



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

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗ
ΔΟΜΙΚΗ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΥΠΟ
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

ΤΣΙΒΙΛΑΤΙΔΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΜΑΙΟΣ 2019

Εσώφυλλο:

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

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΔΟΜΕΣ – ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε τηναπό την εξεταστική επιτροπή:

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

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :

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

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

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

(Υπογραφή υποψηφίου)

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια περάτωσης του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Προηγμένα Υλικά», του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και αποτελεί μελέτη της επίδρασης της ηλεκτροχημικής διάβρωσης στη δομική ακεραιότητα κραμάτων αλουμινίου υπό μηχανική κυκλική φόρτιση.

Σε αυτό το σημείο αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους τους ανθρώπους, η συμβολή και η συμπαράσταση των οποίων ήταν πολύτιμή και καθοριστική στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέπων της εργασίας μου κ. Θεόδωρο Ματίκα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και υπεύθυνο του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφύων Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών, για την ανάθεση του θέματος, την πλήρη καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις επί της οργάνωσης, της δομής και του περιεχομένου της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφύων Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών που με υποστήριξαν σε διάφορα στάδια της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτωρ του Τμήματος κα Παναγιώτα - Αικατερίνη Δάλλα που με στήριξε και με καθοδήγησε σε όλα τα στάδια της προσπάθειας μου, τον υποψήφιο διδάκτωρ του Τμήματος κ. Δημήτριο Έξαρχο για τις πολύτιμες συμβουλές στο κομμάτι της θερμογραφίας, τον υποψήφιο διδάκτωρ του Τμήματος κ. Ηλία Τραγαζίκη για την πολύτιμη συμβολή του στις δοκιμές της ακουστικής εκπομπής καθώς και την υποψήφια διδάκτωρ του Τμήματος κα Θεοδότη Κορδάτου για τις καίριες υποδείξεις στο κομμάτι των πειραμάτων κόπωσης.

Επιπλέον νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αλέξανδρο Ε. Καραντζαλη Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών καθώς και την υποψήφια διδάκτωρ του Τμήματος κα. Χριστίνα Μάθιου, του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας, για την βοήθεια κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων σκληρομέτρησης και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της παρούσας διατριβής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της κα Νεκταρία - Μαριάνθη Μπάρκουλα Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του

Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών καθώς και τον κ. Κωσταντίνο Δάσιο Επίκουρο Καθηγητή του ομώνυμου Τμήματος για την προσεκτική ανάγνωση της διατριβής μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Κλείνοντας, ευχαριστώ ειλικρινά την οικογένεια μου, την κοπέλα μου, τους φίλους και συναδέλφους μου καθώς και όλα τα υπόλοιπα άτομα εντός και εκτός εργαστηρίου για την ηθική και υλική υποστήριξη τους καθόλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος και ειδικά στην προσπάθεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και μηχανικής συμπεριφοράς σε δυναμικές καταπονήσεις, κραμάτων αλουμινίου 7075 - T6 & 7075 - T7 με την παράλληλη εφαρμογή μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου (NDE), υπέρυθρης θερμογραφίας (IR) και ακουστικής εκπομπής (AE), στα οποία υποβλήθηκε στοχευμένη ηλεκτροχημική διάβρωση. Ο λόγος επιλογής μελέτης κραμάτων αλουμινίου 7075 είναι ότι αποτελούν ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά στην αεροναυπηγική λόγω της ανταγωνιστικής μηχανικής και διαβρωτικής συμπεριφοράς τους, σε σχέση με τα σιδηρούχα κράματα. Σκοπός της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η συσχέτιση του βαθμού φθοράς των δοκιμίων αλουμινίου μέσω ηλεκτροχημικής διάβρωσης, με την μηχανική συμπεριφορά αυτών σε δυναμικές καταπονήσεις και την υποβάθμιση του ορίου κόπωσης ή ορίου διαρκούς αντοχής.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο με κύριους πυλώνες τη μηχανική συμπεριφορά μηχανικών στοιχείων κυρίως σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις, τη φύση της διάβρωσης και συγκεκριμένα της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, τη σημασία του αλουμινίου ως δομικό στοιχείο στις μέρες μας καθώς και τη θεωρία των μη καταστροφικών τεχνικών αξιολόγησης με ειδικευση την υπέρυθρη θερμογραφία και την ακουστική εκπομπή. Το θεωρητικό υπόβαθρο αποτέλεσε το εργαλείο διεξαγωγής συμπερασμάτων κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των εκάστοτε δοκιμών.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε με αναφορές σε αντίστοιχες βιβλιογραφικές μελέτες. Αναλυτικότερα, κατά την πραγμάτωση των πειραμάτων δοκίμια αλουμινίου, συγκεκριμένων γεωμετρικά προδιαγραφών, υπέστησαν θερμικές κατεργασίες σύμφωνα με τα πρότυπα T651 και T731 προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης ομογενοποίηση και ομοιομορφία στην κατανομή των κραματικών τους στοιχείων, με σκοπό την ενίσχυση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων τους. Η παραπάνω ενίσχυση επιβεβαιώθηκε μέσω δοκιμών μάκρο - σκληρομέτρησης τύπου *Brinell* καθώς και δοκιμών στατικού εφελκυσμού. Στην συνέχεια δοκίμια αλουμινίου 7075 - T651 επικαλύφθηκαν με διάφανο βερνίκι νυχιών και μέσω της κεφαλής του οργάνου μάκρο - σκληρομέτρησης *Brinell* δημιουργήθηκαν τρεις ομοιόμορφες κοιλότητες στην εξωτερική τους επιφάνεια. Κατόπιν υπεβλήθησαν σε ηλεκτροχημική διάβρωση με την χρήση της

ποτενσιοδυναμικής πόλωσης προκαλώντας έντονη φθορά στις επιμέρους κοιλότητες. Ακολούθησε οπτική παρατήρηση των σχηματιζόμενων διαβρωμένων κοιλοτήτων με χρήση προφίλομετρίας λευκού φωτός, προκειμένου να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών. Εν συνεχεία, τα διαβρωμένα δοκίμια υπεβλήθησαν σε δυναμικές καταπονήσεις προκειμένου να αξιολογηθεί η μηχανική συμπεριφορά τους καθώς και η επίδραση του βαθμού διάβρωσης σε αυτήν. Τέλος, ακολουθήθηκε μία καινοτόμος διάταξη ταχέως προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής (ορίου κόπωσης) που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του εργαστηρίου, σε συνδυασμό με τις μεθόδους μη καταστροφικής αξιολόγησης που προαναφέρθηκαν, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των διαβρωμένων κοιλοτήτων των δοκιμίων αλουμινίου σε αυτό.

Τέλος, στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και ερμηνεύονται βάση του θεωρητικού υπόβαθρου του πρώτου μέρους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, προκύπτει ότι η επίδραση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης στη δομική ακεραιότητα και τη μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου 7075 - T651 σε δυναμικές καταπονήσεις είναι άξια μελέτης. Συγκεκριμένα, οι διαβρωμένες περιοχές αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων οι οποίες επηρεάζουν την μηχανική αντοχή και συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την εφαρμογή δυναμικών καταπονήσεων. Η επίδραση της διάβρωσης εντοπίζεται τόσο από το μηχανισμό αστοχίας όσο και από τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης μέσω διαγραμμάτων θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής. Αντίθετα, η εφαρμογή θερμικών κατεργασιών ενισχύει τόσο τη μηχανική όσο και τη διαβρωτική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου 7075.

Abstract

In the context of this dissertation, the study of mechanical properties and mechanical behavior in dynamic loads was carried out aluminum alloys 7075 - T6 & 7075 - T7 with the parallel implementation of non - destructive evaluation (NDE), infrared thermography (IR) and acoustic emission (AE), to which targeted electrochemical corrosion was subjected. The reason for choosing studying aluminum alloy 7075 is that they are one of the most widely used building materials in aeronautics due to their competitive mechanical endurance and corrosion resist in relation to ferrous alloys. The purpose of this dissertation was to correlate the degree of wear of the aluminum samples through electrochemical corrosion, with their mechanical behavior in dynamic loads and degradation of the fatigue limit or endurance limit.

The theoretical background is presented in the first part of this dissertation with the main pillars the mechanical behavior of mechanical components mainly in static and dynamic loads, the nature of corrosion and in particular electrochemical corrosion, the importance of aluminum as a structural material nowadays as well as the theory of non - destructive evaluation techniques specializing in infrared thermography and acoustic emission. The theoretical background was the tool to conduct conclusions during the presentation of the results of each experiment.

The second part presents extensively the experimental process followed by references to corresponding bibliographic studies. More specifically, in making experiments aluminum samples, with specific geometric specifications, have undergone heat treatments according to standards T651 and T731 in order to achieve complete homogenization and uniformity in the distribution of their alloys elements in order to enhance their mechanical and physical properties. The above reinforcement was confirmed by *Brinell* macro - hardness tests as well as static tensile tests. Subsequently, 7075 - T651 aluminum samples were coated with transparent nail polish and three uniform cavities on their outer surface were created through the head of the *Brinell* macro - hardness. Then they underwent electrochemical corrosion by the use of potentiodynamic polarization causing severe damage to the individual cavities. Optical observation of the corroded cavities was performed using white light profilometry to determine their geometric characteristics. Subsequently, the corroded specimens underwent dynamic loads in order to evaluate their mechanical behavior as well as the effect of the degree of corrosion on it. Finally, an innovative apparatus was applied to

quickly determine the endurance limit (*fatigue limit*) developed in the laboratory, in combination with the non - destructive evaluation methods mentioned above, in order to study the effect of the corroded cavities of the aluminum samples on it.

Finally, the third part analyzes the results of the experimental process and are interpreted based on the theoretical background. According to the results of the present dissertation, it appears that the effect of electrochemical corrosion on the structural integrity and mechanical behavior of the 7075 - T651 aluminum alloys on dynamic stresses is worthy of study. Instead, thermal treatments enhance both the mechanical and corrosive behavior of 7075 alloy alloys. In particular, eroded areas constitute stress concentration points that affect the mechanical strength and behavior of the specimens in the application of dynamic loadings. The influence of corrosion is detected both by the failure mechanism and by the determination of the fatigue limit through thermography and acoustic emission diagrams.

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Εικόνων	- 13 -
Κατάλογος Σχημάτων	- 15 -
Κατάλογος Πινάκων.....	- 17 -
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	- 18 -
Μέρος I : Θεωρητικό Υπόβαθρο	- 19 -
Κεφάλαιο 1^ο : Μηχανική Συμπεριφορά	- 19 -
1.1 Εισαγωγή στη Μηχανική Συμπεριφορά Μεταλλικών Υλικών.....	- 19 -
1.2 Εισαγωγή στη θραυστομηχανική	- 20 -
1.3 Κατηγορίες θραύσης	- 22 -
1.4 Μηχανική των θραύσεων	- 23 -
1.5 Μηχανική συμπεριφορά σε δυναμικές καταπονήσεις.....	- 23 -
1.5.1 Επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης.....	- 25 -
1.5.2 Κύρια χαρακτηριστικά των δυναμικών καταπονήσεων	- 27 -
1.5.3 Καμπύλες S-N (καμπύλες <i>Wöhler</i>).....	- 30 -
1.5.4 Μαθηματική περιγραφή κόπωσης.....	- 34 -
1.5.5 Ανάπτυξη ρωγμών κατά την εφαρμογή δυναμικών καταπονήσεων	- 37 -
1.5.6 Μηχανική κόπωση με προ υπάρχουσες ρωγμές.....	- 39 -
1.5.7 Μηχανισμοί αναπτύξεως της ρωγμής κατά την κόπωση.....	- 41 -
Κεφάλαιο 2^ο : Διάβρωση	- 44 -
2.1 Ο ρόλος της διάβρωσης στις μέρες μας.....	- 44 -
2.2 Ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης	- 47 -
2.2.1 Αντιδράσεις Οξειδοαναγωγής	- 48 -
2.3 Ηλεκτροχημικό Κελί	- 50 -
2.3.1 Γαλβανικό κελί ή στοιχείο.....	- 50 -
2.4 Ηλεκτροχημική σειρά των μετάλλων	- 52 -
2.5 Γαλβανική σειρά των μετάλλων.....	- 53 -
2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν το δυναμικό ενός γαλβανικού στοιχείου	- 55 -
2.6.1 Επίδραση συγκέντρωσης ιόντων και θερμοκρασίας	- 56 -

2.6.2	Επίδραση pH	- 57 -
2.6.3	Ηλεκτρολύτες	- 57 -
2.7	Μορφές διάβρωσης και σχηματιζόμενα κελιά	- 58 -
2.7.1	Κατηγορίες σχηματιζόμενων κελιών διάβρωσης	- 59 -
2.7.2	Μορφές Διάβρωσης.....	- 60 -
2.7.2.1	Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση (<i>General Corrosion</i>)	- 60 -
2.7.2.2	Βελονοειδής διάβρωση (<i>Pitting Corrosion</i>).....	- 61 -
2.7.2.3	Διάβρωση σε χαραγές (<i>Crevice Corrosion</i>)	- 62 -
2.7.2.4	Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (<i>Galvanic Corrosion</i>)	- 63 -
2.7.2.5	Περικρυσταλλική διάβρωση (<i>Intergranular Corrosion</i>).....	- 64 -
2.7.2.6	Μηχανική διάβρωση εκ τριβής (<i>Erosion Corrosion</i>).....	- 64 -
2.7.2.7	Σπηλαιώδης διάβρωση (<i>Cavitation Corrosion</i>).....	- 65 -
2.7.2.8	Διάβρωση με μηχανικές τάσεις (<i>Stress Corrosion Cracking</i>).....	- 66 -
2.7.2.9	Διάβρωση με κόπωση (<i>Corrosion fatigue</i>).....	- 67 -
2.7.2.10	Διάβρωση υδρογόνου (<i>Hydrogen Corrosion Damage</i>).....	- 68 -
2.8	Ταχύτητα διάβρωσης και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.....	- 69 -
2.8.1	Παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν τη ταχύτητα διάβρωσης...	- 69 -
Κεφάλαιο 3^ο: Αλουμίνιο		- 72 -
3.1	Εισαγωγή.....	- 72 -
3.2	Χαρακτηριστικά και ιδιότητες του αλουμινίου	- 73 -
3.3	Ταξινόμηση των κραμάτων αλουμινίου	- 76 -
3.3.1	Ονοματολογία ελατών και χυτών κραμάτων αλουμινίου.....	- 76 -
3.3.2	Ταξινόμηση μηχανικών και θερμικών κατεργασιών.....	- 78 -
3.3.3	Επίδραση των κραματικών στοιχείων	- 80 -
3.4	Διαβρωτική συμπεριφορά καθαρού και κραμάτων αλουμινίου.....	- 83 -
3.4.1	Παθητικοποίηση αλουμινίου.....	- 84 -
3.4.2	Διαβρωτική συμπεριφορά ανά σειρά κράματος.....	- 85 -
3.5	Διάβρωση οπών κραμάτων αλουμινίου.....	- 88 -
3.5.1	Μηχανισμός διάβρωσης οπών.....	- 89 -

3.5.2	Στάδια εξέλιξης των οπών διάβρωσης	- 90 -
3.5.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της διάβρωσης οπών.....	- 91 -
3.6	Αλληλεπίδραση της τοπικής διάβρωσης οπών στη κόπωση του αλουμινίου	- 93 -
Κεφάλαιο 4ο : Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι – ΜΚΕ.....		- 95 -
4.1	Εισαγωγή στους ΜΚΕ.....	- 95 -
4.2	Ακουστική Εκπομπή (<i>Acoustic Emission</i>).....	- 97 -
4.2.1	Πειραματική διάταξη ακουστικής εκπομπής.....	- 99 -
4.2.2	Φύση των κυμάτων ΑΕ	- 100 -
4.2.3	Αισθητήρες της ΑΕ	- 103 -
4.2.4	Ανάλυση βασικών παραμέτρων ΑΕ	- 104 -
4.2.5	Γεωμετρικός προσδιορισμός της θέσης της ΑΕ	- 107 -
4.3	Θερμογραφία Υπερύθρου (<i>Thermography IR</i>)	- 109 -
4.3.1	Εισαγωγή θερμογραφίας	- 110 -
4.3.2	Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και υπέρυθρη ακτινοβολία	- 112 -
4.3.3	Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας	- 114 -
4.3.4	Μηχανισμοί ανταλλαγής ακτινοβολίας	- 120 -
4.3.5	Τεχνικές θερμογραφικού ελέγχου	- 124 -
4.3.5.1	Παθητική θερμογραφία υπέρυθρου.....	- 126 -
4.3.5.2	Ενεργητική θερμογραφία υπέρυθρου.....	- 127 -
4.3.5.3	Θερμογραφία παλμού (<i>Pulsed Thermography</i>).....	- 129 -
4.3.5.4	Διαμορφωμένη Θερμογραφία (<i>Lock-in Thermography</i>).....	- 131 -
Μέρος II : Πειραματικό Μέρος		- 134 -
Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική Διαδικασία.....		- 134 -
5.1	Εισαγωγή.....	- 134 -
5.2	Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας.....	- 135 -
5.3	Υλικό πειραματικής διαδικασίας.....	- 137 -
5.4	Εφαρμογή Θερμικής Κατεργασίας.....	- 140 -
5.5	Δοκιμές σκληρομέτρησης	- 142 -
5.6	Δοκιμές στατικού εφελκυσμού.....	- 144 -

5.7	Σχηματισμός αρχικών κοιλοτήτων	147 -
5.8	Προφίλομετρία λευκού φωτός.....	148 -
5.9	Ηλεκτροχημική Διάβρωση	150 -
5.10	Δοκιμές δυναμικών καταπονήσεων με παράλληλη εφαρμογή μη καταστροφικών διατάξεων χαρακτηρισμού	154 -
Μέρος III : Αποτελέσματα.....		160 -
Κεφάλαιο 6^ο: Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας		160 -
6.1	Αποτελέσματα μετρήσεων φυσικών χαρακτηριστικών.....	160 -
6.2	Αποτελέσματα μετρήσεων μακρο - σκληρότητας.....	161 -
6.3	Αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.....	162 -
6.4	Χαρακτηριστικά διαμορφωμένων αρχικών κοιλοτήτων	165 -
6.5	Αποτελέσματα ηλεκτροχημικής διάβρωσης.....	168 -
6.6	Αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης	171 -
6.7	Διαγράμματα Υπέρυθρης Θερμογραφίας & Ακουστικής Εκπομπής	174 -
Μέρος IV : Συμπεράσματα & Συζήτηση		178 -
Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας.....		178 -
7.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων & Συμπεράσματα.....	178 -
7.2	Προτάσεις μελλοντικής έρευνας	180 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		182 -

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1: Τραγωδία λόγω αστοχίας σε δεξαμενή μελάσας, Βοστώνη 1919.</i>	<i>- 21 -</i>
<i>Εικόνα 2: Παραδείγματα αστοχιών δομικών κατασκευών και μηχανολογικών στοιχείων λόγω κόπωσης.</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Εικόνα 3: Χαρακτηριστικές επιφάνειες, σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο, αστοχίας δοκιμίου τιτανίου Ti-6Al-4V λόγω κόπωσης.</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Εικόνα 4: Μηχανισμός σχηματισμού ρωγμής σε κόπωση μέσω ενδολισθήσεων & εξολισθήσεων στις ζώνες PSB.....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Εικόνα 5: Στάδια εξέλιξης μίας ρωγμής από μικρο-κλίμακα σε μακρο-κλίμακα συναρτήσει του ΔΚ.</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Εικόνα 6: Διάβρωση μεταλλικού τμήματος δεξαμενής.</i>	<i>- 47 -</i>
<i>Εικόνα 7: Γραφική αναπαράσταση ηλεκτροχημικής διάβρωσης σιδήρου.</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Εικόνα 8: Αναπαράσταση ενός τυπικού γαλβανικού στοιχείου Zn - Cu.</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Εικόνα 9: Παράδειγμα γενικής ή ομοιόμορφης διάβρωσης όπου εμφανίζεται μία περιοχή με ομοιόμορφο αναπτυσσόμενο προϊόν διάβρωσης.</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Εικόνα 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα βελονοειδής διάβρωσης.</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Εικόνα 11: Παραδείγματα ανάπτυξης διάβρωσης χαραγών.</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Εικόνα 12: Παραδείγματα ανάπτυξης γαλβανικής διάβρωσης.</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Εικόνα 13: Παραδείγματα περικρυσταλλικής διάβρωσης.</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Εικόνα 14: Παρουσίαση του μηχανισμού διάβρωσης με επίδραση μηχανικής ροής.</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά παραδείγματα μηχανικών στοιχείων τα οποία έχουν υποστεί σπληναιώδη διάβρωση.</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού ανάπτυξης εργοδιάβρωσης.</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση της μορφολογικής εξέλιξης των ρωγμών σε διάφορα είδη διάβρωσης.....</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Εικόνα 18: Παραδείγματα διάβρωσης υδρογόνου.</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Εικόνα 19: Στάδια επεξεργασίας κατά την παθητικοποίηση του αλουμινίου.</i>	<i>- 75 -</i>
<i>Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση ανάπτυξης στρωμάτων οξειδίων με παρουσία υγρού στην εξωτερική επιφάνεια κράματος αλουμινίου.</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση των γεωμετρικών διατάξεων οπών διάβρωσης κραμάτων αλουμινίου.</i>	<i>- 91 -</i>
<i>Εικόνα 22: Ανάδειξη των κύριων κατηγοριών ΜΚΕ.</i>	<i>- 96 -</i>
<i>Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής ακουστικής εκπομπής σε ελέγχους δομικής και μηχανικής ακεραιότητας κυλινδρικών δεξαμενών.....</i>	<i>- 98 -</i>
<i>Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής της ακουστικής εκπομπής.</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Εικόνα 25: Τυπική διάταξη ΑΕ στα πλαίσια εργαστηριακής πειραματικής μελέτης.</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Εικόνα 26: Κατηγορίες συχνотήτων διαφόρων πηγών ακουστικής εκπομπής.</i>	<i>- 101 -</i>

Εικόνα 27: Πραγματικές εικόνες αισθητήρων ακουστικής εκπομπής και σχηματική αναπαράσταση της δομής του.	- 104 -
Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση μίας τυπικής διάταξης γεωμετρικού προσδιορισμού πηγής ΑΕ σε μηχανικό στοιχείο μίας διεύθυνσης.	- 108 -
Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση μίας τυπικής διάταξης γεωμετρικού προσδιορισμού πηγής ΑΕ σε μηχανικό στοιχείο τριών διευθύνσεων με εφαρμογή πολλαπλών αισθητήρων.	- 109 -
Εικόνα 30: Γραφική παρουσίαση εφαρμογής θερμογραφίας υπέρυθρου προς έλεγχο δομικής ακεραιότητας οπλισμένου σκυροδέματος.	- 110 -
Εικόνα 31: Παρουσίαση ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.	- 113 -
Εικόνα 32: Διαίρεση φασματικών ζωνών στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως συνάρτηση του μήκους κύματος.	- 114 -
Εικόνα 33: Παρουσίαση των μεθόδων μετάδοσης θερμότητας κατά την λειτουργία εναλλάκτη θερμότητας.	- 115 -
Εικόνα 34: Εφαρμογή παθητικής θερμογραφίας κατά τον έλεγχο οπλισμένου σκυροδέματος.	- 126 -
Εικόνα 35: Σχηματική απεικόνιση εκτέλεσης ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου.	- 128 -
Εικόνα 36: Παρουσίαση των διαθέσιμων ειδών δοκιμών αλουμινίου 7075, όπου (α) δοκίμιο εφελκυσμού, (β) δοκίμιο κόπωσης και (γ) τετράγωνα δοκίμια.	- 138 -
Εικόνα 37: Διαστασιολόγηση του δοκιμίου εφελκυσμού.	- 139 -
Εικόνα 38: Διαστασιολόγηση του δοκιμίου κόπωσης.	- 139 -
Εικόνα 39: Διαστασιολόγηση του δοκιμίου τετράγωνου σχήματος.	- 139 -
Εικόνα 40: Εργαστηριακοί φούρνοι πραγμάτωσης των πειραμάτων, αριστερά υψηλών θερμοκρασιών και δεξιά χαμηλότερων.	- 142 -
Εικόνα 41: Εργαστηριακός εξοπλισμός Brinell πραγματοποίησης σκληρομέτρησης.	- 144 -
Εικόνα 42: Εργαστηριακός εξοπλισμός πειραμάτων στατικού εφελκυσμού.	- 147 -
Εικόνα 43: Μηχανικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχηματισμό αρχικών κοιλοτήτων, (α) μηχανικά στοιχεία, (β) τελικό στοιχείο εφαρμογής φόρτισης, (γ) διεισδυτής διατομής 1mm.	- 148 -
Εικόνα 44: Εργαστηριακός εξοπλισμός προφίλομετρίας λευκού φωτός.	- 150 -
Εικόνα 45: Εργαστηριακός εξοπλισμός ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης.	- 153 -
Εικόνα 46: Πειραματική διάταξη προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής, (α) πειραματική διάταξη, (β) επιφάνεια δοκιμίου με επικάλυψη και (γ) πίσω πλευρά δοκιμίου στήριξης των αισθητήρων ΑΕ.	- 158 -
Εικόνα 47: Παρουσίαση του φύλλου δεδομένων των τιμών τάσεων στα διάφορα επίπεδα φόρτισης.	- 159 -
Εικόνα 48: Χαρακτηριστική καμπύλη δοκιμής εφελκυσμού δοκιμίου αλουμινίου 7075 - T651.	- 163 -

Εικόνα 49: Φωτογραφία περιοχής αστοχίας δοκιμίου αλουμινίου 7075 - T651.....	- 163 -
Εικόνα 50: Χαρακτηριστική καμπύλη δοκιμής εφελκυσμού δοκιμίου αλουμινίου 7075 – T731..	- 164 -
Εικόνα 51: Φωτογραφία περιοχής αστοχίας δοκιμίου αλουμινίου 7075 – T731.	- 164 -
Εικόνα 52: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 1 ^{ου} δοκιμίου.	- 166 -
Εικόνα 53: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 2 ^{ου} δοκιμίου.	- 166 -
Εικόνα 54: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 3 ^{ου} δοκιμίου.	- 166 -
Εικόνα 55: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 4 ^{ου} δοκιμίου.	- 167 -
Εικόνα 56: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 1 ^{ου} δοκιμίου.....	- 168 -
Εικόνα 57: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 2 ^{ου} δοκιμίου.....	- 168 -
Εικόνα 58: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 3 ^{ου} δοκιμίου.....	- 169 -
Εικόνα 59: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 4 ^{ου} δοκιμίου.....	- 169 -
Εικόνα 60: Συνοπτική παρουσίαση των περιοχών αστοχίας δοκιμίων αλουμινίου μετά την επιβολή κυκλικών φορτίων, (α) καθαρό δοκίμιο χωρίς διάβρωση, (β) δοκίμιο με επιβολή μικρής τάξης διάβρωσης, (γ) δοκίμιο με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης, (δ) δοκίμιο με επιβολή χαμηλής τάξης διάβρωσης, (ε) δοκίμιο με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης.....	- 172 -

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Παρουσίαση των επιμέρους κατηγοριών της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών. ...	- 20 -
Σχήμα 2: Τυπικό διάγραμμα δυναμικής καταπόνησης μεταβλητού πλάτους.	- 28 -
Σχήμα 3: Τυπικό διάγραμμα πλήρως συμμετρικής και αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης	- 28 -
Σχήμα 4: Τυπικό διάγραμμα συμμετρικής μη αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης μεταξύ μηδενικής και εφελκυστικής φόρτισης.	- 29 -
Σχήμα 5: Τυπικό διάγραμμα ασύμμετρης αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης μεταξύ εφελκυσμού – θλίψης – εφελκυσμού.	- 29 -
Σχήμα 6: Τυπικό διάγραμμα ασύμμετρης μη αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης στην εφελκυστική περιοχή.	- 30 -
Σχήμα 7: Χαρακτηριστική καμπύλη S-N διαγράμματος κόπωσης.....	- 30 -
Σχήμα 8: Χαρακτηριστική καμπύλη S-N διαγράμματος κόπωσης με εισαγωγή πιθανότητας.	- 31 -

Σχήμα 9: Καμπύλες S-N κραμάτων αλουμινίου με την ανάδειξη των χαρακτηριστικών περιοχών των διαγραμμάτων κόπωσης.	- 32 -
Σχήμα 10: Χαρακτηριστικές καμπύλες S-N εργαλειοχάλυβα όπου εντοπίζεται το όριο αντοχής σε κόπωση και ενός κράματος αλουμινίου που δεν εντοπίζεται το όριο αντοχής σε κόπωση.....	- 33 -
Σχήμα 11: Καμπύλες κόπωσης σε περιοχές ολιγοκυκλικής και πολυκυκλικής καταπόνησης καθώς και σύνθετης συμπεριφοράς.	- 36 -
Σχήμα 12: Ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK	- 40 -
Σχήμα 13: Συγκεντρωτική παρουσίαση των σταδίων ανάπτυξης ρωγμής και ανάδειξη των κύριων χαρακτηριστικών τους.	- 43 -
Σχήμα 14: Η τριμερής σχέση που χαρακτηρίζει όλα τα υλικά.	- 44 -
Σχήμα 15: Παρουσίαση των διαθέσιμων αναπτυσσόμενων γαλβανικών κελιών.....	- 59 -
Σχήμα 16: Η πλήρης παραγωγική διαδικασία του αλουμινίου από το βωξίτη.....	- 72 -
Σχήμα 17: Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού διάβρωσης οπών σε κράματα αλουμινίου....	- 90 -
Σχήμα 18: Κατάταξη των κραμάτων αλουμινίου σε αύξουσα σειρά ως προς την αντίσταση τους σε τοπικές μορφές διάβρωσης.	- 92 -
Σχήμα 19: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών ειδών ελαστικών κυμάτων.	- 101 -
Σχήμα 20: Αναπαράσταση τυπικής κυματομορφής AE με τα βασικά χαρακτηριστικά που την περιγράφουν.....	- 105 -
Σχήμα 21: Αναπαράσταση κυματομορφών AE με ανάδειξη των όρων Long/Short HDT.....	- 107 -
Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση θερμικής μετάδοσης μέσω αγωγής ενός συνθέτου.....	- 117 -
Σχήμα 23: Σχηματική αναπαράσταση θερμικής μετάδοσης μέσω συναγωγής και αγωγής ενός αγωγού.	- 118 -
Σχήμα 24: Σχηματική αναπαράσταση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός υλικού.	- 119 -
Σχήμα 25: Αναπαράσταση προσπίπτουσας δέσμης στην επιφάνεια ενός σώματος και ανάδειξη των επιμέρους μηχανισμών ακτινοβολίας που λαμβάνουν χώρα.	- 121 -
Σχήμα 26: Ανάδειξη της σχέσης ανάμεσα στη θερμοκρασία, την εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία και τον συντελεστή εκπομπής.	- 122 -
Σχήμα 27: Τυπική αναπαράσταση της διάταξης θερμογραφίας υπέρυθρου.	- 125 -
Σχήμα 28: Συνοπτική παρουσίαση τεχνικών ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου ως συνάρτηση της πηγής διέγερσης.	- 129 -
Σχήμα 29: Σχηματική αναπαράσταση ενεργητικής θερμογραφίας παλμού.	- 130 -
Σχήμα 30: Σχηματική αναπαράσταση ενεργητικής θερμογραφίας διαμορφώμενου παλμού.	- 131 -
Σχήμα 31: Ερμηνεία της θερμογραφίας lock-in χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.....	- 132 -
Σχήμα 32: Παρουσίαση των σταδίων των θερμικών κατεργασιών που εφαρμόστηκαν στα δοκίμια αλουμινίου, αριστερά της T651 και δεξιά της T731.	- 141 -

