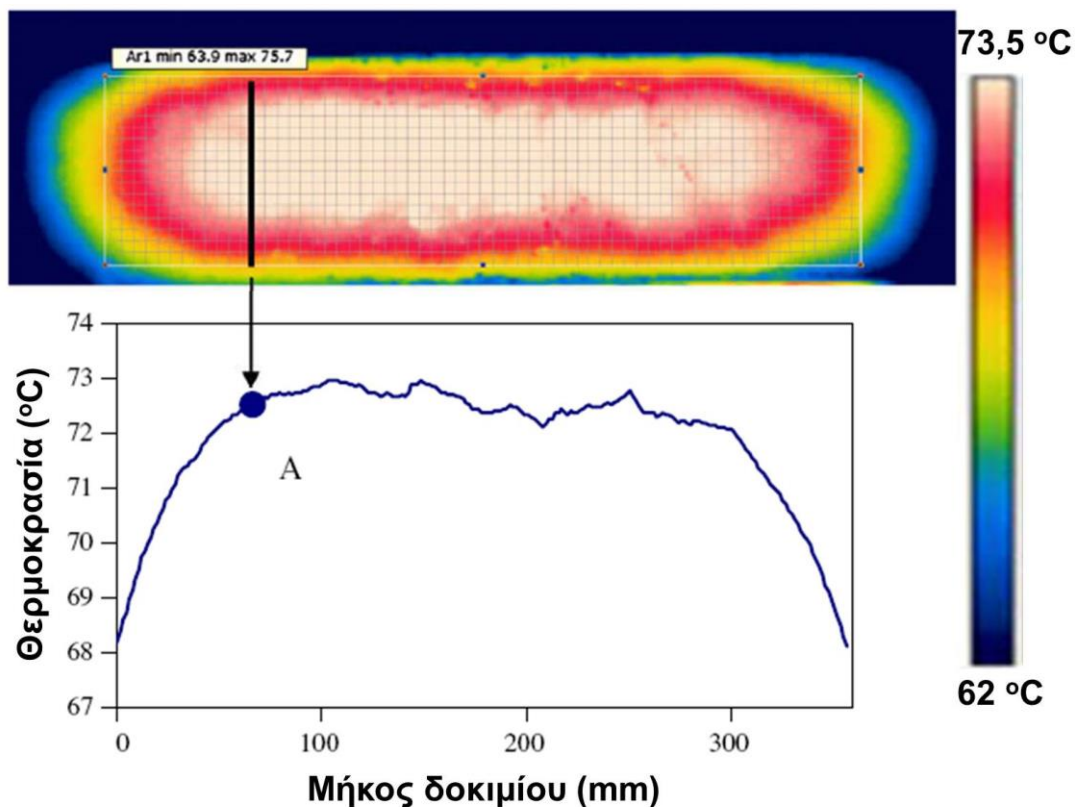
Πίνακας 3.4.2. Χαρακτηριστικά υπέρυθρης κάμερας Flir T360

Χαρακτηριστικά FLIR T360	
Φασματικό εύρος	7,5 - 13 $\mu\text{m}$
Τύπος αισθητήρα	Μη ψυχώμενος με μικροβολόμετρο
Ανάλυση υπέρυθρων	320x240 εικονοστοιχεία
Ρυθμός αποτύπωσης εικόνων	30 Hz
Θερμική ευαισθησία/θόρυβο-ισοδύναμη θερμοκρασιακή διαφορά	< 60 mK
Εστιακό μήκος	18 mm
Πεδίο εστίασης	25° x 19°
Χωρική ανάλυση	1,36 mRad
Εύρος θερμοκρασιών	5 °C – 120 °C

Πέντε δοκίμια, τέσσερα με ρωγματώσεις και ένα υγιές θερμάνθηκαν στο φούρνο για 3 ώρες σε θερμοκρασία 70 °C. Η υπέρυθρη κάμερα τοποθετήθηκε σε απόσταση 1,6 m από τα δοκίμια όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.6 ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο πεδίο εστίασης. Ως συντελεστής εκπομπής «ε» του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0,92. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας αέρα 23 °C και σχετικής υγρασίας 54%.

3.4.3.2. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Κατά τον θερμογραφικό έλεγχο καταγράφηκαν θερμογραφήματα κατά τη διάρκεια αποθέρμανσης κάθε 5 min και ορισμένα από τα πιο ενδεικτικά θερμογραφήματα παρουσιάζονται παρακάτω. Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω ακολουθήθηκε αρχικά σε ένα υγιές δοκίμιο για να μελετηθεί η συμπεριφορά του κατά την αποθέρμανση του και να αποτελέσει το δοκίμιο αναφοράς. Στην Εικόνα 3.4.7 απεικονίζεται το θερμογράφημα ενός υγιούς δοκιμίου. Το θερμοκρασιακό πεδίο είναι ομογενές στο κέντρο του δείγματος, ενώ υπάρχει αναμενόμενη ταχεία ψύξη κοντά στις άκρες του δοκιμίου.

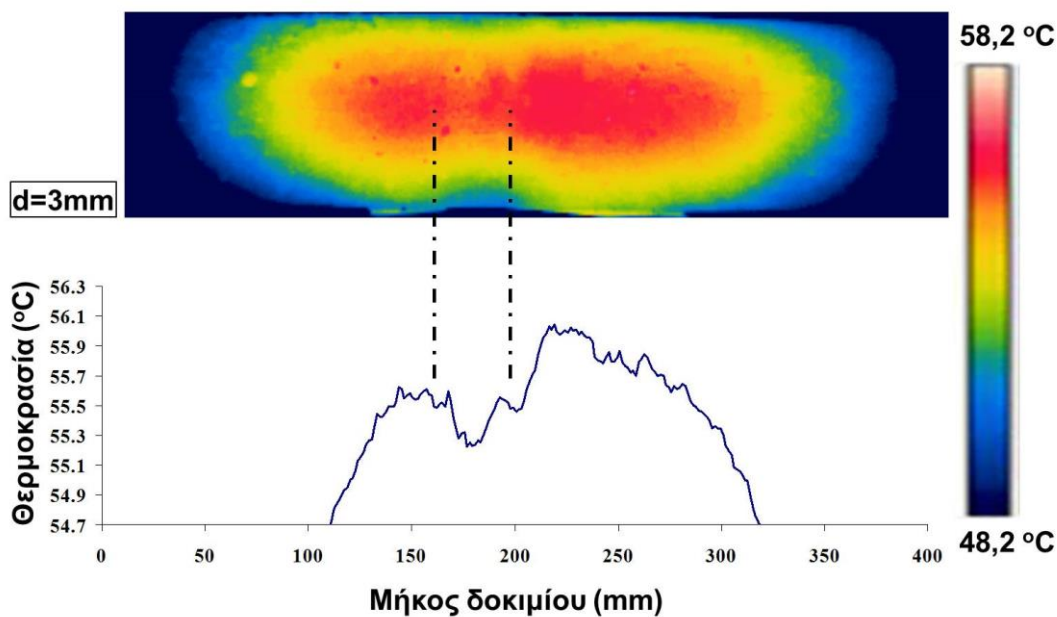


Εικόνα 3.4.7. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας υγιούς δοκιμίου

Το σκυρόδεμα συνήθως έχει κάποια εμφανή ελαττώματα στην επιφάνεια σαν φυσαλίδες αέρα, που μπορεί να λειτουργήσουν ως σημεία θερμικής απελευθέρωσης, γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει τοπικά το πεδίο και να δημιουργήσει ψευδείς εντυπώσεις για σημαντική υπό-επιφανειακή βλάβη. Για να προκύψει μία αντικειμενικά μετρήσιμη παράμετρος που θα υποδεικνύει τη θέση της υπό-επιφανειακής ρωγμής, η

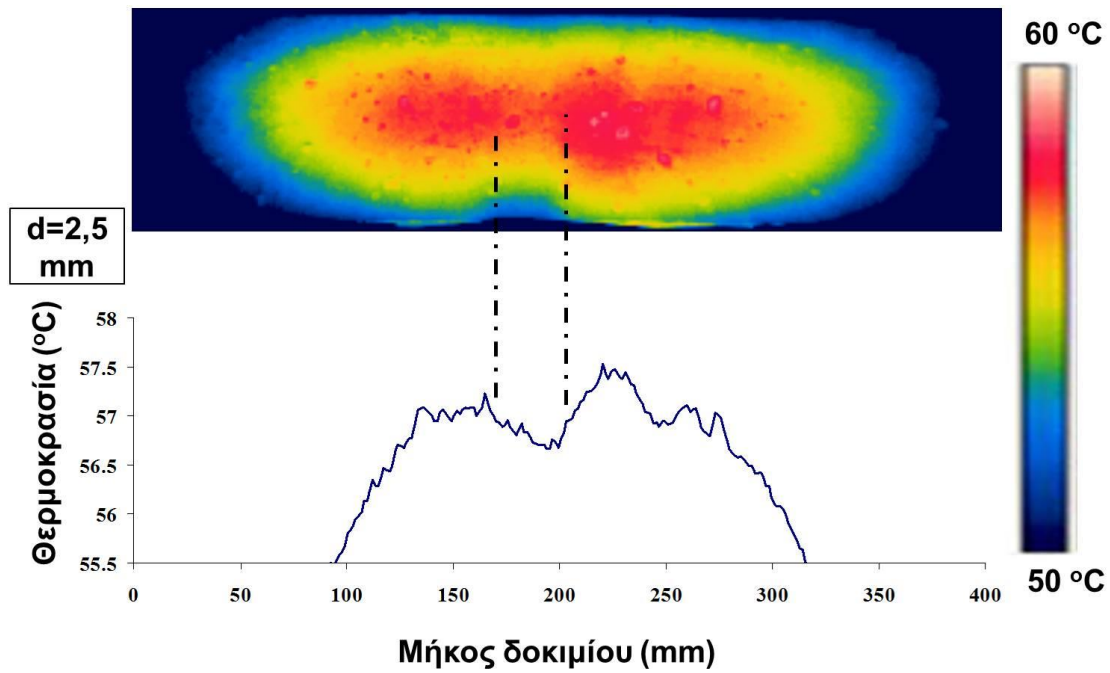


επιφάνεια των δοκιμίων διαιρέθηκε σε ένα πλέγμα με μέγεθος κελιού 1,5 mm και εξετάστηκε η μέση θερμοκρασία κάθε γραμμής. Μια μικρή φυσαλίδα αέρα μπορεί να αλλάξει σε τοπικό επίπεδο τη θερμοκρασία σε απόσταση λίγων mm, όχι όμως και ολόκληρης της κάθετης γραμμής των 10 cm (βλέπε Εικόνα 3.4.7). Η μέση θερμοκρασία των σημείων κάθε κατακόρυφης γραμμής του πλέγματος, όπως φαίνεται στο θερμογράφημα της Εικόνας 3.4.7, απεικονίζεται ως γράφημα στην ίδια εικόνα. Δηλαδή, το σημείο A της καμπύλης, ισούται με τη μέση θερμοκρασία των σημείων της κατακόρυφης γραμμής του θερμογραφήματος (Εικόνα 3.4.7).

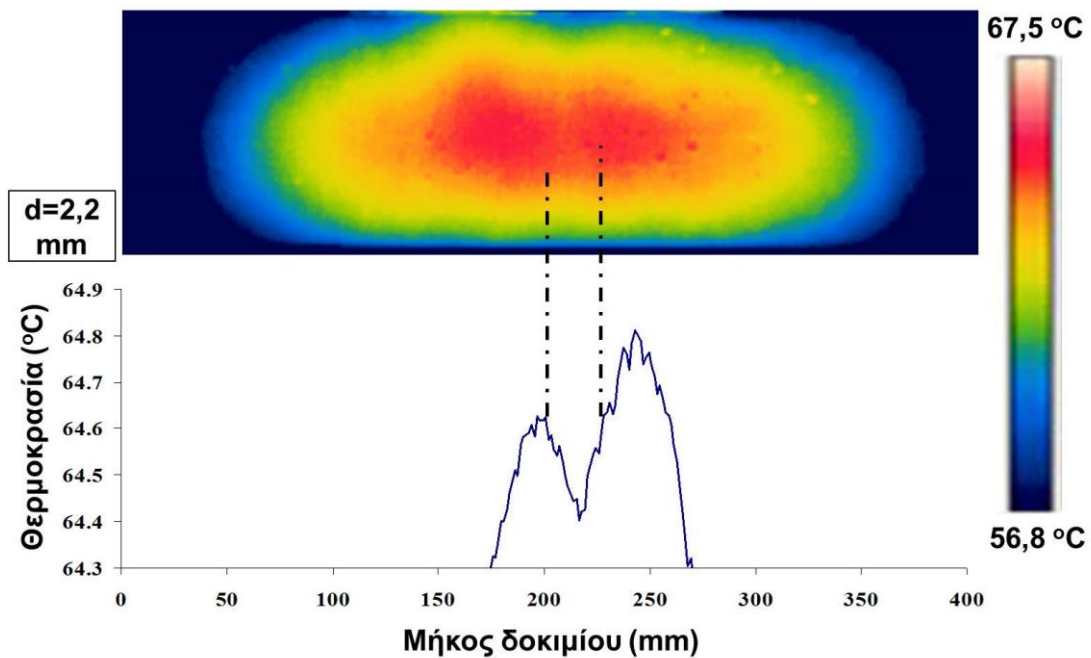


Εικόνα 3.4.8. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 3 mm

Στην Εικόνα 3.4.8 εμφανίζεται το θερμογράφημα ενός ρωγματωμένου δοκιμίου και η καμπύλη της μέσης θερμοκρασίας του. Στην περιοχή που υπάρχει ρωγμή (ανάμεσα στις δύο κάθετες γραμμές) η θερμοκρασία είναι μειωμένη όπως φαίνεται από το θερμογράφημα. Στην περίπτωση αυτή, η ρωγμή αντιστοιχεί σε κεντρική βύθιση δοκιμίου 3 mm και 2,7 mm απόσταση από την επιφάνεια. Η καμπύλη μέσης θερμοκρασίας επιβεβαιώνει την πτώση της θερμοκρασίας σε εκείνη την περιοχή (και την ύπαρξη της ρωγμής), αφού παρουσιάζεται σαφές τοπικό ελάχιστο, περίπου κατά 1 °C.