<i>Σχήμα 33: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης που προκύπτει μέσω πειράματος εφελκυσμού.....</i>	<i>- 145 -</i>
--	----------------

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση ρωγμών ανάλογα με την κλίμακα αναφοράς και τους επιστημονικούς κλάδους που εμφανίζονται.</i>	<i>- 22 -</i>
<i>Πίνακας 2: Μονοτονικές και κυκλικές μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Πίνακας 3: Παρουσίαση των κύριων προβλημάτων διάβρωσης.</i>	<i>- 46 -</i>
<i>Πίνακας 4: Παράρτημα του πίνακα ηλεκτροχημικής σειράς των μετάλλων.</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Πίνακας 5: Γαλβανική σειρά μεταλλικών υλικών σε περιβάλλον θαλασσινού νερού σύμφωνα με την I.N.C (International Nickel Company).</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Πίνακας 6: Κύριες φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου.....</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Πίνακας 7: Χαρακτηριστικές ιδιότητες αλουμινίου και συνήθεις εφαρμογές.</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Πίνακας 8: Ταξινόμηση των ελατών ή διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου.'</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Πίνακας 9: Ταξινόμηση των χυτών κραμάτων αλουμινίου.</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Πίνακας 10: Συγκεντρωτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών, πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της ΑΕ.....</i>	<i>- 99 -</i>
<i>Πίνακας 11: Ταχύτητες του ήχου για επιμήκη και εγκάρσια κύματα σε διαφορετικά μέσα διάδοσης.</i>	<i>- 103 -</i>
<i>Πίνακας 12: Παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της θερμογραφίας IR.</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Πίνακας 13: Συνηθέστεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή εκπομπής. '.....</i>	<i>- 124 -</i>
<i>Πίνακας 14: Παρουσίαση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων παθητικής θερμογραφίας.'</i>	<i>- 127 -</i>
<i>Πίνακας 15: Τυπική χημική σύσταση κράματος Al 7075.....</i>	<i>- 137 -</i>
<i>Πίνακας 16: Τυπικές τιμές ιδιοτήτων al 7075 χωρίς επεξεργασία, σε θερμοκρασία δωματίου. .-</i>	<i>- 137 -</i>
<i>Πίνακας 17: Συνοπτικός πίνακας διαστασιολόγησης των διαθέσιμων δοκιμίων.....</i>	<i>- 139 -</i>
<i>Πίνακας 18: Τιμές παραμέτρων σκληρομέτρησης Brinell.</i>	<i>- 144 -</i>
<i>Πίνακας 19: Παρουσίαση τιμών των παραμέτρων των διαθέσιμων συνθηκών διάβρωσης.-</i>	<i>- 154 -</i>
<i>Πίνακας 20: Μετρήσεις μαζών δοκιμίων κόπωσης αλουμινίου.</i>	<i>- 160 -</i>
<i>Πίνακας 21: Τιμές προσδιορισμού πυκνότητας δοκιμίων κόπωσης αλουμινίου.....</i>	<i>- 161 -</i>
<i>Πίνακας 22: Τιμές των δοκιμών σκληρομέτρησης Brinell.</i>	<i>- 162 -</i>
<i>Πίνακας 23: Τιμές παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς εφελκυσμού δοκιμίου al 7075 - T651.</i>	<i>- 163 -</i>

<i>Πίνακας 24: Τιμές παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς εφελκυσμού δοκιμίου al 7075 - T731.</i>	
.....	- 164 -
<i>Πίνακας 25: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αρχικών διαμορφωμένων κοιλοτήτων.....</i>	- 167 -
<i>Πίνακας 26: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαβρωμένων περιοχών.</i>	- 170 -
<i>Πίνακας 27: Ποσοστά κόπωσης αστοχίας των δοκιμίων αλουμινίου, κατόπιν ηλεκτροχημικής διάβρωσης.....</i>	- 172 -

Κατάλογος Διαγραμμάτων

<i>Διάγραμμα 1: Παρουσίαση πειραματικής πορείας με χρήση διαγράμματος ροής.....</i>	- 135 -
<i>Διάγραμμα 2: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 χωρίς διάβρωση.</i>	- 174 -
<i>Διάγραμμα 3: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή μικρής τάξης διάβρωσης.</i>	- 175 -
<i>Διάγραμμα 4: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης.</i>	- 175 -
<i>Διάγραμμα 5: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή μικρής τάξης διάβρωσης.</i>	- 176 -
<i>Διάγραμμα 6: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης.</i>	- 176 -

Μέρος I : Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κεφάλαιο 1^ο : Μηχανική Συμπεριφορά

1.1 Εισαγωγή στη Μηχανική Συμπεριφορά Μεταλλικών Υλικών

Η μηχανική συμπεριφορά μεταλλικών υλικών ή μηχανική μεταλλουργία είναι ο τομέας εκείνος της μεταλλουργίας που ασχολείται, κατά κύριο λόγο, με την απόκριση των μεταλλικών υλικών σε εξωτερικές δυνάμεις και, γενικότερα, σε μηχανικά φορτία. Τα φορτία αυτά μπορεί να καταπονούν ένα μέταλλο κατά τη χρήση του σαν δομικό στοιχείο μίας κατασκευής ή κατά τη λειτουργία του σαν εξάρτημα μιας μηχανής. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απολύτως απαραίτητο για τον μηχανικό να γνωρίζει κάποιες χαρακτηριστικές οριακές τιμές ή “αντοχές” του μετάλλου, οι οποίες όσο δεν ξεπερνιούνται κατά τη λειτουργία εξασφαλίζουν ότι το δομικό στοιχείο ή εξάρτημα δεν θα υποστεί αστοχία. Με τον όρο “αστοχία” (*failure*) περιγράφεται η αδυναμία ενός δομικού στοιχείου ή στοιχείου μηχανών να συνεχίσει να επιτελεί ομαλά, αποτελεσματικά και με ασφάλεια την λειτουργία του. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αστοχήσει ένα δομικό στοιχείο ποικίλλουν και αποτελούν ένα σύνθετο επιστημονικό πεδίο μηχανικής μελέτης. (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Παπαδόπουλος, 2013), (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (William, 2015)

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών δεν είναι ένα αντικείμενο που μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί μεμονωμένα αλλά αποτελεί έναν συνδυασμό γνώσεων και μεθόδων από διαφορετικούς κλάδους της επιστήμης του μηχανικού, όπως για παράδειγμα η αντοχή υλικών, η τεχνολογία υλικών και η φυσική μεταλλουργία, καθώς και για ένα συνδυασμό διαφορετικών προσεγγίσεων στο θέμα της συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών κάτω από την επίδραση δυνάμεων (*Σχήμα 1*). Από τη μία πλευρά υπάρχει η προσέγγιση της *κλασσικής αντοχής των υλικών*, η οποία βρίσκει εφαρμογή στις θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας, όπου το μέταλλο θεωρείται σαν ένα ομογενές, συνεχές μέσο, του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια με τη χρήση μερικών μόνο σταθερών του υλικού. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί την επιστημονική βάση για τον υπολογισμό, την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση δομικών στοιχείων κατασκευών και στοιχείων μηχανών.

(Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Παπαδόπουλος, 2013), (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (William, 2015)



Σχήμα 1: Παρουσίαση των επιμέρους κατηγοριών της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών.

Οι θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας, που εφαρμόζονται από την σκοπιά της αντοχής των υλικών, παύουν να ισχύουν σε μεγάλο βαθμό όταν αρχίσει να γίνεται σημαντική η επίδραση της μικροδομής (*microstructure*) του μετάλλου, οπότε το υλικό δεν μπορεί πλέον να θεωρείται σαν ομογενές. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μηχανική συμπεριφορά των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου εκεί είναι δυνατόν η μικροδομή του υλικού να μεταβάλλεται διαρκώς με το χρόνο. Μία άλλη τέτοια περίπτωση είναι η μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση, που παρατηρείται στους απλούς ανθρακοχάλυβες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο καθορισμός της εξάρτησης της μηχανικής συμπεριφοράς από τη μικροδομή αποτελεί το κατεξοχήν αντικείμενο ενασχόλησης της φυσικής μεταλλουργίας. (Παπαδόπουλος, 2013), (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (William, 2015)

1.2 Εισαγωγή στη θραυστομηχανική

Τα τελευταία χρόνια η θραυστομηχανική έχει εξελιχθεί σε έναν αυτόνομο επιστημονικό κλάδο που τοποθετείται ανάμεσα στη μηχανική, την επιστήμη των υλικών και τη φυσική των στερεών σωμάτων. Κύριο αντικείμενό της είναι η μελέτη της διάνοιξης και της διάδοσης ρωγμών σε διάφορα υλικά. Στο πλαίσιο αυτό έχουν

αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες και πειραματικές προσομοιώσεις για τη μελέτη, τη συμπεριφορά και τη διάδοση ρωγμών στα διάφορα υλικά υπό στατικές, δυναμικές ή κυκλικές φορτίσεις. (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (Παπαδόπουλος, 2013), (SHARIF, 1996)

Στη σύγχρονη εποχή η αποφυγή και η αποτίμηση των ρωγμών και της ζημιάς γενικότερα παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση κατασκευών, μηχανολογικού εξοπλισμού ή εγκαταστάσεων με σκοπό την ασφάλεια την αντοχή και την αξιοπιστία τους. Κατά το σχεδιασμό σε πολλά υλικά μπορεί να προϋπάρχουν διάφορα ελαττώματα σε μικροσκοπικό ή μακροσκοπικό επίπεδο τα οποία οφείλεται να ληφθούν υπόψη. Η πρώτη καταγεγραμμένη περίπτωση αστοχίας λόγω ψαθυρής θραύσης και ύπαρξης αρχικής ρωγμής είναι η καταστροφή μίας μεγάλης δεξαμενής μελάσας τον Ιανουάριο του 1919 στη Βοστώνη με 12 θύματα, πολλούς τραυματίες και πολλές ζημιές σε γειτονικά κτίρια (*Εικόνα 1*).



Εικόνα 1: Τραγωδία λόγω αστοχίας σε δεξαμενή μελάσας, Βοστώνη 1919.¹

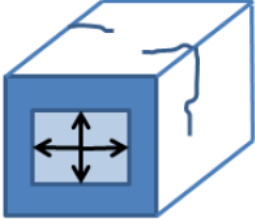
Ο μεγάλος αριθμός των αστοχιών, εκείνης της εποχής, έστρεψαν τη προσοχή των μηχανικών στο πρόβλημα της ψαθυρής θραύσης και το 1950 θεσπίστηκαν οι πρώτοι κανονισμοί για την ποιότητα του χάλυβα, που αποτελούσε και συνεχίζει μέχρι σήμερα να αποτελεί κυρίαρχο υλικό των μηχανικών κατασκευών. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η συστηματική ανάπτυξη της επιστημονικής περιοχής της μηχανικής των θραύσεων, στοιχεία της οποίας θα παρουσιαστούν στη συνέχεια του κεφαλαίου. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (William, 2015), (Παλτόγλου, 2016)

¹ <https://www.lifo.gr/team/lola/45366>

1.3 Κατηγορίες θραύσης

Θραύση (*fracture*) ονομάζεται ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η διαδικασία της θραύσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο διακριτά στάδια: την πυρήνωση (*initiation*) και την προώθηση (*propagation*) ρηγμάτων. Τα φαινόμενα αστοχίας και θραύσης εντοπίζονται σε όλα τα επίπεδα παρατήρησης υλικών δηλαδή από τα ατομικά επίπεδα έως τα επίπεδα μακροκλίμακας (Πίνακας 1). (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, 2003), (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (William, 2015), (Καναβάρης, 2014), (Παπαδόπουλος, 2013), (Σοφινός, 2014), (Ψυλλάκη, 2006)

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση ρωγμών ανάλογα με την κλίμακα αναφοράς και τους επιστημονικούς κλάδους που εμφανίζονται.²

Νάνο-κλίμακα 10^{-10}	Μίκρο-κλίμακα 10^{-9}	Μέσο-κλίμακα 10^{-6}	Μάκρο-κλίμακα 10^{-3}
			
Κλάδος Φυσικής	Κλάδος Μηχανικής Θραυστομηχανικής		Κλάδος Μηχανικής Στερεάς Κατάστασης
Ατομικοί δεσμοί	Μικρο- απομακρύνσεις	Ελαττώματα	Ρωγμές

Η θραύση των υλικών γενικά διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: όλκιμη (*ductile*) και ψαθυρή (*brittle*). Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρηγμάτων, τα οποία τελικά επιφέρουν τη θραύση. Αντίθετα, η ψαθυρή θραύση χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ταχύτητα με την οποία προωθούνται τα ρήγματα στο υλικό, χωρίς να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση. Ο τύπος της θραύσης που συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξαρτάται από τη σύνθεση της

² <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/40658?show=full>

περιοχής, την τάση, το περιβάλλον, τις τάσεις και τον προσανατολισμό των κόκκων. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, Εισαγωγή στην Τεχνολογία Υλικών, 2003) , (Παπαδόπουλος, 2013), (William, 2015), (Σοφιανός, 2014), (Ψυλλάκη, 2006)

1.4 Μηχανική των θραύσεων

Αντοχή ενός υλικού ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό στην πλαστική ροή. Αυξάνοντας την τάση μέχρι να παρουσιαστούν διαταραχές σε ολόκληρη τη διατομή, που σημαίνει ότι το δείγμα μόλις αρχίζει να διαρρέει, μετριέται η αρχική αντοχή σε διαρροή. Η αντοχή γενικά αυξάνεται με την πλαστική παραμόρφωση λόγω εργοσκήληρυνσης και φτάνει τη μέγιστη τιμή της στην αντοχή σε εφελκυσμό. Η δυσθραυστότητα αντίστοιχα ορίζει την αντίσταση ενός υλικού στη διάδοση μιας ρωγμής. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, Εισαγωγή στην Τεχνολογία Υλικών, 2003), (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (William, 2015), (SHARIF, 1996), (Καναβάρης, 2014), (Παλτόγλου, 2016), (Παπαδόπουλος, 2013), (Ψυλλάκη, 2006)

Υποθέτοντας την ύπαρξη μίας οξείας ρωγμής, μειώνει την ενεργή επιφάνεια που λαμβάνει την εξωτερική τάση οδηγώντας, σε περίπτωση χαμηλής δυσθραυστότητας, σε απότομη διάδοση της ρωγμής και τελική αστοχία του δοκιμίου σε τάση πολύ μικρότερη από την αντοχή σε διαρροή. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο η μελέτη γύρω από την ανάπτυξη αρχικής ρωγμής, τους μηχανισμούς ανάπτυξης της και τέλος τα τασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα πριν την θραύση ενός υλικού. (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, Εισαγωγή στην Τεχνολογία Υλικών, 2003) , (William, 2015), (Καναβάρης, 2014), (Παλτόγλου, 2016), (Παπαδόπουλος, 2013), (Ψυλλάκη, 2006)

1.5 Μηχανική συμπεριφορά σε δυναμικές καταπονήσεις

Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την υποβολή ενός εναλλασσόμενου περιοδικού και συνεχούς φορτίου σε ένα μεταλλικό εξάρτημα ή δοκίμιο, αυτό θα αστοχήσει από θραύση σε τιμές τάσεων κατά πολύ μικρότερων από το μέγιστο όριο αστοχίας σε εφελκυσμό ή ακόμα και του ορίου διαρροής. Η θραύση επέρχεται δίχως ανάπτυξη πλαστικής παραμόρφωσης κάνοντας την παρατήρηση του φαινομένου ιδιαίτερα

δύσκολη και σε συνδυασμό με την πρόωρη αστοχία, οδηγεί στην απαίτηση άμεσης προσοχής και αντιμετώπισης του φαινομένου. (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (Sondalini, 2016), (Παπαδόπουλος, 2013), (Γεωργαντζίνος, 2016), (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, 2003)

Ήδη από το 1830 είχε διαπιστωθεί ότι τα μεταλλικά υλικά, όταν καταπονούνται από επαναλαμβανόμενες ή χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις, μπορούν να αστοχήσουν σε θραύση, ακόμη και όταν οι τιμές των τάσεων αυτών βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα από την αντοχή του υλικού σε θραύση. Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται κόπωση, *fatigue*. Τα στοιχεία μπορεί να είναι άψογα χωρίς επιφανειακές ατέλειες ή να περιέχουν αρχικές ρωγμές και επιφανειακές ατέλειες λόγω κατεργασίας ή φθοράς. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (William, 2015)

Σύμφωνα με την A.S.T.M , *American Society for Testing and Materials* ως κόπωση ορίζεται:

“ Η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μόνιμων δομικών μεταβολών, που συμβαίνουν στο υλικό, όταν αυτό υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες ή τυχαία μεταβαλλόμενες καταπονήσεις, που μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της αντοχής του και τελικά σε πλήρη θραύση, μετά από έναν επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου. ”

Το βασικό χαρακτηριστικό της κόπωσης είναι ότι απαιτεί μία σημαντική χρονική περίοδο λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μίας κατασκευής για να εμφανιστεί. Μάλιστα, καθώς η πρόοδος της τεχνολογίας έφερε σε χρήση νέα δομικά στοιχεία, τα οποία βρήκαν εφαρμογή σε κατασκευές όπως αυτοκίνητα, αεροσκάφη, συμπιεστές και στρόβιλοι στα οποία οι μηχανικές καταπονήσεις είναι κατ' εξοχήν δυναμικές, η κόπωση απέκτησε σταδιακά όλο και μεγαλύτερη σημασία σαν μηχανισμός αστοχίας. Εκτιμάται ότι το 90% των αστοχιών που προέρχονται από μηχανικά αίτια, οφείλεται σε κόπωση (Εικόνα 2). (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (William, 2015), (Patibandla, 2011), (Sondalini, 2016), (Tatsuo Sakai, 2016), (Παπαδόπουλος, 2013)



Εικόνα 2: Παραδείγματα αστοχιών δομικών κατασκευών και μηχανολογικών στοιχείων λόγω κόπωσης.^{3,4}

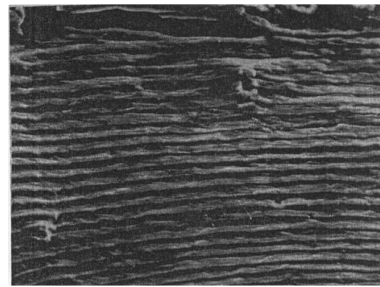
1.5.1 Επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης

Η επιφάνεια αστοχίας ενός δοκιμίου λόγω κόπωσης παρουσιάζει μία ιδιαίτερη μορφολογία σε σχέση με την αντίστοιχη επιφάνεια όλκιμης ή ψαθυρής θραύσης. Συγκεκριμένα, ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας θραύσης έχει λεία εμφάνιση, η οποία οφείλεται στην τριβή των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους καθώς αυτό προωθείται σταδιακά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αντίθετα, ένα μικρότερο τμήμα της επιφάνειας, το οποίο αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο της θραύσης, έχει ανώμαλη εμφάνιση και οφείλεται στη γρήγορη εξέλιξη του ρήγματος με όλκιμο τρόπο μέσα στο υλικό, καθώς η μειωμένη διατομή του υλικού που έχει απομείνει δεν μπορεί να αντέξει πλέον τα επιβαλλόμενα φορτία. (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, 2003), (William, 2015), (Patibandla, 2011), (Ασημακόπουλος, 2007), (Παπαδόπουλος, 2013)

Ένα εξίσου τυπικό χαρακτηριστικό των επιφανειών θραύσης που προήλθαν από κόπωση είναι οι γραμμώσεις που δημιουργούνται σε αυτήν σε μορφή κυμάτων άμμου όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Οι γραμμώσεις αυτές έχουν συνήθως σχήμα τόξων από ομόκεντρους κύκλους, το κέντρο των οποίων υποδεικνύει το σημείο όπου βρισκόταν το αρχικό ρήγμα (Εικόνα 3). Η απόσταση της μίας γραμμώσης από την άλλη δίνει μία καλή εκτίμηση της ταχύτητας με την οποία προωθήθηκε το ρήγμα μέσα στο υλικό. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (William, 2015), (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Ασημακόπουλος, 2007)

³ <https://www.reliasoft.com/resources/resource-center/reliability-prediction-for-components-in-fatigue>

⁴ <https://failuremechanisms.wordpress.com/tag/causes-of-fatigue>



Εικόνα 3: Χαρακτηριστικές επιφάνειες, σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο, αστοχίας δοκιμίου τιτανίου Ti-6Al-4V λόγω κόπωσης.^{5,6}

Για να αναπτυχθούν συνθήκες κόπωσης και να επέλθει αστοχία του δοκιμίου μέσω του μηχανισμού θραύσης πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες συνθήκες όπως: (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, 2003), (William, 2015), (Tatsuo Sakai, 2016), (Ασημακόπουλος, 2007)

- Μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση. Σύμφωνα με τη θεωρία ανάπτυξης και διάδοσης μίας ρωγμής, κατά την δυναμική καταπόνηση, ο εφελκυσμός οδηγεί στην εξέλιξη της ρωγμής ενώ η θλίψη στην ανάπτυξη της ατέλειας.
- Μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία. Η έντονη διακύμανση τάσης οδηγεί στην βραχύ ανάπτυξη ρωγμής και εξέλιξής της σε κρίσιμη με αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού.
- Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης. Γενικά υψηλές τάσεις οδηγούν σε μικρούς χρόνους λειτουργίας (*LCF*), ενώ χαμηλές τάσεις σε αυξημένους χρόνους ζωής (*HCF*).

Βέβαια, εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση επηρεάζεται και από μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό κ.α. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επιταχύνουν την ανάπτυξη και εξέλιξη της ρωγμής. Η πολυπλοκότητα και η αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων είναι ο λόγος για τον οποίο η κόπωση δεν έχει εξηγηθεί πλήρως θεωρητικά και η ανάλυσή της βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε πειραματικές και εμπειρικές παρατηρήσεις. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, 2003)

⁵ <http://apaq.potanist.co/fatigue-failure>

⁶ http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA120/07_Fatigue.pdf

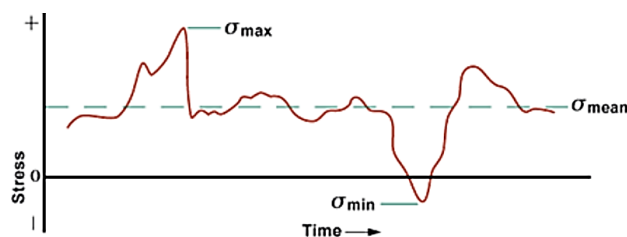
1.5.2 Κύρια χαρακτηριστικά των δυναμικών καταπονήσεων

Η δυναμική καταπόνηση βασίζεται στην εναλλαγή εφαρμογής τάσεων με σταθερό ή μεταβαλλόμενο χρονικό βήμα ή αλλιώς συχνότητα. Στη γενικότερη κατάσταση η εναλλαγή των τάσεων πραγματοποιείται μεταξύ μίας εφελκυστικής και μίας θλιπτικής τάσης. Ωστόσο η παραπάνω κατάσταση είναι αρκετά ιδεατή καθώς η κόπωση μηχανικών στοιχείων αλλάζει συνεχώς μορφή και συνήθως αποτελείται από διάφορα είδη και στάδια καταπόνησης όπως δυναμική καταπόνηση μεταξύ εφελκυσμών, δυναμική καταπόνηση μεταξύ θλιπτικών φορτίων και ασύμμετρη καταπόνηση μεταξύ εφελκυσμού και θλίψεως, (Σχήμα 2). (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (William, 2015), (Roylance, 2001), (Αλεξόπουλος, 2010)

Τα κύρια μαθηματικά στοιχεία που περιγράφουν πλήρως την μηχανική κόπωση είναι το $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, σ_a , σ_m , $\Delta\sigma$, και R . Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά των δοκιμών κόπωσης περιγράφονται ως: (Patibandla, 2011), (Roylance, 2001), (Tatsuo Sakai, 2016), (Αλεξόπουλος, 2010)

- Η μέγιστη και η ελάχιστη τάση μεταξύ ενός δυναμικού κύκλου, $\sigma_{\max}$ και $\sigma_{\min}$. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μέγιστη και η ελάχιστη τάση δεν είναι απαραίτητο να περιγράφουν έναν εφελκυσμό και μία θλίψη αλλά δύο εφελκυσμούς ή δύο θλίψεις.
- Το πλάτος της δυναμικής καταπόνησης δηλαδή η απόσταση μεταξύ μέγιστου σημείου και μέσης τιμής σ_a , όπου $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$.
- Η μέση τιμή της δυναμικής καταπόνησης σ_m , όπου $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$.
- Το εύρος της δυναμικής καταπόνησης $\Delta\sigma$, όπου $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2 * \sigma_a$.
- Ο λόγος των μέγιστων τάσεων της δυναμικής καταπόνησης R , όπου $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

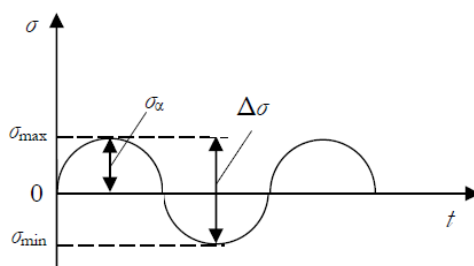
Παρατηρώντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι για την πλήρη περιγραφή του δυναμικού φαινομένου απαιτούνται μόνο δύο στοιχεία από το σύνολο των μαθηματικών παραμέτρων. Επίσης, όλα τα στοιχεία που περιγράφουν την δυναμική καταπόνηση έχουν μονάδες μέτρησης της τάσης εκτός από τον λόγο τάσεων που είναι καθαρός αριθμός. (William, 2015), (Αλεξόπουλος, 2010)



Σχήμα 2: Τυπικό διάγραμμα δυναμικής καταπόνησης μεταβλητού πλάτους.⁷

Ανάλογα με τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων η δυναμική καταπόνηση λαμβάνει συγκεκριμένες χαρακτηριστικές καμπύλες τάσεων – χρόνου. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι συνηθέστερες κατηγορίες καταπονήσεων ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνει ο λόγος των τάσεων, R .

Συμμετρική αντιστρεπτή κόπωση: Η δυναμική καταπόνηση αυτής της μορφής ονομάζεται πλήρως αντιστρεπτή καθώς $\sigma_m = 0$ και $\sigma_{max} = \sigma_{min}$, όπου η σ_{max} είναι εφελκυστική και σ_{min} είναι θλιπτική τάση, (Σχήμα 3). Ο λόγος τάσεων λαμβάνει την τιμή $R = -1$ και αυτή η μορφή καταπόνησης είναι χαρακτηριστική για την εξαγωγή της καμπύλης *Wöhler* του υλικού που θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου. (Αλεξόπουλος, 2010)

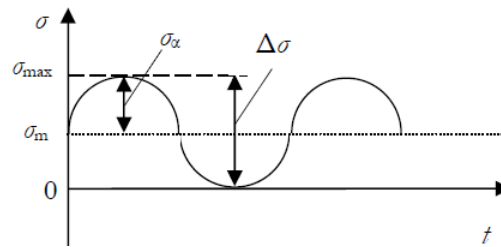


Σχήμα 3: Τυπικό διάγραμμα πλήρως συμμετρικής και αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης.⁸

Συμμετρική μη αντιστρεπτή κόπωση: Η δυναμική καταπόνηση αυτής της μορφής ονομάζεται συμμετρική μη αντιστρεπτή καθώς η μέση τάση ισούται με το πλάτος τάσης δηλαδή $\sigma_m = \sigma_a$, (Σχήμα 4) Γενικά στην κατηγορία αυτή ανήκουν δύο περιπτώσεις μηχανικής κόπωσης, αυτή της μηδενικής φόρτισης – εφελκυστικής φόρτισης ($\sigma_m > 0$) και αυτή της θλιπτικής φόρτισης – μηδενικής φόρτισης ($\sigma_m < 0$). Ο λόγος των τάσεων για αυτές τις δυναμικές καταπονήσεις λαμβάνει την τιμή, $R = 0$. (Αλεξόπουλος, 2010)

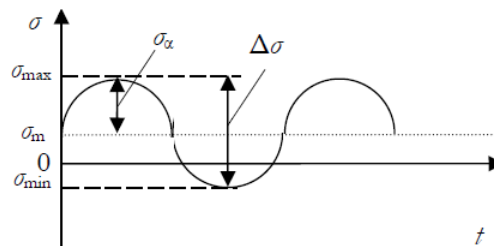
⁷<https://eclass.gunet.gr/modules/document/file.php/OCGU107/Κόπωση/Σημειώσεις%20κόπωσης%20Γεωργατζίνου.pdf>

⁸http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cf/simeioseis_kai_askiseis_stin_koposi.pdf



Σχήμα 4: Τυπικό διάγραμμα συμμετρικής μη αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης μεταξύ μηδενικής και εφελκυστικής φόρτισης.⁹

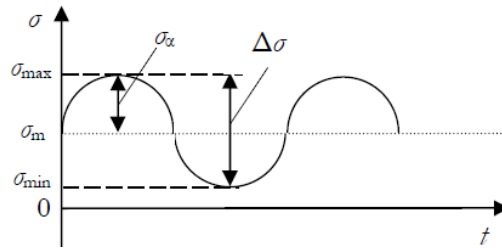
Ασύμμετρη αντιστρεπτή κόπωση: Η δυναμική καταπόνηση αυτής της μορφής ονομάζεται ασύμμετρη αντιστρεπτή καθώς η μέση τάση λαμβάνει μία τυχαία τιμή, $\sigma_m \neq 0$, είτε θετική είτε αρνητική, (Σχήμα 5). Ο όρος αντιστρεπτή αναφέρεται στη μορφή της δυναμικής καταπόνησης να επιστρέφει κατά την ολοκλήρωση μίας περιόδου στο αρχικό είδος φόρτισης, δηλαδή εφελκυσμό-θλίψη-εφελκυσμό ή θλίψη-εφελκυσμό-θλίψη. Ο λόγος των τάσεων για αυτές τις δυναμικές καταπονήσεις λαμβάνει την τιμή, $-1 < R < 0$. (Αλεξόπουλος, 2010)



Σχήμα 5: Τυπικό διάγραμμα ασύμμετρης αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης μεταξύ εφελκυσμού – θλίψης – εφελκυσμού.¹⁰

Ασύμμετρη μη αντιστρεπτή κόπωση: Η δυναμική καταπόνηση αυτής της μορφής ονομάζεται ασύμμετρη μη αντιστρεπτή καθώς η μέση τάση λαμβάνει μία τυχαία τιμή, $\sigma_m \neq 0$, είτε θετική είτε αρνητική, (Σχήμα 6). Ο όρος μη αντιστρεπτή αναφέρεται στη μορφή της δυναμικής καταπόνησης να περιορίζεται το φαινόμενο είτε στην εφελκυστική είτε στη θλιπτική περιοχή. Ο λόγος των τάσεων για αυτές τις δυναμικές καταπονήσεις λαμβάνει την τιμή, $0 < R < 1$. (Αλεξόπουλος, 2010)

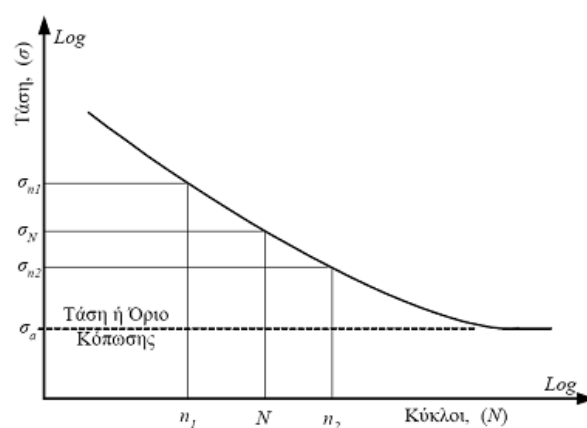
^{9,10} http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cf/simeioseis_kai_askiseis_stin_koposi.pdf