Εικόνα 3.4.9. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 2,5 mm

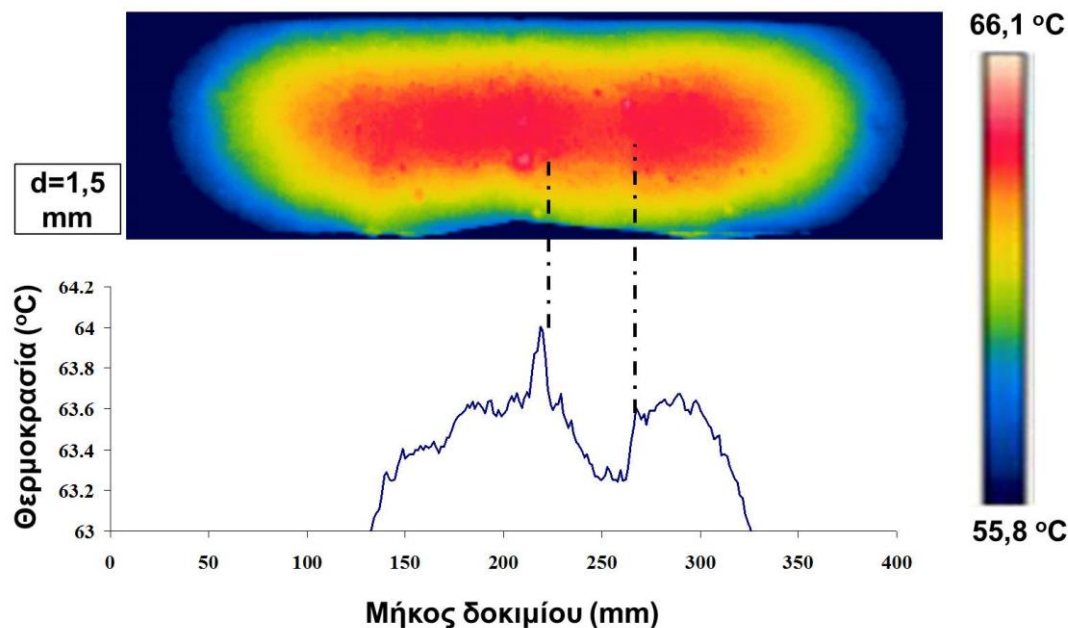


Εικόνα 3.4.10. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 2,2 mm



Στην Εικόνα 3.4.9 απεικονίζεται το θερμογράφημα και η καμπύλη της μέσης θερμοκρασίας του για ρωγματωμένο δοκίμιο με βέλος κάμψης 2,5 mm. Στην περίπτωση αυτή η ρωγή απέχει 4,1 mm απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 3.4.9 εμφανίζεται πάλι η υπό-επιφανειακή ρωγή ως πτώση της θερμοκρασίας στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου (διακεκομμένες γραμμές). Το θερμογράφημα αποτελεί μία ποιοτική παράμετρο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Η ποσοτικοποίηση όμως των αποτελεσμάτων είναι εκείνη που παρέχει περισσότερες πληροφορίες κατά τον θερμογραφικό έλεγχο.

Στην συνέχεια μελετήθηκαν δοκίμια με μικρότερο βέλος κάμψης και στην Εικόνα 3.4.10 παρουσιάζεται ο θερμογραφικός έλεγχος για δοκίμιο με μικρότερη ρωγή που αντιστοιχεί σε βέλος κάμψης 2,2 mm. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 3.4.10 δεν παρατηρείται με ευκολία η ύπαρξη της υπό-επιφανειακής ρωγής, αντίθετα όμως η καμπύλη της μέσης θερμοκρασίας εμφανίζει ένα τοπικό ελάχιστο που καταδεικνύει την ύπαρξη της και την εντοπίζει δεξιά από το κέντρο του δοκιμίου.



Εικόνα 3.4.11. Θερμοκρασιακό πεδίο και καμπύλη μέσης θερμοκρασίας δοκιμίου με βέλος κάμψης 1,5 mm

Όπως φαίνεται από τα θερμογραφήματα, όσο μειώνεται το βέλος κάμψης των δοκιμίων, (άρα μειώνεται το μήκος της ρωγής) τόσο πιο δύσκολη είναι η ανίχνευση της

ρωγμής. Στην Εικόνα 3.4.11 όπου το βέλος κάμψης είναι ακόμη μικρότερο η ρωγμή σχεδόν δεν διακρίνεται στο θερμογράφημα, αντίθετα με το διάγραμμα της ίδιας εικόνας όπου το τοπικό ελάχιστο καταδεικνύει την ύπαρξη υπό-επιφανειακής ρωγμής ακόμη και σε 10,6 mm κάτω από την επιφάνεια. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέση θερμοκρασιακή καμπύλη αποδεικνύεται ισχυρό εργαλείο λόγω του τοπικού ελάχιστου που παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση. Σημειώνεται ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες η ανίχνευση των ρωγμών είναι ευκολότερη, λόγω του πιο έντονου ρυθμού αποθέρμανσης. Στα συγκεκριμένα θερμογραφήματα παρουσιάζονται μετρήσεις σε θερμοκρασία γύρω στους 60 °C που είναι οριακά η θερμοκρασία της επιφάνειας σκυροδέματος κάτω από έντονη ηλιοφάνεια.

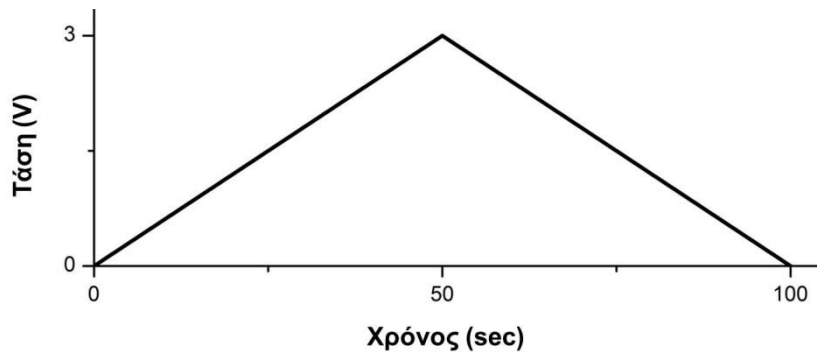
### 3.4.4. Αξιολόγηση φθοράς της Μονής «Μολυβδοσκεπάστου»

Στο Κεφάλαιο 3.4.3 αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας με σκοπό την αξιολόγηση υπό-επιφανειακής βλάβης σε δοκίμια σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, με τη μεθοδολογία αυτή εντοπίστηκαν υπό-επιφανειακές ρωγμές που βρίσκονταν σε βάθος έως και 10,6 mm. Ως εκ τούτου, έχοντας αποτιμήσει με την υπέρυθρη θερμογραφία υπό-επιφανειακές βλάβες σε εργαστηριακή κλίμακα, η έρευνα του Κεφαλαίου 3.4.4 επεκτάθηκε στην αξιολόγηση φθοράς σε υφιστάμενες κατασκευές πολιτιστικής κληρονομιάς. Αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 3.4.4 αναπτύχθηκε μία ακόμη νέα μέθοδος υπέρυθρης ενεργητικής θερμογραφίας (**θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση**) και συγκρίθηκε η αποτελεσματικότητά της τόσο με την θερμογραφία φάσης παλμού όσο και με την οπτική lock-in θερμογραφία.

#### *3.4.4.1. Μέθοδοι υπέρυθρης θερμογραφίας (θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση, θερμογραφία φάσης παλμού και οπτική lock-in θερμογραφία)*

Η μη καταστροφική αποτίμηση μίας κατασκευής με υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, την ενεργητική και την παθητική. Η ενεργητική θερμογραφία βασίζεται στο γεγονός ότι το υπό-εξέταση δοκίμιο διεγείρεται θερμικά για να δημιουργηθούν θερμοκρασιακές αντιθέσεις που θα αποκαλύψουν υπό-επιφανειακή βλάβη. Στο Κεφάλαιο 3.4.4 χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι ενεργητικής θερμογραφίας για τον χαρακτηρισμό της βλάβης του τρούλου αλλά και της κτητορικής επιγραφής της μονής «Μολυβδοσκεπάστου».

Η πρώτη μέθοδος που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε για την επίτευξη των παραπάνω ήταν η **θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση**. Κατά τη μέθοδο αυτή καταγράφηκε η αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας κατά της διάρκεια της θερμική διέγερσης. Η θερμική διέγερση επιτεύχθηκε με τη χρήση τεσσάρων λαμπτήρων πυρακτώσεως. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε την βαθμιαία θέρμανση της υπό-εξέτασης επιφάνειας για συνολικό χρόνο 100 δευτερολέπτων. Στα πρώτα 50 δευτερόλεπτα η τάση του ρεύματος των λαμπτήρων αυξανόταν βαθμιαία από τα 0 Volt ως τα 3 Volt και στα επόμενα 50 δευτερόλεπτα μειωνόταν από τα 3 Volt στα 0 Volt με σταθερό ρυθμό όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.12



Εικόνα 3.4.12. Θερμική διέγερση κατά την μέθοδο της θερμογραφίας με βαθμιαία θέρμανση

Ο ρυθμός αλλά και η διάρκεια της θερμικής διέγερσης επιλέχθηκαν κατόπιν προκαταρκτικών πειραμάτων ώστε να επιτευχθεί και ομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας αλλά και η θερμοκρασία να μην υπερβεί μια κρίσιμη τιμή των  $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , γεγονός που θα προκαλούσε επιπλέον βλάβη στις πολύτιμες τοιχογραφίες της μονής.

Επίσης στο Κεφάλαιο 3.4.4 εφαρμόστηκε και η μέθοδος της lock-in θερμογραφίας (LT). Στη μέθοδο αυτή η θέρμανση επιτεύχθηκε με περιοδική εναπόθεση θερμότητας στην επιφάνεια της εξεταζόμενης περιοχής. Συγκεκριμένα τα θερμικά κύματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη διέγερση ήταν ημιτονοειδή με συχνότητες από  $0,01\text{ Hz} - 0,2\text{ Hz}$  και παράχθηκαν μέσω λαμπτήρων πυρακτώσεως. 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 [36].

Επιπρόσθετα, για το χαρακτηρισμό της βλάβης στη μονή «Μολυβδοσκεπάστου» χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της θερμογραφίας φάσης – παλμού (PPT). Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της θερμογραφίας παλμού αλλά και της lock-in θερμογραφίας. Κατά τη θερμογραφία παλμού (PT) η υπό εξέταση επιφάνεια θερμαίνεται γρήγορα και έπειτα καταγράφεται η καμπύλη αποθέρμανσης με μια υπέρυθρη κάμερα. Η θερμογραφία φάσης παλμού βασίζεται κυρίως σε μετασχηματισμούς Fourier. Η καταγραφή της θερμοκρασίας πραγματοποιείται ακριβώς όπως και στη θερμογραφία παλμού. Στην περίπτωση όμως της PPT για κάθε εικονοστοιχείο «pixel» εξάγεται η χρονική εξέλιξη από την αλληλουχία των εικόνων που καταγράφηκαν, γεγονός που επιτρέπει τον υπολογισμό των εικόνων φάσης.

3.4.4.2. Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση της βλάβης στη μονή «Μολυβδοσκεπάστου» αποτελούνταν από τέσσερις λαμπτήρες πυρακτώσεως, ισχύος 1kW με δυνατότητα ρύθμισης συνεχούς τάσεως εύρους 0-10 Volt, ως πηγή θερμικής διέγερσης, μία μονάδα επεξεργασίας δεδομένων (H/Y), ένα lock-in ενισχυτή και δύο διαφορετικούς τύπους υπέρυθρης θερμικής κάμερας. Στην Εικόνα 3.4.13 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη στο εσωτερικό της μονής.



Εικόνα 3.4.13. Πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση βλάβης μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς

Για τον καλύτερο έλεγχο της μονής χρησιμοποιήθηκαν δύο υπέρυθρες θερμικές κάμερες οι οποίες έχουν την δυνατότητα ανίχνευσης διαφορετικού εύρους υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η θερμογραφία lock-in αλλά και η θερμογραφία φάσης παλμού διεξήχθησαν με μία κάμερα μέσου υπέρυθρου (MWIR) από 3-5  $\mu\text{m}$  της εταιρίας CEDIP με ρυθμό αποθήκευσης εικόνων τα 100 Hz (περισσότερες τεχνικές πληροφορίες βλέπε Κεφάλαιο 3.1). Αντίθετα, για την ανάπτυξη της μεθόδου θερμογραφίας με βαθμιαία

θέρμανση χρησιμοποιήθηκε υπέρυθρη κάμερα μεγάλου μήκους κύματος (LWIR) από 7,5-13 μm της εταιρίας Flir. Αναλυτικά χαρακτηριστικά της υπέρυθρης κάμερας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.2.

Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τοιχογραφίες και τα κονιάματα επικάλυψης της μονής δεν έχουν συγκεκριμένο συντελεστή εκπομπής λόγω της ανομοιογένειας τους, για την επίτευξη του θερμογραφικού ελέγχου ο συντελεστής εκπομπής ορίστηκε ως 0,75 σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [8, 9].

#### *3.4.4.3. Αποτελέσματα και Συζήτηση*

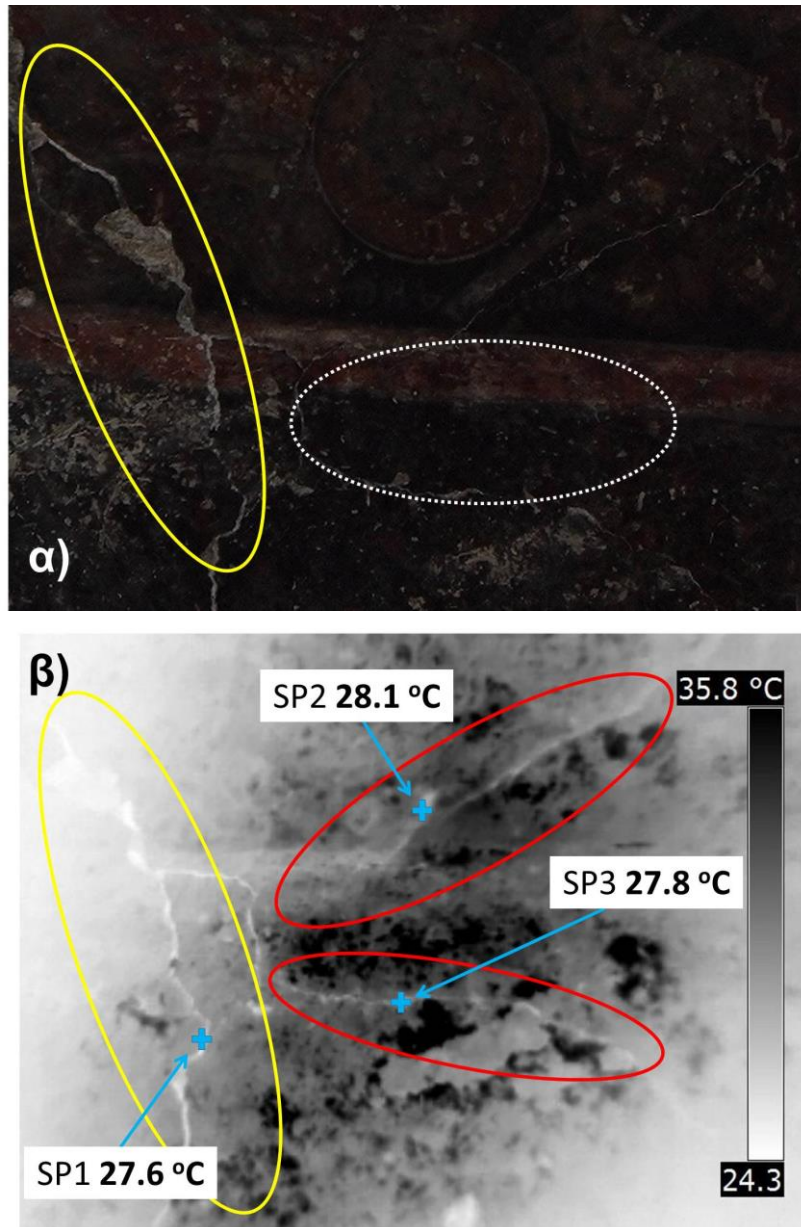
Ο έλεγχος της μονής «Μολυβδοσκεπάστου» πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Αρχικά εξετάστηκε οπτικά το εσωτερικό της μονής και εντοπίστηκαν οι περιοχές με σημαντικές βλάβες για την περαιτέρω μελέτη με τις μεθόδους θερμογραφίας που προαναφέρθηκαν.