Σχήμα 6: Τυπικό διάγραμμα ασύμμετρης μη αντιστρεπτής δυναμικής καταπόνησης στην εφελκυστική περιοχή.¹¹

1.5.3 Καμπύλες S-N (καμπύλες *Wöhler*)

Το σύνολο των διαθέσιμων πληροφοριών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών σε δυναμικές καταπονήσεις, συγκεντρώνονται στα διαγράμματα *S-N* ή αλλιώς καμπύλες *Wöhler* που το όνομα τους οφείλεται στον μελετητή και δημιουργό τους. Οι καμπύλες αυτές μας δίνουν σημαντική πληροφορία σχετικά με την αντοχή ενός υλικού σε κόπωση σε συνάρτηση με τις επιβαλλόμενες εξωτερικές δυναμικές καταπονήσεις. Συγκεκριμένα, οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα όπου στον κατακόρυφο άξονα έχουν κάποιο στοιχείο της τασικής ποσότητας (*S*) δηλαδή το πλάτος της κόπωσης, τη μέγιστη ή ελάχιστη τάση κόπωσης, ενώ στον οριζόντιο άξονα αναφέρεται ο χρόνος ζωής του υλικού (*N_f*) μέσω του αριθμού των κύκλων κόπωσης μέχρι να επέλθει η θραύση, (Σχήμα 7). (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Patibandla, 2011), (Roylance, 2001), (Tatsuo Sakai, 2016), (Αλεξόπουλος, 2010)



Σχήμα 7: Χαρακτηριστική καμπύλη S-N διαγράμματος κόπωσης.¹²

¹¹ http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cf/simeioseis_kai_askiseis_stin_koposi.pdf

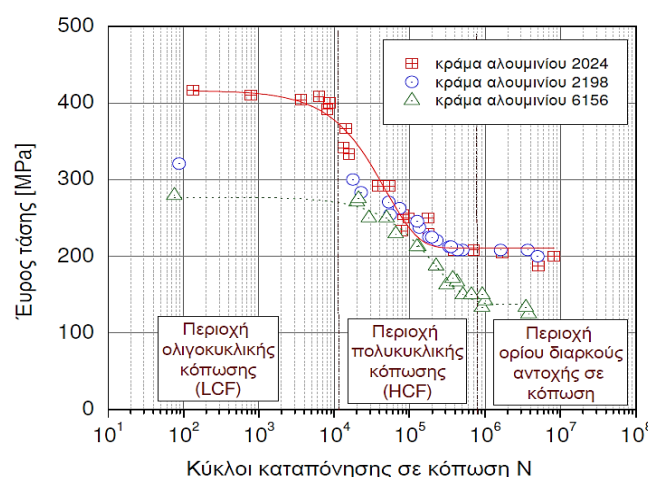
¹² <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/107SNWohler.html>

Έχει παρατηρηθεί επιπλέον (Ransom 1952), ότι ακόμα και αν το υλικό και τα στοιχεία φόρτισης παραμείνουν ίδια, πραγματοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό δοκιμών, το αποτέλεσμα της καμπύλης μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Ως αποτέλεσμα αυτής της παρατήρησης, στη βιβλιογραφία εντοπίζονται χαρακτηριστικές καμπύλες κόπωσης διαφόρων υλικών στα οποία εισάγεται η πιθανότητα εμφάνισης της εκάστοτε καμπύλης, (Σχήμα 8). Τέλος, τα περισσότερα πειράματα κόπωσης πραγματοποιούνται με την επιλογή ενός υλικού, έναν μεγάλο αριθμό δοκιμών και ως χαρακτηριστική τάσης επιλέγεται $\sigma_m = 0$. Ωστόσο, επειδή σε πραγματικές εφαρμογές ισχύει ότι $\sigma_m \neq 0$, θα πρέπει να αναφερθούν οι μεταβολές που προκύπτουν στις καμπύλες κόπωσης ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνουν τα χαρακτηριστικά της φόρτισης. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Patibandla, 2011), (Ασημακόπουλος, 2007)



¹³ http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA120/07_Fatigue.pdf

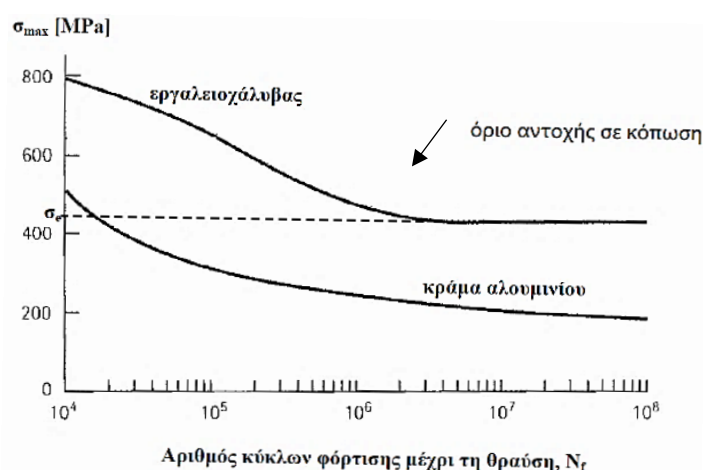
- Περιοχή ολιγοκυκλικής κόπωσης (Low Cycle Fatigue – LCF): Στην περιοχή αυτή η διάρκεια ζωής του υλικού είναι σύντομη, έως 10^4 κύκλους φόρτισης για να επέλθει αστοχία. Το υλικό υπόκειται σε φορτίσεις με υψηλές τιμές τάσης, οι οποίες είναι μεγαλύτερες ή ίσες από το όριο διαρροής του υλικού και επομένως αναμένονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Στοιχεία που σχεδιάζονται με γνώμονα την αντοχή τους σε ολιγοκυκλική κόπωση αποτελούν διατάξεις πυρηνικών αντιδραστήρων ή σκαπτικά και χωματουργικά μηχανήματα. (Αλεξόπουλος, 2010)
- Περιοχή πολυκυκλικής κόπωσης (High Cycle Fatigue – HCF): Στην περιοχή αυτή η διάρκεια ζωής του υλικού είναι μεγάλη συνήθως μεταξύ 10^4 και 10^7 κύκλους φόρτισης για να επέλθει αστοχία. Το υλικό υπόκειται σε φορτίσεις με χαμηλές τιμές τάσης, οι οποίες είναι μικρότερες από το όριο διαρροής του υλικού και επομένως οι παραμορφώσεις είναι κυρίως ελαστικές. Στοιχεία που σχεδιάζονται με γνώμονα την αντοχή τους σε πολυκυκλική κόπωση αποτελούν περιστρεφόμενα εξαρτήματα και στοιχεία που υπόκεινται σε ταλαντώσεις. (Αλεξόπουλος, 2010)
- Περιοχή διαρκούς αντοχής σε κόπωση (Endurance Limit): Στην περιοχή αυτή το υλικό δεν πρόκειται να αστοχήσει υπό τα επιβαλλόμενα φορτία κόπωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η περιοχή αυτή μπορεί να ξεκινάει στους 10^8 και 10^7 κύκλους φόρτισης για κράματα χάλυβα και αλουμινίου αντίστοιχα. (Αλεξόπουλος, 2010)



Σχήμα 9: Καμπύλες S-N κραμάτων αλουμινίου με την ανάδειξη των χαρακτηριστικών περιοχών των διαγραμμάτων κόπωσης.¹⁴

¹⁴ http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cf/simeioseis_kai_askiseis_stin_koposi.pdf

Το όριο αντοχής σε κόπωση ενός υλικού είναι το σημαντικότερο στοιχείο κατά το σχεδιασμό έναντι σε δυναμικές καταπονήσεις. Γενικά, το όριο αντοχής σε κόπωση αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη μέση τιμή σ_m και περιγράφει την τιμή του πλάτους κόπωσης σ_a κάτω από την οποία θεωρείται ότι το υλικό δεν αστοχεί για οποιοδήποτε αριθμό κύκλων φόρτισης ($N \rightarrow \infty$). Παράλληλα, εκτός από τον απόλυτο ορισμό αναφέρεται στη βιβλιογραφία και το *τεχνητό όριο* αλλά και το *συμβατικό όριο* κόπωσης. Το τεχνητό όριο κόπωσης είναι το όριο κόπωσης ενός υλικού, κάτω από το οποίο δεν σημειώνεται σημαντική μείωση της αντοχής του με αύξηση των κύκλων φόρτισης. Αντίστοιχα, το συμβατικό όριο κόπωσης ενός υλικού για μία ορισμένη μέση τάση σ_m , ονομάζεται η μέγιστη τιμή σ_a του πλάτους της περιοδικής φόρτισης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στο δοκίμιο χωρίς αυτό να αστοχήσει σε ένα ορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης. Ενώ το απόλυτο όριο αντοχής σε κόπωση εντοπίζεται στα διαγράμματα και στις καμπύλες S-N χαλύβων και εργαλειοχαλύβων, στα κράματα αλουμινίου δεν εντοπίζεται και χρησιμοποιούνται οι ορισμοί του τεχνικού και συμβατικού ορίου κόπωσης, (Σχήμα 10). (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Patibandla, 2011), (Roylance, 2001), (Tatsuo Sakai, 2016), (Ασημακόπουλος, 2007), (Ψυλλάκη, 2006)



Σχήμα 10: Χαρακτηριστικές καμπύλες S-N εργαλειοχάλυβα όπου εντοπίζεται το όριο αντοχής σε κόπωση και ενός κράματος αλουμινίου που δεν εντοπίζεται το όριο αντοχής σε κόπωση.¹⁵

Γενικά, στους χάλυβες ως συμβατικό όριο κόπωσης ορίζεται η τάση στην οποία το δοκίμιο αντέχει για $N = 10^8$ κύκλους καταπόνησης. Αντίστοιχα, στα κράματα

¹⁵ http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_VIII.pdf

αλουμινίου, ως συμβατικό όριο κόπωσης ορίζεται η τάση στην οποία το δοκίμιο αντέχει για $N = 10^7$ κύκλους καταπόνησης. (Ψυλλάκη, 2006)

1.5.4 Μαθηματική περιγραφή κόπωσης

Η γενική θεώρηση της κόπωσης στηρίζεται στην υπόθεση ότι το υλικό μελέτης είναι τέλει, χωρίς προ υπάρχουσες επιφανειακές ρωγμές. Στην περίπτωση κυκλικής φορτίσεως με πλήρη αναστροφή της τάσεως και χαμηλές τιμές του πλάτους τάσεως η διάρκεια ζωής υπερβαίνει τους 10^3 με 10^4 κύκλους, πολυκυκλική φόρτιση. Η παραπάνω μορφή κόπωσης, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ονομάζεται πολυκυκλική κόπωση και περιγράφεται με τον νόμο *Basquin*. (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Roylance, 2001), (Sondalini, 2016), (Αλεξόπουλος, 2010)

Ο νόμος *Basquin* περιγράφει τη μεταβολή του εναπομείναντα χρόνου ζωής ενός υλικού σε αριθμό κύκλων κόπωσης, σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πλάτος δυναμικής καταπόνησης. Εάν τα πειραματικά δεδομένα τοποθετηθούν σε διπλή λογαριθμική κλίμακα ως $\log \sigma_a$ σε συνάρτηση με $\log 2N_f$, όπου $2N_f$ ο αριθμός των αναστροφών του φορτίου τότε η σχέση είναι γραμμική και περιγράφεται από την *Εξίσωση 1.1* : (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, 2005), (Fatemi, 2010), (Patibandla, 2011), (Roylance, 2001), (Tatsuo Sakai, 2016), (Αλεξόπουλος, 2010)

$$\sigma_a = \sigma'_f * (2N_f)^b, \text{ (Basquin) } \quad (\text{Εξ. 1.1})$$

όπου το σ'_f είναι ο συντελεστής αντοχής σε κόπωση και αντίστοιχα το b είναι ο εκθέτης αντοχής σε κόπωση ή εκθέτης *Basquin*. Οι παράμετροι σ'_f και b αποτελούν ιδιότητες του μετάλλου. Ο συντελεστής αντοχής σε κόπωση προσδιορίζεται συνήθως ως ένα ποσοστό του σ_{uts} , το όριο θραύσης σε μονοτονική θραύση ή ταυτίζεται με αυτό υπό προϋποθέσεις. Αντίστοιχα, ο εκθέτης b κυμαίνεται στην περιοχή $-0.12 < b < -0.05$ με τυπική τιμή $b = -0.1$.

Στην περίπτωση της ολιγοκυκλικής φόρτισης όπου εντοπίζονται υψηλές πλαστικές παραμορφώσεις, η γραμμική σχέση του *Basquin* αδυνατεί να περιγράψει την μηχανική συμπεριφορά του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή η διάρκεια ζωής συσχετίζεται καλύτερα με το πλάτος της πλαστικής παραμόρφωσης μέσω της *Εξίσωσης 1.2* : (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Tatsuo Sakai, 2016)

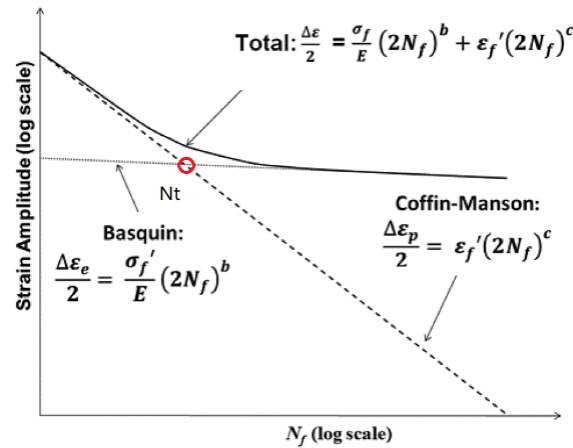
$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f * (2N_f)^c, \text{ (Coffin – Manson) } \quad (\text{Εξ. 1.2})$$

όπου ε'_f είναι ο συντελεστής ολκιμότητας σε κόπωση και το c ο αντίστοιχος εκθέτης ολκιμότητας. Η παραπάνω σχέση ονομάζεται *Coffin – Manson*. Οι παράμετροι ε'_f και c αποτελούν ιδιότητες του υλικού. Συχνά ο συντελεστής ολκιμότητας, σε αντιστοιχία με το συντελεστή κόπωσης του *Basquin*, προσδιορίζεται συνήθως ως ένα ποσοστό της πραγματικής παραμόρφωσης θραύσεως σε μονοτονική φόρτιση ή ταυτίζονται με αυτήν. Ο συντελεστής c κυμαίνεται στην περιοχή $-0.7 < c < -0.5$ με τυπική τιμή $c = -0.6$. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου συνυπάρχουν ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις είναι δυνατός ο συνδυασμός των δύο εξισώσεων *Basquin* και *Coffin – Manson*, πάντα για πλήρη αναστροφή των τάσεων. Η σχέση που περιγράφει την σύνθετη αυτή συμπεριφορά περιγράφεται μέσω της *Εξίσωσης 1.3* : (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Tatsuo Sakai, 2016)

$$\frac{\Delta \varepsilon_{total}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \text{ (Basquin \& Coffin – Manson) } \quad (\text{Εξ. 1.3})$$

όπου η εξίσωση συντίθεται με τους όρους των επιμέρους μεταβλητών των σχέσεων πολυκυκλικής και ολιγοκυκλικής κόπωσης.

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει την συμπεριφορά σε κόπωση για μέταλλα χωρίς προ υπάρχουσες ρωγμές και συμπεριλαμβάνει τόσο την πολυκυκλική όσο και την ολιγοκυκλική κόπωση. Εάν σχεδιαστούν οι καμπύλες της πολυκυκλικής και ολιγοκυκλικής κόπωσης, σχηματίζουν ένα κοινό χαρακτηριστικό σημείο που αντιστοιχεί στο χρονικό όριο μεταβάσεως, N_t . Η εξίσωση σύνθετης κόπωσης *Basquin & Coffin – Manson* ουσιαστικά εφάπτεται πάνω από της εκάστοτε καμπύλες *Basquin* και *Coffin – Manson*, όπως παρουσιάζεται στο *Σχήμα 11*. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010)



Σχήμα 11: Καμπύλες κόπωσης σε περιοχές ολιγοκυκλικής και πολυκυκλικής καταπόνησης καθώς και σύνθετης συμπεριφοράς.¹⁶

Στην περίπτωση όπου η **ελαστική και πλαστική παραμόρφωση είναι ίσες** τότε η σύνθετη εξίσωση καταπόνησης μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή (Εξίσωση 1.4) : (Tatsuo Sakai, 2016)

$$2N_t = \left(\frac{E\varepsilon'_f}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}}, \quad (\text{Εξ. 1.4})$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση όταν $N_f < N_t$ υπερσχύει η πλαστική παραμόρφωση και η συμπεριφορά σε κόπωση ελέγχεται από την ολκιμότητα του μετάλλου. Αντίστοιχα, όταν ισχύει $N_f > N_t$ υπερσχύουν οι ελαστικές παραμορφώσεις και η συμπεριφορά του του υλικού καθορίζεται από την αντοχή του μετάλλου. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα μέταλλα σε αυτά που βρίσκουν εφαρμογή σε ολιγοκυκλική κόπωση με έντονη πλαστική παραμόρφωση και σε αυτά που βρίσκουν εφαρμογή σε πολυκυκλική κόπωση με κύριο κριτήριο σχεδιασμού την αντοχή του υλικού. (Fatemi, 2010)

Τέλος, όλοι οι αριθμητικοί τελεστές που εντοπίζονται στις σχέσεις δυναμικών καταπονήσεων παρουσιάζονται σε πίνακες όπου οι τιμές τους προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα. Αναλυτικά, στους πίνακες εμφανίζονται συνήθως, το μονοτονικό και το κυκλικό όριο διαρροής (σ_o , σ'_o), ο μονοτονικός και κυκλικός συντελεστής αντοχής (K , K'), ο μονοτονικός και κυκλικός εκθέτης εργοσκήρυνσης (n , n'), η μονοτονική παραμόρφωση θραύσης ε_f , ο συντελεστής ολκιμότητας σε κόπωση ε'_f , το μονοτονικό όριο θραύσης και ο συντελεστής αντοχής σε κόπωση (σ_f , σ'_f), ο εκθέτης αντοχής σε κόπωση b και ο εκθέτης ολκιμότητας c , το όριο διαρκούς

¹⁶ <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1980718>

αντοχής σ_e που αντιστοιχεί σε ζωή $2N_f = 10^7$ καθώς και ο λόγος σ_e/σ_{UTS} ο οποίος για τους χάλυβες που εμφανίζουν διακριτό όριο αντοχής είναι περίπου 0.5 . Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τιμές για όλες τις παραπάνω παραμέτρους δυναμικής καταπόνησης διαφόρων μεταλλικών υλικών. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005)

Πίνακας 2: Μονοτονικές και κυκλικές μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου.¹⁷

Material	Process Description	S _u MPa (ksi)	HB	E GPa (ksi·10 ³)	%RA	S _y /S _e [*] MPa (ksi)	K/K' MPa (ksi)	n/n'	e _f /e _f '	σ _f /σ _f ' MPa (ksi)	b	c
<i>Steel</i>												
1010	HR sheet	331 (48)	—	203 (29.5)	80	200/— (29)/—	534/867 (78)/(126)	0.185/0.244	1.63/0.104	—/499 (72)	-0.100	-0.408
1020	HR sheet	441 (64)	109	203 (29.5)	62	262/— (38)/—	738/1962 (107)/(284)	0.190/0.321	0.96/0.337	—/1384 (201)	-0.156	-0.485
1038 ^e	Normalized	582 (84)	163	201 (29.5)	54	331/342 (48)/(50)	1106/1340 (160)/(195)	0.259/0.220	0.77/0.309	898/1043 (130)/(151)	-0.107	-0.481
1038 ^e	Q & T	649 (94)	195	219 (31.5)	67	410/364 (60)/(53)	1183/1330 (172)/(193)	0.221/0.208	1.10/0.255	1197/1009 (174)/(146)	-0.097	-0.460
Man-Ten	HR sheet	510 (74)	—	207 (30)	64	393/372 (57)/(54)	—/786 (114)	0.20/0.11	1.02/0.86	814/807 (118)/(117)	-0.071	-0.65
RQC-100	HR sheet	931 (135)	290	207 (30)	64	883/600 (128)/(87)	1172/1434 (170)/(208)	0.06/0.14	1.02/0.66	1330/1240 (193)/(180)	-0.07	-0.69
1045	Annealed	752 (109)	225	—	44	517/— (75)/—	—/1022 (148)	—/0.152	0.58/0.486	—/916 (133)	-0.079	-0.520
1045	Q & T	1827 (265)	500	207 (30)	51	1689/— (245)/—	—/3371 (489)	0.047/0.145	0.71/0.196	—/2661 (386)	-0.093	-0.643
1090 ^e	Normalized	1090 (158)	259	203 (29.5)	14	735/545 (107)/(79)	1765/1611 (256)/(234)	0.158/0.174	0.15/0.250	—/1310 (190)	-0.091	-0.496
1090 ^e	Q & T	1147 (166)	309	217 (31.5)	22	650/627 (94)/(91)	1895/1873 (275)/(272)	0.165/0.176	0.24/0.700	—/1878 (273)	-0.120	-0.600
1141 ^e	Normalized	789 (115)	229	220 (32)	47	493/481 (72)/(70)	1379/1441 (200)/(209)	0.187/0.177	0.64/0.602	1117/1326 (162)/(192)	-0.103	-0.581
1141 ^e	Q & T	925 (134)	277	227 (33)	59	814/591 (118)/(86)	1205/1277 (125)/(185)	0.074/0.124	0.88/0.309	1405/1127 (204)/(164)	-0.066	-0.514
4142	Q & T	1413 (205)	380	207 (30)	48	1378/— (200)/—	—/2266 (387)	0.051/0.124	0.65/0.637	—/2143 (311)	-0.094	-0.761
4142	Q & T	1929 (41)	475	207 (30)	35	1722/— (239)	—/2399 (56)/(55)	0.048/0.094	0.43/0.331	—/2161 (333)	-0.081	-0.854
<i>Aluminum</i>												
2024-T3	—	469 (68)	—	70 (10)	24	379/427 (55)/(62)	455/655 (66)/(95)	0.032/0.065	0.28/0.22	558/1100 (81)/(160)	-0.124	-0.59
5456-H311	—	400 (58)	95	69 (10)	35	234/— (34)/—	—/817 (118)	—/0.145	0.42/1.076	—/826 (120)	-0.115	-0.797
7075-T6	—	579 (84)	—	70 (10)	34	469/524 (68)/(76)	827/— (120)/—	0.11/0.146	0.41/0.19	745/1315 (108)/(191)	-0.126	-0.52
A356	Cast	283 (41)	93	70 (10)	5.7	229/295 (33)/(43)	388/379 [*] (56)/(55)	0.083/0.043	0.06/0.027	274/594 (40)/(86)	-0.124	-0.530
<i>Others</i>												
AZ91E-T6	Cast Mg	318 (46)	—	45 (6.5)	13	142/180 (21)/(26)	639/552 (92)/(80)	0.137/0.184	0.14/0.089	356/831 (52)/(121)	-0.148	-0.451
Incon 718	Aged	1304 (189)	—	204 (29.5)	—	1110/— (161)/—	—/1986 (288)	—/0.112	—/3.637	—/2295 (333)	-0.100	-0.894

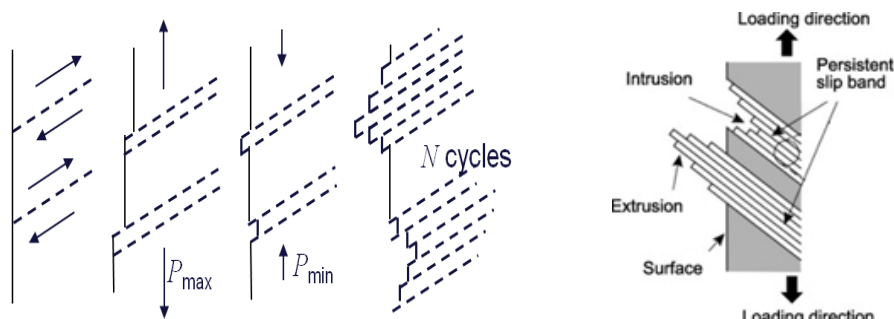
1.5.5 Ανάπτυξη ρωγμών κατά την εφαρμογή δυναμικών καταπονήσεων

Η μηχανική κόπωση αποτελεί ένα καταστροφικό επιφανειακό φαινόμενο καθώς η εξέλιξη της στηρίζεται στις σχηματιζόμενες μικρορωγμές στην επιφάνεια του στοιχείου, οι οποίες συναρτήσει των κύκλων κόπωσης εξελίσσονται με αποτέλεσμα την τελική αστοχία του. Όπως έχει αναφερθεί ο συνολικός χρόνος ζωής ενός υλικού σε κόπωση προκύπτει από το άθροισμα των κύκλων ζωής που απαιτούνται για τον σχηματισμό των ρωγμών και τον αριθμό των κύκλων ζωής που απαιτούνται για την ανάπτυξη αυτών. Ωστόσο, όταν τα μηχανικά στοιχεία φέρουν στις επιφάνειες τους προ

¹⁷ http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_VIII.pdf

υπάρχουσες ρωγμές, ο συνολικός χρόνος ζωής σε κόπωση μειώνεται δραστικά καθώς το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα που αποτελεί η ανάπτυξη ρωγμών εξαλείφεται. (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Σαρμή & Τσολπίδου, 2004), (Χαϊδεμενόπουλος, 2006), (Χαϊδεμενόπουλος & Κατσαμάς, 2003)

Οι ρωγμές συνήθως σχηματίζονται σε ασυνέχειες στην επιφάνεια ενός στοιχείου, σε εγκλείσματα καθώς και σε χαραγές ή εγκοπές που οφείλονται στην κατεργασία που έχει υποστεί. Σε πολύ λεία δοκίμια οι ασυνέχειες δημιουργούνται στην επιφάνεια του στοιχείου κατά μήκος ζωνών εντοπισμένης πλαστικής παραμόρφωσης που ονομάζονται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία επίμονες ζώνες ολισθήσεως (*persistent slip bands, PSB*). Στις ζώνες αυτές οι ολισθήσεις και οι γραμμοαταξίες πραγματοποιούνται με μεγαλύτερη ευκολία σε αντίθεση με το υπόλοιπο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι ολισθήσεις αυτές δημιουργούν βαθμίδες ολισθήσεων στην επιφάνεια οι οποίες με την εξέλιξη της μηχανικής κόπωσης παίρνουν τη μορφή ενδοολισθήσεων και εξολισθήσεων (Εικόνα 4). Οι ρωγμές μπορούν να σχηματιστούν είτε απ' ευθείας από τις ενδοολισθήσεις και εξολισθήσεις είτε από αλληλεπίδραση της παραμορφώσεως με εγκλείσματα ή σύνορα κόκκων. (Χαϊδεμενόπουλος, 2006), (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Σαρμή & Τσολπίδου, 2004)



Εικόνα 4: Μηχανισμός σχηματισμού ρωγμής σε κόπωση μέσω ενδοολισθήσεων & εξολισθήσεων στις ζώνες PSB.¹⁸

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η διάρκεια ζωής εξαρτάται από την ευκολία με την οποία σχηματίζονται οι επίμονες ζώνες ολισθήσεως. Στα μέταλλα που ανήκουν στο εδροκεντρωμένο σύστημα (FCC), όπως τα Cu, Al, Ni και Ag λαμβάνει χώρα ευκολότερα η σταυρολίσθηση με αποτέλεσμα τα μέταλλα αυτά να υπόκεινται σε εντονότερη κυκλική σκλήρυνση ή εξασθένιση στο πρώτο 20 – 40 % της διάρκειας ζωής

¹⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112316301372>

ανάλογα με την αρχική τους κατάσταση. Αντίθετα στα εδροκεντρωμένα μέταλλα όπως οι ορείχαλκοι, οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες και τα υπερκράματα νικελίου, η σταυρολίσθηση είναι δυσκολότερη γεγονός που παρεμποδίζει την δημιουργία των ζωνών *PSB* και αυξάνει την διάρκεια ζωής σε κόπωση. (Χαϊδεμενόπουλος, 2006) , (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016)

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η επιτάχυνση σχηματισμού πλαστικών παραμορφώσεων και κατ' επέκταση ο σχηματισμός ρωγμών κατά την κόπωση, θα πρέπει να μελετηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τους μηχανισμούς ανάπτυξης ρωγμών. Κυρίαρχη παράμετρος είναι η **κατάσταση της επιφάνειας**. Γενικά, μία λεία επιφάνεια με χαμηλή ή μηδενική **τραχύτητα** συμβάλει σε μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς περιορίζονται οι ασυνέχειες που προκαλούν το σχηματισμό ρωγμών. Ομοίως, η **διάβρωση** και η κακή μηχανουργική **κατεργασία** μειώνουν δραστικά τη διάρκεια ζωής. Επίσης, η αύξηση του **ορίου διαρροής** στην επιφάνεια καθυστερεί την έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων και το σχηματισμό ζωνών *PSB* κοντά στην επιφάνεια. Παράλληλα, αρκετές επιφανειακές κατεργασίες που εφαρμόζονται στα μηχανικά στοιχεία αποσκοπούν στην επιβράδυνση σχηματισμού πλαστικών ζωνών ενώ ταυτόχρονα δημιουργούν και πεδίο **θλιπτικών παραμενουσών τάσεων** που παρεμποδίζουν τον σχηματισμό της ρωγμής. Τέλος, η μείωση των **εγκλεισμάτων και πόρων** στο εσωτερικό των στοιχείων προσφέρουν επιπλέον καθυστέρηση στον σχηματισμό ρωγμών. (Χαϊδεμενόπουλος, 2006), (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Σαρμή & Τσολπίδου, 2004)

1.5.6 Μηχανική κόπωση με προ υπάρχουσες ρωγμές

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού σε δυναμικές καταπονήσεις με προϋπάρχουσες ρωγμές στηρίζονται στις εξισώσεις της Θραυστομηχανικής και συγκεκριμένα της γραμμικής θεωρίας της μηχανικής των θραύσεων. Οι κύριες εξισώσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής (*Εξίσωση 1.5-1.8*) : (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Roylance, 2001), (Tatsuo Sakai, 2016), (Ασημακόπουλος, 2007)

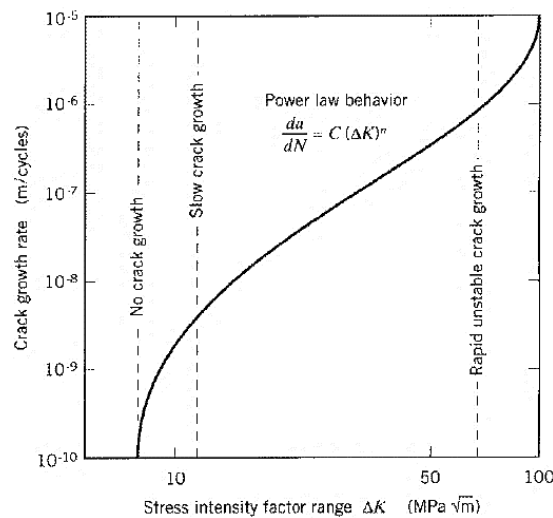
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} , \text{ η διαφορά των συντελεστών έντασης τάσεων } \quad (\text{Εξ. 1.5})$$

$$K_{\max} = Q \cdot \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi a} , \text{ η μέγιστη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων } \quad (\text{Εξ. 1.6})$$

$$K_{\min} = Q \cdot \sigma_{\min} \cdot \sqrt{\pi a} , \text{ η μέγιστη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων } \quad (\text{Εξ. 1.7})$$

$$\Delta K = Q \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad , \quad \text{η διαφορά των συντελεστών έντασης τάσεων} \quad (\text{Εξ. 1.8})$$

Στα περισσότερα μεταλλικά κράματα και στοιχεία η σχέση μεταξύ του da/dN και του ΔK εκφράζεται μέσω μίας σιγμοειδούς καμπύλης. Η σιγμοειδής καμπύλη απεικονίζεται σε λογαριθμικές κλίμακες όπου παρατηρούνται τρεις διακριτές χαρακτηριστικές περιοχές, (Σχήμα 12). (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Ασημακόπουλος, 2007)



Σχήμα 12: Ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK .¹⁹

Παρατηρώντας τα τμήματα των χαρακτηριστικών περιοχών του παραπάνω διαγράμματος, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, το μεγαλύτερο τμήμα περιγράφεται μέσω της γενικευμένης εξίσωσης *Paris*. Σύμφωνα με τη χρήση του νόμου *Paris* μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής ενός στοιχείου που υποβάλλεται σε κόπωση και περιέχει μία αρχική ρωγμή μήκους a_0 . Η διάρκεια ζωής είναι ο αριθμός των κύκλων N_f που απαιτούνται για την ανάπτυξη της ρωγμής από την τιμή a_0 στην τιμή a_f . Ωστόσο, για τη χρήση των εξισώσεων θεωρείται σταθερός ο λόγος τάσεων R καθώς και το εύρος τάσεων $\Delta \sigma$. Μέσω των εξισώσεων γραμμικής μηχανικής των θραύσεων και του νόμου *Paris* προκύπτει η *Εξίσωση 1.9*: (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Fatemi, 2010), (Roylance, 2001)

¹⁹ <http://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/fatigue.pdf>

$$\frac{d\alpha}{dN} = C * (Q * \Delta\sigma * \sqrt{\pi\alpha}) \rightarrow C * Q^m * (\Delta\sigma)^m * \pi^{m/2} * \int_0^{N_f} dN = \int_{\alpha_0}^{\alpha_f} \frac{d\alpha}{\alpha^{m/2}} \quad (Eξ. 1.9)$$

όπου C μία αριθμητική σταθερά κόπωσης, Q μία γεωμετρική παράμετρος, m εκθετική παράμετρος κόπωσης, $\Delta\sigma$ εύρος τάσης, N_f ο αριθμός των κύκλων κόπωσης μέχρι την αστοχία, α η τιμή της αρχικής ρωγμής.

Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις ως προς το χρόνο ζωής του υλικού προκύπτει η *Εξίσωση 1.10* : (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Roylance, 2001), (Tatsuo Sakai, 2016)

$$N_f = \frac{2}{(m-2)CQ^m(\Delta\sigma)^m\pi^{m/2}} \left[\frac{1}{\alpha_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{\alpha_f^{(m-2)/2}} \right] \quad \text{ή} \quad \frac{\alpha_f^{-(m/2)+1} - \alpha_0^{-(m/2)+1}}{[-(m/2)+1]C(\Delta\sigma)^m(\pi)^{m/2}Q^m} \quad (Eξ. 1.10)$$

όπου η τιμή α_0 προσδιορίζεται μέσω μίας μη καταστροφικής μεθόδου ή αλλιώς λαμβάνει τιμή ίση με τη ελάχιστη τιμή μήκους που προσδιορίζεται μέσω της μη καταστροφικής μεθόδου. Σε περίπτωση πολλαπλών ρωγματώσεων ως αρχικό μήκος ρωγμής ορίζεται αυτή με το μεγαλύτερο μήκος. Το κρίσιμο μήκος α_f προκειμένου να επέλθει η θραύση προσδιορίζεται μέσω της κρίσιμης συνθήκης θραύσεως. Το κρίσιμο μήκος ρωγμής υπολογίζεται σύμφωνα με την *Εξίσωση 1.11* : (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005), (Tatsuo Sakai, 2016)

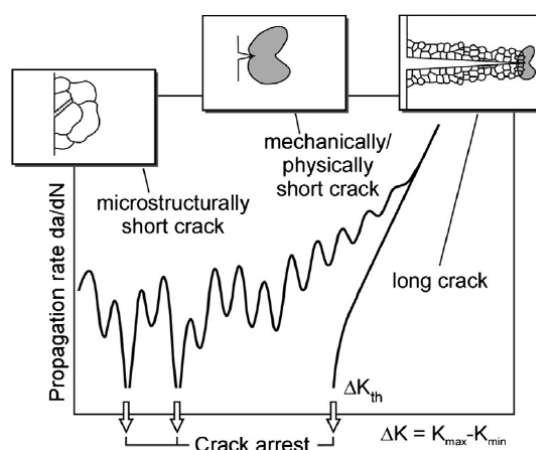
$$K_{\max} = Q\sigma_{\max}\sqrt{\pi\alpha_f} = K_{IC} \rightarrow \alpha_f = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_{IC}}{Q\sigma_{\max}} \right]^2 \quad (Eξ. 1.11)$$

1.5.7 Μηχανισμοί ανάπτυξης της ρωγμής κατά την κόπωση

Η μικροσκοπική ανάπτυξη της ρωγμής κατά την κόπωση επηρεάζεται κυρίως από την πλαστικότητα του υλικού, την μικροδομή του και τα χαρακτηριστικά της κυκλικής φορτίσεως. Στις προηγούμενες ενότητες αναφέρθηκε ότι η ανάπτυξη και η εξέλιξη ρωγμής πραγματοποιείται μέσω της ανάπτυξης εντοπισμένης πλαστικής παραμόρφωσης στην αιχμή της ρωγμής. Γενικά διακρίνονται δύο φάσεις κατά την ανάπτυξη της ρωγμής στην κόπωση, η φάση I και η φάση II. Η φάση I αφορά κυρίως την **περιοχή A** του διαγράμματος, όταν το υλικό υποβάλλεται σε μικρά ΔK και το μέγεθος της πλαστικής ζώνης να συγκρίνονται με το μέγεθος του κόκκου. Ωστόσο, η ανάπτυξη ρωγμών σύμφωνα με τη φάση I γίνεται ακόμα και σε μεγαλύτερες ρωγμές

αρκεί το ΔK να είναι αρκετά χαμηλό ώστε το μέγεθος της πλαστικής ζώνης να είναι μικρότερο από το μέσο μέγεθος των κόκκων. (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Σαρμή & Τσολπίδου, 2004), (Χαϊδεμενόπουλος, 2006)

Η ρωγμή κατά την ανάπτυξη της εισέρχεται από τη φάση I στην φάση II στην **περιοχή B** του διαγράμματος, ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, σε υψηλότερες τιμές του ΔK όπου η πλαστική ζώνη αυξάνεται σημαντικά ώστε να καλύψει αρκετούς κόκκους, (Εικόνα 5). Στην περίπτωση αυτή ενεργοποιούνται δύο συστήματα ολισθήσεως και η ρωγμή αναπτύσσεται κατά μήκος της τομής των ζωνών εντοπισμένης πλαστικής παραμορφώσεως., χωρίς να αλλάζει κατεύθυνση από κόκκο σε κόκκο. Η ανάπτυξη της ρωγμής πραγματοποιείται κάθετα προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης κυκλικής τάσεως που αντιστοιχεί στον τύπο I στη στατική θραύση. Η επιφάνεια θραύσεως της ρωγμής κατά τη φάση II παρουσιάζει χαρακτηριστικές αυλακώσεις. (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Χαϊδεμενόπουλος, 2006)

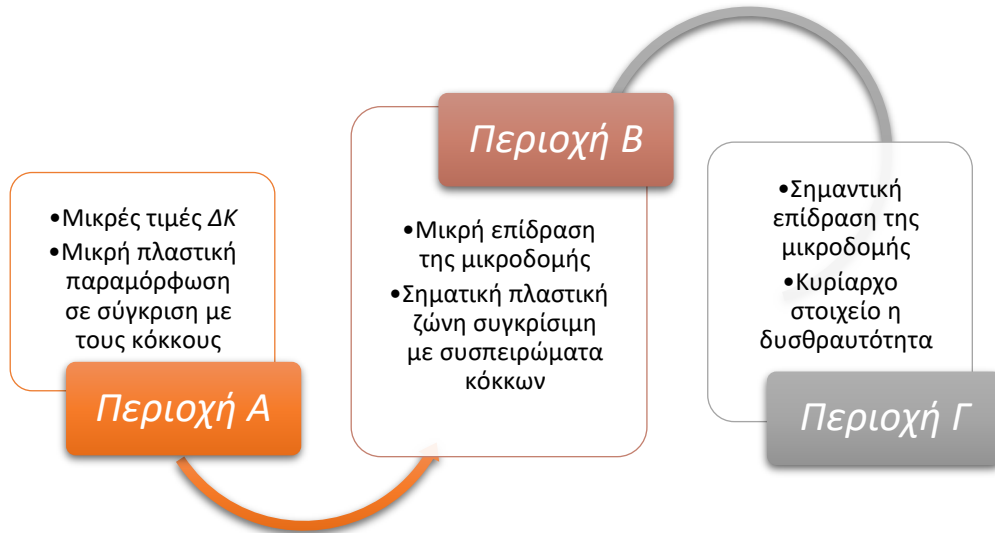


Εικόνα 5: Στάδια εξέλιξης μίας ρωγμής από μικρο-κλίμακα σε μακρο-κλίμακα συναρτήσει του ΔK .²⁰

Αντίθετα με την περιοχή A, στην περιοχή B (γραμμική περιοχή Paris) δεν υπάρχει σημαντική επίδραση της μικροδομής. Ο λόγος είναι ότι η ανάπτυξη της ρωγμής πραγματοποιείται σύμφωνα με τον μηχανισμό της φάσεως II, όπου η πλαστική ζώνη έχει μέγεθος αρκετών κόκκων. Η ρωγμή διασχίζει πολλούς κόκκους χωρίς να αλλάζει κατεύθυνση, παραμένοντας ουσιαστικά ανεπηρέαστη από την μικροδομή. Παράλληλα, στην **περιοχή Γ** όπου η ρωγμή αναπτύσσεται ταχύτητα κάτω από πολύ υψηλά ΔK μέχρι την τελική θραύση, η μικροδομή έχει πάλι σημαντική επίδραση καθώς

²⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794417303041>

το K_{max} πλησιάζει το K_{IC} δηλαδή τη δυσθραυστότητα του υλικού. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται στο Σχήμα 13. (Patibandla, 2011), (Tatsuo Sakai, 2016), (Χαϊδεμενόπουλος, 2006)

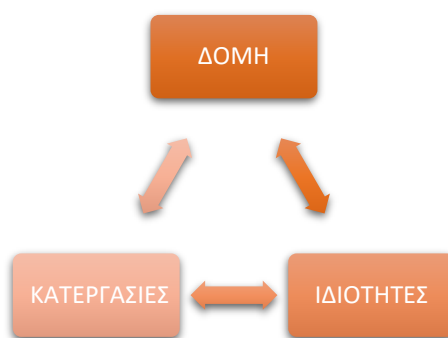


Σχήμα 13: Συγκεντρωτική παρουσίαση των σταδίων ανάπτυξης ρωγμής και ανάδειξη των κύριων χαρακτηριστικών τους.

Κεφάλαιο 2^ο : Διάβρωση

2.1 Ο ρόλος της διάβρωσης στις μέρες μας

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των κατεργασιών, αναπτύχθηκε μία μεγάλη ποικιλία υλικών με μοναδικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες ικανά να καλύψουν τις συνεχώς αναπτυσσόμενες βιομηχανικές ανάγκες. Κυρίως στο κλάδο της νανοτεχνολογίας τα αλματώδη βήματα εξέλιξης οδήγησαν στην ανάπτυξη σύγχρονων σύνθετων υλικών τα οποία συνδυάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά δυνατά να αντιμετωπίσουν οποιοσδήποτε ανάγκες. Ωστόσο, όλα τα υλικά ασχέτως χημικής σύνθεσης και μηχανικών ιδιοτήτων υποφέρουν μέσω διαφόρων μηχανισμών και φαινομένων φθοράς με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων καθιστώντας τα ανίκανα να επιτελέσουν το λειτουργικό τους ρόλο. Αν αναλογιστούμε ότι οι ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από τη δομή και τις κατεργασίες που έχουν υποστεί, θα οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι τα πιθανά φαινόμενα φθοράς επηρεάζοντας τη δομή των υλικών θα οδηγήσουν μονοσήμαντα και στην μεταβολή των ιδιοτήτων τους και ως επί το πλείστον αρνητικά, (Σχήμα 14). (Λεκάτου, 2013), (Χαϊδεμενόπουλος, 2006), (AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (Safiuddin, 2006)



Σχήμα 14: Η τριμερής σχέση που χαρακτηρίζει όλα τα υλικά.

Τα κύρια φαινόμενα φθοράς επέρχονται και ενεργούν αρνητικά στο υλικό μέσω του περιβάλλοντος στο οποίο αυτό εκτίθεται. Έτσι, η φθορά σε βάθος χρόνου λειτουργεί κατασταλτικά αλλάζοντας τη δομή του υλικού και αλλοιώνοντας σταδιακά τις ιδιότητες και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του υλικού. Στην περίπτωση συνδυασμού υλικών όπως είναι τα σύνθετα που αναφέραμε παραπάνω, οι μηχανισμοί

φθοράς αναφέρονται στα επιμέρους υλικά και τις αλληλεπιδράσεις τους π.χ. το σκυρόδεμα – οπλισμός σκυροδέματος. Εντοπίζονται διάφορες μορφές φθοράς και κατατάσσονται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με τη φύση της, το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται ακόμα και κατηγορίες υλικών που εμφανίζονται. Ωστόσο, ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς φθοράς των υλικών είναι η διάβρωση ή αλλιώς ηλεκτροχημική διάβρωση. (Λεκάτου, 2013), (William, 2015), (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016), (Safiuddin, 2006)

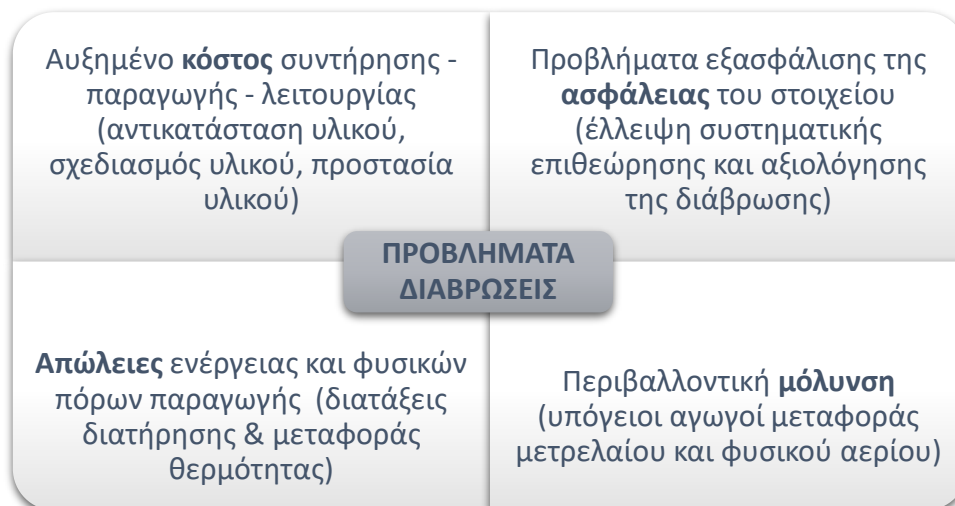
Στα πλαίσια μελέτης της διάβρωσης διατυπώθηκαν πολλοί ορισμοί και προτάσεις για να μπορέσουμε να διασαφηνίσουμε την ακριβή σημασία και μηχανισμού του φαινομένου. Ένας από τους πληρέστερους ορισμούς είναι αυτός που προέκυψε μέσω έρευνας στα πλαίσια της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων Κατασκευών και Διεθνών Συνεδριών σύμφωνα με τον οποίο: (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Ιωσηφίδου, 2009), (Μπότσης, 2015)

« Διάβρωση ονομάζεται κάθε αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκ βεβιασμένη, ηλεκτροχημικής, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων που οδηγεί σε απώλεια υλικού ».

Στη γενικότερη έννοια του φαινομένου της διάβρωσης αναφερόμαστε στην αυξημένη φθορά ενός υλικού και στην κατάρρευση των ιδιοτήτων που το χαρακτηρίζουν σε βαθμό ακρήστευσης του εξαιτίας κάποιας αυθόρμητης αντίδρασης, ηλεκτροχημικής ή μηχανικής φύσης με το περιβάλλον του. Η διάβρωση αποτελεί μία φυσική διεργασία η οποία συνδέεται με μείωση του βάρους του υλικού λόγω φθοράς της επιφάνειας του υλικού ή αύξηση του βάρους εξαιτίας των πιθανών παραγόμενων προϊόντων διάβρωσης. Τις περισσότερες φορές δρα βαθμιαία και με χαμηλούς ρυθμούς φθοράς κάνοντας τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση της ιδιαίτερα δύσκολη. Η έγκυρη διάγνωση και προστασία του υλικού από την ανάπτυξη και εξέλιξη φαινομένων διάβρωσης κρίνεται αναγκαία καθώς η τελευταία επηρεάζει το σύνολο των ιδιοτήτων του υλικού, το χρόνο ζωής του, το λειτουργικό ρόλο του ακόμα και την παραγωγική διαδικασία σε περίπτωση παύσης λόγω απώλειας ενός καίριου λειτουργικού στοιχείου. Ορισμένα από τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με τη διάβρωση αναφέρονται

συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3. (Λεκάτου, 2013), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016), (Safiuddin, 2006), (Winston & Herbert, 2008), (Μπότσης, 2015)

Πίνακας 3: Παρουσίαση των κύριων προβλημάτων διάβρωσης.



Η διάβρωση εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στα μεταλλικά υλικά καθώς τα τελευταία είναι θερμοδυναμικά ασταθή και τείνουν να επιστρέψουν στην αρχική τους φυσική κατάσταση δηλαδή ως μεταλλεύματα, (Εικόνα 6). Σύμφωνα με τα παραπάνω τα ευγενή μέταλλα όπως ο χρυσός και η πλατίνα τα οποία εντοπίζονται στη φύση ως καθαρά μέταλλα, χαρακτηρίζονται από θερμοδυναμική σταθερότητα και κατ' επέκταση από πολύ χαμηλούς έως μηδαμινούς ρυθμούς διάβρωσης. Ωστόσο πέρα από τα μεταλλικά υλικά η διάβρωση εντοπίζεται και σε άλλες κατηγορίες υλικών όπως στα πολυμερή αλλά με πολύ αργούς ρυθμούς κυρίως λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας που τα χαρακτηρίζουν (ιδίως όταν αναφερόμαστε στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης). Τέλος, τα κεραμικά δεν υφίστανται κάποιας μορφής διάβρωσης καθώς βρίσκονται στη σταθερή θερμοδυναμική φύση των οξειδίων, καρβιδίων, νιτρίδων και σουλφιδίων. (Λεκάτου, 2013), (Mars, 1987), (AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (William, 2015), (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016), (Safiuddin, 2006), (Ιωσηφίδου, 2009)



Εικόνα 6: Διάβρωση μεταλλικού τμήματος δεξαμενής.²¹

Τέλος, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η διάβρωση δεν είναι μία μονοσήμαντη έννοια και εξαρτάται όπως αναφέρθηκε παραπάνω ως μία ηλεκτροχημική συνήθως αντίδραση δηλαδή μία αντίδραση που περιλαμβάνει τόσο αντιδράσεις οξείδωσης όσο και αντιδράσεις αναγωγής. Οι αντιδράσεις αυτές δεν πραγματοποιούνται αυθόρμητα πάνω στο υλικό αλλά εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση υλικού – περιβάλλοντος καθώς και άλλων βοηθητικών στοιχείων του περιβάλλοντος όπως ηλεκτρολύτες, τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια. Συνοψίζοντας, για την πλήρη κατανόηση του μηχανισμού της διάβρωσης απαιτούνται γνώσεις πολλών επιστημονικών πεδίων όπως φυσικής, χημείας, μηχανικής καθιστώντας τη μελέτη του φαινομένου αρκετά απαιτητική. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Gustafsson, 2011), (Lyon, 2010), (Safiuddin, 2006)

2.2 Ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης

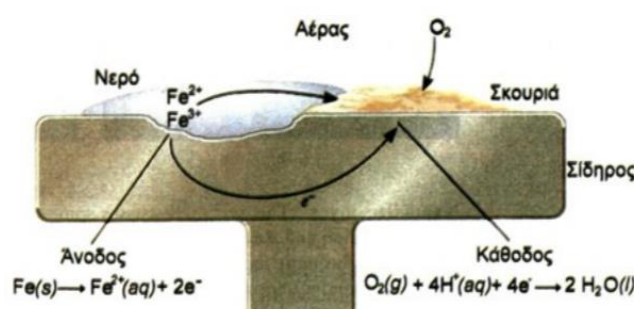
Η κύρια επιστήμη που μελετά και ερμηνεύει το φαινόμενο της διάβρωσης είναι η ηλεκτροχημεία. Η διάβρωση όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί έναν αυθόρμητο μηχανισμό ηλεκτροχημικών αντιδράσεων οξειδοαναγωγής μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος. Προκειμένου λοιπόν να αρχίσουμε να κατανοούμε βαθύτερα το μηχανισμό του φαινομένου, θα πρέπει να αναλύσουμε τη φύση των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την εξέλιξη του φαινομένου. (Mars, 1987), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016), (Winston & Herbert, 2008)

²¹ <https://hongten91.wordpress.com/tag/copper-corrosion/>

2.2.1 Αντιδράσεις Οξειδοαναγωγής

Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής περιλαμβάνουν αντιδράσεις οξείδωσης δηλαδή ηλεκτρόνια που χάνονται από κάποια άτομα ή ιόντα και αντιδράσεις αναγωγής όπου τα ηλεκτρόνια προσλαμβάνονται ή ανάγονται από κάποια άτομα ή ιόντα. Στα πλαίσια της διάβρωσης μεταξύ δύο μετάλλων, στο ένα μέταλλο πραγματοποιείται η οξείδωση ή διάβρωση που συνοδεύεται από την απομάκρυνση ηλεκτρονίων και στο δεύτερο μέταλλο πραγματοποιείται η αναγωγή που συνοδεύεται με την πρόσληψη των ηλεκτρονίων, (Εικόνα 7). Τα παραπάνω ζεύγη αντιδράσεων μπορεί να πραγματοποιούνται σε διαφορετικά μέταλλα ή στο ίδιο υλικό αλλά σε διαφορετικά σημεία και τμήματα του. (Lyon, 2010), (Winston & Herbert, 2008), (Ιωσηφίδου, 2009), (Μεκερίδης, 2010)

Ωστόσο για να αναπτυχθεί και να συνεχιστεί ο μηχανισμός της διάβρωσης απαιτείται η συνεχής κίνηση των ηλεκτρονίων και συγκεκριμένα η κίνηση από την άνοδο στην κάθοδο του συστήματος. Η κίνηση των ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρικής σύνδεσης των δύο υλικών μέσω του περιβάλλοντος (παρουσία ενός ηλεκτρολύτη) ή άμεσης ηλεκτρικής επαφής μεταξύ τους. Ο μηχανισμός της ηλεκτροχημικής διάβρωσης παρουσιάζεται γραφικά παρακάτω. Αν για οποιοδήποτε λόγο σταματήσει η συνεχής κίνηση των ηλεκτρονίων ή εντοπιστεί έλλειψη ηλεκτρικής σύνδεσης μεταξύ των υλικών το φαινόμενο της διάβρωσης παύει να υφίσταται. (Winston & Herbert, 2008), (Ιωσηφίδου, 2009)



Εικόνα 7: Γραφική αναπαράσταση ηλεκτροχημικής διάβρωσης σιδήρου.²²

Στην παραπάνω εικόνα πραγματοποιείται αναπαράσταση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης του σιδήρου με παρουσία νερού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα σημεία όπου πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής ανήκουν στο ίδιο υλικό αλλά

²² <https://slideplayer.com/slide/6959944/>

σε διαφορετικά τμήματα της επιφάνειας. Έτσι, στο τμήμα της ανόδου έχουμε κατανάλωση του μετάλλου (οξείδωση) μέσω διάσπασης ατόμων της επιφάνειας και απελευθέρωσης ηλεκτρονίων ενώ στην κάθοδο πραγματοποιείται η καθοδική αντίδραση όπου λαμβάνονται τα ηλεκτρόνια της ανόδου προς δημιουργία διαβρωτικού προϊόντος (σκουριά). Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του ίδιου του υλικού ενώ η μεταφορά ιόντων και οξυγόνου πραγματοποιείται μέσω του περιβάλλοντος (νερό και αέρας). Αναλυτικά οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι: (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016), (Winston & Herbert, 2008), (Ιωσηφίδου, 2009), (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013)

- Οξείδωση ή διάβρωση: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

(Διάσπαση ατόμων σιδήρου σε ιόντα σιδήρου και απελευθέρωση ηλεκτρονίων)

- Αναγωγή: $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

(Κατανάλωση ηλεκτρονίων μέσω της καθοδικής αντίδρασης προς σχηματισμό υδροξυλίων)

- Τελική αντίδραση οξειδοαναγωγής: $\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$

(Το άθροισμα των δύο αντιδράσεων παράγει την τελική αντίδραση οξειδοαναγωγής)

Γενικά, ανεξάρτητα από το υλικό που συμμετέχει στο φαινόμενο της διάβρωσης θα λαμβάνουν χώρα μία αντίδραση οξείδωσης ή διάβρωσης με διάσπαση ατόμων του μετάλλου (M) προς δημιουργία ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων (e) καθώς και μία αντίδραση αναγωγής ή καθόδου προς σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης (X) και κατανάλωσης ηλεκτρονίων. Η κίνηση ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρικής σύνδεσης των μετάλλων ενώ η παροχή και η μεταφορά ιόντων μέσω ηλεκτρολύτη. Συνοπτικά οι αντιδράσεις έχουν την παρακάτω μορφή: (Sabbahal, 2016), (Ιωσηφίδου, 2009), (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013)

- Γενική μορφή οξείδωσης ή διάβρωσης μετάλλου: $\text{M} \rightarrow \text{M}^{m+} + m\text{e}^-$
- Γενική μορφή αναγωγής: $\text{X}^{x+} + x\text{e}^- \rightarrow \text{X}$

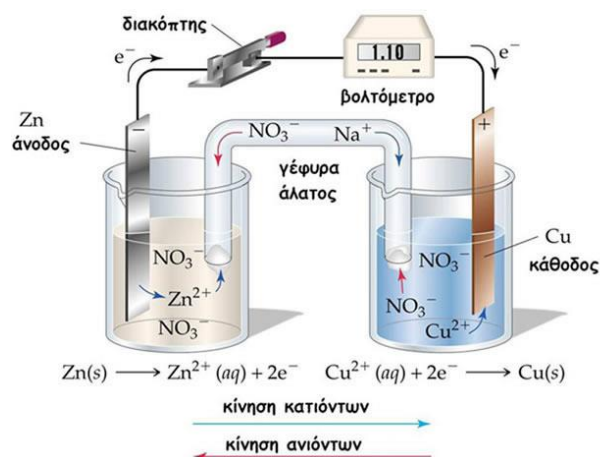
2.3 Ηλεκτροχημικό Κελί

Η διάβρωση είναι συνήθως μία αυθόρμητη ηλεκτροχημική αντίδραση κατά την οποία συμβαίνουν ταυτόχρονα οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις. Ουσιαστικά ο χαρακτηρισμός «αυθόρμητη» αντίδραση αναφέρεται στο γεγονός της ελεύθερης κίνησης των ηλεκτρονίων με συγκεκριμένη φορά αναπτύσσοντας μία διαφορά δυναμικού. Το παραπάνω φαινόμενο αποτελεί ένα ηλεκτροχημικό κελί κατά το οποίο η κίνηση των ηλεκτρονίων παράγει μία διαφορά δυναμικού λόγω μιας αυθόρμητης χημικής αντίδρασης. (Lyon, 2010), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016), (Μεκερίδης, 2010)

Εντοπίζονται δύο είδη ηλεκτροχημικού κελιού, το **γαλβανικό κελί** κατά το οποίο μία αυθόρμητη οξειδοαναγωγική αντίδραση παράγει ηλεκτρικό ρεύμα (μέσω της κίνησης ηλεκτρονίων στο κύκλωμα) και το **ηλεκτρολυτικό κελί** κατά το οποίο εξωτερικό εφαρμοζόμενο ρεύμα επιφέρει εξαναγκασμένη κίνηση ηλεκτρονίων και πραγματοποίηση μίας χημικής. Συνήθως, όπως γίνεται αντιληπτό, τα φαινόμενα της διάβρωσης σχετίζονται με την αυθόρμητη κίνηση ηλεκτρονίων λόγω αντιδράσεων οξειδοαναγωγής άρα με το σχηματισμό γαλβανικών κελιών. (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016)

2.3.1 Γαλβανικό κελί ή στοιχείο

Τα γαλβανικά στοιχεία ανακαλύφθηκαν από τους Ιταλούς φυσικούς *L. Galvani* (1737-1798) και *A. Volta* (1745-1827) στους οποίους οφείλουν το όνομα τους. Τα γαλβανικά στοιχεία αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις στις οποίες λόγω αυθόρμητων οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ουσιαστικά κατά το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται μετατροπή της χημικής ενέργειας (μέσω των αντιδράσεων) σε ηλεκτρική (μέσω της κίνησης των ηλεκτρονίων). Μία αναπαράσταση ενός τυπικού γαλβανικού στοιχείου παρουσιάζεται στην *Εικόνα 8*. (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016)



Εικόνα 8: Αναπαράσταση ενός τυπικού γαλβανικού στοιχείου Zn - Cu.²³

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, το γαλβανικό στοιχείο αποτελείται από δύο ημιστοιχεία τα οποία αποτελούν τους πόλους του γαλβανικού κελιού, μία άνοδο (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο Zn) και μία κάθοδο (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο Cu). Τα ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρικά μέσω μίας εξωτερικής σύνδεσης ενώ υπάρχει και μία εσωτερική σύνδεση των παραγόμενων ιόντων που ονομάζεται γέφυρα άλατος ή σε εργαστηριακές διατάξεις ημιπερατή μεμβράνη. Στη συγκεκριμένη διάταξη παρατηρείται και μία σύνδεση βολτόμετρου σε σειρά για την ανίχνευση του παραγόμενου δυναμικού. (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016)

Συνοπτικά η αρχή λειτουργίας του παραπάνω γαλβανικού στοιχείου είναι η εξής: Αρχικά λόγω της θερμοδυναμικής διαφοράς των δύο ηλεκτροδίων πραγματοποιείται κίνηση ηλεκτρονίων μέσω του στοιχείου και συγκεκριμένα από την άνοδο στην κάθοδο του κελιού (η κίνηση ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω της εξωτερικής σύνδεσης). Κατά την πραγμάτωση των αντιδράσεων, απελευθερώνονται κατιόντα ψευδαργύρου και ιόντα χαλκού. Τα ιόντα μεταφέρονται από την άνοδο στην κάθοδο του στοιχείου και αντίστροφα μέσω της γέφυρας άλατος (εσωτερική σύνδεση). Το μπλε διάλυμα του θεικού χαλκού σταδιακά αποχρωματίζεται καθώς τα μπλε ιόντα του χαλκού αντικαθίστανται από τα άχρωμα ιόντα του ψευδαργύρου. Επίσης το πάχος του ηλεκτροδίου της ανόδου, δηλαδή ο ψευδάργυρος, σταδιακά μειώνεται λόγω διάβρωσης. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο φαινόμενο είναι: (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013), (Sabbahal, 2016)

²³ <http://users.sch.gr/xbalasi/electrochem/sect03/page32.html>

- Οξείδωση ή διάβρωση: $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

(Διάσπαση ατόμων ψευδαργύρου σε ιόντα ψευδαργύρου και απελευθέρωση ηλεκτρονίων)

- Αναγωγή ή ηλεκτροαπόθεση: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$

(Κατανάλωση ηλεκτρονίων μέσω της καθοδικής αντίδρασης προς σχηματισμό χαλκού στην επιφάνεια της καθόδου σε μορφή σκόνης)

- Τελική αντίδραση οξειδοαναγωγής: $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$

(Το άθροισμα των δύο αντιδράσεων παράγει την τελική αντίδραση οξειδοαναγωγής.)

2.4 Ηλεκτροχημική σειρά των μετάλλων

Η συγκέντρωση όλων των πρότυπων δυναμικών μεταξύ διαφόρων στοιχείων και του ηλεκτροδίου αναφοράς του υδρογόνου σε πρότυπες συνθήκες, δηλαδή διαλύματα συγκέντρωσης 1M και θερμοκρασίας 25°C, σχηματίζουν τους πίνακες ηλεκτροχημικής σειράς των μετάλλων ή αλλιώς τη σειρά δραστηριότητας των μετάλλων. Τα πρότυπα δυναμικά που αναγράφονται υπολογίζονται σύμφωνα με τις διατάξεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα δηλαδή μονωμένου ή αντιστρεπτού γαλβανικού κελιού. Παράρτημα του πίνακα ηλεκτροχημικής σειράς των μετάλλων παρουσιάζεται στον *Πίνακα 4*. (Lyon, 2010), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016), (Μεκερίδης, 2010), (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013)

Πίνακας 4: Παράρτημα του πίνακα ηλεκτροχημικής σειράς των μετάλλων.

Electrode reaction		Standard electrode potential E_0 (V)	
Cs = Cs ⁺ + e	Reactive metals ↑	-3.02	ισχυρότερα αναγωγικά ↑
Li = Li ⁺ + e		-3.02	
K = K ⁺ + e		-2.92	
Na = Na ⁺ + e		-2.71	
Ca = Ca ²⁺ + 2e		-2.50	
Mg = Mg ²⁺ + 2e		-2.34	
Al = Al ³⁺ + 3e		-1.67	
Ti = Ti ²⁺ + 2e		-1.67	
Zn = Zn ²⁺ + 2e		-0.76	
Cr = Cr ³⁺ + 3e		-0.50	
Fe = Fe ²⁺ + 2e		-0.44	
Cd = Cd ²⁺ + 2e		-0.40	
Ni = Ni ²⁺ + 2e		-0.25	
Sn = Sn ²⁺ + 2e		-0.136	
Pb = Pb ²⁺ + 2e		-0.126	
H = 2H ⁺ + 2e		0.00	
Cu = Cu ²⁺ + 2e	Noble metals ↓	+0.34	
Hg = Hg ²⁺ + 2e		+0.80	Cu Hg Ag Pt Au
Ag = Ag ⁺ + e		+0.80	
Pt = Pt ²⁺ + 2e		+1.20	
Au = Au ⁺ + e		+1.68	

Η μελέτη της ηλεκτροχημικής σειράς των μετάλλων παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα τόσο στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις όσο και στην εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι: (Lyon, 2010), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016), (Ευκλείδου, Παναγιώτου, & Γιαννακουδάκης, 2013)

- Η ηλεκτροχημική σειρά των μετάλλων βοηθάει στην πρόβλεψη πραγματοποίησης μίας αυθόρμητης αντίδρασης οξειδοαναγωγής μεταξύ ενός ημιστοιχείου ηλεκτροδίου και του πρότυπου ηλεκτροδίου αναφοράς.
- Μέσω της πρόβλεψης πραγματοποίησης της αυθόρμητης οξειδοαναγωγικής αντίδρασης, μπορούμε να μελετήσουμε την ηλεκτροχημική διάβρωση του μετάλλου/ηλεκτροδίου.
- Σύμφωνα με την ηλεκτροχημική σειρά, όσο πιο αρνητικό είναι το ηλεκτροχημικό δυναμικό τόσο πιο οξειδωτική είναι η συμπεριφορά του, δηλαδή τάση να χάνει ηλεκτρόνια και να σχηματίζει ιόντα άρα τάση για διάβρωση. Αντίστοιχα, μέταλλα με θετικό ηλεκτροχημικό δυναμικό εμφανίζουν έντονη καθοδική συμπεριφορά άρα αντίσταση σε ηλεκτροχημική διάβρωση.
- Κατά το σχηματισμό ενός ηλεκτροχημικού κελιού μεταξύ δύο μετάλλων που ανήκουν στην ηλεκτροχημική σειρά, το μέγεθος του αναπτυσσόμενου δυναμικού εξαρτάται από την απόσταση των μετάλλων στην ηλεκτροχημική σειρά.

Συνοψίζοντας τις παραπάνω προτάσεις, για να πραγματοποιηθεί μία αυθόρμητη αντίδραση οξειδοαναγωγής θα πρέπει να ισχύει ότι (*Εξίσωση 2.1*) :

$$E^0_{\text{ανόδου}} < E^0_{\text{καθόδου}} \text{ ή } E^0_{\text{καθόδου}} - E^0_{\text{ανόδου}} > 0 \text{ ή } E^0_{\text{κελιού}} > 0 \quad (Eξ. 2.1)$$

2.5 Γαλβανική σειρά των μετάλλων

Η γαλβανική σειρά των μετάλλων αποτελεί μία εξέλιξη της ηλεκτροχημικής σειράς. Η ηλεκτροχημική σειρά αναφέρεται στο πρότυπο δυναμικό μεταξύ ενός μεταλλικού ηλεκτροδίου και του ηλεκτροδίου υδρογόνου αναφοράς σε πρότυπες συνθήκες. Ωστόσο, το δυναμικό μεταξύ ενός μετάλλου και του ηλεκτροδίου αναφοράς εξαρτάται από το περιβάλλον εργασίας. Η γαλβανική σειρά αποτελείται από έναν

κατάλογο μετάλλων και κραμάτων αυτών ταξινομημένα σύμφωνα με το ηλεκτροδιακό δυναμικό τους σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον π.χ. θαλασσινό νερό, γλυκό νερό, ατμοσφαιρικός αέρας. (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016)

Στη γενικότερη μορφή η ηλεκτροχημική σειρά και ή γαλβανική σειρά παρουσιάζουν έντονες ομοιότητες σχετικά με τη θέση που κατέχουν σε αυτές. Ωστόσο, εντοπίζονται και διαφορές στις θέσεις ορισμένων μετάλλων που εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η φύση του περιβάλλοντος (θαλασσινό, γλυκό νερό), η θερμοκρασία λειτουργίας (υψηλές, χαμηλές θερμοκρασίες), η πιθανότητα ανάπτυξης προστατευτικού φιλμ στο μέταλλο (όπως το στρώμα προστασίας του αλουμινίου στο γλυκό νερό ή το αντίστοιχο στρώμα του τιτανίου σε χαμηλές θερμοκρασίες). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται η γαλβανική σειρά μεταλλικών υλικών σε θαλάσσιο περιβάλλον. (Λεκάτου, 2013), (Mars, 1987), (Sabbahal, 2016), (Μεκερίδης, 2010)

Πίνακας 5: Γαλβανική σειρά μεταλλικών υλικών σε περιβάλλον θαλασσινού νερού σύμφωνα με την I.N.C (International Nickel Company).²⁴

Noble or cathodic	Platinum	
	Gold	
	Graphite (Carbon) (non-metal)	
	Titanium	
	Silver	
	Stainless steel (Type 304)	PASSIVE
	Stainless steel (Type 430)	PASSIVE
	Nickel	PASSIVE
	Silver solders (70% Ag 30% Cu)	
	Monel	
	Bronze	
	Copper	
	Brasses	
	Nickel	
	Tin	
	Lead	
	Lead-tin solders	
	Stainless steel (Type 304; 18% Cr 10% Ni)	ACTIVE
	Stainless steel (Type 430; 18% Cr)	ACTIVE
	Cast iron	
	Mild steel	
	Duralumin (Al with 4½% Cu)	
	Cadmium	
	Aluminium (commercial)	
	Zinc	
Active or anodic	Magnesium	

²⁴<https://eclass.teiath.gr/modules/document/file.php/NAFP152/ΕΡΓΑΣΙΕΣ%20ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ/ΜΕΘΟΔΟ%20ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗΣ%20ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ%20ΠΛΟΙΩΝ.pdf>

Ομοίως με την ηλεκτροχημική σειρά, στην κορυφή της γαλβανικής σειράς εντοπίζονται τα ευγενή ή ουδέτερα ή καθοδικότερα μέταλλα ενώ στο τέλος τα μέταλλα με έντονη τάση οξείδωσης άρα και διάβρωσης. Επίσης, αντίστοιχα με τη ηλεκτροχημική σειρά η απόσταση των θέσεων των μετάλλων στη γαλβανική σειρά χαρακτηρίζει και την ηλεκτροδυναμική του σχηματιζόμενου κελιού. Εμπειρικά η ελάχιστη δυναμική διαφορά μεταξύ δύο μετάλλων, προς σχηματισμό ενός γαλβανικού κελιού υπολογίζεται ως 50mV.

Συνοψίζοντας, η ηλεκτροχημική σειρά και η γαλβανική σειρά παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες και διαφορές. Οι διαφορές εντοπίζονται όταν αλλάζουν οι εξωτερικοί παράγοντες του σχηματιζόμενου γαλβανικού κελιού δηλαδή όταν μεταβαίνουμε από πρότυπες συνθήκες σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να συγχέονται οι σειρές μεταξύ τους λόγω βασικών διαφορών που τις χαρακτηρίζουν. Αρχικά, οι τιμές των δυναμικών στην ηλεκτροχημική σειρά αναφέρεται σε καθαρά υλικά και μόνο σε πρότυπες συνθήκες ενώ οι γαλβανικές σειρές αναφέρονται σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Επίσης οι γαλβανικές σειρές περιλαμβάνουν εκτός από καθαρά μέταλλα και κράματα αυτών. (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016)

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω προτάσεων, η ηλεκτροχημική σειρά χρησιμοποιείται κυρίως στις εργαστηριακές ασκήσεις καθώς περιλαμβάνουν καθαρά μέταλλα σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, ενώ οι γαλβανικές σειρές περιλαμβάνουν εμπορικά και βιομηχανικά κράματα μετάλλων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν το δυναμικό ενός γαλβανικού στοιχείου

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι η γαλβανική σειρά και ο ρυθμός εξέλιξης της διάβρωσης εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η συγκέντρωση των ιόντων, η θερμοκρασία διαλύματος και το pH του διαλύματος. Οι παραπάνω παράγοντες επεμβαίνουν στην θερμοδυναμική φύση της διάβρωσης καθώς και στην κινητική των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής που λαμβάνουν χώρα στο φαινόμενο. Ως αποτέλεσμα της προηγούμενης πρότασης, ελέγχοντας την κινητική των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής μπορούμε να προβλέψουμε την κινητική του φαινομένου της διάβρωσης καθώς επίσης και το ρυθμό διάβρωσης των μετάλλων που διέπουν το γαλβανικό κελί. (Λεκάτου, 2013), (Lyon, 2010), (Winston & Herbert, 2008)

2.6.1 Επίδραση συγκέντρωσης ιόντων και θερμοκρασίας

Το πρότυπο δυναμικό ενός γαλβανικού κελιού εξαρτάται από την κινητική των ιόντων μεταξύ των ημιστοιχείων του κελιού. Μεταβολή της συγκέντρωσης των διαλυμάτων των ημιστοιχείων του γαλβανικού κελιού οδηγεί στην αλλαγή δυναμικού του στοιχείου. Ο Γερμανός χημικός *Walther Nernst (1864-1941)* μελέτησε τη μεταβολή των δυναμικών γαλβανικών στοιχείων σε συνθήκες που δεν είναι πρότυπες δηλαδή σε θερμοκρασίες διαφορετικές των 25°C και συγκέντρωση ιόντων διάφορου του 1M. Ο τύπος που περιγράφει τις παραπάνω μεταβολές είναι γνωστός στη βιβλιογραφία ως εξίσωση του Nernst και περιλαμβάνει τόσο μεταβολές θερμοκρασίας όσο και μεταβολές ιόντων προϊόντων/αντιδρώντων στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (Εξίσωση 2.2). Η εξίσωση του Nernst περιγράφεται ως: (Λεκάτου, 2013), (Mars, 1987)

$$E_{\text{γαλβανικού κελιού}} = E^{\circ}_{\text{γαλβανικού κελιού}} - (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \ln * [(\text{προϊόντα}) / (\text{αντιδρώντα})]$$

(Εξ. 2.2)

όπου **E**: ηλεκτρεγερτική δύναμη του γαλβανικού κελιού, **E^ο**: πρότυπο ηλεκτρεγερτικό δυναμικό του γαλβανικού κελιού, **R**: παγκόσμια σταθερά των αερίων (R=8.314 J/(Kmol), **T**: θερμοκρασία διαλύματος, **n**: αριθμός ηλεκτρονίων που λαμβάνουν χώρα στην αντίδραση οξειδοαναγωγής, **F**: σταθερά Faraday (F=96.487 J/(V*mol). Για πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας δηλαδή 25°C η εξίσωση απλοποιείται σε (Εξίσωση 2.3):

$$E_{\text{γαλβανικού κελιού}} = E^{\circ}_{\text{γαλβανικού κελιού}} - (0.059/n) \cdot \text{Iog} * [(\text{προϊόντα}) / (\text{αντιδρώντα})]$$

(Εξ. 2.3)

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, η πραγματική ηλεκτρεγερτική δύναμη ενός γαλβανικού στοιχείου υπολογίζεται ως το πρότυπο δυναμικό του γαλβανικού στοιχείου (σε πρότυπες συνθήκες) μείον έναν παράγοντα που εξαρτάται από τη πραγματική θερμοκρασία διαλύματος και τη συγκέντρωση ιόντων τόσο των προϊόντων όσο και των αντιδρώντων των εξισώσεων οξειδοαναγωγής.

2.6.2 Επίδραση pH

Σημαντικός παράγοντας στο ρυθμό εξέλιξης της διάβρωσης αποτελεί το pH του διαλύματος σχηματισμού. Ωστόσο, για να κατανοήσουμε το μηχανισμό του pH στην κινητική της διάβρωσης θα πρέπει να μελετήσουμε την εξίσωση του pH, (Εξίσωση 2.4). Το pH ενός διαλύματος, ορίζεται ως ο αρνητικός λογάριθμος της μοριακής συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου και προσδιορίζεται από τη σχέση: (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Mars, 1987)

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, όξυνα διαλύματα με χαμηλές τιμές pH χαρακτηρίζονται από έναν μεγάλο αριθμό ελεύθερων ιόντων υδρογόνου ενώ αντίστοιχα σε αλκαλικά ο αριθμός των ελεύθερων ιόντων υδρογόνου είναι μικρός. Επίσης λόγω της λογαριθμικής σχέσης, μεταβολή του pH κατά μία μονάδα συνεπάγεται μεταβολή της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου κατά δέκα φορές.

Στα ηλεκτροχημικά κελιά μεταξύ μετάλλων μέσα σε όξινο περιβάλλον, η συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην κινητική των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής. Συγκεκριμένα αύξηση των κινούμενων ιόντων υδρογόνου αυξάνει την κινητική των αντιδράσεων με αποτέλεσμα αύξηση του ρυθμού διάβρωσης των μετάλλων. Συνοψίζοντας, όξινα περιβάλλοντα αυξάνουν την κινητική των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής μεταξύ ενός ηλεκτροχημικού κελιού με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του φαινομένου διάβρωσης.

2.6.3 Ηλεκτρολύτες

Κατά το σχηματισμό ενός ηλεκτροχημικού κελιού απαιτείται ένα μέταλλο με έντονη οξειδωτική συμπεριφορά (απώλεια ηλεκτρονίων), ένα μέταλλο με έντονη αναγωγική συμπεριφορά (λήψη των ελεύθερων ηλεκτρονίων) καθώς και μεταφορά των ηλεκτρονίων και ιόντων μέσω μιας εξωτερικής σύνδεσης και ενός ηλεκτρολύτη. Η παρουσία του ηλεκτρολύτη συνεπώς, αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη ηλεκτροχημικής διάβρωσης καθώς προσφέρει την ποσότητα ιόντων στο σύστημα για την πραγμάτωση των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Mars, 1987), (Winston & Herbert, 2008)

Γενικά ο ηλεκτρολύτης είναι μία ουσία η οποία μέσα σε ένα υδατικό διάλυμα παρέχει ελεύθερα κινούμενα ιόντα, τα οποία κλείνουν ηλεκτρικά το κύκλωμα καθιστώντας το ηλεκτρικά αγωγίμο. Η μορφή τους είναι κυρίως υγρή και τα διαλύματα που σχηματίζουν ονομάζονται ιοντικά διαλύματα. Ωστόσο, εκτός από υγρά διαλύματα εμφανίζονται ως τήγματα σε μορφή τζελ (όπως οι ηλεκτρολύτες μπαταριών) καθώς και σε στερεά μορφή (όπως στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές). Ο συνηθέστερος ηλεκτρολύτης στα χημικά διαλύματα είναι το νερό καθώς περιέχει μεταλλικά ιόντα, θειικά και ανθρακικά ιόντα, ιόντα υδρογόνου, ιόντα υδροξυλίου κ.α. (Winston & Herbert, 2008)

Η ποσότητα ιόντων σε έναν ηλεκτρολύτη χαρακτηρίζει την ηλεκτρική του αγωγιμότητα και τη συνεισφορά του στο ηλεκτροχημικό κελί. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μίας ουσίας μετριέται σε Ζίμενς (*Siemens*) στο διεθνές σύστημα μονάδων. Το πόσιμο νερό χαρακτηρίζεται από ηλεκτρική αγωγιμότητα της τάξης του 10-20 mS/m λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ιόντων καθιστώντας το ως έναν χρήσιμο ηλεκτρολύτη, ενώ το απιονισμένο νερό της τάξης του 1-10 mS/m λόγω έλλειψης ιόντων κάνοντας αδύνατη τη χρήση του ως ηλεκτρολύτη. Ο αέρας λόγω της ποσότητας υγρασίας που περιέχει εσωτερικά, αποτελεί ηλεκτρολύτη και είναι υπεύθυνος για τη φυσική διάβρωση των μετάλλων (εντοπισμός σκουριάς) στο εξωτερικό περιβάλλον λειτουργίας. Τέλος, το υδατικό διάλυμα NaCl συγκέντρωσης 3.5% που χρησιμοποιείται στις εργαστηριακές εφαρμογές ηλεκτροχημικής διάβρωσης χαρακτηρίζεται από μία ηλεκτρική αγωγιμότητα της τάξης του 5.2 – 5.4 S/m. (Winston & Herbert, 2008)

2.7 Μορφές διάβρωσης και σχηματιζόμενα κελιά

Η διάβρωση αποτελεί συνήθως ένα αυθόρμητο ηλεκτροχημικό φαινόμενο που αναπτύσσεται λόγω διαφόρων ειδών γαλβανικών κελιών μεταξύ μεταλλικών ημιστοιχείων. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου απαραίτητη προϋπόθεση για την άμεση αντιμετώπιση και επιλογή κατάλληλων μέτρων προστασίας, αποτελεί η κατανόηση του αίτιου μηχανισμού ανάπτυξης της διάβρωσης. Λόγω των παραπάνω κρίνεται απαραίτητο, πριν την παρουσίαση των συνηθέστερων μορφών διάβρωσης, να αναφερθούν οι ομάδες των πιθανών σχηματιζόμενων κελιών τα οποία θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη των διαφόρων μορφών διάβρωσης. (Λεκάτου, 2013), (ALMET

MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Gustafsson, 2011), (Lyon, 2010), (Mars, 1987), (Safiuddin, 2006)

2.7.1 Κατηγορίες σχηματιζόμενων κελιών διάβρωσης

Η κινητήρια δύναμη των φαινομένων διάβρωσης αποτελούν τα σχηματιζόμενα ηλεκτροχημικά κελιά που αναπτύσσονται στο εκάστοτε περιβάλλον λειτουργίας. Συγκεκριμένα από τα δύο είδη ηλεκτροχημικών κελιών που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τα γαλβανικά κελιά είναι αυτά που σχετίζονται συνήθως με τα φαινόμενα διάβρωσης και αποκαλούνται κελιά διάβρωσης. Συνήθως η διάβρωση αποτελεί αποτέλεσμα συνεργατικής αλληλεπίδρασης και ανάπτυξης πολλών ειδών γαλβανικών στοιχείων. Γενικά η κινητήρια δύναμη των φαινομένων διάβρωσης, στην περίπτωση των γαλβανικών κελιών, είναι το μέγιστο αναπτυσσόμενο δυναμικό μεταξύ των ημιστοιχείων του κελιού δηλαδή η ηλεκτρεγερτική τάση. (Λεκάτου, 2013), (Gustafsson, 2011), (Lyon, 2010), (Sabbahal, 2016)

Υπάρχουν πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των σχηματιζόμενων κελιών διάβρωσης καθώς και των επιμέρους μορφών διάβρωσης που αναπτύσσουν. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται τα βασικά κελιά διάβρωσης που αναπτύσσονται στα περιβάλλοντα εφαρμογής. (Gustafsson, 2011), (Sabbahal, 2016)



Σχήμα 15: Παρουσίαση των διαθέσιμων αναπτυσσόμενων γαλβανικών κελιών.

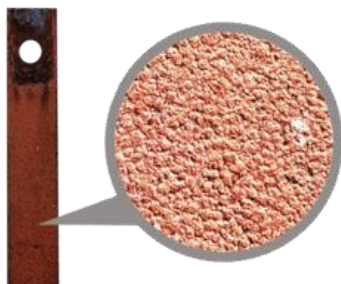
Η ανάπτυξη των φαινομένων διάβρωσης μπορεί να οφείλονται στην επίδραση και σχηματισμό ενός γαλβανικού κελιού ή στη συνεργατική επίδραση πολλών γαλβανικών κελιών.

2.7.2 Μορφές Διάβρωσης

Τα ηλεκτροχημικά κελιά που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα οδηγούν στην ανάπτυξη διαφόρων μορφών διάβρωσης. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές τα φαινόμενα διάβρωσης προκύπτουν συνεργατικά από την επίδραση δύο ή περισσότερων κελιών. Η κάθε μία μορφή διάβρωσης χαρακτηρίζεται από το μηχανισμό ανάπτυξης, την γεωμετρική συμπεριφορά εξέλιξης, το βαθμό υποβάθμισης που προκαλεί στο υλικό και τις μεθόδους αντιμετώπισης της. (AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010), (Lyon, 2010), (Mars, 1987)

2.7.2.1 Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση (*General Corrosion*)

Αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή διάβρωσης που εντοπίζεται σε όλα τα υλικά, συνήθως όταν ένα μεταλλικό στοιχείο βρίσκεται σε επαφή με ένα οξύ ή διάλυμα ή σε ξηρή ατμόσφαιρα με κατάλληλες συνθήκες (θερμοκρασία). Η ομοιόμορφη διάβρωση συνήθως πραγματοποιείται με ομοιόμορφο τρόπο στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου όπου έχουμε την μεγαλύτερη εκτεθειμένη επιφάνεια στο περιβάλλον λειτουργίας, (Εικόνα 9). Αποτέλεσμα αυτής της μορφής διάβρωσης είναι η ανάπτυξη ενός ισοπαχούς στρώματος προϊόντος διάβρωσης το οποίο, σε ορισμένες συνθήκες (περιβάλλον, επιβολή τάσεων), μειώνει σταδιακά την περαιτέρω διάβρωση του υλικού. Η ομοιόμορφη διάβρωση είναι μία επιθυμητή μορφή διάβρωσης καθώς μπορεί να παρατηρηθεί λόγω διάβρωσης της επιφάνειας, να προσδιοριστεί ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής της διάταξης, να υπολογιστεί ο βαθμός φθοράς του υλικού καθώς και να αναχαιτιστεί η εξέλιξη της. Οι κύριοι τρόποι αντιμετώπισης είναι η κατάλληλη επιλογή του υλικού κατά το σχεδιασμό, εφαρμογή κατάλληλων επιστρωμάτων προστασίας, χρήση αναστολέων περιβάλλοντος καθώς και εφαρμογή άλλων μορφών προστασίας (ανοδική, καθοδική). (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Gustafsson, 2011), (Mars, 1987)

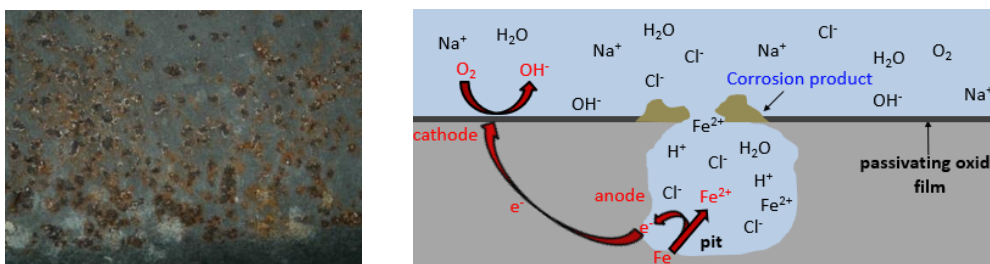


Εικόνα 9: Παράδειγμα γενικής ή ομοιόμορφης διάβρωσης όπου εμφανίζεται μία περιοχή με ομοιόμορφο αναπτυσσόμενο προϊόν διάβρωσης.²⁵

2.7.2.2 Βελονοειδής διάβρωση (*Pitting Corrosion*)

Μαζί με την ομοιόμορφη διάβρωση, αποτελούν τις συνηθέστερες μορφές διάβρωσης που εξελίσσονται σε μεταλλικά στοιχεία. Η βελονοειδής διάβρωση αποτελεί μία τοπική ή εκλεκτική μορφή διάβρωσης εξαιτίας μιας διαφοράς συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη (περιβάλλον λειτουργίας). Η διάβρωση έχει σαν αρχικό στάδιο τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης ενώ στη συνέχεια εξελίσσεται σε τοπική διάλυση του υλικού σχηματίζοντας εσοχές ή κρατήρες βελονοειδούς μορφής, (Εικόνα 10). Οι οπές και κρατήρες που σχηματίζονται κατά την εξέλιξη του φαινομένου λαμβάνουν διάφορες μορφές και γεωμετρίες που επιταχύνουν το βαθμό εξέλιξης της διάβρωσης. Έτσι, σε πολύ μικρό χρόνο από την εμφάνιση της μικροσκοπικής οπής, η διάβρωση μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία διάτρηση και καταστροφή του υλικού. Η βελονοειδής διάβρωση εμφανίζεται συνήθως σε μέταλλα που παθητικοποιούνται όταν τα τελευταία εκτεθούν σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα λειτουργίας λόγου χάρη, ανοξείδωτους χάλυβες, κράματα αλουμινίου και τιτανίου. Το συγκεκριμένο είδος διάβρωσης χαρακτηρίζεται άκρως καταστροφικό καθώς προκαλεί έντονο βαθμό φθοράς και υποβάθμισης χωρίς έντονη απώλεια μάζας και κατ' επέκταση δυσκολία εντοπισμού και παρατήρησης του φαινομένου. Επιπλέον, η δυσκολία ανίχνευσης του φαινομένου οφείλεται στη δυσκολία διάκρισης των βελονισμών ή οπών είτε λόγω του μικρού μεγέθους είτε λόγω κάλυψης τους από προϊόντα διάβρωσης. Η βελονοειδής διάβρωση εμφανίζεται συνήθως κάτω από σταγόνες νερού, ακαθαρσίες, ιζήματα, σκωρίες και προϊόντα διάβρωσης καθώς και εσοχές λανθασμένου σχεδιασμού. (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010), (Gustafsson, 2011), (Mars, 1987)

²⁵ https://www.ndt.net/article/v07n07/ginzel_r/ginzel_r.htm



Εικόνα 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα βελονοειδής διάβρωσης.^{26,27}

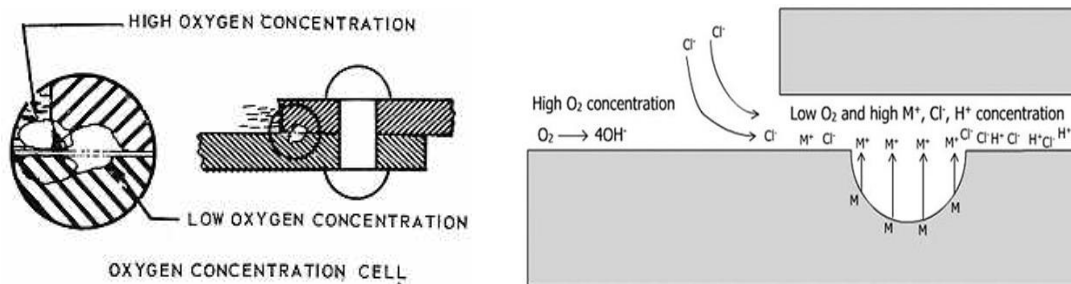
2.7.2.3 Διάβρωση σε χαραγές (Crevice Corrosion)

Η διάβρωση χαραγών ομοιάζει σημαντικά με την διάβρωση οπών. Ο μηχανισμός ανάπτυξης της διάβρωσης είναι η μεταβολή συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη στο εσωτερικό των χαραγών καθώς και γύρω από αυτήν, με αποτέλεσμα την εκλεκτική διάβρωση της περιοχής. Η ανάπτυξη και εξέλιξη του ρυθμού διάβρωσης οφείλεται συνήθως στην μεταβολή συγκέντρωσης του οξυγόνου στο εσωτερικό των εσοχών (μικρή συγκέντρωση – άνοδος της διάταξης) ή στην παρουσία υγρού ή άλλων ακαθαρσιών, (Εικόνα 11). Σύμφωνα με την προηγούμενη πρόταση αναπτύσσονται ηλεκτροχημικά στοιχεία μεταξύ του εσωτερικού της χαραγής, με μικρή συγκέντρωση οξυγόνου συνθέτοντας την άνοδο του στοιχείου, και της περιοχής γύρω από αυτή με αυξημένη συγκέντρωση οξυγόνου συνθέτοντας την κάθοδο. (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010)

Η διάβρωση χαραγών μπορεί να εντοπιστεί σε μια μεγάλη ποικιλία μετάλλων και συνδυάζεται συνήθως με άλλες μορφές διάβρωσης όπως γαλβανική ή θερμογαλβανική ή μηχανική. Επιπλέον, εμφανίζεται σε κράματα που επιδέχονται παθητικοποίηση σχηματίζοντας σταθερά φιλμ (ανοξειδωτους χάλυβες, αλουμίνια, κράματα τιτανίου), ωστόσο σε περιβάλλοντα χλωριόντων τα φιλμ γίνονται ασταθή σχηματίζοντας συνθήκες εκλεκτικής διάβρωσης. Τέλος, το φαινόμενο ενισχύεται με την ύπαρξη εγκοπών ή σχισμών λόγω λανθασμένου σχεδιασμού και ανάπτυξης εντοπισμένης διάβρωσης (μηχανικές συνδέσεις). (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

²⁶http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/2921/iosifidoua_corrosion.pdf?sequence=3

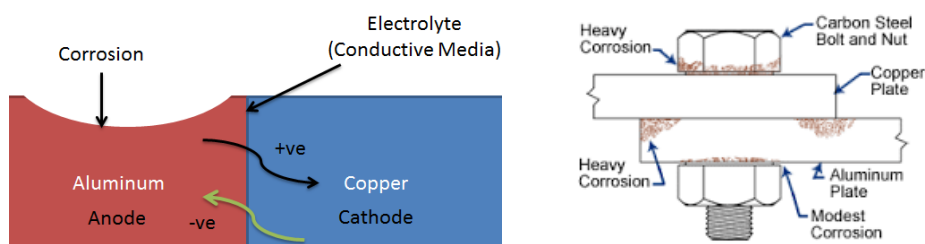
²⁷ <https://www.lcc-ucla.com/current-research/electrochemistry-of-surfaces/>