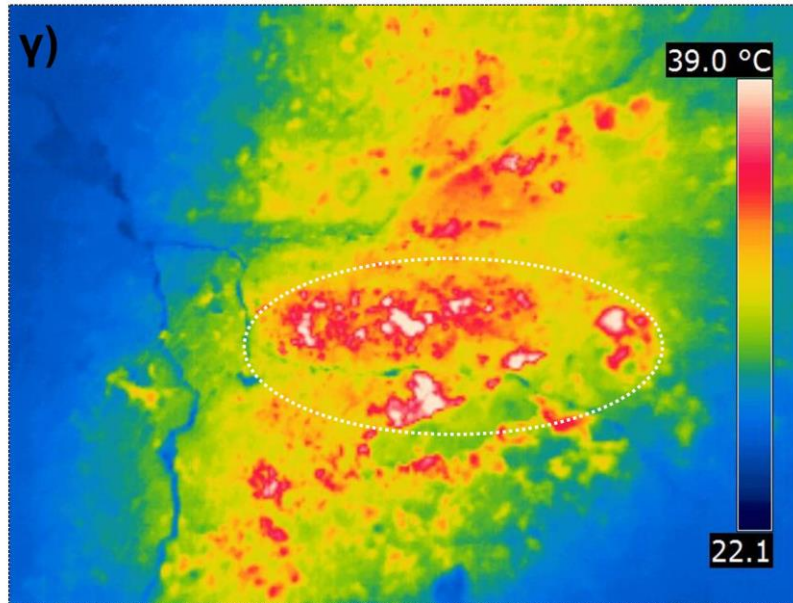
Μία από τις περιοχές που ελέγχθηκαν είναι ο τρούλος της μονής (Εικόνα 3.4.14α). Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ο τρούλος απέχει από το δάπεδο περίπου 5 μέτρα είναι αδύνατο να γίνει οπτική επιθεώρηση. Ως εκ τούτου, εφαρμόστηκε η θερμογραφία με βαθμιαία θέρμανση για τον χαρακτηρισμό της βλάβης των τοιχογραφιών του τρούλου. Στην ψηφιακή φωτογραφία (Εικόνα 3.4.14α) εμφανίζονται αρκετές επιφανειακές ρωγμές, ωστόσο στην Εικόνα 3.4.14β που αποτελεί το θερμογράφημα του τρούλου παρατηρείται η δριμύτητα των ρωγμών αυτών. Με κίτρινο κύκλο στις Εικόνες 3.4.14 α και β επισημαίνεται η ορατή ρωγμή. Ωστόσο, στο θερμογράφημα παρατηρούνται επιπλέον ρωγματώσεις σχεδόν αδύνατον να ανιχνευθούν οπτικά (κόκκινοι κύκλοι). Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας την οπτική εικόνα με το θερμογράφημα συμπεραίνεται πως οι ρωγμές που επισημαίνονται με κόκκινους κύκλους δεν αποτελούν μόνο επιφανειακή βλάβη αλλά είναι τόσο κρίσιμες όσο και αυτές που επισημαίνονται με κίτρινο κύκλο. Το παραπάνω διαπιστώνεται από το γεγονός ότι και τα δύο είδη ρωγμών εμφανίζουν ακριβώς την ίδια θερμοκρασία όπως φαίνεται από τους σταυρούς της Εικόνα 3.4.14β. Ακόμη, ο θερμογραφικός έλεγχος κατέδειξε σημεία πιθανής ύπαρξης αποκολλήσεων και αποσαθρώσεων στην τοιχογραφία του τρούλου. Στο θερμογράφημα στην Εικόνα 3.4.14γ εμφανίζεται σε ένα μέρος της τοιχογραφίας συσσωρευμένη θερμότητα γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη αποκόλλησης. Στην περίπτωση ενός υγιούς υποστρώματος η



Κεφάλαιο 3.4. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον χαρακτηρισμό της υπό-επιφανειακής βλάβης

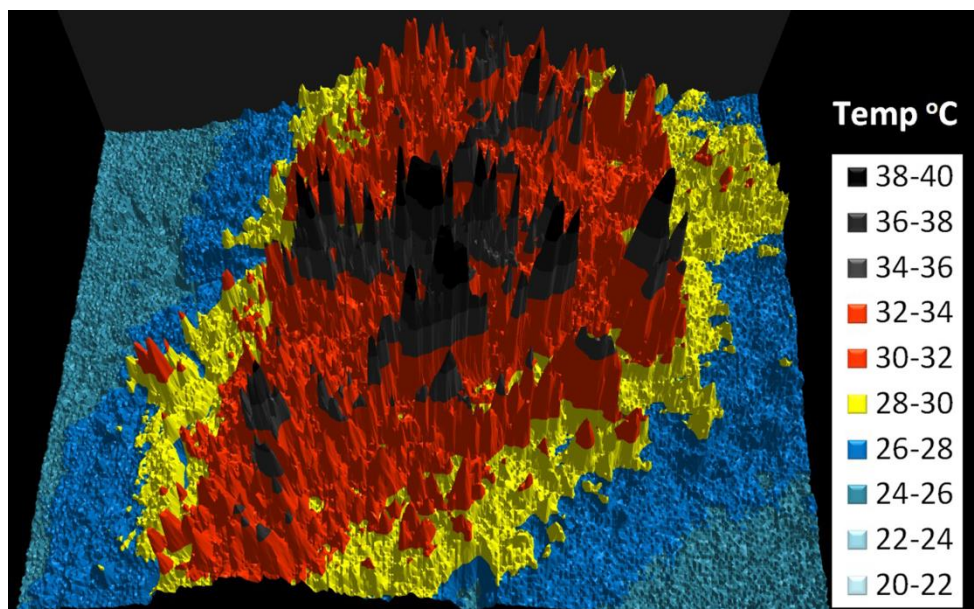
θερμοκρασιακή κατανομή θα ήταν ομοιόμορφη, ωστόσο αυτό δεν παρατηρείται στην Εικόνα 3.4.14γ. Η αποκολλημένη περιοχή σημειώνεται με διακεκομμένο κύκλο στις Εικόνες 3.4.14 α και γ.





Εικόνα 3.4.14. α) Τοιχογραφία του τρούλου της «Μονής Μολυβδοσκεπάστου», β) θερμογράφημα του τρούλου με ρωγμές, γ) θερμογράφημα του τρούλου με αποκολλήσεις

Για να τονισθεί η σημαντική διαφορά θερμοκρασίας στην αποκολλημένη περιοχή της τοιχογραφίας του τρούλου, στην Εικόνα 3.4.15 παρατίθεται η τρισδιάστατη χαρτογράφηση των θερμοκρασιών της συγκεκριμένης περιοχής.



Εικόνα 3.4.15. Τρισδιάστατη απεικόνιση των θερμοκρασιακών διαφορών του τρούλου



Στην Εικόνα 3.4.15 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή σε τρισδιάστατο γράφημα. Οι άξονες x και y αντιστοιχούν στα εικονοστοιχεία (pixels) του θερμογραφήματος της Εικόνας 3.4.14γ και ο κατακόρυφος άξονας στη θερμοκρασία του κάθε εικονοστοιχείου. Η αποκολλημένη περιοχή απεικονίζεται με γκρι και μαύρο χρώμα που αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες από 34 °C έως 40 °C. Από το θερμογραφικό έλεγχο της τοιχογραφίας του τρούλου της μονής προέκυψε πως χρήζει άμεσης αποκατάστασης – συντήρησης ώστε να αποφευχθεί περαιτέρω μη αναστρέψιμη βλάβη.

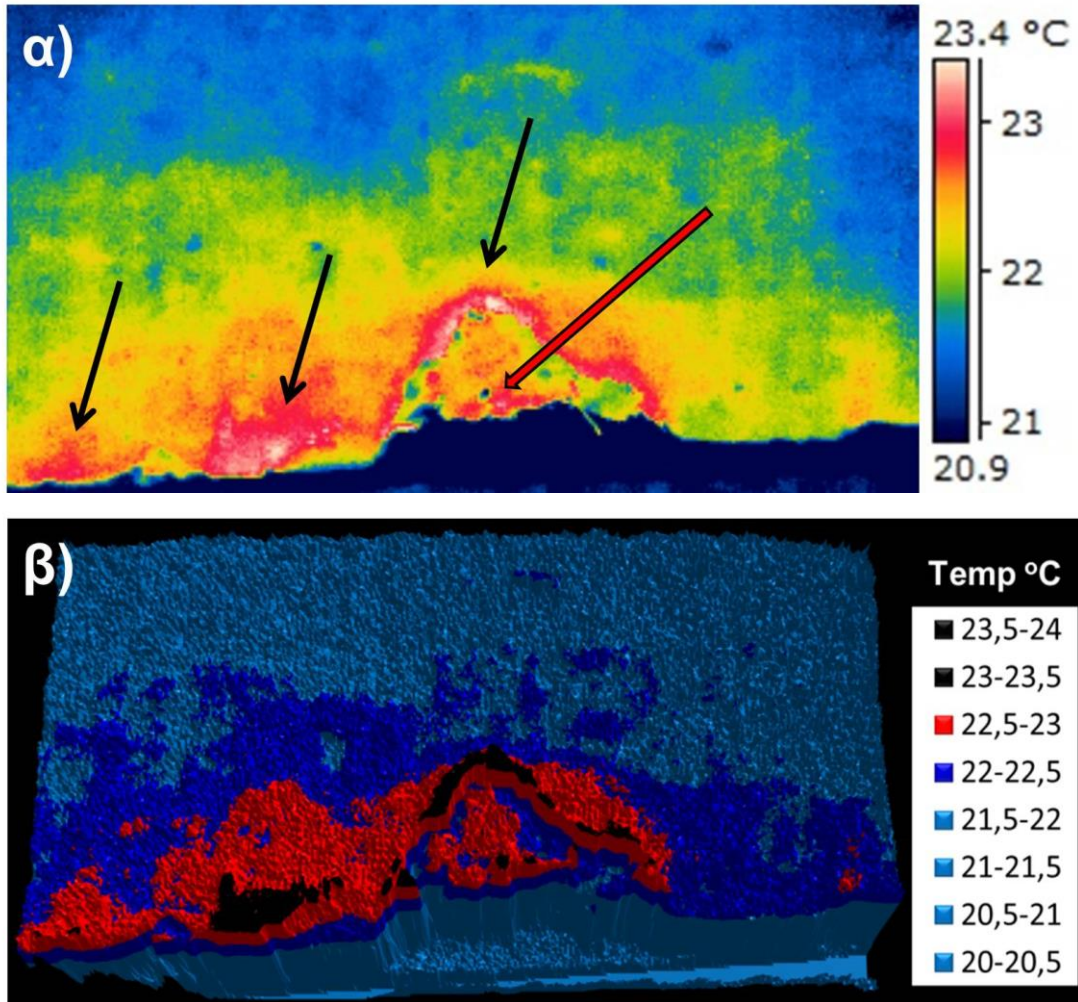
Μία ακόμη περιοχή μεγάλης ιστορικής αξίας που επιθεωρήθηκε μη καταστροφικά, ήταν η κτητορική επιγραφή που βρίσκεται πάνω από την δυτική είσοδο της μονής. Οι κτητορικές επιγραφές παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το χρόνο που χτίστηκε ή αναπαλαιώθηκε μία εκκλησία καθώς και άλλα σημαντικά ιστορικά στοιχεία. Μέρος αυτή της κτητορικής επιγραφής έχει καταστραφεί όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.16. Ως εκ τούτου, κρίθηκε σκόπιμο να ελεγχθεί η γύρω περιοχή για πιθανή ύπαρξη περαιτέρω βλάβης (βλέπε Εικόνα 3.4.16 κόκκινος κύκλος).



Εικόνα 3.4.16. Κτητορική επιγραφή της μονής

Κατά τον θερμογραφικό έλεγχο της κτητορικής επιγραφής εφαρμόστηκαν και οι τρεις μεθοδολογίες της υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιώντας δύο τύπους υπέρυθρης κάμερας (LWIR και MWIR). Όσον αφορά τον έλεγχο με τη θερμογραφία βαθμιαίας θέρμανσης, η αύξηση της θερμοκρασίας σε περιοχές κοντά στο κατεστραμμένο τμήμα της

επιγραφής φανέρωσε τρεις αποκολλημένες περιοχές που επισημαίνονται με μαύρα βέλη στην Εικόνα 3.4.17α.



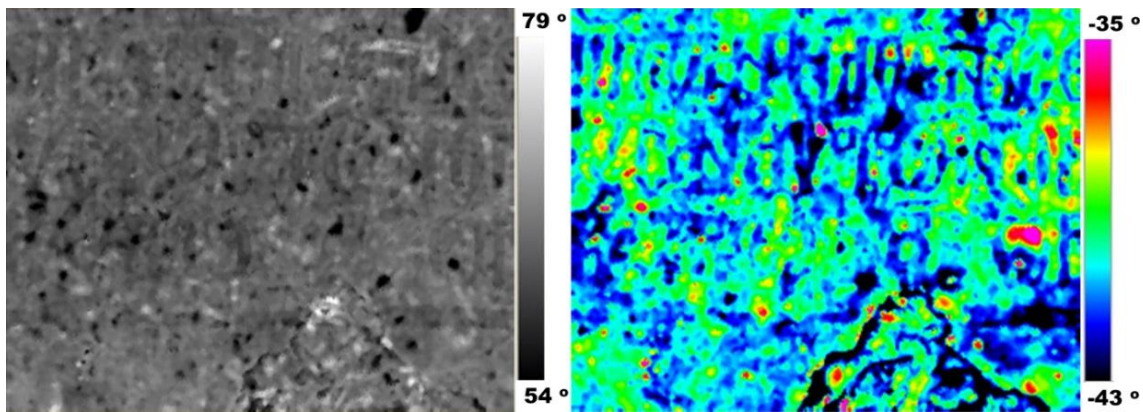
Εικόνα 3.4.17. α) Θερμογράφημα με τη μέθοδο της «θερμογραφίας με βαθμιαία θέρμανση» και β) τρισδιάστατη χαρτογράφηση θερμοκρασιών της κτητορικής επιγραφής

Η περιοχή της Εικόνας 3.4.17α που επισημαίνεται με κόκκινο βέλος αντιστοιχεί στο κατεστραμμένο τμήμα της επιγραφής (Εικόνα 3.4.16). Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται αύξηση στη θερμοκρασία λόγω των διαφορετικού βάθους επιτήρησης και επίσης γιατί η υποκείμενη επιγραφή (κατεστραμμένο τμήμα) είναι κατασκευασμένη από διαφορετικά δομικά υλικά. Ως εκ τούτου, η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτό το τμήμα δεν μπορεί να αποτελέσει ένδειξη για ύπαρξη υπό-επιφανειακής βλάβης.