Εικόνα 11: Παραδείγματα ανάπτυξης διάβρωσης χαραγών.²⁸

2.7.2.4 Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (Galvanic Corrosion)

Η γαλβανική διάβρωση σχηματίζεται κατά την επαφή δύο μετάλλων και παρουσία ηλεκτρολύτη, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικό ηλεκτροχημικό δυναμικό. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη του σχηματιζόμενου στοιχείου οφείλεται στην διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ημιστοιχείων δηλαδή την απόσταση τους στην ηλεκτροχημική σειρά, (Εικόνα 12). Το ημιστοιχείο με το χαμηλότερο αρνητικό ηλεκτρικό δυναμικό αποτελεί την άνοδο του στοιχείου και χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό διάβρωσης. Αντίστοιχα, το ημιστοιχείο με το υψηλότερο ηλεκτρικό δυναμικό συνθέτει την κάθοδο και χαρακτηρίζεται από ελάχιστο ρυθμό φθοράς. Για τη πλήρη αντιμετώπιση της γαλβανικής διάβρωσης θα πρέπει να προσδιοριστεί το περιβάλλον λειτουργίας της διάταξης καθώς ο ηλεκτρολύτης-περιβάλλον επηρεάζει την ηλεκτροχημική σειρά των μετάλλων. (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010)



Εικόνα 12: Παραδείγματα ανάπτυξης γαλβανικής διάβρωσης.^{29,30}

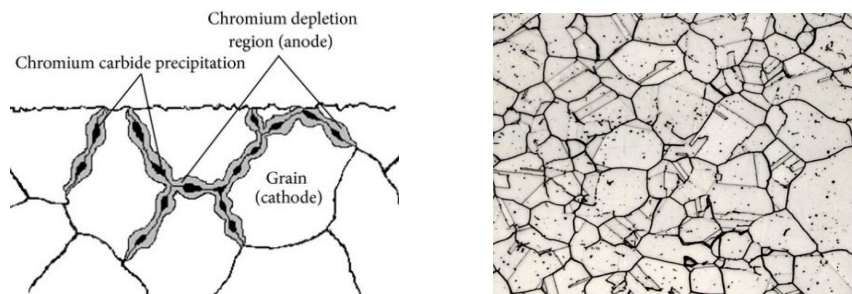
²⁸ <http://content.aviation-safety-bureau.com/allmembers/ac-43-13-1b/sections/corrosion-inspection-and-protection2.php>

²⁹ <http://smlease.com/entries/corrosion/galvanic-corrosion>

³⁰ <https://embossingtapesupplies.com.au/blog/post/how-to-prevent-corrosion-when-two-dissimilar-metals-come-into-contact-causing-electrolysis/>

2.7.2.5 Περικρυσταλλική διάβρωση (*Intergranular Corrosion*)

Η διάβρωση αναπτύσσεται στα όρια των κόκκων ενός κράματος λόγω διαφοράς σύστασης ή μικροδομής ή ενεργειακού περιεχομένου ή ξένων στοιχείων ως προς το κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού, (Εικόνα 13). Η περικρυσταλλική διάβρωση εντοπίζεται συνήθως σε κράματα τα οποία έχουν υποστεί μιας μορφής επεξεργασίας, θερμικής ή ψυχρηλασίας, με στόχο την ενίσχυση και τη μεταβολή της μικροδομής τους. Η διάβρωση αυτή έχει σαν συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, το οποίο υπό την επίδραση εξωτερικών τάσεων υφίσταται περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, ακόμη και αν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο της αντοχής του σε εφελκυσμό. Η περικρυσταλλική διάβρωση εντοπίζεται επίσης σε μηχανικές κατεργασίες όπως συγκολλήσεις ωστενιτικών χαλύβων, λόγω κατακρήμνισης καρβιδίων στη σύσταση του υλικού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφορικών δυναμικών μεταξύ των μικροφασικών περιοχών. Η εξέλιξη του φαινομένου στο εσωτερικό του υλικού είναι ολέθρια καθώς εξελίσσεται εσωτερικά στη μικροδομή και οδηγεί στην πλήρη αστοχία και κατάρρευση του. (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010)



Εικόνα 13: Παραδείγματα περικρυσταλλικής διάβρωσης.^{31,32}

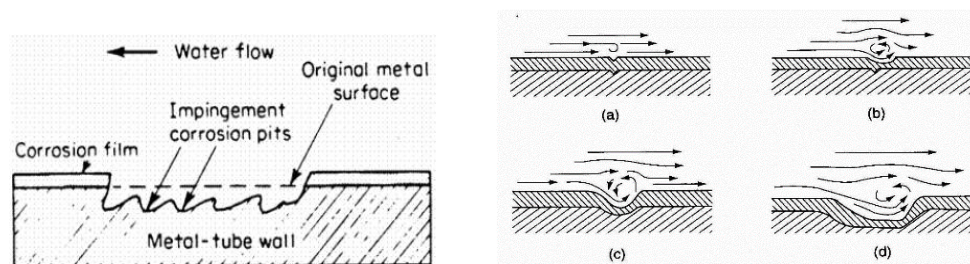
2.7.2.6 Μηχανική διάβρωση εκ τριβής (*Erosion Corrosion*)

Πρόκειται για μία μορφή διάβρωσης που σχετίζεται με την επίδραση μηχανικών τάσεων και έντονων φαινομένων φθοράς λόγω εξωτερικής εφαρμογής μηχανικής ροής, (Εικόνα 14). Τα σωματίδια της μηχανικής ροής αλληλοεπιδρούν με την επιφάνεια του υλικού προκαλώντας σταδιακά φθορά και ανάπτυξη τοπικών

³¹ <https://bloggingwithjimmysd.wordpress.com/two-methods-for-the-price-of-one/intergranular-corrosion/>

³² <https://engineeringdegradation.wordpress.com/2014/10/21/notes-about-two-forms-of-corrosion-intergranular-and-microbial/>

μικρορωγμών. Οι μικρορωγμές ενισχύουν την ανάπτυξη συγκέντρωσης τάσεων, επιταχύνουν την εξέλιξη της διάβρωσης και ενισχύουν την ανάπτυξη τοπικών ηλεκτροχημικών κελιών. Η αντοχή σε μηχανική διάβρωση με παρουσία ροών εξαρτάται από τη χημική σύσταση, τη γενική αντίσταση σε διάβρωση, τη σκληρότητα της επιφάνειας καθώς και τη γενική επιφανειακή κατάσταση του υλικού. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)



Εικόνα 14: Παρουσίαση του μηχανισμού διάβρωσης με επίδραση μηχανικής ροής.^{33,34}

2.7.2.7 Σπηλαιώδης διάβρωση (*Cavitation Corrosion*)

Η σπηλαιώδης διάβρωση αποτελεί μία ειδική περίπτωση της εκτριβής μηχανικής διάβρωσης, με την επίδραση φυσαλίδων ατμού λόγω υψηλών θερμοκρασιών, υψηλής ταχύτητας ρευστού και ύπαρξη τυρβώδους ροής κοντά στην επιφάνεια του υλικού, (Εικόνα 15). Κατά την κίνηση της τυρβώδους ροής, οι φυσαλίδες ατμού συγκρούονται με την επιφάνεια του υλικού και σκάνε προκαλώντας μηχανικά κύματα και δονήσεις. Τα κύματα και οι δονήσεις προκαλούν φθορά στην επιφάνεια δημιουργώντας ρωγματώσεις και ασυνέχειες επιταχύνοντας την ανάπτυξη ηλεκτροχημικών κελιών και κατ' επέκταση αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Τελος, η σπηλαιώδης διάβρωση εμφανίζεται κυρίως σε υδραυλικές τουρμπίνες, προπέλες πλοίων και γενικά σε επιφάνειες που υφίστανται ταχεία ροή υγρών και μεταβολές πίεσης. (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010)

³³ <https://www.slideshare.net/RISHABHSHARMA248/presentation-on-erosion-corrosion>

³⁴ <http://www.corrosionlab.com/papers/erosion-corrosion/erosion-corrosion.htm>



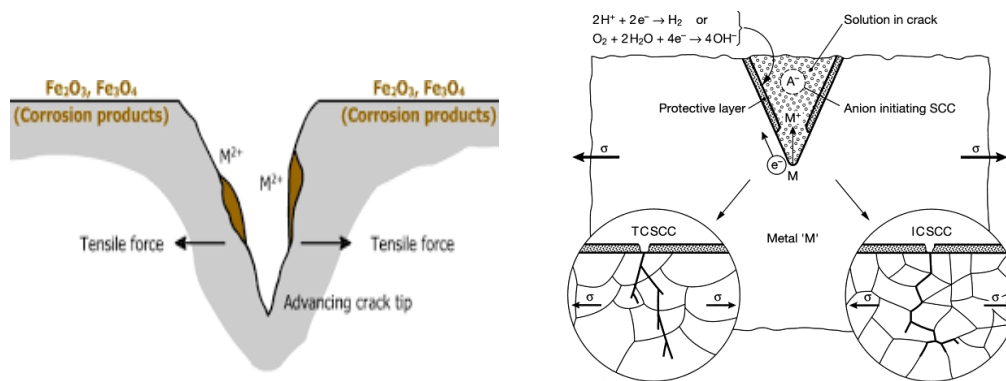
Εικόνα 15: Χαρακτηριστικά παραδείγματα μηχανικών στοιχείων τα οποία έχουν υποστεί σπηλαιώδη διάβρωση.^{35,36}

2.7.2.8 Διάβρωση με μηχανικές τάσεις (*Stress Corrosion Cracking*)

Μία από τις σημαντικότερες μορφές διάβρωσης είναι αυτή με συνύπαρξη μηχανικών τάσεων. Κατά την άσκηση εφελκυστικών τάσεων η οποιαδήποτε ασυνέχεια ή ατέλεια της επιφάνειας του μετάλλου εξελίσσεται σε μικρορωγμή η οποία εξελίσσεται σε μακρορωγμή λόγω συγκέντρωσης τάσεων και επιταχύνει την ανάπτυξη γαλβανικών και ηλεκτροχημικών κελιών. Η ανάπτυξη των ρωγμών και ο σχηματισμός δικτύων αυτών στο εσωτερικό του υλικού οδηγεί μικροσκοπικά σε περικρυσταλλική ή διακρυσταλλική θραύση, (Εικόνα 16). Λόγω της παραπάνω πρότασης, η μηχανική διάβρωση αποτελεί μία καταστροφική μορφή διάβρωσης καθώς με μικρή φθορά της επιφάνειας του υλικού πραγματοποιείται σταδιακή αποδόμηση και κατ' επέκταση αστοχία της διάταξης. Ο σημαντικότερος παράγοντας στην κινητική της εξέλιξης του φαινομένου είναι ο σχηματισμός και η ανάπτυξη των μικρορωγμών της επιφάνειας. Συγκεκριμένα, η έναρξη των αναπτυσσόμενων ρωγμών μπορεί να οφείλεται σε μία τοπική διάβρωση στην επιφάνεια του υλικού, συσσώρευση γραμμοαταξιών και διαταραχών στα όρια κόκκων με αποτέλεσμα ανάπτυξης τάσεων εσωτερικά, αρχική ρωγμάτωση του πιθανού παθητικού στρώματος, πιθανά ελαττώματα στην επιφάνεια με αποτέλεσμα συγκέντρωσης τάσεων καθώς και συσσώρευση κατακρημνισμάτων στα όρια των κόκκων που βοηθούν στην εξέλιξη ανάπτυξης ρωγμών. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

³⁵ <https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/groups/ncats/corrosion.page>

³⁶ <https://www.imagenesmy.com/imagenes/cavitation-corrosion-4f.html>



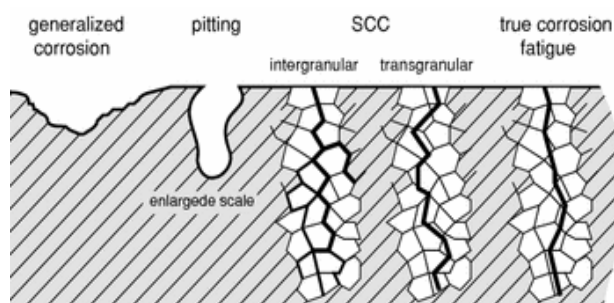
Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού ανάπτυξης εργοδιάβρωσης.^{37,38}

2.7.2.9 Διάβρωση με κόπωση (*Corrosion fatigue*)

Η ανάπτυξη του φαινομένου στηρίζεται στη συνέργεια ηλεκτροχημικής διάβρωσης και εφαρμογής εναλλασσόμενων μηχανικών φορτίων. Αποτέλεσμα της κόπωσης ενός υλικού είναι η ανάπτυξη μικρορωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου και η αυξανόμενη κινητική των διαβρωτικών μηχανισμών, (Εικόνα 17). Σε αντίθεση με την εργοδιάβρωση, η εξέλιξη των ρωγμών είναι μη διακλαδισμένες, εξελίσσονται διαμέσου των κόκκων και η αστοχία του υλικού χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή. Επίσης, δεν απαιτείται κάποιο ιδιαίτερο περιβάλλον διάβρωσης όπως στην εργοδιάβρωση αλλά μπορεί να αναπτυχθεί σε όλα τα περιβάλλοντα. Ο μηχανισμός ανάπτυξης και εξέλιξης ομοιάζει σημαντικά με τον αντίστοιχο της εργοδιάβρωσης, δηλαδή παρουσία και εξέλιξη των ρωγμών ή ατελειών της επιφάνειας. Ωστόσο, η μορφολογία ενός δείγματος που έχει υποστεί μηχανική διάβρωση με κόπωση διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη της εργοδιάβρωσης. Συγκεκριμένα στην επιφάνεια αστοχίας εντοπίζονται δύο περιοχές, μία λεία και μία τραχιά. Η λεία επιφάνεια οφείλεται στην τριβή των παρειών της ρωγμής ενώ το τραχύ αντιστοιχεί στο τμήμα που αστόχησε τελευταίο (ψαθυρή θραύση). Παράγοντες που επηρεάζουν την κινητική της διάβρωσης με κόπωση είναι η συγκέντρωση οξυγόνου, η θερμοκρασία και η οξύτητα του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, η τάση αστοχίας λόγω κόπωσης των κραμάτων αλουμινίου σε διαβρωτικό περιβάλλον κυμαίνεται μεταξύ 30-75% της τάσης αστοχίας σε αδρανές περιβάλλον. (Λεκάτου, 2013), (ALFED, ALUMINIUM FEDERATION, 2010)

³⁷ <http://faculty.kfupm.edu.sa/ME/hussaini/Corrosion%20Engineering/04.06.03.htm>

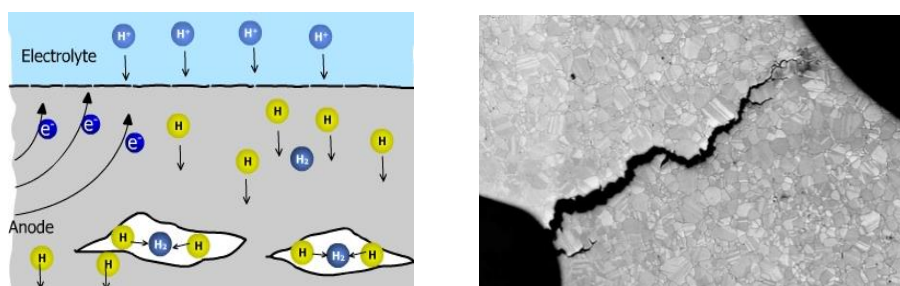
³⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630799000333>



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση της μορφολογικής εξέλιξης των ρωγμών σε διάφορα είδη διάβρωσης.³⁹

2.7.2.10 Διάβρωση υδρογόνου (*Hydrogen Corrosion Damage*)

Η διάβρωση υδρογόνου πραγματοποιείται λόγω μείωσης της ολκιμότητας του υλικού και ψαθυροποίηση για αυτό αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ψαθυροποίηση υδρογόνου. Ωστόσο, η μορφή της διάβρωσης συνδέεται και με την ανάπτυξη έμμεσων εσωτερικών τάσεων. Συγκεκριμένα, το ατομικό υδρογόνο απορροφάτε από την επιφάνεια του υλικού, εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του και προξενεί φουσκάλες οδηγώντας στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων, (Εικόνα 18). Ο συνδυασμός των αναπτυσσόμενων τάσεων στο εσωτερικό και η ψαθυροποίηση του υλικού λόγω απορρόφησης υδρογόνου, οδηγεί στο σχηματισμό μικρο ρωγματώσεων και επιτάχυνση των ηλεκτροχημικών φαινομένων. Τα συνηθέστερα κράματα που εντοπίζεται ψαθυροποίηση με διάβρωση είναι οι χάλυβες υψηλής αντοχής, κράματα αλουμινίου και κράματα τιτανίου. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)



Εικόνα 18: Παραδείγματα διάβρωσης υδρογόνου.^{40,41}

³⁹ <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=441>

⁴⁰ <http://faculty.kfupm.edu.sa/ME/hussaini/Corrosion%20Engineering/04.07.03.htm>

⁴¹ https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-embrittlement-of-UNS-N07725-showing-signs-of-intergranular-cleavage-Image_fig3_316622305

2.8 Ταχύτητα διάβρωσης και οι παράγοντες που την επηρεάζουν

Η ταχύτητα διάβρωσης και ο ρυθμός ανάπτυξης της προσδιορίζεται είτε με την απώλεια ή αύξηση μάζας (φθορά υλικού ή παραγωγή οξειδίων) ή με το πάχος του προστατευτικού φιλμ οξειδίου που αναπτύσσεται (παθητικοποίηση). Γενικά η εξάρτηση της αύξησης ή μείωσης μάζας του υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο παρουσιάζει γραμμική, παραβολική, λογαριθμική ή κυβική συμπεριφορά. Από τις παραπάνω μορφές η γραμμική εξάρτηση αποτελεί τη χειρότερη συμπεριφορά λόγω της συνεχής φθοράς του υλικού με αποτέλεσμα την τελική αστοχία του. Οι υπόλοιπες μορφές εντοπίζονται κυρίως σε μέταλλα και κράματα τα οποία παθητικοποιούνται με αποτέλεσμα την αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση με την πάροδο του χρόνου λόγω ανάπτυξης προστατευτικού φιλμ οξειδίου. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Gustafsson, 2011)

2.8.1 Παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν τη ταχύτητα διάβρωσης

Η διάβρωση αποτελεί ένα σύνθετο ηλεκτροχημικό φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με τη φύση του υλικού, το περιβάλλον λειτουργίας και τις ιδιότητες του, τον παρεχόμενο ηλεκτρολύτη καθώς και το χρόνο εξέλιξης του φαινομένου. Γενικά, η διάβρωση χαρακτηρίζεται ως ένα χρονο-εξαρτώμενο φαινόμενο καθώς ο μηχανισμός της στηρίζεται στην κινητική των εξισώσεων οξειδοαναγωγής που πραγματοποιούνται. Ο πιο αργός μηχανισμός που λαμβάνει χώρα στην εξέλιξη της διάβρωσης, καθορίζει μονοσήμαντα την ταχύτητα και το ρυθμό διάβρωσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της διάβρωσης. (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Gustafsson, 2011), (Lyon, 2010), (Mars, 1987), (Winston & Herbert, 2008), (Μεκερίδης, 2010), (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)

- **Θερμοκρασία:** Η θερμοκρασία επηρεάζει όλες τις κινητικές αντιδράσεις και μηχανισμούς μιας διάβρωσης, όπως περιγράφεται από την εξίσωση Arrhenius. Η προσφερόμενη ενέργεια, υπό μορφή θερμότητας, βοηθάει στη μείωση του ενεργειακού βήματος για την έναυση των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων.

Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην αύξηση κινητικότητας των ατόμων – μορίων άρα επηρεάζει τη διαχυτική συμπεριφορά των μηχανισμών (διάχυση οξυγόνου στο πλέγμα). (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)

- **Οξύτητα:** Το pH του περιβάλλοντος επηρεάζει την ταχύτητα διάβρωσης γιατί μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της καθοδικής δράσης όπως το δυναμικό ισορροπίας και την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής είτε γιατί μεταβάλλει τη διαλυτότητα των μετάλλων ή των προστατευτικών οξειδίων. Γενικά, οποιαδήποτε απομάκρυνση από το σημείο ουδετερότητας αυξάνει την ταχύτητα διάβρωσης μέσω αύξησης της ταχύτητας των αντιδράσεων. Συγκεκριμένα αύξηση του pH ενισχύει τη διάβρωση κραμάτων σιδήρου ενώ μείωση του pH οδηγεί μείωση της ταχύτητας διάβρωσης κραμάτων αλουμινίου. (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)
- **Ταχύτητα κίνησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος:** Η ταχύτητα του διαλύματος αυξάνει την ταχύτητα διάβρωσης μόνο αν το σύστημα ελέγχεται από τη διάχυση, ενώ την αφήνει ανεπηρέαστη αν το σύστημα ελέγχεται από υπέρταση φορτίου. Ωστόσο τις περισσότερες φορές η αυξημένη κίνηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος οδηγεί στην ανάπτυξη τασικών δυνάμεων η οποία με τη σειρά της προκαλεί έντονη φθορά των επιφανειών με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης. (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)
- **Ακτινοβολία & Ραδιενέργεια:** Οι ακτινοβολίες υψηλής διείσδυσης και η ραδιενέργεια επιδρούν στη μικροδομή του υλικού, επηρεάζουν την κινητικότητα και την αλληλεπίδραση των ατόμων-μορίων και αλλοιώνουν τη μηχανική συμπεριφορά του. Συνήθως, η έκθεση μετάλλου ή κράματος σε ραδιενέργεια συνεπάγεται τη δημιουργία πρόσθετων αταξιών δομής που καθιστούν το μέταλλο πιο ανοδικό και κατά συνέπεια προκαλούν την ταχύτερη διάβρωση του. (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)
- **Επιφάνεια του υλικού:** Η κατάσταση της επιφάνειας ενός υλικού καθώς και η τραχύτητα της, επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα διάβρωσης και το ρυθμό εξέλιξης της. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας και χρόνου καταναλώνεται στο

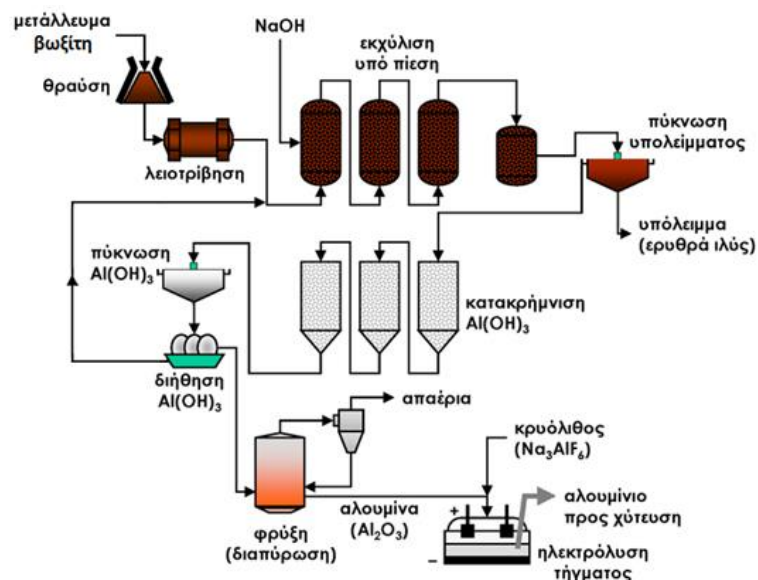
πρώτο στάδιο εξέλιξης της διάβρωσης δηλαδή την δημιουργία μιας ατέλειες ή ασυνέχειας στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στην περίπτωση υπάρχουσας ατέλειας ή μικρορωγμής στην επιφάνεια, αυξάνεται σημαντικά ο ρυθμός ανάπτυξης της μορφής διάβρωσης και μειώνεται θεαματικά ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του στοιχείου. (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)

- **Μηχανικές τάσεις:** Η εφαρμογή εξωτερικών τάσεων οδηγεί στην ανάπτυξη του ενεργειακού περιεχομένου μεταξύ των περιοχών του υλικού, σχηματίζοντας ηλεκτροχημικά κελιά στο εσωτερικό. Επιπλέον, οι παραμένουσες ή εφαρμοζόμενες τάσεις οδηγούν στην ψαθυροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς. (Μπότσης, 2015), (Σπύρου & Σωτηράκης, 2016)

Κεφάλαιο 3^ο : Αλουμίνιο

3.1 Εισαγωγή

Το αργίλιο ή αλουμίνιο είναι το χημικό στοιχείο του περιοδικού με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό $Z = 13$. Αποτελεί ένα αργυρόλευκο μεταλλικό στοιχείο που ανήκει στην 13^η ομάδα και 3^η σειρά του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, απαντάται στα μεταλλεύματα του βωξίτη με τη μορφή υδροξειδίων ή οξυ-υδροξειδίων όπως, γιββσίτη, διάσπορου και βαιμίτη που μετατρέπεται σε αλουμίνα και στην συνέχεια μέσω ηλεκτρόλυσης μετατρέπεται σε μέταλλο αλουμίνιο. Συνοπτικά η παραγωγική διαδικασία του αλουμινίου από την εξόρυξη μέχρι το τελικό προϊόν παρουσιάζεται στο Σχήμα 16. (Ceri & Evangelista, 1999), (William, 2015), (Σιδηρόπουλος, 2008), (Τριανταφυλλίδης, 2016)



Σχήμα 16: Η πλήρης παραγωγική διαδικασία του αλουμινίου από το βωξίτη.⁴²

⁴² <http://www.orykta.gr/ekmetalleusi-emploutismos/metallourgikes-diergasies/83-metallourgia-metallourgikes-diergasies>

Το αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των “ελαφρών μετάλλων” μαζί με το μαγνήσιο και το τιτάνιο. Τέτοιου είδους μέταλλα χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές πυκνότητας (2.7 , 1.7 , 4.5 g/cm^3 αντίστοιχα έναντι 7.83 g/cm^3 για το σίδηρο). Τα μέταλλα αυτά και τα κράματά τους παρουσιάζουν υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ). Με την πάροδο του χρόνου οι απαιτήσεις σε παραγωγή “ ελαφρών μετάλλων ” αυξήθηκαν. Συγκεκριμένα για το αλουμίνιο, μεταξύ του 1900 - 1950 η παραγωγή του αυξήθηκε κατά 250 φορές, ενώ στο δεύτερο μισό του 20ου αιώνα το αλουμίνιο αποτέλεσε το δεύτερο πιο εύχρηστο μέταλλο, ξεπερνώντας ακόμα και τον χαλκό. Στις περισσότερες χώρες το αλουμίνιο χρησιμοποιείται κυρίως σε πέντε κατασκευαστικούς βασικούς τομείς: κτήρια και κατασκευές, κιβώτια εμπορευμάτων και συσκευασίες, μεταφορές, ηλεκτρικοί αγωγοί, μηχανικός εξοπλισμός. (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Λεκάτου, 2005), (Ελληνική Ένωση Αλουμινίου, 2018), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

3.2 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες του αλουμινίου

Το καθαρό αλουμίνιο αποτελεί ένα ελαφρύ και πολύ όλκιμο μέταλλο, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Οι μηχανικές του ιδιότητες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την καθαρότητά του αλλά και από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί ανάλογα με το είδος της κατεργασίας του. Η τιμή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας φτάνει το 75% αυτής του χαλκού, δεδομένης όμως της χαμηλότερης πυκνότητάς του, το καθιστά καλύτερο αγωγό. Ορισμένα από τα κυριότερα φυσικά χαρακτηριστικά του αλουμινίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2010), (Ελληνική Ένωση Αλουμινίου, 2018), (Cerri & Evangelista, 1999), (Λαγαρή, 2009), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

Πίνακας 6: Κύριες φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου.⁴³

Όνομα Ιδιοτήτων	Τιμές
Ατομικός Αριθμός, Z	13
Σχετική Ατομική Μάζα	26.982
Κρυσταλλική Δομή	Εδροκεντρωμένο σύστημα, FCC
Σημείο Τήξης	660 °C
Σημείο Βρασμού	2520 °C

⁴³ <http://www.atem-oe.gr/alouminio-plirofories/idiotites-alouminiou/idiotites-katharou-alouminiou-kramaton.html>

Σχετική Πυκνότητα, d	2.7 g/cm ³
Μέτρο Ελαστικότητας Young, E	70 GPa
Μέση Ειδική Θερμότητα (0 – 100 °C)	917 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Θερμική Αγωγιμότητα (20 – 100 °C)	238 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής (0 - 100 °C)	23.5·10 ⁻⁶ ·K ⁻¹
Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση (στους 20 °C)	2.67 μ·Ohm·cm ⁻¹

Πέρα από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις φυσικές ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου, παράγεται ένας μεγάλος αριθμός κραμάτων αλουμινίου με τη προσθήκη σε αυτό διαφόρων κραματικών στοιχείων όπως σιδήρου, χαλκού, μαγνησίου, μαγγανίου, πυριτίου και πολλών άλλων με αποτέλεσμα την ενίσχυση και βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Λόγω των παραπάνω, το αλουμίνιο διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελάσσεται, διελάσσεται, συγκολλάται και συνεπώς αποτελεί ιδανικό υλικό κατασκευών, (Πίνακας 7). Συγκριτικά το μέτρο ελαστικότητας του είναι τρεις φορές χαμηλότερο από εκείνο του σιδήρου ενώ παρουσιάζει τρεις φορές μεγαλύτερη ελαστική επιμήκυνση σε σχέση με το σίδηρο σε δεδομένη κατάσταση φόρτισης. Παράλληλα το αλουμίνιο και τα κράματά του παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά σε φαινόμενα διάβρωσης λόγω του φαινομένου της παθητικοποίησης στην επιφάνεια τους. (Cerri & Evangelista, 1999), (Τριανταφυλλίδης, 2016), (Ελληνική Ένωση Αλουμινίου, 2018)

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικές ιδιότητες αλουμινίου και συνήθεις εφαρμογές.⁴⁴

Όνομα Ιδιοτήτων	Εφαρμογές & Χρήσεις
Χαμηλό ειδικό βάρος, ανθεκτικότητα	Μέσα μεταφοράς
Αντοχή στην διάβρωση	Ναυπηγική, Οικοδομικά
Πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα	Αγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας
Αδιαπέραστο από μικροοργανισμούς & φως	Συσκευασίες και φαρμακοβιομηχανίες
Μη μαγνητικό υλικό	Ηλεκτρονικός εξοπλισμός
Πολύ καλή ανακλαστικότητα	Πάνελ και κουβέρτες διάσωσης
Ανακυκλώσιμο	Προστασία περιβάλλοντος

Η υψηλή αντίσταση του αλουμινίου και των κραμάτων του σε ήπιες συνθήκες διάβρωσης οφείλεται στον σχηματισμό ενός συμπαγούς φιλμ οξειδίου με ισχυρή

⁴⁴http://www.biblionet.gr/book/203839/Λεκάτου,_Αγγελική/Η_διάβρωση_και_προστασία_των_μετ_άλλων_με_απλά_λόγια