Από τα δεδομένα του θερμογραφήματος της Εικόνας 3.4.17α κατασκευάστηκε η τρισδιάστατη χαρτογράφηση των θερμοκρασιών (Εικόνα 3.4.17β). Στην Εικόνα 3.4.17β

αποκαλύπτονται πιο έντονα οι αποκολλήσεις της επιγραφής με μαύρο χρώμα που αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες 23 °C - 24 °C.

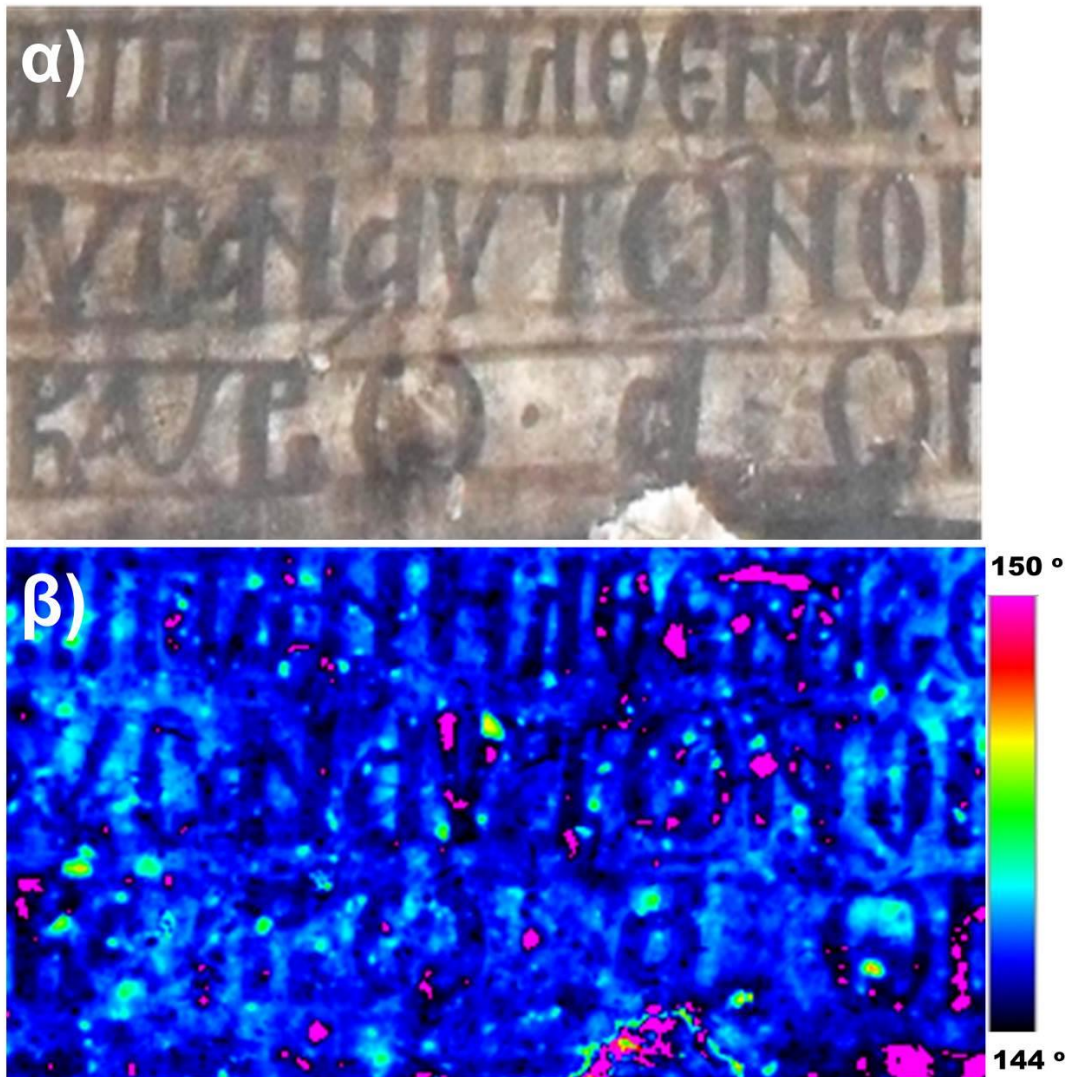
Για την αποτίμηση της βλάβης της επιγραφής χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδο της lock-in θερμογραφίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4.18. Στο θερμογράφημα της Εικόνας 3.4.18 εμφανίζονται ποικίλα μοτίβα διαφορετικού σχήματος και γεωμετρίας που οφείλονται στη μεταβολή «φάσης» και απεικονίζουν τη μικροδομή του κονιάματος της επιγραφής. Η μικροδομή του κονιάματος της εποχής που κατασκευάστηκε η μονή αποτελούνταν συνήθως από άχυρα, σύρματα και χαλίκια. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου έχει ως αποτέλεσμα την αξιολόγηση της μικροδομής της τοιχογραφίας.



Εικόνα 3.4.18. Θερμογραφήματα «φάσης» από θερμογραφία lock-in που απεικονίζουν τη μικροδομή του κονιάματος

Η κάμερα υπέρυθρου μέσου μήκους κύματος χρησιμοποιήθηκε επίσης και για την εφαρμογή της μεθόδου της θερμογραφίας φάσης παλμού. Από την εφαρμογή της μεθόδου προέκυψαν πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ατελειών. Στην Εικόνα 3.4.19 παρουσιάζονται α) η ψηφιακή οπτική φωτογραφία της επιγραφής και β) το θερμογράφημα φάσης που προέκυψε.





Εικόνα 3.4.19. α) Ψηφιακή οπτική φωτογραφία της επιγραφής και β) θερμογράφημα «φάσης» που απεικονίζει υπό-επιφανειακές ατέλειες

Στην Εικόνα 3.4.19β τα μωβ μοτίβα αντιστοιχούν σε υπό-επιφανειακές ατέλειες μη ορατές στην οπτική εικόνα (Εικόνα 3.4.19α). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθούν υπόψη κάποια σημαντικά ιστορικά στοιχεία σχετικά με την τεχνοτροπία των αγιογράφων της εποχής που χρονολογείται η μονή. Η τεχνοτροπία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 3.4.20 όπου απεικονίζεται μια υποκείμενη αγιογραφία. Συγκεκριμένα, οι αγιογράφοι εκείνης της εποχής, άνοιγαν τρύπες (Εικόνα 3.4.20) στο υποκείμενο κονίαμα ώστε η νέα τοιχογραφία να μπορεί να προσκολληθεί καλύτερα. Ως εκ τούτου, στην Εικόνα 3.4.19β η μεγάλη διαφορά σε φάση των μωβ περιοχών ( $\sim 5^\circ$ ) σε σύγκριση με την φάση των ορατών γραμμάτων αποτελεί ένδειξη αυτών των υπό-επιφανειακών ατελειών.



Εικόνα 3.4.20. Τοιχογραφία με τεχνητές τρύπες

Οι μωβ περιοχές (Εικόνα 3.4.19β) δεν έχουν το ίδιο σχήμα και την ίδια γεωμετρία με τις τρύπες της Εικόνας 3.4.20 λόγω του ότι οι τρύπες κάτω από την επιγραφή είναι μερικώς πληρωμένες με κονίαμα. Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτές οι τρύπες γινόταν με το χέρι με αποτέλεσμα να μην ακολουθείται το ίδιο μοτίβο. Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να εξαχθεί πως η θερμογραφία φάσης παλμού μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ατελειών.

### 3.4.5. Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.4.3 ασχολείται με το χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακής βλάβης σε σκυρόδεμα που μπορεί να προκληθεί από διάβρωση οπλισμού. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία για το γρήγορο και αξιόπιστο έλεγχο επιφανειών σκυροδέματος. Δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικά μεγέθη υπό-επιφανειακών ρωγμών ελέγχθηκαν με θερμογραφία. Όσον αφορά τις μεγάλες ρωγμές, τα θερμογραφήματα απεικόνισαν ξεκάθαρα την ύπαρξή τους, ενώ για ρωγμές που βρισκόταν σε μεγαλύτερο βάθος απαιτήθηκε ο υπολογισμός των μέσων θερμοκρασιών ώστε να μειωθούν η πιθανότητα εσφαλμένου εντοπισμού. Συγκεκριμένα, από την έρευνα του Κεφαλαίου 3.4.3 προέκυψε πως, με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, είναι δυνατός ο εντοπισμός υπό-επιφανειακών ρωγμών που βρίσκονται σε βάθος έως και 11 mm. Σε ένα ομοιογενές υλικό όπου η αποθέρμανση θα ήταν ομοιόμορφη το βάθος ανίχνευσης θα ήταν μεγαλύτερο. Επίσης, από την συγκεκριμένη μελέτη προέκυψε πως για να αυξηθεί το βάθος ανίχνευσης θα πρέπει να αυξηθεί και η θερμική διέγερση με αποτέλεσμα την αύξηση της φθοράς μίας κατασκευής. Η δυνατότητα, λοιπόν, ανίχνευσης ρωγμών σε βάθος 11 mm αποτελεί πολύ σημαντικό εύρημα αν ληφθεί υπόψη η ανομοιομορφία της μικροδομής του σκυροδέματος και ότι η θερμική διέγερση ήταν όση μπορεί να προσδώσει «φυσικά» ο ήλιος σε μια υφιστάμενη κατασκευή κατά τους θερινούς μήνες.

Στο Κεφάλαιο 3.4.4 αποδείχθηκε πως η υπέρυθη θερμογραφία αποτελεί μία ισχυρή μέθοδο για τη μη καταστροφική αποτίμηση της βλάβης σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Τόσο με την ανάπτυξη της νέας μεθόδου της θερμογραφίας με βαθμιαία θέρμανση όσο και με την εφαρμογή της lock-in θερμογραφίας και της θερμογραφίας φάσης παλμού κατέστη δυνατός ο χαρακτηρισμός της υποβάθμισης των τοιχογραφιών από απόσταση και εξάχθηκαν συμπεράσματα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την κατάσταση της βλάβης τους. Η συγκεκριμένη έρευνα οδήγησε επίσης στην αποτίμηση και ανίχνευση κρίσιμων υπό-επιφανειακών ρωγμών και αποκολλημένων περιοχών, ευρήματα πολύ σημαντικά για τη δομική ακεραιότητα τόσο των τοιχογραφιών όσο και της κτητορικής επιγραφής. Τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 3.4 δημοσιεύτηκαν στα [37-44].

### 3.4.6. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Wong BS, Tui CG, Bai W, Tan PH, Low BS, Tan KS. Thermographic evaluation of defects in composite materials. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 1999;41(8):504-9.
- [2] Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures. In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. Orlando, FL2001. p. 560-6.
- [3] Choi M-Y, Park J-H, Kang K-S, Kim W-T. Application of thermography to analysis of thermal stress in the NDT for compact tensile specimen. *Proc 12th PCNDT 2006*. 2006.
- [4] Kim W-T, Choi M-Y, Huh Y-H, Eom S-J. Measurement of thermal stress and prediction of fatigue for STS using Lock-in thermography. *Proc 12th PCNDT 2006*. 2006.
- [5] Plekhov O, Palin-Luc T, Saintier N, Uvarov S, Naimark O. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2005;28(1-2):169-78.
- [6] Krapez JC, Pacou D, Gardette G. Lock-in thermography and fatigue limit of metals. *Proc QIRT'2000*. 2000:277-82.
- [7] Yang B, Liaw PK, Wang G, Peter WH, Buchanan RA, Yokoyama Y, et al. Thermal-Imaging Technologies for Detecting Damage during High-Cycle Fatigue. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2004;35 A(1):15-23.
- [8] Avdelidis NP, Moropoulou A. Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*. 2003;35(7):663-7.
- [9] Moropoulou A, Avdelidis NP. Emissivity measurements on historic building materials using dual-wavelength infrared thermography. In: Rozlosnik AE, Dinwiddie RB, editors. 1 ed. Orlando, FL, USA: SPIE; 2001. p. 224-8.
- [10] Moropoulou A, Avdelidis NP. Role of emissivity in infrared thermographic imaging and testing of building and structural materials. In: Maldague XP, Rozlosnik AE, editors. 1 ed. Orlando, FL, USA: SPIE; 2002. p. 281-7.
- [11] Kandemir-Yucel A, Tavukcuoglu A, Caner-Saltik EN. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Physics & Technology*. 2007;49(3):243-8.
- [12] Moropoulou A, Avdelidis NP, Theoulakis P. Outdoor thermographic survey of historic structures. In: Cramer KE, Maldague XP, editors. 1 ed. Orlando, FL, USA: SPIE; 2003. p. 117-21.
- [13] Avdelidis NP, Moropoulou A. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*. 2004;5(1):119-27.
- [14] Avdelidis NP, Moropoulou A. IRT in the investigation of buildings and historic structures. In: Burleigh DD, Cramer KE, Peacock GR, editors. 1 ed. Orlando, FL, USA: SPIE; 2004. p. 150-7.

- [15] Avdelidis NP, Moropoulou A, Delegou ET. A thermographic study for the assessment of historic structures. 7th Quantitative Infrared Thermography Conference (QIRT). Brussels – Belgium 2004.
- [16] Meola C. Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Physics & Technology*. 2007;49(3):228-33.
- [17] Omar M, Hassan MI, Saito K, Alloo R. IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects. *Infrared Physics & Technology*. 2005;46(4):283-9.
- [18] Arndt RW. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. *Infrared Physics & Technology*. 2010;53(4):246-53.
- [19] Imposa S. Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy). *Journal of Cultural Heritage*. 2010;11(3):259-64.
- [20] Grinzato E, Bison PG, Marinetti S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage*. 2002;3(1):21-9.
- [21] Grinzato E, Bressan C, Marinetti S, Bison PG, Bonacina C. Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*. 2002;43(3–5):165-9.
- [22] Theodorakeas P, Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Avdelidis NP, Kouli M, Maldague X, et al. NDT inspection of plastered mosaics by means of transient thermography and holographic interferometry. *NDT & E International*. 2012;47(0):150-6.
- [23] Moropoulou A, Avdelidis NP, Kouli M, Delegou ET, Tsiourva T. Infrared thermographic assessment of materials and techniques for the protection of cultural heritage. In: Tong Q, Zhu Y, Zhu Z, editors. 1 ed. Wuhan, China: SPIE; 2001. p. 313-8.
- [24] Gayo E, de Frutos J. Interference filters as an enhancement tool for infrared thermography in humidity studies of building elements. *Infrared Physics & Technology*. 1997;38(4):251-8.
- [25] Ludwig N, Redaelli V, Rosina E, Augelli F. Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2004;46(1–2):161-6.
- [26] Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*. 1998;29(1):1-9.
- [27] Colantonio A. Thermal Performance Patterns on Solid Masonry Exterior Walls of Historic Buildings. *Journal of Building Physics*. 1997;21(2):185-201.
- [28] Tavukçuoğlu A, Düzgüneş A, Caner-Saltık EN, Demirci Ş. Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzıkarahan (Aksaray), Turkey. *NDT & E International*. 2005;38(5):402-10.
- [29] Karamperide A. Ζωγράφοι από το Γράμμο στην Ήπειρο του 17<sup>ου</sup> αιώνα, Στοιχεία από τις επιγραφές των έργων τους (In Greek). Ioannina 2003.
- [30] Papadopoulou B. Η Κόνιτσα και η ευρύτερη περιοχή κατά τη Βυζαντινή περίοδο (In Greek). Konitsa 1996.