πρόσφυση στην επιφάνεια του μετάλλου. Σε περίπτωση αστοχίας, το παθητικό φιλμ αναγεννάται αμέσως στα περισσότερα περιβάλλοντα, (Εικόνα 19). Το παθητικό φιλμ παραμένει σταθερό σε εύρος $pH\ 4 - 8.5$. Τα όρια βέβαια του εύρους μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, την εκάστοτε σύνθεση του φιλμ και την παρουσία ουσιών που μπορεί να σχηματίζουν σύμπλοκα ή αδιάλυτα άλατα με το αλουμίνιο. Ωστόσο, το παθητικό επίστρωμα διαλύεται σε όξινα και βασικά διαλύματα προς σχηματισμό ιόντων Al^{3+} στην πρώτη περίπτωση και AlO_2^- στη δεύτερη περίπτωση. (Cerri & Evangelista, 1999), (Λεκάτου, 2005), (William, 2015), (Γεωργάτης, 2017), (Σιδηρόπουλος, 2008), (Λαγαρή, 2009)



Εικόνα 19: Στάδια επεξεργασίας κατά την παθητικοποίηση του αλουμινίου.⁴⁵

Σήμερα, που η προσπάθεια εξοικονόμησης πλουτοπαραγωγικών πόρων και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν τον κύριο στόχο της σύγχρονης κοινωνίας, πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα η δυνατότητα ανακύκλωσης του αλουμινίου. Το αλουμίνιο, όπου και σε όποια μορφή και αν βρίσκεται, μετά την χρήση των προϊόντων συλλέγεται και επαναχυτεύεται απαιτώντας μόνο το 5% της ενέργειας που χρειάστηκε για την πρωτογενή παραγωγή του. Τέλος, το αλουμίνιο μπορεί να ανακυκλώνεται συνεχώς χωρίς να υπολείπεται σε ποιότητα, τουναντίον σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται καλύτερο. Επιπρόσθετα το αλουμίνιο διατηρεί μόνιμα την αγοραστική του αξία γεγονός που είναι ένα ισχυρό κίνητρο για την ανακύκλωση. (William, 2015)

⁴⁵ <http://www.atem-oe.gr/aluminio-plirofories/technologies-alouminiou/anodioxii-ilektrostatiki-vafi-alouminiou.html>

3.3 Ταξινόμηση των κραμάτων αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς τρόπους και κατηγορίες. Οι συνηθέστερες ταξινομήσεις σύμφωνα με τον Σύνδεσμο Αλουμινίου (*Aluminum Association Inc.*), περιλαμβάνουν ταξινόμηση με βάση τον τρόπο παρασκευής τους ελατά – χυτά, ταξινόμηση με βάση τη θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί καθώς και ταξινόμηση με βάση τα κραματικά στοιχεία που περιέχουν. Η επίδραση όλων των παραπάνω παραγόντων, στο στάδιο παραγωγής, επεξεργασίας και μικροδομής επηρεάζει μονοσήμαντα την τελική μηχανική και χημική συμπεριφορά του κράματος αλουμινίου. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι επιμέρους ταξινομήσεις και θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι κύριες ιδιότητες και χαρακτηριστικά τους. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015), (Cerri & Evangelista, 1999), (R.B.C. Cayless, 1990), (Γεωργάτης, 2017), (Λαγαρής, 2009)

3.3.1 Ονοματολογία ελατών και χυτών κραμάτων αλουμινίου

Η ονοματολογία των κραμάτων αλουμινίου καθορίζεται από το Σύνδεσμο Αλουμινίου σύμφωνα με τον οποίο τα ελατά κράματα ή κράματα διαμόρφωσης προσδιορίζονται με τέσσερα ψηφία, όπου το πρώτο καθορίζει την σειρά του κράματος προσδιορίζοντας και το κύριο κραματικό στοιχείο. Για την σειρά 1XXX το δεύτερο ψηφίο, όταν παίρνει τιμές από το 1 έως το 9 αφορά ειδικούς ελέγχους για μία οι περισσότερες ακαθαρσίες, ενώ τα δύο τελευταία ψηφία δίνουν το ελάχιστο ποσοστό αλουμινίου. Για τις σειρές 2XXX έως 8XXX το δεύτερο ψηφίο όταν παίρνει τιμές από 1 έως 9 δείχνει τροποποίηση του αυθεντικού κράματος το οποίο προσδιορίζεται από την τιμή 0, ενώ τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν διαφορετικά κράματα της σειράς. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται συστάσεις των ελατών κραμάτων αλουμινίου. (AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (Benedyk, 2009), (Cerri & Evangelista, 1999), (R.B.C. Cayless, 1990), (Γεωργάτης, 2017), (Διαμαντοπούλου & Παναγιώτη, 2012), (Μεκερίδης, 2010)

Πίνακας 8: Ταξινόμηση των ελατών ή διαμορφωμένων κραμάτων αλουμινίου.^{46,47}

<i>Σειρά κράματος</i>	<i>Κύρια κραματικά στοιχεία</i>	<i>Εύρος σύστασης (κ.β%)</i>
1XXX	Al	Al > 99%
2XXX	Cu	2 - 6
3XXX	Mn	0.5 - 1.5
4XXX	Si	0.8 - 1.7
5XXX	Mg	0.5 - 5
6XXX	Mg & Si	Mg: 0.2 - 1.5 Si: 0.2 - 1.5
7XXX	Zn & Mg	Zn: 5 - 7 Mg: 1 - 2
8XXX	Si & Fe	Si: 0.3 - 1 Fe: 0.6 - 2

Αντίστοιχα, το σύστημα ονοματολογίας των κραμάτων για την παρασκευή χυτών προϊόντων είναι παρόμοιο με αυτό των ελατών κραμάτων. Συγκεκριμένα, στα κράματα χύτευσης ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης και οι δύο επόμενοι την κατηγορία του εκάστοτε κράματος. Ακολουθεί τελεία και ο επόμενος αριθμός αναφέρεται στην μορφολογία του προϊόντος χύτευσης. Το ψηφίο μετά την τελεία αντιπροσωπεύει τη μορφή του τελικού προϊόντος, δηλαδή εάν είναι ημιτελές χυτό ή τελικό χυτό προϊόν. Στον *Πίνακα 9* παρουσιάζονται συστάσεις των χυτών κραμάτων αλουμινίου. (Benedyk, 2009), (R.B.C. Cayless, 1990)

Πίνακας 9: Ταξινόμηση των χυτών κραμάτων αλουμινίου.⁴⁸

<i>Σειρά Κράματος</i>	<i>Κύρια κραματικά στοιχεία</i>	<i>Σειρά Κράματος</i>	<i>Κύρια κραματικά στοιχεία</i>
1XX.X	Al > 99%	5XX.X	Mg
2XX.X	Cu	6XX.X	-
3XX.X	Si & Cu ή Mg	7XX.X	Zn & Mg ή Mg + Cu
4XX.X	Si	8XX.X	Sn

⁴⁶ <https://www.aluminum.org/sites/default/files/AEC%20presentation%20160224.pdf>

⁴⁷ http://www.biblionet.gr/book/203839/Λεκάτου,_Αγγελική/Η_διάβρωση_και_προστασία_των_μετ_άλλων_με_απλά_λόγια

⁴⁸ http://www.biblionet.gr/book/203839/Λεκάτου,_Αγγελική/Η_διάβρωση_και_προστασία_των_μετ_άλλων_με_απλά_λόγια

3.3.2 Ταξινόμηση μηχανικών και θερμικών κατεργασιών

Ο Σύνδεσμος Αλουμινίων έχει υιοθετήσει παράλληλα ένα σύστημα ονοματολογίας μηχανικών και θερμικών κατεργασιών που αναφέρεται και στα κράματα που προορίζονται για μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης (ελατά) και στα κράματα που προορίζονται για παραγωγή χυτών προϊόντων (χυτά). Σύμφωνα με το σύστημα ονοματολογίας, δίπλα από τη σειρά κράματος αλουμινίου ακολουθεί ένα γράμμα που δείχνει τη θερμική ή μηχανική κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα. Αναλυτικότερα οι κατεργασίες που λαμβάνουν χώρα αποτελούν οι ακόλουθες: (Benedyk, 2009), (R.B.C. Cayless, 1990), (Διαμαντοπούλου & Παναγιώτη, 2012), (Μεκερίδης, 2010), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

- Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης: Θερμική κατεργασία που περιλαμβάνει θέρμανση του κράματος σε κατάλληλη θερμοκρασία, παραμονή στη θερμοκρασία αυτή για ικανό χρονικό διάστημα ώστε να δημιουργηθεί διάλυμα στερεάς διαλυτότητας και ταχεία ψύξη για να διατηρηθεί το διάλυμα στερεάς διαλυτότητας. (Benedyk, 2009), (Τριανταφυλλίδης, 2016)
- Γήρανση: Καθιζήσεις από το υπέρκορο στερεό διάλυμα οδηγούν σε μεταβολή των ιδιοτήτων του κράματος, συνήθως συμβαίνει αργά σε θερμοκρασία δωματίου (φυσική γήρανση) ή πιο γρήγορα σε ανεβασμένη θερμοκρασία (τεχνητή γήρανση). (Benedyk, 2009), (Τριανταφυλλίδης, 2016)
- Ομογενοποίηση: Εκτελείται αμέσως μετά τη χύτευση προκειμένου να επιτευχθεί ομοιογενής κατανομή των κραματικών στοιχείων στη χυτή δομή. Η ομογενοποίηση γίνεται σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία solidus του κράματος. (Benedyk, 2009), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι θερμικές και μηχανικές κατεργασίες που λαμβάνουν χώρα καθορίζονται από γράμματα που ακολουθούν την ονομασία του κράματος αλουμινίου εφαρμογής. Πέρα από το γράμμα, υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης ενός ψηφίου ή περισσότερων τα οποία καθορίζουν πιθανές παραλλαγές των κατεργασιών που λαμβάνουν χώρα. Συγκεκριμένα, η ονοματολογία περιλαμβάνει τις ακόλουθες κατεργασίες: (Benedyk, 2009), (R.B.C. Cayless, 1990), (Διαμαντοπούλου & Παναγιώτη, 2012), (Μεκερίδης, 2010), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

- **F:** *προϊόν όπως παρήχθη:* Αφορά προϊόντα που διαμορφώθηκαν με θερμηλασία, με ψυχρηλασία ή με χύτευση χωρίς καμία επιπλέον κατεργασία.
- **O:** *ανόπτηση:* Συμβολίζει κράμα που μετά την παρασκευή του έχει υποστεί ανόπτηση για αύξηση της ολκιμότητας του ή/και ανακούφιση τάσεων.
- **H:** *ενδοτράχυνση:* Αφορά κράματα ελατά ή διαμόρφωσης. Μετά το H ακολουθούν δύο αριθμητικά ψηφία. Το πρώτο ψηφίο παίρνει τιμές από το 1 έως το 3 και αφορά το είδος της κατεργασίας. Το δεύτερο ψηφίο παίρνει τιμές από το 1 έως το 8 και δηλώνει τον βαθμό ενδοτράχυνσης.
- **W:** *θερμική κατεργασία ομογενοποίησης:* Αναφέρεται σε κράματα που υπόκεινται σε θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης. Εφαρμόζεται σπάνια και μόνο σε κράματα που αυθόρμητα παθαίνουν γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετά από μία θερμική κατεργασία. Οδηγεί σε ασταθή κατάσταση.
- T:** *θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση:* Εφαρμόζεται σε χυτά και διαμορφωμένα κράματα με σκοπό την αύξησης των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Μετά το T ακολουθούν ένα ή περισσότερα ψηφία τα οποία δηλώνουν μία σειρά κατεργασιών.

Κράματα που μπορούν να υποστούν σκλήρυνση με κατακρήμνιση υπομικροσκοπικών συνεκτικών κατακρημνισμάτων μέσω γήρανσης, είναι συνήθως εκείνα στα οποία είτε η διαλυτότητα του κραματικού στοιχείου στο Al μειώνεται απότομα με τη μείωση της θερμοκρασίας, είτε το κατακρήμνισμα που θα προκύψει είναι σκληρότερο από τη μήτρα, είτε το κατακρήμνισμα παρουσιάζει πλεγματική συνοχή με τη μήτρα. Τα κύρια κράματα του αλουμινίου των οποίων η σκληρότητα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με κατακρήμνιση μέσω γήρανσης είναι τα κράματα **Al - Cu (2xxx, 2xx.x)** με κύρια ενδομεταλλική φάση σκλήρυνσης το CuAl_2 ή CuMgAl_2 για υψηλές περιεκτικότητες Mg, τα κράματα **Al - Zn - Mg - Cu (7xxx, 7xx.x)** με κύρια ενδομεταλλική φάση σκλήρυνσης το MgZn_2 . Τα περισσότερα κράματα που σκληρύνονται με κατακρήμνιση μέσω γήρανσης, περιέχουν συνδυασμούς Mg με ένα ή περισσότερα κραματικά στοιχεία από τα Cu, Si, Zn. Γενικά μικρά ποσά Mg σε συνδυασμό με αυτά τα στοιχεία επιταχύνουν και αυξάνουν την κατακρήμνιση, ενώ το Mg προκαλεί σημαντική σκλήρυνση και λόγω σχηματισμού στερεού διαλύματος με το

Al. (Benedyk, 2009), (R.B.C. Cayless, 1990), (Διαμαντοπούλου & Παναγιώτη, 2012), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

Στην ονοματολογία των κραμάτων, η θερμική κατεργασία της γήρανσης συμβολίζεται με το γράμμα T ακολουθούμενο από ένα ακέραιο αριθμό (1-10), ως εξής: (Benedyk, 2009), (R.B.C. Cayless, 1990), (Διαμαντοπούλου & Παναγιώτη, 2012), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

T1 → Απόψυξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ και φυσική γήρανση. Συνήθως εφαρμόζεται σε προϊόντα διέλασης και περιορίζεται στα κράματα δxxx.

T2 → Απόψυξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ, ψυχρηλασία και φυσική γήρανση. Συνήθως εφαρμόζεται σε χυτά προϊόντα.

T3 → Κατεργασία διαλυτοποίησης, με ή χωρίς ψυχρηλασία και φυσική γήρανση.

T4 → Κατεργασία διαλυτοποίησης και φυσική γήρανση.

T5 → Απόψυξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ και τεχνητή γήρανση.

T6 → Κατεργασία διαλυτοποίησης και τεχνητή γήρανση.

T7 → Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και υπεργήρανσης.

T8 → Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, ψυχρηλασία και τεχνητή γήρανση.

T9 → Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, τεχνητή γήρανση και μετά ψυχρηλασία.

T10 → Απόψυξη μετά από κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ, ψυχρηλασία και τεχνητή γήρανση. Συνήθως εφαρμόζεται σε χυτά προϊόντα.

Επιπρόσθετα ψηφία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά τον πρώτο ακέραιο για να δείξουν κατεργασίες ανακούφισης με τάνυση ή συμπίεση μετά τη θερμική κατεργασία.

3.3.3 Επίδραση των κραματικών στοιχείων

Το αλουμίνιο είναι σχετικά μη ανθεκτικό αλλά πολύ όλκιμο μέταλλο. Το μέτρο ελαστικότητας του είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι το αλουμίνιο παραμορφώνεται ελαστικά τρεις φορές περισσότερο από τον χάλυβα, κάτω από αντίστοιχη φόρτιση. Αυτή η ιδιότητα δεν βελτιώνεται σημαντικά με την κραμάτωση. Επίσης το αλουμίνιο και τα κράματα του κρατούν την ολκιμότητα τους και δεν γίνονται ψαθυρά ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που δεν

συμβαίνει με τον χάλυβα και το τιτάνιο. (Λεκάτου, 2013), (AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (Μεκερίδης, 2010)

Το καθαρό αλουμίνιο χρησιμοποιείται για ηλεκτρικούς αγωγούς, χημικό εξοπλισμό και σα φύλλο με διάφορες εφαρμογές. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό). Ωστόσο, πέρα από τις μηχανικές ιδιότητες η επίδραση των κραματικών στοιχείων επιφέρουν αλλαγές και στη διαβρωτική συμπεριφορά του αλουμινίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κυριότερα κραματικά στοιχεία που εντοπίζονται στα κράματα αλουμινίου, καθώς και οι επιδράσεις τόσο στη μηχανική όσο και διαβρωτική συμπεριφορά. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999), (Μεκερίδης, 2010), (Λαγαρή, 2009)

- Χαλκός (Cu)

Μηχανικές ιδιότητες: Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σα κύριο κραματικό στοιχείο, η μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από 1 έως 10%.

Διαβρωτική συμπεριφορά: Ο χαλκός μειώνει την αντίσταση του αλουμινίου σε γενική διάβρωση. Επιπλέον, σχηματίζει με το αλουμίνιο και άλλα κραματικά στοιχεία ενδομεταλλικές ενώσεις που ευνοούν την περικρυσταλλική διάβρωση, την εργοδιάβρωση και τη διάβρωση οπών. Τέλος, αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης οπών αλλά μειώνει την ταχύτητα διεύθυνσης των οπών στο εσωτερικό. (Λεκάτου, 2013)

- Μαγνήσιο (Mg)

Μηχανικές ιδιότητες: Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα Al-Mg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και ψευδάργυρο, για ακόμη καλύτερη ενίσχυση της αντοχής.

Διαβρωτική συμπεριφορά: Το μαγνήσιο διαλυόμενο στο αλουμίνιο ή βρισκόμενο μερικώς σε ομοιόμορφη λεπτομερή διασπορά προάγει την αντίσταση στη διάβρωση κυρίως σε αλκαλικά διαλύματα και στο θαλασσινό νερό. Ωστόσο, σε ποσοστά άνω του

3.5% κ.β. στο αλουμίνιο ευνοεί την περικρυσταλλική διάβρωση και την εργοδιάβρωση. Τέλος, με την παρουσία άλλων κραματικών στοιχείων, το μαγνήσιο ευνοεί την επιδεκτικότητα στη περικρυσταλλική διάβρωση και τη διάβρωση οπών λόγω σχηματισμού διαφόρων ενδομεταλλικών ενώσεων ανοδικότερες από την μήτρα αλουμινίου. (Λεκάτου, 2013)

- Πυρίτιο (Si)

Μηχανικές ιδιότητες: Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξης κράματος και αυξάνει την ρευστότητα του αλουμινίου. Αυξάνει επίσης σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.

Διαβρωτική συμπεριφορά: Το πυρίτιο επηρεάζει αρνητικά την αντίσταση σε διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου. Σε υψηλές όμως συγκεντρώσεις, οδηγεί σε σχηματισμό γαλβανικών κελιών Al/Si λόγω της καθοδικής δράσης των κατακρημνισμάτων Si. Τέλος, προωθεί τον σχηματισμό ενδομεταλλικών κατακρημνισμάτων με το Al και με άλλα κραματικά στοιχεία. (Λεκάτου, 2013)

- Μαγγάνιο (Mn)

Μηχανικές ιδιότητες: Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε κράματα (επιδεκτικά ή μη επιδεκτικά θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση.

Διαβρωτική συμπεριφορά: Το μαγγάνιο επιδρά ελαφρώς θετικά στη γενική διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου. (Λεκάτου, 2013)

- Ψευδάργυρος (Zn)

Μηχανικές ιδιότητες: Ο ψευδάργυρος εισάγεται στα χυτά κράματα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο στα κράματα διαμόρφωσης, παράγοντας κράματα που έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου.

Διαβρωτική συμπεριφορά: Ο ψευδάργυρος μπορεί να σχηματίσει ενδομεταλλικές ενώσεις που διαλύονται επιλεκτικά έναντι του αλουμινίου προωθώντας την περικρυσταλλική διάβρωση και τη διάβρωση οπών. Επιπλέον σε ποσοστά <1% στα κράματα Al-Mg-Mn παρεμποδίζει τον σχηματισμό της ενδομεταλλικής ένωσης Al_3Mg_2 στα όρια των κόκκων λόγω σχηματισμού της πιο ανθεκτικής στη διάβρωση φάσης Al-Mg-Zn. (Λεκάτου, 2013)

- Σίδηρος (Fe)

Μηχανικές ιδιότητες: Ο σίδηρος εντοπίζεται συνήθως ως ατέλεια και ακαθαρσία στα κράματα αλουμινίου. Ωστόσο, ως κραματικό στοιχείο βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα του κράματος ενώ παράλληλα μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση.

Διαβρωτική συμπεριφορά: Γενικά ο σίδηρος μειώνει τη διαβρωτική αντοχή και συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου. Μέσω αυτού και των σχηματιζόμενων ενδομεταλλικών ενώσεων προωθείται έντονα η διάβρωση οπών. Οι σχηματιζόμενες ενδομεταλλικές ενώσεις είναι καθοδικότερες του αλουμινίου ευνοώντας την περικρυσταλλική διάβρωση και τη διάβρωση οπών. Τέλος, η προσθήκη σιδήρου και νικελίου προστίθενται σε ορισμένα κράματα προς βελτίωση της αντίστασης τους σε καυτό νερό 150-250 °C. (Λεκάτου, 2013)

3.4 Διαβρωτική συμπεριφορά καθαρού και κραμάτων αλουμινίου

Το υπερκαθαρό Αλουμίνιο (Al 99.99%) έχει μια ομογενή μορφή, εκτός από εναποθέσεις λόγω διαδικασίας, καθιστώντας το ανθεκτικό σε γενική μορφή διάβρωσης. Έτσι μπορεί να βυθιστεί σε πολύ επιθετικούς ηλεκτρολύτες για μεγάλες περιόδους, εμφανίζοντας χαμηλούς ρυθμούς διάβρωσης και φθοράς. Σε αντίθεση με την διαβρωτική συμπεριφορά του στον αέρα, το εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο διαβρώνεται εμφανώς γρηγορότερα σε ένα διαβρωτικό υγρό. Ωστόσο στην περίπτωση της κραμάτωσης με άλλα στοιχεία, η διαβρωτική συμπεριφορά στηρίζεται στις σχηματιζόμενες ενδομεταλλικές φάσεις και στην αλληλεπίδραση με την μήτρα αλουμινίου. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

Το εμπορικής καθαρότητας αλουμίνιο με τουλάχιστον 99,5% Al και με μια περιεκτικότητα σε Fe λιγότερο από 0,40% , μπορεί να θεωρηθεί αντιδιαβρωτικό για τους περισσότερους σκοπούς χάρη στην προστασία του στρώματος οξειδίου που σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού. Με την αύξηση του σιδήρου ή την παρουσία χαλκού η διαβρωτική συμπεριφορά μειώνεται ενώ παράλληλα επιταχύνεται ο ρυθμός διάβρωσης του αλουμινίου. Τα ανθεκτικά σε διάβρωση κράματα περιέχουν μαγνήσιο και μαγγάνιο ως κύρια στοιχεία κραμάτωσης. Αυτά τα κράματα και τα κράματα πυριτίου έχουν σχεδόν το ίδιο ηλεκτροχημικό δυναμικό μέσα σε υγρά, συμπεριλαμβανομένου του θαλάσσιου νερού, έτσι η επαφή μεταξύ τους δεν

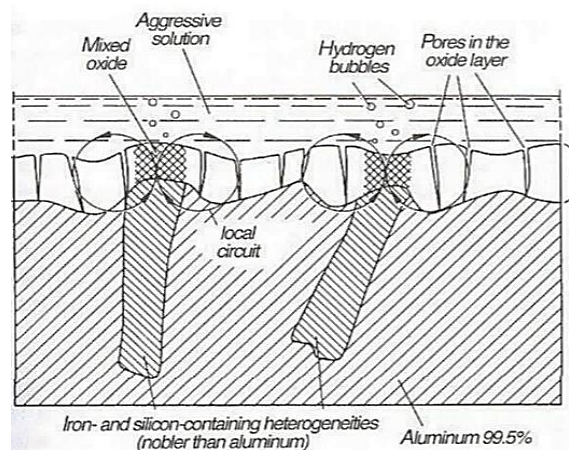
επιδεινώνει τον κίνδυνο διάβρωσης. Τα κράματα που δεν περιέχουν ψευδάργυρο εάν βρεθούν σε επαφή με κράματα που περιέχουν ψευδάργυρο, κάτω από διαβρωτικές συνθήκες, αναπτύσσουν ηλεκτροχημικά κελιά και επιταχύνεται ο ρυθμός διάβρωσης. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999)

3.4.1 Παθητικοποίηση αλουμινίου

Η καλή συμπεριφορά του αλουμινίου και των κραμάτων αυτού στηρίζεται στην παθητικοποίηση που υφίσταται κατά την παρουσία ή όχι διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η παθητικοποίηση αναφέρεται στην αυθόρμητη ανάπτυξη ενός φυσικού επιστρώματος οξειδίου στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού. (AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (SHARIF, 1996), (Γεωργάτης, 2017), (Τριανταφυλλίδης, 2016)

- Απουσία Υγρού: Το αλουμίνιο, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αντιδρά με το οξυγόνο του αέρα σχηματίζοντας ένα πολύ λεπτό προστατευτικό φιλμ οξειδίου πάχους μερικών nm. Σε περίπτωση φθοράς του φιλμ, η αυθόρμητη ανάπτυξη του συνεχίζεται έως την πλήρη αποκατάσταση. Το πάχος και ο βαθμός συνοχής του φιλμ επηρεάζεται από την μικροδομή του υλικού και το εξωτερικό διαβρωτικό περιβάλλον.
- Παρουσία Υγρού: Το αλουμίνιο, με παρουσία υγρού, υπόκειται επίσης σε παθητικοποίηση. Στο πρώτο στάδιο, αναπτύσσεται εξωτερικά το παθητικό φιλμ λόγω σχηματισμού άνυδρης αλουμίνιας. Ωστόσο, με παρουσία υγρασίας, το πάχος του επιστρώματος γρήγορα αυξάνεται λόγω σχηματισμού ένυδρων οξειδίων πάνω στο άνυδρο οξείδιο, (Εικόνα 20). Γενικά αύξηση του ποσοστού υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του πάχους του φιλμ.

Συνοψίζοντας, το φυσικό επίστρωμα του αλουμινίου αποτελείται λοιπόν από δύο επιμέρους στρώματα. Το *εσωτερικό στρώμα* πάχους άνω του 1nm, που έχει σχηματιστεί λόγω αέρα. Το φιλμ αυτό είναι συμπαγές με ισχυρή διεπιφάνεια μετάλλου-οξειδίου και έχει δομή άμορφης αλουμίνιας. Το εσωτερικό φιλμ είναι αυτό που δρα ως φράγμα έναντι στην εξέλιξη της διάβρωσης και σε περίπτωση φθοράς αναπλάθεται άμεσα στον αέρα. Αντίστοιχα το *εξωτερικό επίστρωμα* αποτελείται από ένυδρα οξείδια, κατά την παρουσία υγρού. Σε επαφή με υγρά περιβάλλοντα, η εξωτερική επιφάνεια του άμορφου οξειδίου υδρολύεται προς σχηματισμό ένυδρων οξειδίων αλουμινίου. (Γεωργάτης, 2017)



Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση ανάπτυξης στρωμάτων οξειδίων με παρουσία υγρού στην εξωτερική επιφάνεια κράματος αλουμινίου.⁴⁹

Τα δομικά χαρακτηριστικά του επιστρώματος που σχηματίζεται στην επιφάνεια του αλουμινίου επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Οι κυριότεροι παράγοντες αφορούν τη χημική σύσταση του κράματος, την παρουσία και κατανομή ελαττωμάτων της κρυσταλλικής δομής, την παρουσία και κατανομή ατελειών και ασυνεχειών στη μικροδομή, την παρουσία ελαττωμάτων, μηχανικών αστοχιών και άλλων ετερογενειών καθώς και τις ιδιότητες του διαβρωτικού περιβάλλοντος όπως τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη, συγκέντρωση ιόντων, pH, τη θερμοκρασία, την ταχύτητα ροής του μέσου κ.λ.π. (Γεωργάτης, 2017)

3.4.2 Διαβρωτική συμπεριφορά ανά σειρά κράματος

Στις παραπάνω ενότητες αναφέρθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαβρωτική συμπεριφορά του αλουμινίου και των κραμάτων αυτού. Κυρίαρχος παράγοντας αποτελούν τα κραματικά στοιχεία που εντοπίζονται στο εσωτερικό του κράματος καθώς και οι ενδομεταλλικές φάσεις που σχηματίζουν κατά τα στάδια επεξεργασίας τους. Γενικά τα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία γήρανσης παρουσιάζουν καλή αντίσταση στη γενική διάβρωση. Επίσης, τα κράματα που δεν επιδέχονται γήρανση αλλά βρίσκονται σε κατάσταση υπερβαφής είναι περισσότερο ανθεκτικά στη διάβρωση από αυτά που έχουν σκληρυνθεί με κατακρήμνιση λόγω γήρανσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαβρωτική συμπεριφορά των συνηθέστερων σειρών αλουμινίου. (Λεκάτου, 2013), (AFSA,

⁴⁹ http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/7_stoixeia%20antoxhs%20diavrosh%20anodiosi.pdf

ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA, 2011), (Cerri & Evangelista, 1999), (R.B.C. Cayless, 1990), (Γεωργάτης, 2017)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1XXX: Τα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν τουλάχιστον 99% αλουμίνιο. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται στα κράματα αυτά είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο σχηματίζοντας ενδομεταλλικές ενώσεις, καθοδικές ως προς το αλουμίνιο, που επηρεάζουν τη διαβρωτική τους συμπεριφορά. Το επιφανειακό οξείδιο που αναπτύσσεται στη σειρά αυτή είναι λεπτότερο από το μητρικό αλουμίνιο. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω, αναπτύσσεται συνήθως διάβρωση λόγω σχηματισμού οπών, κυρίως στην διεπιφάνεια των ενδομεταλλικών φάσεων του σιδήρου. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XXX: Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6 - 6,3% και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl_2 και CuMgAl_2 , που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, μη συνεκτικά ευμεγέθη σωματίδια CuAl_2 , συχνά παραμένουν στα όρια των κόκκων των θερμικά κατεργασμένων κραμάτων προξενώντας περικρυσταλλική διάβρωση, εργοδιάβρωση και διάβρωση οπών. Ακόμη και η αντίσταση τους στη γενική διάβρωση δεν είναι καλή λόγω του περιεχόμενου Cu. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999), (Μεκερίδης, 2010)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3XXX: Τα κράματα αυτά έχουν ως κύρια προσθήκη το μαγγάνιο. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al είναι 1,8% στους 659°C, ενώ ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία. Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη μέσο μεταλλική ένωση MnAl_6 . Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Τα κράματα αυτά μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλούνται εύκολα. Η σειρά παρουσιάζει καλή αντίσταση σε γενική διάβρωση για δύο λόγους, πρώτον λόγω των κατακρημνισμάτων των ενδομεταλλικών ενώσεων όπως MnAl_6 και δεύτερον το δυναμικό διάβρωσης του MnAl_6 είναι παραπλήσιο αυτού της μήτρας αλουμινίου. Με προσθήκη χαλκού σε