- [31] Tsoures K. Ο κεραμοπλαστικός διάκοσμος των υστερο-βυζαντινών μνημείων της βορειοδυτικής Ελλάδος (In Greek). Kavala1988. p. 10; 1; 3; 49 – 50; 104 – 7; 21; 49; 51; 76.
- [32] Nicol DMG. The churches of Molyvdoskepastos: British School at Athens; 1953.
- [33] Papadopoulou B, Karamperide A. Βυζαντινά και Μεταβυζαντινά Μνημεία Μολυβδοςκεπάστου (In Greek). Ioannina2006.
- [34] Chatzidakis M. Έλληνες ζωγράφοι μετά την Άλωση (1450 – 1830) (In Greek). Athens1987.
- [35] Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading) ASTM C1609/C1609M-05. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 2005.
- [36] Ibarra-Castanedo C, Piau J-M, Guilbert S, Avdelidis NP, Genest M, Bendada A, et al. Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures. Research in Nondestructive Evaluation. 2009;20(1):1-31.
- [37] Kordatos EZ, Exarchos DA, Matikas TE, Stavrakos C, Moropoulou AI. Application of IR thermography to damage characterization of structures and the diagnosis of historic monuments. Ioannina2012. p. 77-81.
- [38] D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, A. Charalambopoulos, T. E. Matikas. Characterization of Subsurface Damage in Concrete Using Rayleigh Waves and Thermography. The 5th Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5). Kumamoto, Japan2009.
- [39] Kordatos EZ, Strantza M, Soulioti DV, Matikas TE, Aggelis DG. Combined NDT methods for characterization of subsurface cracks in concrete. San Diego, CA2011.
- [40] Aggelis DG, Kordatos EZ, Soulioti DV, Matikas TE. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. Construction and Building Materials. 2010;24(10):1888.
- [41] Kordatos EZ, Exarchos DA, Stavrakos C, Moropoulou A, Matikas TE. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. Construction and Building Materials. 2013.
- [42] Aggelis DG, Kordatos EZ, Strantza M, Soulioti DV, Matikas TE. NDT approach for characterization of subsurface cracks in concrete. Construction and Building Materials. 2011;25(7):3089-97.
- [43] Kordatos EZ, Soulioti DV, Strantza M, Matikas TM, Aggelis DG. Thermography and ultrasound for characterizing subsurface defects in concrete. In: Buyukozturk O, editor.2012. p. 193-8.
- [44] M. A. Strantza, E. Z. Kordatos, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, Aggelis DG. Use of thermography and ultrasound for characterization of subsurface cracks in concrete. 7th National Conference in Nondestructive Testing. Athens, Greece2010.



### **3.5. Ανάπτυξη νέας μη καταστροφικής τεχνικής «θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας»**

#### 3.5.1. Σκοπός – Αντικείμενο

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.5 σχετίζεται με την ανάπτυξη μίας καινοτόμου τεχνικής lock-in θερμογραφίας. Η νέα μέθοδος δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων & Μη Καταστροφικού Ελέγχου (MSS-NDE) του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Στη νέα μέθοδο που ονομάστηκε «θερμοηλεκτρική lock-in θερμογραφία», η θερμική διέγερση προκαλείται από ένα «θερμοηλεκτρικό στοιχείο». Στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι όχι μόνον να ανιχνεύσει πιθανή υπό-επιφανειακή βλάβη σε ένα υλικό, το οποίο επιτυγχάνεται και με άλλες συμβατικές μεθόδους θερμογραφίας, αλλά και να την ποσοτικοποιήσει. Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της, εφαρμόστηκε σε σύνθετα υλικά με τεχνητές ατέλειες.

#### 3.5.2. Εισαγωγή

Η συμβατική θερμογραφία (π.χ. θερμογραφία παλμού) βασίζεται στην καταγραφή της αποθέρμανσης ενός υλικού ενώ η lock-in θερμογραφία στην ανάλυση των θερμικών κυμάτων (θερμοκρασιακών διαφορών) που προκύπτουν λόγω της αντίδρασης του υλικού στην περιοδική θερμική διέγερση [1]. Το 1979 οι Nordal και Kanstad παρουσίασαν φωτοθερμικές (photothermal) μετρήσεις που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και την τοπική θερμική διάχυση των υλικών [2] όπως αναφέρθηκε στο [1]. Το μειονέκτημα της μεθόδου των συγκεκριμένων πινακοποιημένων (raster) εικόνων είναι ο χρόνος που αφιερώνεται για να επιτευχθεί σάρωση σημείο-προς-σημείο με υψηλότερο βάθος παρατήρησης. Η ανάπτυξη της lock-in θερμογραφίας [3-5] όπως αναφέρθηκε στον [1] έλυσε το παραπάνω πρόβλημα καθώς κατέστη εφικτή η διεξαγωγή μετρήσεων, ακόμη και σε χαμηλές συχνότητες, σε πολύ μικρό χρόνο. Η βασική ιδέα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η κωδικοποίηση της θερμικής ροής με τέτοιο τρόπο ώστε όταν αποκωδικοποιηθεί μέσω

ανάλυσης Fourier να επαλειφθούν τυχόν διαταραχές. Επίσης, ένα πλεονέκτημα της είναι ότι με τη χρήση των εικόνων φάσης μειώνεται η επίδραση των εξωτερικών επιρροών, όπως ανομοιογένεια του συντελεστή εκπομπής και ανομοιόμορφη θέρμανση.

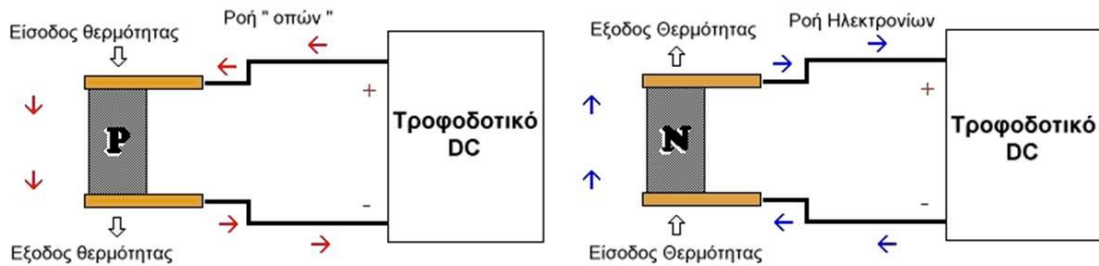
Μία ακόμη τεχνική, είναι η lock-in θερμογραφία με υπέρηχους [6, 7], κατά την οποία η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στην μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι ευαίσθητη στην ανίχνευση ατελειών λόγω της υψηλής υστέρησης που παρουσιάζουν τα κύματα υπερήχων στις περιοχές με βλάβη. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιηθεί θερμική τομογραφία των ατελειών. Αν αντί για σήμα διαμορφωμένου πλάτους εναποτεθεί στην επιφάνεια του δοκιμίου σήμα υπερήχων με ριπές [8] τότε η ανάλυση Fourier μπορεί να παρέχει εικόνες φάσης σε διαφορετικές συχνότητες, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα αξιολόγησης της βλάβης των υλικών. Ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι η θερμική διέγερση με υπέρηχους επιτυγχάνεται μέσω επαφής των αισθητήρων με το δοκίμιο. Αν και οι Ταο κ.ά. [9], στη μέθοδο που ανέπτυξαν, κατάφεραν να επιτύχουν θερμική διέγερση με υπέρηχους από απόσταση.

Η τεχνική θερμογραφίας lock-in με δινορεύματα [1] αποτελεί μία εναλλακτική μέθοδο μη επαφής που ανιχνεύει επίσης ατέλειες λόγω των ηλεκτρικών απωλειών. Η λειτουργία της βασίζεται στη θερμική διέγερση του παράγεται μέσω επαγωγικού πηνίου εισάγοντας δινορεύματα σε αγωγία υλικά και την ανίχνευση της θερμότητας μέσω υπέρυθρης κάμερας.

### 3.5.3. Αρχή λειτουργίας της «θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας»

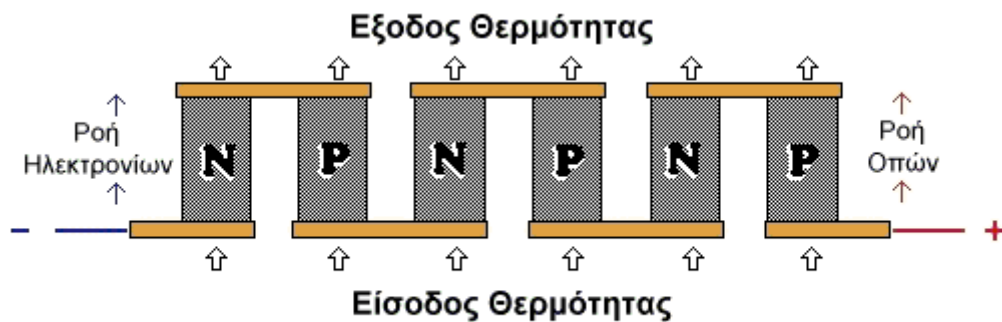
Η τεχνική της θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας βασίζεται στη δημιουργία θερμικών κυμάτων μέσα στο δοκίμιο από εναπόθεση θερμότητας περιοδικά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Οι θερμοκρασιακές διαφορές που δημιουργούνται λόγω της αντίδρασης του υλικού στη θερμική διέγερση, ανιχνεύονται από μία υπέρυθρη κάμερα. Στην περίπτωση της «θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας» η θερμική διέγερση προκαλείται από ένα «θερμοηλεκτρικό στοιχείο» («ΘΗΣ» peltier element). Η λειτουργία του θερμοηλεκτρικού στοιχείου βασίζεται στο φαινόμενο Peltier. Το συγκεκριμένο φαινόμενο δημιουργείται όταν μία επαφή αγωγών ή ημιαγωγών κατασκευασμένων από

διαφορετικά υλικά διαρρέεται από ρεύμα. Ανάλογα με τη φορά του ρεύματος, η επαφή απορροφά ή εκλύει θερμότητα. Οι συγκεκριμένες επαφές είναι τύπου P και N (Εικόνα 3.5.1).



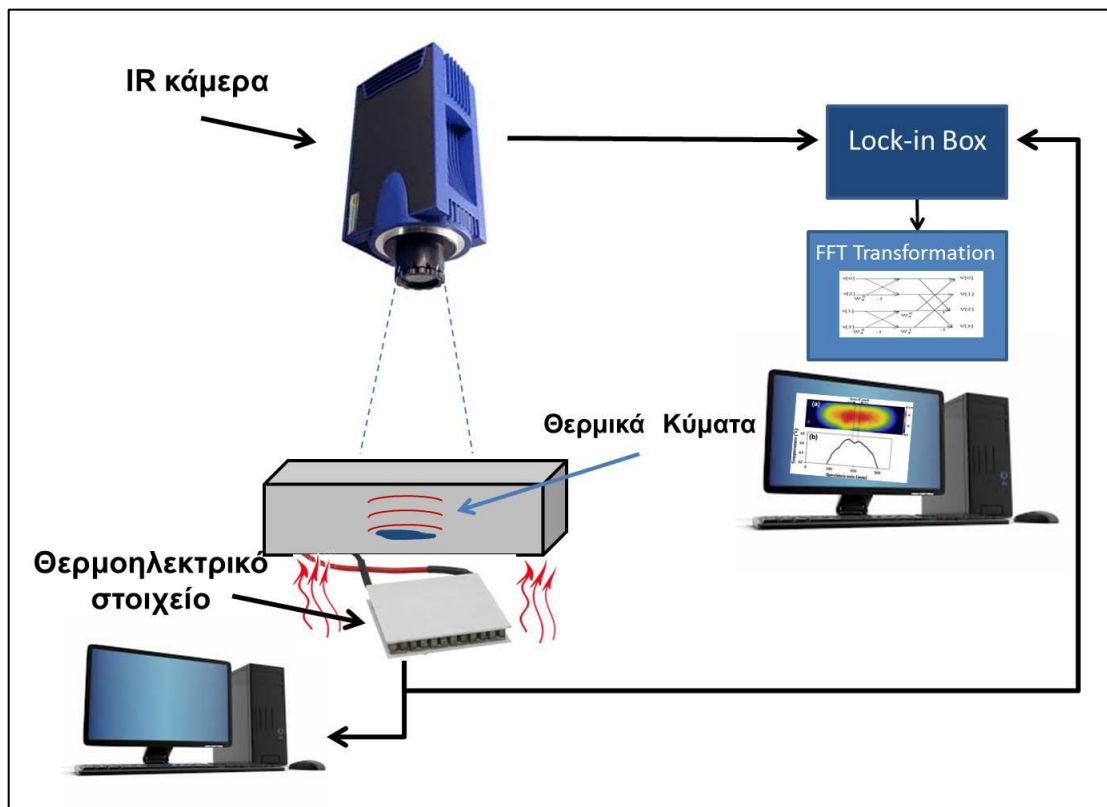
Εικόνα 3.5.1. Επαφές τύπου P και N [10]

Αν δημιουργηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στη διάταξη (Εικόνα 3.5.1), τότε θα υπάρξει ροή θερμότητας από τη μία επαφή στην άλλη. Η ροή θερμότητας έχει την ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση της μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή την πολικότητα του ρεύματος. Στην περίπτωση ημιαγωγού τύπου N, η μεταφορά του φορτίου πραγματοποιείται από ηλεκτρόνια, ενώ σε ημιαγωγό τύπου P από «οπές». Για την κατασκευή ενός αποδοτικού θερμοηλεκτρικού στοιχείου απαιτείται η συνδεσμολογία της Εικόνας 3.5.2, όπου οι επαφές τύπου P και N (συνήθως περισσότερες από 127) ανάλογα με τη φορά του ρεύματος καθορίζουν τη «θερμή» και την «ψυχρή» πλευρά του στοιχείου.



Εικόνα 3.5.2. Λειτουργία θερμοηλεκτρικού στοιχείου [10]

Η αρχή λειτουργίας της θερμοηλεκτρικής θερμογραφίας lock-in παρουσιάζεται στο σχήμα της Εικόνας 3.5.3. Αρχικά, εναποτίθεται περιοδικά θερμότητα στο υπό-εξέταση δοκίμιο με τη χρήση ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου και η θερμική απόκριση του υλικού ανιχνεύεται από μία υπέρυθρη κάμερα. Στη συνέχεια, η κυματομορφή της περιοδικής διέγερσης συγχρονίζεται με το σήμα της κάμερας, με τη βοήθεια του lock-in, ώστε το σήμα που θα προκύψει να είναι απαλλαγμένο από «θόρυβο». Τέλος, τα δεδομένα που ανίχνευσε η υπέρυθρη κάμερα επεξεργάζονται με μετασχηματισμούς Fourier ώστε να προκύψουν θερμογραφήματα φάσης.

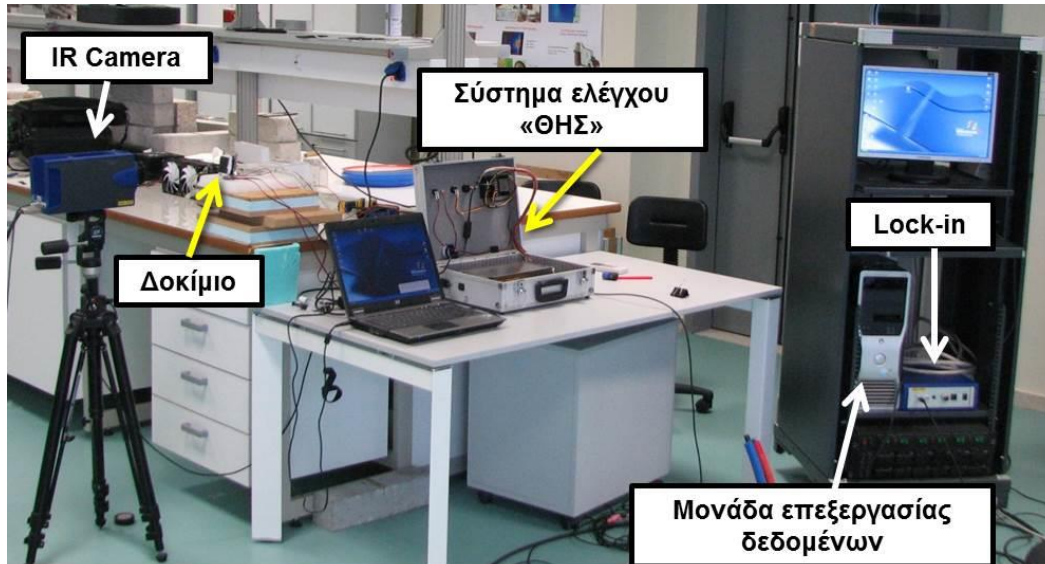


Εικόνα 3.5.3. Αρχή λειτουργίας «θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας»

### 3.5.4. Πειραματική διάταξη – Ανάπτυξη τεχνικής

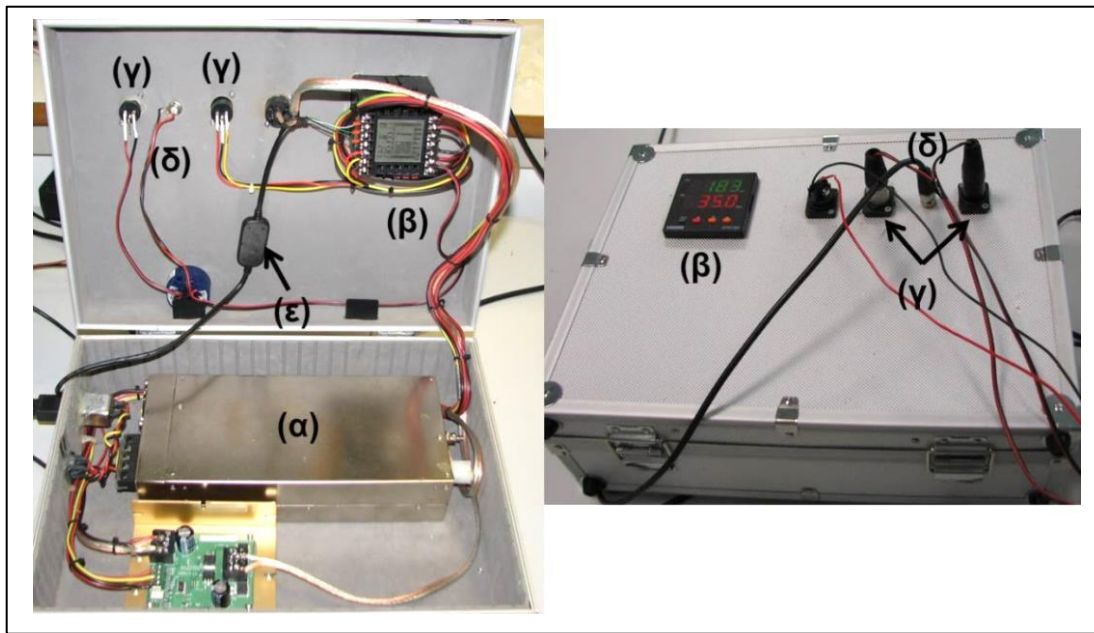
Στην Εικόνα 3.5.4 εμφανίζεται η πειραματική διάταξη της νέας μεθόδου lock-in όπως αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων & Μη Καταστροφικού Ελέγχου (MSS-NDE) του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Συγκεκριμένα, η

διάταξη περιλαμβάνει μία υπέρυθη κάμερα, το θερμοηλεκτρικό στοιχείο και το σύστημα ελέγχου του για τη δημιουργία περιοδικής διέγερσης, το lock-in, το υπό-εξέταση δοκίμιο και τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων.



Εικόνα 3.5.4. Πειραματική διάταξη

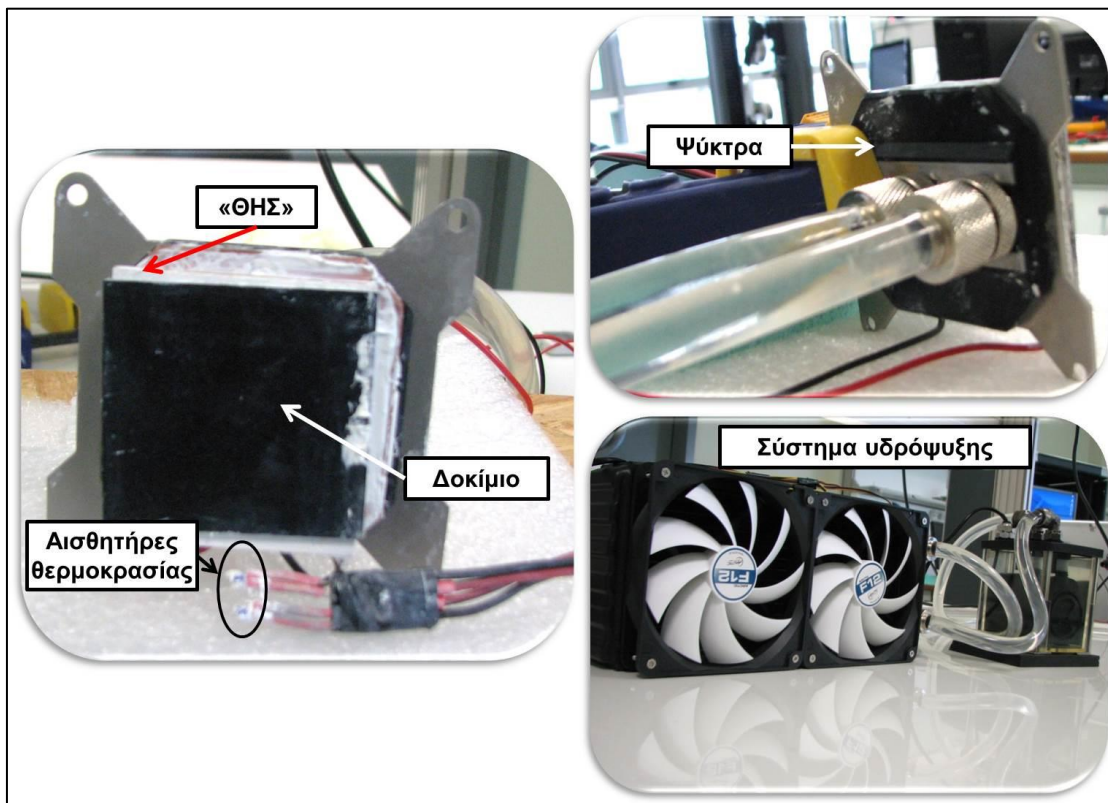
Όσον αφορά τη δημιουργία περιοδικής θερμικής διέγερσης και τον έλεγχο του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, αρχικά σχεδιάστηκε το σύστημα ελέγχου της Εικόνας 3.5.5. Το σύστημα περιλαμβάνει ένα τροφοδοτικό (α) συνεχούς τάσης ισχύος 700Watt για την τροφοδοσία του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, έναν ελεγκτή (β) ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα μορφοποίησης του ηλεκτρικού σήματος του «ΘΗΣ» και τη δυνατότητα ανάγνωση θερμοκρασίας, δύο αισθητήρες θερμοκρασίας (γ), μία έξοδο (δ) του σήματος αναφοράς για την επίτευξη του συγχρονισμού με το lock-in και δυνατότητα χειρισμού του ελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου «usb» (ε).



Εικόνα 3.5.5. Σύστημα ελέγχου θερμοηλεκτρικού στοιχείου

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 3.5.6 παρουσιάζεται το σύστημα θερμικής διέγερσης το οποίο απαρτίζεται από το «ΘΗΣ», τους αισθητήρες θερμοκρασίας και το σύστημα υδρόψυξης με τη χάλκινη ψύκτρα. Αναλυτικά, το υπό-εξέταση δοκίμιο τοποθετείται στη μία πλευρά του «ΘΗΣ», ενώ στην άλλη πλευρά του προσαρτάται η ψύκτρα. Κατά τη λειτουργία του «ΘΗΣ», σύμφωνα με το φαινόμενο peltier, η μία πλευρά του είναι θερμή ενώ η άλλη είναι ψυχρή. Αλλάζοντας την πολικότητα του ρεύματος παρέχεται η δυνατότητα να επιτευχθεί εναλλαγή της θερμής με την ψυχρή πλευρά, με αποτέλεσμα την ελεγχόμενη θέρμανση και ψύξη του δοκιμίου. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο αισθητήρων θερμοκρασίας τύπου «PT100», με διακριτικότητα 0,01 °C. Για να επιτευχθεί γρήγορη αλλά και σταθερή ψύξη του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε σύστημα υδρόψυξης για την άμεση απαγωγή της θερμότητας.





Εικόνα 3.5.6. Σύστημα θερμικής διέγερσης

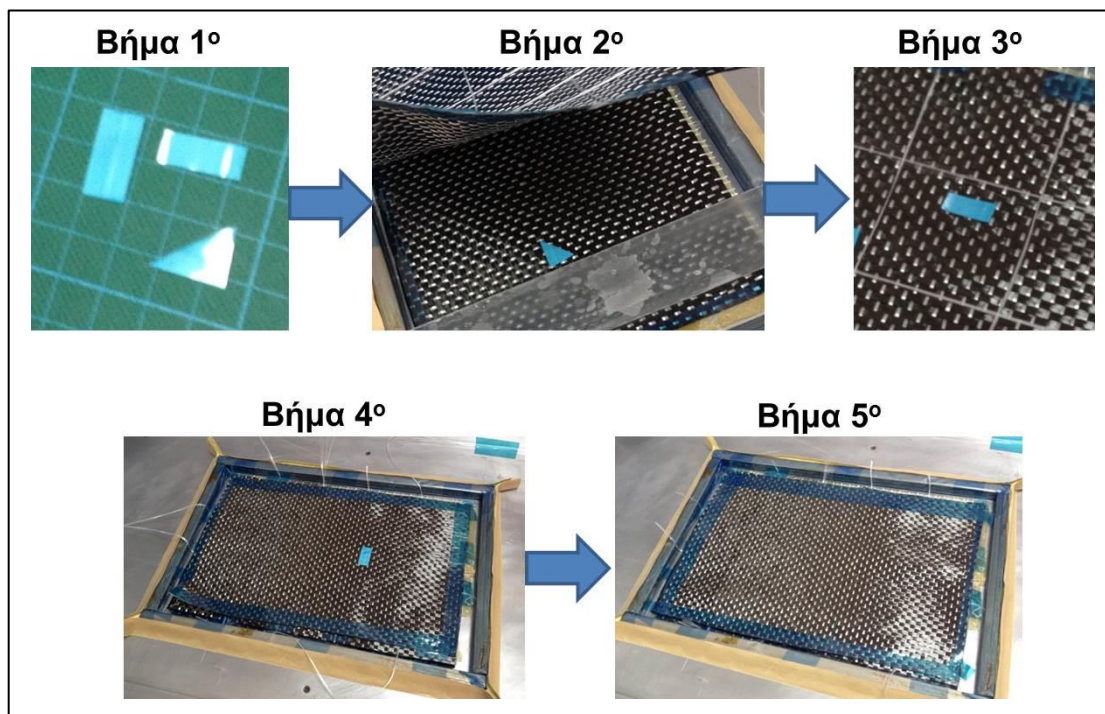
Ο υπέρυθρη κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση και την απεικόνιση των θερμοκρασιακών διαφορών είναι μεσαίου μήκους κύματος (MWIR) της εταιρίας CEDIP με εύρος ανίχνευσης στο υπέρυθρο 3-5  $\mu\text{m}$  και εύρος θερμοκρασιών 5  $^{\circ}\text{C}$  – 120  $^{\circ}\text{C}$ . Αναλυτικά χαρακτηριστικά της υπέρυθρης κάμερας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.5 του Κεφαλαίου 3.1.

### 3.5.5. Εφαρμογή της «θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας»

Με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της καινοτόμου μεθόδου lock-in που αναπτύχθηκε, εξετάστηκαν σύνθετα υλικά με τεχνητές εσωτερικές ατέλειες. Συγκεκριμένα, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σύνθετα με πολυμερική μήτρα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. (CFRP). Τέτοιου είδους υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές λόγω της αυξημένης αντοχής τους. Όμως, λόγω της

μικροδομής τους εμφανίζουν συχνά εσωτερικές ατέλειες όπως διαστρωματικές αποκολλήσεις, εγκλείσματα κ.ά. οι οποίες δεν είναι συνήθως εύκολα ανιχνεύσιμες.

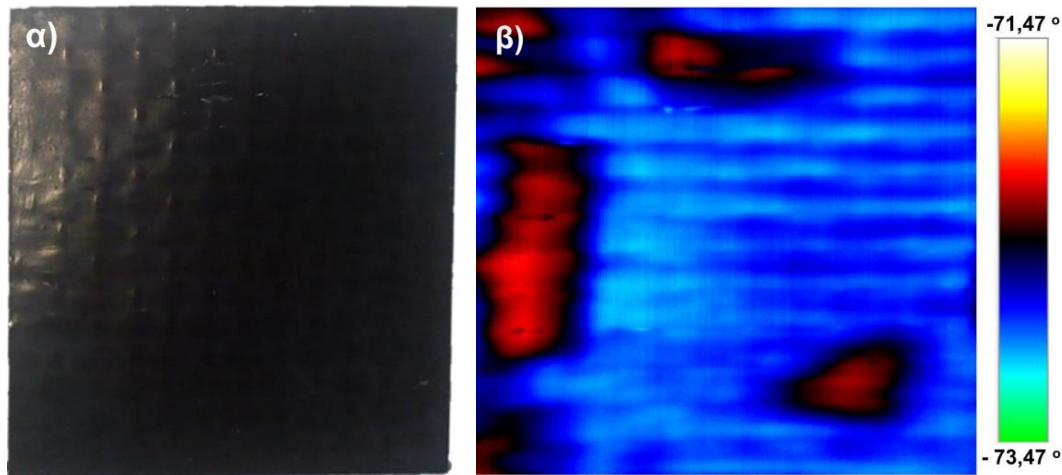
Στην Εικόνα 3.5.7 απεικονίζεται η γεωμετρία των τεχνητών ατελειών από πολυτετραφθοροαιθυλένιο («τεφλόν», PTFE) και η διαδικασία εισαγωγής τους στο σύνθετο υλικό. Η κάθε μία ατέλεια εισήχθη σε διαφορετική στρώση φύλλου ινών άνθρακα. Το σύνθετο αποτελείται από τέσσερις στρώσεις φύλλων ινών άνθρακα μονής κατεύθυνσης και ένα φύλλο ρητίνης. Η παρασκευή του υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του διαποτισμού φύλλων ρητίνης σε αυτόκλειστο φούρνο (autoclave) της εταιρίας Aeroform για 2 ώρες στους 130 °C. Το δοκίμιο είχε διαστάσεις 50 mm x 50 mm και παρασκευάστηκε στο Εργαστήριο Σύνθετων και Νανοδομημένων Υλικών του Ινστιτούτου Χημικής Μηχανικής και Χημικών Διεργασιών Υψηλής Θερμοκρασίας (ΕΙΧΗΜΥΘ).



Εικόνα 3.5.7. Στάδια εισαγωγής τεχνητών ατελειών

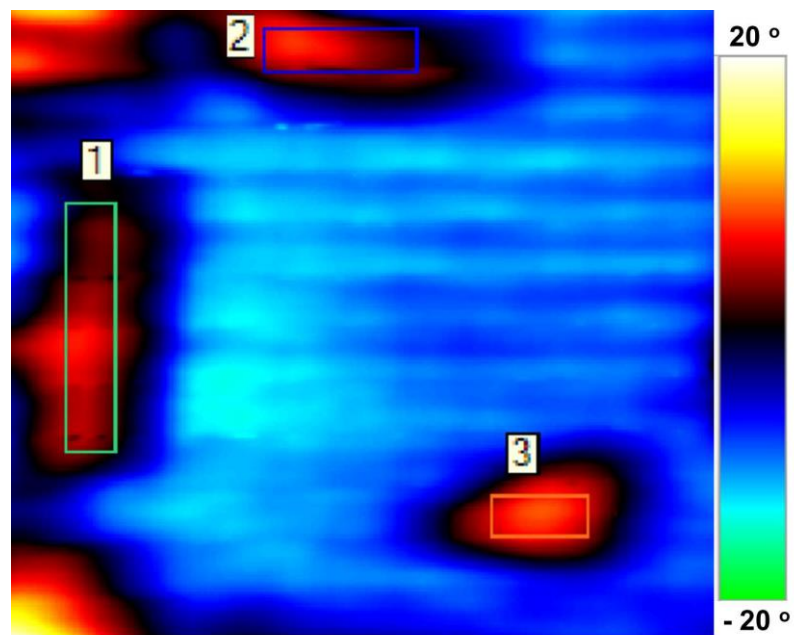
Ο έλεγχος των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόστηκε η μέθοδος θερμογραφίας φάσης – παλμού, στην οποία όμως η θερμική διέγερση επιτεύχθηκε μέσω της νέα μεθόδου του θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Παράχθηκε

ένας παλμός συνολικής διάρκειας 30 δευτερολέπτων και καταγράφηκε η αποθέρμανση του δοκιμίου με την υπέρυθη κάμερα. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν με μετασχηματισμούς Fourier και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5.8β. Όπως είναι εμφανές, οι τεχνητές ατέλειες στο δοκίμιο δεν είναι οπτικά ορατές, σε αντίθεση με το θερμογράφημα της μεθόδου φάσης παλμού, όπου οι ατέλειες παρατηρούνται με σαφήνεια.



Εικόνα 3.5.8. α) Ψηφιακή φωτογραφία δοκιμίου και β) θερμογράφημα θερμογραφίας φάσης - παλμού

Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόστηκε η νέα μέθοδος της lock-in θερμογραφίας και το θερμογράφημα απεικονίζεται στην Εικόνα 3.5.9. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο στο θερμογράφημα οι ατέλειες είναι εμφανείς. Στη συγκεκριμένη όμως μέθοδο μπορούν να εξαχθούν εκτός από ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα. Η κλίμακα του θερμογραφήματος της Εικόνας 3.5.9 έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με το θερμογράφημα της Εικόνας 3.5.8 με αποτέλεσμα να παρέχει και πληροφορίες σχετικά με το βάθος των ατελειών. Ως εκ τούτου, οι τιμές της φάσης των ατελειών καθορίστηκαν μέσω του λογισμικού Altair ως η μέση τιμή των πλαισίων 1, 2 και 3 (βλέπε Πίνακα 3.5.1). Από το συγκεκριμένο υπολογισμό που δείχνει ότι οι ατέλειες έχουν διαφορετικό βάθος, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι βρίσκονται σε διαφορετικές στρώσεις στο εσωτερικό του συνθέτου. Γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη διαδικασία παρασκευής του υλικού που αναφέρθηκε παραπάνω (βλέπε Εικόνα 3.5.7)



Εικόνα 3.5.9. Θερμογράφημα θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας

Πίνακας 3.5.1. Βάθος ατελειών (μέθοδος θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας)

	<b>Ατέλεια 1</b>	<b>Ατέλεια 2</b>	<b>Ατέλεια 3</b>
<b>Βάθος (°)</b>	3,382	4,323	6,816

### 3.5.6. Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.5 είχε ως στόχο την ανάπτυξη καινοτόμου μη καταστροφικής τεχνικής, της θερμοηλεκτρικής lock-in θερμογραφίας, η οποία βασίζεται στη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας. Η αποτελεσματικότητα της νέας τεχνικής εξετάστηκε για την ανίχνευση ατελειών σε σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η νέα τεχνική έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει υπό-επιφανειακές ατέλειες. Επιπλέον, λόγω του νέου τρόπου θερμικής διέγερσης, καθίσταται δυνατή η πιο ομοιόμορφη θέρμανση και αποθέρμανση του υλικού σε σχέση με άλλες μεθόδους lock-in, γεγονός που οδηγεί στην καλύτερη μη καταστροφική αξιολόγηση των υλικών. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι όμως ότι, εκτός της ποιοτικής αξιολόγησης της βλάβης σε ένα υλικό, μπορεί να παρέχει πληροφορίες που επιπλέον την ποσοτικοποιούν. Περαιτέρω μελέτη είναι αναγκαία για τη βελτιστοποίηση της νέας τεχνικής.

### 3.5.7. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Riegert G, Zweschper T, Busse G. Lockin thermography with eddy current excitation. QIRT Journal. 2004;1(1):21-31.
- [2] Nordal P.-E., Kanstad S.O., Photothermal radiometry, Physica Scripta 20, 1979, p. 659-662 P 42 03 272: Verfahren zur phasenempfindlichen Darstellung eines effektmodulierten Gegenstandes, Patentschrift;1992.
- [3] Carlomagno G.M., Berardi P.G., Unsteady thermography in nondestructive testing, Proceedings of the 3rd Biannual Information Exchange, p. 33-39, St. Louis/USA;1976.
- [4] Beaudoin J. L., Marianne E., Danjoux R., M. E. Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry SPIE Infrared technology and applications,1985. p. p. 287.
- [5] Kuo P.K., Feng Z.J., Ahmed T., Favro L.D., Thomas R.L., Hartikainen J. Parallel thermal wave imaging using a vector lockin video technique Photoacoustic and Photothermal Phenomena Heidelberg: Publ. P. Hess und J. Pelzl, Springer-Verlag 1988.
- [6] Rantala J, Wu D, Busse G. Amplitude-modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites. Research in Nondestructive Evaluation. 1995;7(4):215-28.
- [7] Dillenz A, Busse G, Wu D. Ultrasound lock-in thermography: feasibilities and limitations. 1999:10-5.
- [8] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography. Journal of Applied Physics. 1996;79(5):2694-8.
- [9] Tao N, Zeng Z, Feng L, Chen D, Li Y, Zhang C. Noncontact ultrasonic excitation thermography inspection technique. 2010:78543S-S.
- [10] <http://new-electronics.gr>.

# Κεφάλαιο 4

---

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ο μη καταστροφικός χαρακτηρισμός της βλάβης υλικών μέσω ανάλυσης της θερμό-μηχανικής συμπεριφοράς τους με μη καταστροφικές μεθόδους. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου αναπτύχθηκαν καινοτόμες μεθοδολογίες και τεχνικές βασισμένες στην υπέρυθρη θερμογραφία και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν με συμβατικές μεθόδους, αλλά και με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής.

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ανάπτυξη και διάδοση ρωγμής σε υλικά που υποβάλλονται σε κυκλικές μηχανικές φορτίσεις και χαρακτηρίστηκε το επίπεδο βλάβης τους ως συνάρτηση των κύκλων κόπωσης προσδιορίζοντας τις θερμικές παραμέτρους τους. Επιπλέον, καθορίστηκε το όριο κόπωσης μέσω μίας νέας μεθοδολογίας που συνδυάζει δύο μη καταστροφικές μεθόδους, την υπέρυθρη θερμογραφία και την ακουστική εκπομπή. Αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία βασισμένη στην υπέρυθρη θερμογραφία για τον χαρακτηρισμό της υπό-επιφανειακής βλάβης σε κατασκευές από σκυρόδεμα και εφαρμόστηκε σε υφιστάμενη κατασκευή μεγάλης ιστορικής σημασίας για την ελληνική πολιτιστική κληρονομιά. Επίσης, επιτεύχθηκε η ανάπτυξη καινοτόμου μεθόδου lock-in θερμογραφίας ικανής να ανιχνεύσει πιθανή υπό-επιφανειακή βλάβη σε υλικά.

Στο Κεφάλαιο 3.1 αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες βασισμένες στην υπέρυθρη θερμογραφία και την ακουστική εκπομπή για τη μελέτη της συμπεριφοράς θραύσης μονολιθικών αλλά και σύνθετων υλικών μήτρας μεταλλικής ή κεραμικής. Με τη μέθοδο της θερμογραφίας προσδιορίστηκε επιτυχώς ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής τόσο σε δοκίμια μονολιθικού αλουμινίου όσο και σε σύνθετα μεταλλικά υλικά με μήτρα αλουμινίου και τα αποτελέσματα βρέθηκαν να είναι σε συμφωνία με αυτά της συμβατικής μεθόδου. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα καθώς α) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση της ανάπτυξης ρωγμής και την πλήρη πρόβλεψη της διαδρομής της ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η ρωγμάτωση δεν είναι εμφανής στην επιφάνεια του δοκιμίου, β) επιτρέπει την έγκαιρη πρόβλεψη της επερχόμενης θραύσης του δοκιμίου και μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλες γεωμετρίες δοκιμίων για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής ακόμη και εκεί όπου με τη συμβατική μέθοδο ο προσδιορισμός είναι αδύνατος. Επιπλέον, πολλές παράμετροι ακουστικής εκπομπής παρουσίασαν σαφείς μεταβολές πολύ νωρίτερα από την τελική θραύση του

δοκιμίου, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην εναλλαγή των τύπων θραύσης. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων δίνει τη δυνατότητα για έγκαιρη πρόβλεψη της αστοχίας ενός υλικού.

Ακόμη συμπεραίνεται ότι η υπέρυθη θερμογραφία, ως μέθοδος ευρέως πεδίου, έχει δυνατότητα εφαρμογής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της δομής και μπορεί με πολύ ακρίβεια να προβλέψει το χρόνο, την ακριβή τοποθεσία έναρξης της ρωγμής, καθώς και τη διάδοσή της σε σύνθετα υλικά με κεραμική μήτρα που υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση. Επίσης, είναι ικανή να προβλέψει τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής του σύνθετου υλικού. Το γεγονός ότι η υπέρυθη θερμογραφία αποτελεί μία ισχυρή μέθοδο για το χαρακτηρισμό της βλάβης και τη μελέτη του τρόπου διάδοσης μίας ρωγμής ενισχύεται από το ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής ήταν σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματά της ακουστικής εκπομπής.

Αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία υπέρυθρης θερμογραφίας που αποδείχθηκε ότι έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει με μεγάλη ακρίβεια το μήκος μίας ρωγμής και να ξεπεράσει τυχόν προβλήματα που προκύπτουν με τη συμβατική μέθοδο σε σύνθετα δοκίμια γεωμετρίας τύπου «CT» που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα ενισχύεται αν ληφθεί υπόψη ότι και τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής συμφωνούν απόλυτα με αυτά της θερμογραφίας.

Στο Κεφάλαιο 3.2 παρουσιάστηκε μία μη καταστροφική μεθοδολογία βασισμένη στην υπέρυθη θερμογραφία που αναπτύχθηκε για το χαρακτηρισμό του επιπέδου βλάβης μεταλλικών υλικών που υπόκεινται σε κυκλική μηχανική φόρτιση. Η συγκεκριμένη μη καταστροφική μεθοδολογία έχει τη δυνατότητα να καθορίσει το επίπεδο βλάβης ενός δοκιμίου ή ενός εξαρτήματος υποβάλλοντας το σε λίγους μόνο κύκλους φόρτισης. Επιπλέον, η μέθοδος προβλέπει το χρονικό διάστημα για το οποίο το δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια (την εναπομένουσα ζωή του), αφού η συσχέτιση της αύξησης της θερμοκρασίας του δοκιμίου με τους κύκλους φόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστη μετρική της βλάβης του υλικού λόγω κόπωσης.

Στο Κεφάλαιο 3.3 αναπτύχθηκε μία μη καταστροφική μεθοδολογία για τον ταχύ, και αξιόπιστο προσδιορισμό του ορίου κόπωσης των υλικών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία με βάση την υπέρυθη θερμογραφία μπορεί να εφαρμοστεί με ευκολία σε διαφορετικούς τύπους υλικών, όπως σε μονολιθικά υλικά (π.χ. μέταλλα) και σε σύνθετα υλικά με κεραμική ή και μεταλλική μήτρα. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητά της μεθόδου ενισχύεται διότι οι παράμετροι της ακουστικής εκπομπής εμφανίζουν παρόμοια

συμπεριφορά. Το όριο κόπωσης που προσδιορίστηκε για χάλυβα AISI 1006 με τη μέθοδο της θερμογραφίας είναι σε πλήρη συμφωνία με αυτό που προέκυψε από την καμπύλη Wöhler, ενώ όσον αφορά στο αλουμίνιο 1050 H16 το όριο κόπωσης του προσδιορίστηκε από την καμπύλη S-N καθορίστηκε τόσο με τη μέθοδο της θερμογραφίας όσο και με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της μεθόδου της θερμογραφίας. Με τη νέα μεθοδολογία έγινε εφικτός ο προσδιορισμός του ορίου κόπωσης και σε σύνθετα κεραμικά SiC/BMAS και επιπλέον επιβεβαιώθηκε με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής. Επιπροσθέτως, το όριο κόπωσης καθορίστηκε και σε σύνθετα μεταλλικά υλικά με μήτρα αλουμινίου με ενίσχυση καρβιδίων του πυριτίου σε τρία διαφορετικά ποσοστά και παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού ενίσχυσης οδηγεί σε μείωση του ορίου κόπωσης. Στην περίπτωση αυτή η μέθοδος της θερμογραφίας αποκτά μεγάλη αξία καθώς αντιπαρέχεται στους περιορισμούς της καμπύλης Wöhler. Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι ο προσδιορισμός του ορίου κόπωσης μέσω της θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής προσφέρει μία νέα, εναλλακτική και αξιόπιστη μεθοδολογία, η οποία μπορεί να ξεπεράσει τα προβλήματα της συμβατικής μεθόδου καθώς μειώνεται ο πειραματικός χρόνος και τυπικά απαιτείται ένα μοναδικό δοκίμιο για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης σε οποιοδήποτε υλικό.

Η έρευνα του Κεφαλαίου 3.4 ασχολείται με την ανάπτυξη μεθοδολογίας βασισμένη στην υπέρυθη θερμογραφία για τον χαρακτηρισμό υπό-επιφανειακής βλάβης σε κατασκευές η οποία εφαρμόστηκε τόσο σε εργαστηριακή κλίμακα όσο και στο πεδίο, σε υφιστάμενη κατασκευή μεγάλης ιστορικής σημασίας για την ελληνική πολιτιστική κληρονομιά. Με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, έχει καταστεί δυνατός ο εντοπισμός υπό-επιφανειακών ρωγμών που βρίσκονται σε βάθος έως και 11 mm. Η δυνατότητα, λοιπόν, ανίχνευσης ρωγμών σε βάθος 11 mm αποτελεί πολύ σημαντικό εύρημα λαμβάνοντας υπόψη την ανομοιομορφία της μικροδομής του σκυροδέματος και τη θερμική διέγερση που ήταν όση μπορεί να προσδώσει με τρόπο φυσικό η ηλιοφάνεια σε μια υφιστάμενη κατασκευή κατά τους θερινούς μήνες.

Αποδείχθηκε πως η υπέρυθη θερμογραφία αποτελεί μία ισχυρή μέθοδο για τη μη καταστροφική αποτίμηση της βλάβης σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Τόσο με την ανάπτυξη της νέας μεθόδου της θερμογραφίας με βαθμιαία θέρμανση όσο και με την εφαρμογή της lock-in θερμογραφίας και της θερμογραφίας φάσης παλμού κατέστη δυνατός ο χαρακτηρισμός της υποβάθμισης των τοιχογραφιών από απόσταση και αξιολογήθηκε σε πραγματικό χρόνο η κατάσταση της βλάβης τους. Η συγκεκριμένη

έρευνα οδήγησε επίσης στην αποτίμηση και ανίχνευση κρίσιμων υπό-επιφανειακών ρωγμών και αποκολλημένων περιοχών, ευρήματα πολύ σημαντικά για τη δομική ακεραιότητα τόσο των τοιχογραφιών όσο και της κτητορικής επιγραφής.

Στο Κεφάλαιο 3.5 αναπτύχθηκε μία νέα καινοτόμος μη καταστροφική τεχνική, η «θερμοηλεκτρική lock-in θερμογραφία», και εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα της για την ανίχνευση ατελειών σε σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα. Η νέα μέθοδος έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει υπό-επιφανειακές ατέλειες και να συμβάλλει στην καλύτερη μη καταστροφική αξιολόγηση των υλικών, λόγω της περισσότερο ομοιόμορφης θέρμανσης και αποθέρμανσης του υλικού που παρέχει το θερμοηλεκτρικό στοιχείο σε σύγκριση με άλλες μεθόδους lock-in. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι συνδυάζει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά αποτελέσματα.

# Κεφάλαιο 5

**ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ  
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 5.1. Λίστα δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές

1. In-Situ Monitoring of Damage Evolution in Glass Matrix Composites during Cyclic Loading using Nondestructive Techniques  
**E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, K. G. Dassios, T. E. Matikas, *Applied Composite Materials*, 1-13, (2013)
2. Nanocomposite Catalysts Producing Durable, Super-Black Carbon Nanotube Systems: Applications in Solar Thermal Harvesting  
N. T. Panagiotopoulos, E. K. Diamanti, L. E. Koutsokeras, M. Baikousi, **E. Kordatos**, T. E. Matikas, D. Gournis, P. Patsalas, *ACS Nano*, in press (DOI: 10.1021/nn304531k), (2012)
3. Cyclic Loading of a SiC-Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composite Reveals Damage Mechanisms and Thermal Residual Stress State  
K. G. Dassios, D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 44, pp. 105-113 (2013).
4. Infrared Thermographic Inspection of Murals and Characterization of Degradation in Historic Monuments  
**E. Z. Kordatos**, D. A. Exarchos, C. Stavrakos, A. Moropoulou, T. E. Matikas, *Construction and Building Materials*, published online, doi: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812004540>, (2012).
5. Monitoring Mechanical Damage in Structural Materials Using Complimentary NDE Techniques Based on Thermography and Acoustic Emission  
**E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, T. E. Matikas, *Composites Part B: Engineering*, vol. 43(6), pp. 2676–2686, (2012).
6. Crack-Tip Stress Field and Fatigue Crack Growth Monitoring Using Infrared Lock-in Thermography in A359/Sicp Composites

- D. P. Myriounis, **E. Z. Kordatos**, S. T. Hasan, T. E. Matikas, *Strain*, vol. 47(SUPPL. 1), pp. e619-e627, (2011).
7. Innovative Non-Destructive Evaluation and Damage Characterization of Composite Aerostructures Using Thermography  
S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, N.-M. Barkoula, T. E. Matikas, A. S. Paipetis, *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 40(6/7), pp. 342-348, (2011).
8. NDT Approach for Characterization of Subsurface Cracks in Concrete  
D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, M. Strantza, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol. 25(7), pp. 3089-3097, (2011).
9. Monitoring of Metal Fatigue Damage Using Acoustic Emission and Thermography  
D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, *Journal of Acoustic Emission*, vol. 29, pp. 113-122, (2011).
10. Acoustic Emission for Fatigue Damage Characterization in Metal Plates  
D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, *Mechanics Research Communications*, vol. 38(2), pp. 106-110, (2011).
11. Combined Use of Thermography and Ultrasound for the Characterization of Subsurface Cracks in Concrete  
D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol. 24(10), pp. 1888-1897, (2010).
12. Non-Destructive Damage Evaluation in Ceramic Matrix Composites for Aerospace Applications  
Konstantinos G. Dassios, **Evangelos Z. Kordatos**, Dimitris G. Aggelis, Theodore E. Matikas, Submitted for publication, (2013)
13. Crack growth monitoring in ceramic matrix composites by combined infrared thermography and acoustic emission  
K. G. Dassios, **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, , T. E. Matikas, Submitted for publication, (2013)



14. Rapid evaluation of the fatigue limit in composites using infrared lock-in thermography and acoustic emission  
**E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, K. G. Dassios, T. E. Matikas, Submitted for publication, (2013)
  
15. Monitoring of damage accumulation in cyclically-loaded BMAS/SiC glass-ceramic matrix composites  
D. G. Aggelis, K. G. Dassios, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, Submitted for publication, (2013)
  
16. Lock-in thermography of bonded composite repair: critical vs. subcritical damage assessment and quantification  
S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, A. S. Paipetis, Submitted for publication, (2013)
  
17. Real time debonding monitoring of composite repaired materials via electrical, acoustic and thermographic methods  
S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, A. S. Paipetis, Submitted for publication, (2013)

## 5.2. Λίστα δημοσιεύσεων σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων

18. **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, K. G. Dassios, T. E. Matikas. Monitoring of glass-ceramic composites under static and dynamic loading by combined NDE methods. San Diego, CA, USA, 2013, SPIE
19. S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas and A. S. Paipetis. A combination of novel thermographic and electrical techniques for low-velocity impact damage identification in multifunctional composites. San Diego, CA, USA, 2013, SPIE
20. S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, T. E. Matikas and A. S. Paipetis. Critical and subcritical damage monitoring of bonded composite repairs using innovative non-destructive techniques. Athens, TRA 2012.
21. S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas and A. S. Paipetis. Bonded repair integrity monitoring of aerospace materials using combined non-destructive methods. Brussels, Belgium, 2012, Duracosys2012.
22. A.S. Paipetis, S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, "Low-Velocity Impact Damage Identification Using a Novel Current Injection Thermographic Technique", Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems, Article number 8346-45, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2012).
23. A.S. Paipetis, S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, T. E. Matikas, "Critical and Subcritical Damage Monitoring of Bonded Composite Repairs Using Innovative Non-Destructive Techniques", Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems, Article number 8346-36, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2012).
24. **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, K. G. Dassios, P.-L. I. Lagari, T. E. Matikas, "Real-Time Characterization of Damage in Ceramic Matrix Composites Using Ir Thermography and Acoustic Emission", Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems, Article number 8346-42, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2012).

25. **E. Z. Kordatos**, M. A. Strantza, K. Dassios, P.-L. I. Lagari, T. E. Matikas, "Determination of Fatigue Limit in Composite Materials Using Ir Lock-in Thermography", Proc. of the 10th International Conference on Durability of Composite Systems (DURACOSYS 2012), (Brussels, Belgium, 17-19 September, 2012).
26. D. G. Aggelis, K. Dassios, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, "A Study on the Acoustic Emission Behavior of Ceramic Matrix Composites During Cyclic Loading", Proc. of the 10th International Conference on Durability of Composite Systems (DURACOSYS 2012), (Brussels, Belgium, 17-19 September, 2012).
27. A.S. Paipetis, S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, N. M. Barkoula, T. E. Matikas, "In Service Damage Assessment of Bonded Composite Repairs with Full Field Thermographic Techniques", Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, vol. 7983, Article Number 79831U, DOI: 10.1117/12.880376, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2011
28. **E. Z. Kordatos**, M. Strantza, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, D. G. Aggelis, "Combined NDT Methods for Characterization of Subsurface Cracks in Concrete", Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems, vol. 7982, Article number 7982-33, DOI: 10.1117/12.881025, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2011).
29. **E. Z. Kordatos**, D. V. Soulioti, M. Strantza, T. E. Matikas, D. G. Aggelis, "Thermography and Ultrasound for Characterizing Subsurface Defects in Concrete", Proc. of the NDTMS-2011, (Istanbul, 15-18 May 2011).
30. **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, "Developing Damage Metrics for Metallic Structures Undergoing Fatigue Using Real-Time Thermographic Evaluation", Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems, vol. 7982, Article Number 79820U, DOI: 10.1117/12.881019, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2011).

31. **E. Z. Kordatos**, 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 the 5th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (ETNDT5), pp. 77-81, (Ioannina, Greece, September 19-21 2011).
32. **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, T. E. Matikas, "Monitoring of Fracture Behaviour in Structural Materials by Thermography and Acoustic Emission", Proc. of the Micromechanics and Modeling of Multifunctional Materials 2011 (MMMM11), (Thessaloniki, Greece, July 14-15 2011).
33. **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, T. E. Matikas, "Thermography and Acoustic Emission for Monitoring the Fracture of Aluminium Plates", Proc. of the NDTMS-2011, (Istanbul, 15-18 May 2011).
34. **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, T. E. Matikas, "Monitoring of Fatigue Damage in Metal Plates by Acoustic Emission and Thermography", Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems, vol. 7982, Article number 7982-32, DOI: 10.1117/12.881021, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2011).
35. S. Grammatikos, **E. Kordatos**, N.-M. Barkoula, T. E. Matikas, A. Paipetis, "In Service Damage Assessment of Bonded Composite Repairs with Full Field Thermographic Techniques", Proc. of the Micromechanics and Modeling of Multifunctional Materials 2011 (MMMM11), (Thessaloniki, Greece, July 14-15 2011).
36. S. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, N.-M. Barkoula, T. E. Matikas, A. S. Paipetis. In-service damage monitoring of bonded composite repairs. Duracosys2010, Patras, 2010.
37. S. A Grammatikos, **E.Z. Kordatos**, N.-M.Barkoula, T.E. Matikas, A. Paipetis. Innovative non-destructive evaluations and damage characterization of composites. First Greek – Ukrainian Conference on Fracture Mechanics of Materials and Structures, Xanthi, Greece 20 – 23 October 2010.
38. S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, N. M. Barkoula, T. E. Matikas, A. Paipetis, "Innovative Non-Destructive Evaluation and Damage Characterization of Composite

- Aerostructures", Proc. of the 14th European Conference on Composite Materials (ECCM14), Paper ID: 802, (Budapest, Hungary, June 2010).
39. S. Grammatikos, **E. Kordatos**, N. M. Barkoula, T. Matikas, A. Paipetis, "Repair Integrity Monitoring of Composite Aerostructures Using Thermographic Imaging", Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, vol. 7649, Article number 76491D, DOI: 10.1117/12.847611, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2010).
  40. D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, "Monitoring of Acoustic Emission During Fatigue of Metal Plates", Proc. of the 20th International Acoustic Emission Symposium, vol. Progress in Acoustic Emission XV, JSNDI, pp. 73-78, (Kumamoto, Japan, 16-19 November 2010).
  41. M. A. Strantza, **E. Z. Kordatos**, D. V. Soulioti, T. E. Matikas, D. G. Aggelis "Use of thermography and ultrasound for characterization of subsurface cracks in concrete" 7th National Conference in Nondestructive Testing, Athens, 15-17/10/2010. (in CD)
  42. D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, T. E. Matikas, "Acoustic emission for fatigue damage characterization on metal Plates" 7th National Conference in Nondestructive Testing, Athens, 15-17/10/2010. (in CD)
  43. S. A. Grammatikos, **E. Z. Kordatos**, D. G. Aggelis, N. M. Mparkoula, T. E. Matikas, A. Paipetis, "Non-destructive inspection of repair patches in aeronautic materials" 7th National Conference in Nondestructive Testing, Athens, 15-17/10/2010. (in CD)
  44. **E. Z. Kordatos**, N. M. Mparkoula, A. Paipetis, T. E. Matikas, "Characterization of crack growth in metallic materials by non-destructive full field method", 7th National Conference in Nondestructive Testing, Athens, 15-17/10/2010. (in CD)
  45. **E. Z. Kordatos**, D. P. Myriounis, S. T. Hasan, T. E. Matikas, "Monitoring the Fracture Behavior of SiCp/Al Alloy Composites Using Infrared Lock-in Thermography", Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, vol. 7294,

Article number 72940X, DOI: 10.1117/12.815207, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2009).

46. D. G. Aggelis, **E. Z. Kordatos**, A. Charalambopoulos, T. E. Matikas, "Characterization of Subsurface Damage in Concrete Using Rayleigh Waves and Thermography", Proc. of the The 5th Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5), (Kumamoto, Japan, 17-18 September 2009).