συγκεντρώσεις μικρότερου του 0.05%, τα κράματα αυτά παρουσιάζουν σχεδόν τόσο καλή αντίσταση σε γενική διάβρωση όσο και το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο. Η πιο συνηθισμένη μορφή διάβρωσης στα κράματα στα κράματα 3XXX είναι η διάβρωση οπών. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 4XXX: Η σειρά αυτή δεν χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε μηχανικές κατασκευές αλλά στην αρχιτεκτονική λόγω των χρωμάτων που μπορούν να πάρουν στο στάδιο της ανοδίωσης. Τα κράματα αυτά δεν επιδέχονται γήρανση εκτός αν περιέχουν περιεκτικότητες μαγγανίου. Παρότι περιέχουν κατακρημνίσματα Si, η αντίσταση σε διάβρωση των μη σκληρυνόμενων είναι καλή. Το παραπάνω οφείλεται στο ότι το πυρίτιο ενώ είναι καθοδικότερο του αλουμινίου, οδηγεί σε χαμηλή πυκνότητα ρεύματος με αποτέλεσμα τον μικρό ρυθμό διάβρωσης του κράματος. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XXX: Τα κράματα αυτά αλουμινίου έχουν ως κύρια προσθήκη το μαγνήσιο, σε ποσοστά μικρότερα του 4%. Το μεγαλύτερο μέρος του μαγνησίου βρίσκεται στο στερεό διάλυμα ενώ το υπόλοιπο μετέχει στη μέσο μεταλλική ένωση Mg_2Al_3 η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη. Τα κράματα της σειράς αυτής παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος, όμως, της ολκιμότητάς τους. Τα κράματα όπου το Mg παραμένει στην κατάσταση στερεού διαλύματος με το Al χαρακτηρίζονται από καλή αντίσταση σε διάβρωση κυρίως σε παράκτιες περιοχές και σε ελαφρώς αλκαλικά περιβάλλοντα. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6XXX: Πρόκειται για κράματα Al-Mg-Si. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στον σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία, συνήθως, μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si, με λόγο μαζών Mg/Si ίσο προς 1,73. Κάποια περίσσεια Si, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση. Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8% και Cr σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν στην εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση, που προκαλεί. Γενικά τα κράματα αυτά εμφανίζουν καλή αντίσταση σε διάβρωση τόσο σε περιβάλλοντα επιθετικά όσο και αστικά. Η αντίσταση τους σε διάβρωση είναι γενικά μικρότερη από αυτή της σειράς 5XXX, αλλά η μηχανική τους

αντοχή είναι μεγαλύτερη. Τέλος τα κράματα της σειράς εμφανίζουν αυξημένη δεκτικότητα σε φαινόμενα περικρυσταλλικής διάβρωσης σε αντίθεση με φαινόμενα εργοδιάβρωσης. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999)

Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7XXX: Πρόκειται για κράματα Al-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. Αυτά, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Το ποσοστό του Zn μεταβάλλεται από 4% έως 8%, ενώ το ποσοστό του Mg από 1% έως 3%. Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης $MgZn_2$. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης, καθιστώντας τα κράματα αυτά ιδανικά για διάφορες αεροπορικές εφαρμογές. Ωστόσο, η παρουσία χαλκού μειώνει την εμβαιότητα, τη συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al-Mg-Zn, όπως επίσης και την αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον. Σε περίπτωση σφαλμάτων κατά τη θερμική κατεργασία ή αναθέρμανση κατά τη λειτουργία της εφαρμογής σε θερμοκρασίες μεταξύ 200-400°C, είναι επιδεκτικά σε περικρυσταλλική διάβρωση, διάβρωση αποφλοιώσης και εργοδιάβρωση. Ωστόσο, μέσω εφαρμογών διαφόρων θερμικών κατεργασιών, μπορεί να αυξήσει την αντίσταση σε περικρυσταλλική διάβρωση, εργοδιάβρωση και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων αυτών χωρίς να μειωθεί αισθητά η αντοχή τους. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999), (Διαμαντοπούλου & Παναγιώτη, 2012), (Λαγαρή, 2009)

3.5 Διάβρωση οπών κραμάτων αλουμινίου

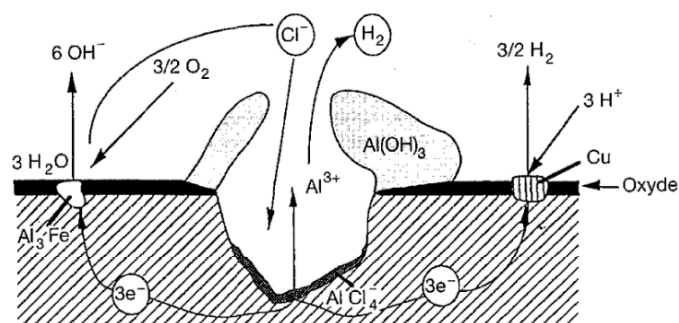
Υπάρχουν διάφορα είδη και μορφές διάβρωσης στα μεταλλικά υλικά, ωστόσο στα κράματα αλουμινίου εντοπίζεται συχνά η διάβρωση με οπές τόσο σε ξηρό όσο και υγρό περιβάλλον. Ο μηχανισμός της διάβρωσης οπών είναι αρκετά σύνθετος και εξαρτάται από παράγοντες τόσο του υλικού ή κράματος αυτού όσο και του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Ωστόσο, η εξέλιξη του φαινομένου στηρίζεται, όπως δηλώνει και το όνομα της διάβρωσης, στις σχηματιζόμενες οπές στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού λόγω σχηματιζόμενων γαλβανικών κελιών μεταξύ περιοχών διαφορετικών ηλεκτρικών δυναμικών. Συνήθως οι οπές εξαρτώνται στο δυναμικό που αναπτύσσεται μεταξύ του προστατευτικού φιλμ οξειδίου του αλουμινίου και του καθαρού αλουμινίου κάτω από αυτό, πάντα με την παρουσία ενός διαβρωτικού

περιβάλλοντος. Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας θα αναλυθεί συνοπτικά ο μηχανισμός της διάβρωσης οπών σε αλουμίνια και κράματα αυτού, οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ανάπτυξης του φαινομένου καθώς και μέτρα αντιμετώπισης του. (Λεκάτου, 2013), (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

3.5.1 Μηχανισμός διάβρωσης οπών

Η διάβρωση οπών αναπτύσσεται λόγω τοπικής κατάρρευσης του παθητικού επιστρώματος οξειδίων, στα σημεία όπου παρουσιάζει ασυνέχεια ή ατέλεια μικροδομής. Έτσι, οι μεταβολές της μικροδομής καθώς και οι σχηματιζόμενες καθοδικές ενδομεταλλικές ενώσεις οδηγούν στην ανάπτυξη δυναμικών γαλβανικών κελιών, όπου η κάθοδος δομείται από τις ενδομεταλλικές φάσεις και η άνοδος μέσω της μήτρας αλουμινίου. (Λεκάτου, 2013), (Cerri & Evangelista, 1999), (SHARIF, 1996), (Mars, 1987), (Μεκερίδης, 2010)

Συγκεκριμένα, στην άνοδο του συστήματος λαμβάνει χώρα η εξίσωση οξείδωσης του αλουμινίου με παραγωγή ηλεκτρονίων και ιόντων υδρογόνου. Ωστόσο, λόγω παραγωγής ιόντων υδρογόνου στην άνοδο, το pH του ηλεκτρολύτη μειώνεται συνεχώς και αποτέλεσμά την εξέλιξη και αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Παράλληλα στην κάθοδο του στοιχείου πραγματοποιείται η αναγωγή των ελεύθερων ηλεκτρονίων καθώς και των ιόντων υδρογόνου. Η εξέλιξη του φαινομένου και η συνεχής ανάπτυξη των οπών πραγματοποιείται μέσω της ανάπτυξης κελιών διαφορετικής συγκέντρωσης οξυγόνου στο εσωτερικό των οπών, (Σχήμα 17). Αναλυτικά, η συνεχής διάλυση του αλουμινίου μέσα στην οπή οδηγεί στη μείωση διείσδυσης του οξυγόνου στο εσωτερικό της και οδηγεί σε ανάπτυξη γαλβανικών κελιών λόγω κελιού διαφορικού αερισμού. Άνοδο του στοιχείου αποτελούν οι περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου ενώ η κάθοδος δομείται από την εξωτερική ή παράπλευρη επιφάνεια του υλικού. Η συνολική συμπεριφορά και ο ρυθμός ανάπτυξης του παραπάνω φαινομένου ενισχύεται σημαντικά με την εμφάνιση έντονου διαβρωτικού περιβάλλοντος όπως παρουσία ιόντων χλωρίου. Τα ιόντα χλωρίου μετακινούνται στις θέσεις διάλυσης του αλουμινίου διευκολύνοντας τις αντιδράσεις υδρόλυσης, μειώνοντας περεταίρω το pH των περιοχών, επιταχύνοντας τη διάλυση του αλουμινίου. (Λεκάτου, 2013), (SHARIF, 1996), (Mars, 1987), (Μεκερίδης, 2010)

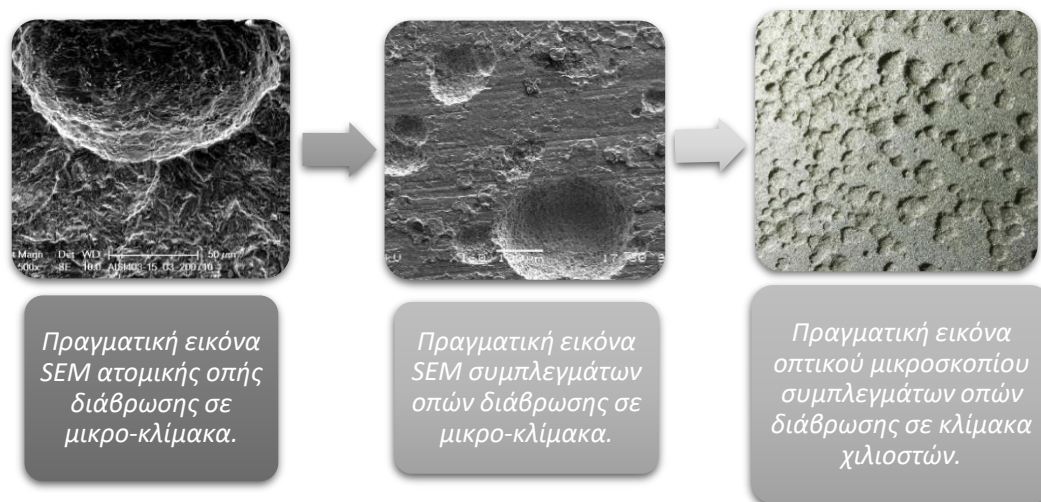


Σχήμα 17: Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού διάβρωσης οπών σε κράματα αλουμινίου.⁵⁰

3.5.2 Στάδια εξέλιξης των οπών διάβρωσης

Ο ρυθμός εξέλιξης και ανάπτυξης του φαινομένου διάβρωσης οπών σχετίζεται άμεσα με το χρόνο που απαιτείται για την δημιουργία και ανάπτυξη της ρωγμής σε μία οριακή κατάσταση. Έχει παρατηρηθεί ότι ο σχηματισμός των οπών διάβρωσης λαμβάνει χώρα μέσω συγκεκριμένων σταδίων ανάπτυξης, (Εικόνα 21). Συγκεκριμένα, στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται τοπική κατάρρευση του παθητικού φιλμ και δίνονται οι βάσεις για την ανάπτυξη μετασταθών οπών. Στο δεύτερο στάδιο οι αναπτυσσόμενες οπές λαμβάνουν το τελικό σχήμα και βάθος δομώντας σταθερές δομές και γεωμετρίες ασυνεχειών. Τέλος, η ανάπτυξη των οπών περιορίζεται ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατή η αναπαθητικοποίησή τους. Ο ρυθμός ανάπτυξης των οπών διάβρωσης καθώς και το τελικό σχήμα που λαμβάνουν, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τη μικροδομή του κράματος, το χημικό περιβάλλον διάβρωσης, τον εφαρμοζόμενο χρόνο διάβρωσης και τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού ή οι εξωτερικές εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Όπως και στους ανοξείδωτους χάλυβες, οι οπές συχνά καλύπτονται από ένα ασταθές στρώμα προϊόντων διάβρωσης που παρεμποδίζει σημαντικά την έγκαιρη παρατήρηση της διάβρωσης και την περαιτέρω εξέλιξή της. (SHARIF, 1996), (Mars, 1987), (Μεκερίδης, 2010)

⁵⁰ <http://www.almet-marine.com/images/clients/EN/Aluminium-users-guide/Ch10-corrosion-behaviour-of-aluminium-in-marine%20environments.pdf>



Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση των γεωμετρικών διατάξεων οπών διάβρωσης κραμάτων αλουμινίου.^{51,52,53}

3.5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της διάβρωσης οπών

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι το φαινόμενο της διάβρωσης οπών σχετίζεται με πολλούς παράγοντες και καθιστά αρκετά σύνθετη τη παρατήρηση και μελέτη του φαινομένου. Οι παράγοντες επίδρασης στη διάβρωση οπών του αλουμινίου και των κραμάτων σχετίζονται με το υλικό της διάταξης και τα χαρακτηριστικά του, το εξωτερικό περιβάλλον διάβρωσης καθώς και τις εφαρμοζόμενες εξωτερικές μηχανικές καταπονήσεις. (Λεκάτου, 2013), (SHARIF, 1996), (Mars, 1987), (Μεκερίδης, 2010)

- Υλικό: Αναλυτικά, η επίδραση του υλικού εμφανίζεται μέσω της μικροδομής του κράματος καθώς και της χημικής σύστασης του. Συγκεκριμένα η μικροδομή του υλικού χαρακτηρίζει τη διαβρωτική συμπεριφορά και το ρυθμό εξέλιξης του φαινομένου λόγω των ενδομεταλλικών φάσεων που εμπεριέχονται στο εσωτερικό, την ομοιομορφία κατανομής και το μέγεθος αυτών. Σημαντικό επίσης στοιχείο στην εξέλιξη της διάβρωσης οπών είναι η χημική σύσταση του κράματος δηλαδή η περιεκτικότητα των κραματικών στοιχείων σε αυτό. Τέλος, σημαντικός παράγοντας στην εξέλιξη της διάβρωσης οπών αποτελεί η κατάσταση της εξωτερικής επιφάνειας του υλικού, συνήθως εκφρασμένης μέσω της τραχύτητας, καθώς και οι θερμικές κατεργασίες που έχει υποστεί κατά την επεξεργασία του. (Λεκάτου, 2013)

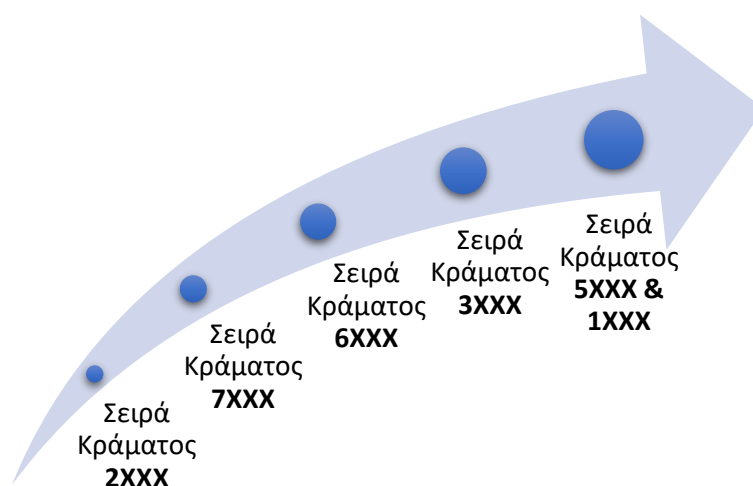
⁵¹ <http://eprijournal.com/epri-led-effort-helps-predict-life-of-corrosion-pitted-turbine-blades>

⁵² <https://www.engineerlive.com/content/pitting-repairs-process-vessels>

⁵³ <https://www.abfad.co.uk/editorial/pitting-corrosion-and-storage-tank-failure/>

- Περιβάλλον: Αναλυτικά, η επίδραση του περιβάλλοντος εμφανίζεται μέσω της συγκέντρωσης των επιθετικών ιόντων όπως χλωριόντων, την παρουσία και συγκέντρωση οξυγόνου καθώς και λοιπά χαρακτηριστικά όπως θερμοκρασία και pH. Γενικά στα κράματα αλουμινίου, η αντίσταση σε φαινόμενα διάβρωσης οπών μειώνεται αισθητά με αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων, αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθώς και την αύξηση ή ελάττωση του pH από το επίπεδο ισορροπίας. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες ρυθμίζουν το δυναμικό που αναπτύσσεται στα σχηματιζόμενα γαλβανικά κελιά. (Λεκάτου, 2013)

Συνοπτικά, μέσω διαφόρων πειραμάτων και μελετών έχειδειχθεί ότι η γενική κατάταξη των κραμάτων αλουμινίου σε σχέση με την αντίστασή τους σε τοπικές μορφές διάβρωσης και ανάπτυξης οπών είναι, (Σχήμα 18): (Λεκάτου, 2013)



Σχήμα 18: Κατάταξη των κραμάτων αλουμινίου σε αύξουσα σειρά ως προς την αντίστασή τους σε τοπικές μορφές διάβρωσης.⁵⁴

Η κατάταξη αυτή σχετίζεται με το γεγονός ότι το παθητικό φιλμ οξειδίων είναι πιο ομοιόμορφο και συνεκτικό σε κράματα που δεν μπορούν να σκληρυνθούν με γήρανση και ιδιαίτερα στα κράματα που παρουσιάζουν όσο το δυνατόν λιγότερες ετερογένειες. Επομένως οι σειρές με την χαμηλότερη αντίσταση, δηλαδή οι 2XXX και 7XXX, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε επιθετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα θα

⁵⁴http://www.biblionet.gr/book/203839/Λεκάτου,_Αγγελική/Η_διάβρωση_και_προστασία_των_μετ_άλλων_με_απλά_λόγια

πρέπει να εφαρμοστούν ειδικά μέτρα προστασίας, όπως κάποιας μορφής επικάλυψης ή συνδυασμό αυτών. (Λεκάτου, 2013)

3.6 Αλληλεπίδραση της τοπικής διάβρωσης οπών στη κόπωση του αλουμινίου

Η μηχανική κόπωση όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αποτελεί ένα επιφανειακό φαινόμενο μηχανικής καταπόνησης. Ουσιαστικά η αντοχή ενός μηχανικού στοιχείου προκύπτει από το χρόνο ή τους κύκλους κόπωσης που απαιτούνται, προκειμένου να επέλθει η τελική αστοχία του. Ο συνολικός χρόνος προκύπτει μέσω του αθροίσματος των κύκλων που απαιτούνται για την ανάπτυξη της μικροσπής, την εξέλιξη της μέχρι την κρίσιμη κατάσταση και τέλος την αστοχία του. (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πιθανή ύπαρξη επιφανειακών οπών λόγω διάβρωσης επηρεάζει σημαντικά τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων κόπωσης προκειμένου να επέλθει η αστοχία του υλικού. Συγκεκριμένα, η εμφάνιση οπών διάβρωσης εξαλείφει τον χρόνο που απαιτείται για την αρχική δημιουργία της ρωγμής. Σε περίπτωση που το βάθος της διαβρωτικής οπής είναι κρίσιμο και αντιστοιχεί με το κρίσιμο μήκος ρωγμής για αστοχία τότε ο χρόνος ή κύκλοι κόπωσης που απαιτούνται για την εξέλιξη του ρήγματος σε κρίσιμη, μηδενίζεται. Επομένως ο εναπομείναντας χρόνος ζωής προκύπτει μόνο από τον αριθμό αστοχίας του υλικού με υπάρχουσα εγκοπή κρίσιμου μήκους. (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

Γενικά, η τάση αστοχίας λόγω κόπωσης του αλουμινίου σε διαβρωτικό περιβάλλον κυμαίνεται στο 25-75% της τάσης αστοχίας στο αδρανές περιβάλλον. Η φύση του διαβρωτικού περιβάλλοντος επηρεάζει το βαθμό και ρυθμό διάβρωσης του αλουμινίου λόγω των επιθετικών ιόντων που περιέχουν. Η πιθανή ύπαρξη υγρού περιβάλλοντος αυξάνει τον ρυθμό διάβρωσης ενώ η παρουσία ιόντων χλωρίου επιταχύνει περαιτέρω την ηλεκτροχημική φύση του φαινομένου. Η αντίσταση στη διάβρωση με κόπωση δεν επηρεάζεται πολύ από τις διάφορες θερμικές κατεργασίες ενώ η διάβρωση οπών οδηγούν στο σχηματισμό συγκέντρωσης τάσεων με αποτέλεσμα τη περαιτέρω μείωση της ζωής σε κόπωση. Λόγω του παραπάνω, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η μείωση της αντοχής σε κόπωση εφαρμόζονται αποτελεσματικές κατεργασίες ή εισάγονται θλιπτικά παραμένονσα φορτία. (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

Τέλος, τα πιο ανθεκτικά στη διάβρωση κράματα αλουμινίου είναι και τα πιο ανθεκτικά στη διάβρωση με κόπωση. Συνεπώς, οι σειρές κράματος 2XXX και 7XXX είναι αυτές που παρουσιάζουν τη μικρότερη τάση αστοχίας λόγω κόπωσης σε διαβρωτικό περιβάλλον και προκειμένου να χρησιμοποιηθούν κάτω από έντονες συνθήκες διάβρωσης θα πρέπει να εφαρμοστούν διάφορα μέτρα προστασίας. (ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding, 2015)

Κεφάλαιο 4^ο : Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι – ΜΚΕ

4.1 Εισαγωγή στους ΜΚΕ

Ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών είναι σημαντικός για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό προϊόντων. Η ανάγκη για αξιόπιστο χαρακτηρισμό υλικών και δομών που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, τόσο εργαστηριακών όσο και εξωτερικά εφαρμοζόμενων, έχει οδηγήσει στην ταχεία ανάπτυξη νέων τεχνικών και μεθόδων. Μέχρι τα τέλη του περασμένου αιώνα οι έλεγχοι μηχανολογικών στοιχείων απαιτούσαν την μερική ή ολική καταστροφή του δοκιμίου με αποτέλεσμα την απαίτηση υψηλού κόστους ελέγχου και μεγάλη χρονική αδράνεια της παραγωγικής διαδικασίας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν και συνεχίζουν να αναπτύσσονται με ραγδαίους ρυθμούς οι μη καταστροφικοί έλεγχοι, υποσχόμενοι να καλύψουν τις παραπάνω ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας. (La Rosa, Clienti, & Lo Savio, 2014)

Οι ΜΚΕ αποτελούν μία σειρά φυσικών δοκιμών ελέγχου που επιτρέπουν την ανίχνευση και αξιολόγηση των ιδιοτήτων του υλικού ή μηχανικού στοιχείου χωρίς να απαιτείται η καταστροφή της δομής του ή παρεμπόδιση της λειτουργικής χρήσης του. Στα πλαίσια εφαρμογής των ΜΚΕ προσδιορίζονται σημαντικές παράμετροι της δομής και λειτουργίας του υλικού όπως, χαρακτηριστικά της μικρο και μακρο δομής, τη μηχανική συμπεριφορά του κάτω από εφαρμοζόμενες φορτίσεις, φυσικές ιδιότητες καθώς και τη πιθανή παρουσία ελαττωμάτων κατά την επεξεργασία του. Οι ΜΚΕ αναφέρονται σε πολλές διαφορετικές μεθόδους που βασίζονται σε ελαστικά κύματα, διεισδύουσες ακτινοβολίες, φως, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικά αισθητήρια καθιστώντας την μελέτη τους αρκετά σύνθετη λόγω της συνέργειας πολλών επιστημονικών και τεχνικών ειδικοτήτων, (Εικόνα 22). (Ματίκας & Αγγέλης, 2015)



Εικόνα 22: Ανάδειξη των κύριων κατηγοριών ΜΚΕ.

Η σημαντικότητα των ΜΚΕ καθώς και η συνεχή ανάπτυξη τους οφείλεται στα προηγμένα χαρακτηριστικά που τα διακρίνουν. Κυρίαρχα από αυτά είναι η υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων, η αξιοπιστία ανίχνευσης ατελειών και ελαττωμάτων, η απλότητα κατά την εφαρμογή του ελέγχου καθώς και χαμηλές απαιτήσεις κόστους εφαρμογής λόγω της δυνατότητας εποπτείας κατά τη φυσική λειτουργία του χωρίς την απαίτηση διακοπής της παραγωγικής διαδικασίας. Στόχος των ΜΚΕ είναι η κατάστρωση σχεδίου συντήρησης των κατασκευών βάσει της φθοράς που έχουν υποστεί, την ακεραιότητα τους και την επικινδυνότητα στα πλαίσια λειτουργία τους, έχοντας ως γνώμονα την αξιοπιστία, την ασφάλεια και το χαμηλό κόστος εφαρμογής. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015)

Κάθε μία κατηγορία ΜΚΕ απαρτίζεται από επιμέρους μεθόδους και ελέγχους με διακριτά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Η κάθε μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί από πέντε βασικούς παράγοντες: α) *πηγή ενέργειας* ή μέσο για τη διερεύνηση του υλικού (π.χ. ακτίνες Χ, κύματα υπερήχων και θερμική ακτινοβολία), β) *φύση των σημάτων* και η εικόνα ή υπογραφή που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση με το αντικείμενο, γ) *μέσο ανίχνευσης* ή απεικόνισης των παραγόμενων σημάτων, δ) *μέθοδοι καταγραφής* των σημάτων (ραδιογράφος, παλμογράφος, κάμερα υπερύθρου), ε) *ερμηνεία των αποτελεσμάτων* (ποσοτική ή ποιοτική). Οι κυριότερες ΜΚΕ που εφαρμόζονται στις μηχανολογικές εφαρμογές αποτελούν η *ραδιογραφία*, *εφαρμογή διεισδυτικών υγρών*, *δινορεύματα*, *μαγνητικά σωματίδια*, *υπέρυθρη θερμογραφία*,

υπέρηχοι και ακουστική εκπομπή. Στις επόμενες ενότητες θα περιγράψουν εκτενέστερα οι ΜΚΤ με χρήση ακουστικής εκπομπής και υπέρυθρης θερμογραφίας, που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015)

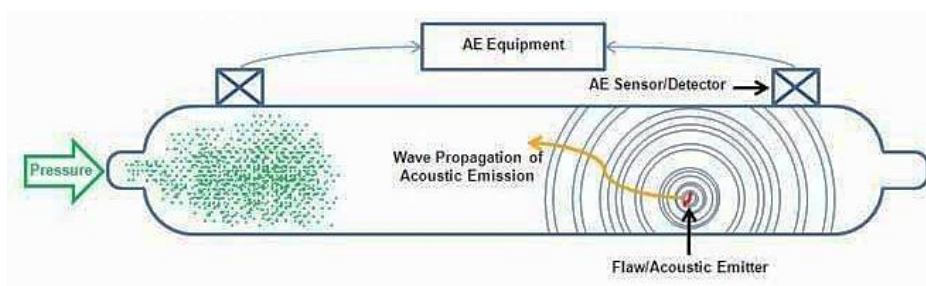
4.2 Ακουστική Εκπομπή (*Acoustic Emission*)

Η ακουστική εκπομπή αποτελεί μία μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου με στόχο τη διάγνωση και χαρακτηρισμό της συσσώρευσης βλάβης σε μία μηχανική διάταξη πολύ πριν τη τελική θραύση. Σύμφωνα τον ορισμό της *ASTM*, η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των ελαστικών κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση, ή η έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Επιπλέον, πηγές ελαστικών κυμάτων ακουστικής εκπομπής μπορεί να δημιουργηθούν και κατά την τήξη του υλικού και την αλλαγή φάσεως, λόγω θερμικών τάσεων. (Σταματούλης, 2013), (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Mistras Group Hellas, ABEE, 2005), (Padfield, David, 2018), (Wadley, Scruby, & Speake, 1980)

Ειδικότερα, η προέλευση της ΑΕ σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του υλικού ή με έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το υλικό, ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή. Τα ελαστικά κύματα της ΑΕ διαδίδονται μέσα στο υλικό και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες ΑΕ (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. (Eitzen & Wadley, 1984), (Holford, 2008), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)

Η μέθοδος ακουστικής εκπομπής είναι δημοφιλής ως εργαλείο για το μη καταστροφικό έλεγχο (*NDT*) στη βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης ρωγμών και τον έλεγχο ασφάλειας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών). Συγκεκριμένα η ακουστική εκπομπή εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος μηχανολογικών εφαρμογών όπως σε εργαστηριακή ή βιομηχανική χρήση, αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας εγκαταστάσεων ή κατασκευών, ελέγχους πιεστικών δοχείων

ή κυλινδρικών δεξαμενών, ελέγχους πυθμένα δεξαμενών, αξιολόγηση γήρανσης αεροσκαφών, δοκιμές σε βυτιοφόρα βαγόνια και κυλινδρικά δοχεία αερίου, ελέγχους διαρροών σε υπέργειες και υπόγειες σωληνώσεις, σωλήνες αερίου ή ατμού υψηλής πίεσης, δοκιμές μερικής αποφόρτισης μετασχηματιστών, ελέγχους προηγμένων υλικών, κεραμικών και συνθέτων καθώς και εντοπισμό διάβρωσης, (Εικόνα 23). (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Beattie, 2013), (Mistras Group Hellas, ABEE, 2005), (Padfield, David, 2018), (Wadley, Scruby, & Speake, 1980), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)



Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής ακουστικής εκπομπής σε ελέγχους δομικής και μηχανικής ακεραιότητας κυλινδρικών δεξαμενών.⁵⁵

Ωστόσο πέρα των πλεονεκτημάτων που την διακατέχουν, η τεχνική της AE δε δίνει πληροφορίες για το μήκος και το βάθος των ατελειών και δεν προσδιορίζει άμεσα βασικές μηχανικές παραμέτρους όπως η τάση ή η παραμόρφωση. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου. (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Holford, 2008), (Mistras Group Hellas, ABEE, 2005), (Padfield, David, 2018), (Wadley, Scruby, & Speake, 1980), (Wevers & Surgeon, 2000)

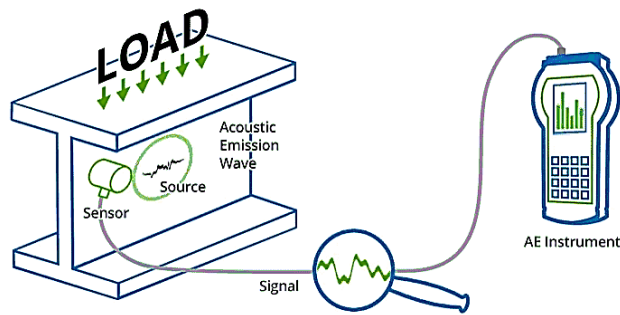
⁵⁵ <https://www.openpr.com/news/1066389/Acoustic-Emission-Testing-Service-Market-Size-Trends-and-Industry-Challenges-2018-2025-with-Global-Key-Players-TUV-Rheinland-MISTRAS-TUV-Nord-Parker-Hannifin-TUV-Austria-GE.html>

Πίνακας 10: Συγκεντρωτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών, πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της ΑΕ.

Χαρακτηριστικά ΑΕ	Πλεονεκτήματα ΑΕ	Μειονεκτήματα ΑΕ
Καθολικός έλεγχος της διάταξης με κατάλληλη τοποθέτηση των αισθητήρων	Είναι δυνατός ο καθορισμός της θέσης ανάπτυξης των ρωγμών με κατάλληλη τοποθέτηση των αισθητήρων	Είναι δύσκολη η διάκριση μεταξύ των πραγματικών σημάτων ακουστικής εκπομπής και του θορύβου από το περιβάλλον κατά την διάρκεια της μέτρησης
Δυνατότητα ελέγχου μέσω πρόσβασης σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας	Η κατηγοριοποίηση και η διεύθυνση των ρωγμών μπορεί να καθοριστεί με ανάλυση των κυματομορφών	Σε ορισμένα υλικά τα σήματα ΑΕ αναπτύσσονται μόνο όταν η φόρτιση φτάσει στο όριο παραμόρφωση του υλικού
Μη επαναλήψιμη μέθοδος λόγω της μοναδικότητας των ακουστικών σημάτων	Η δυναμική συμπεριφορά των υλικών μπορεί να παρακολουθείτε σε πραγματικό χρόνο	Είναι δύσκολος ο υπολογισμός της θέσης της ΑΕ σε περίπτωση μη ομογενών υλικών, όπου οι ταχύτητες διάδοσης διαφέρουν στις διάφορες διευθύνσεις
Απαίτηση εξωτερικής εφαρμοζόμενης καταπόνησης προκειμένου να μελετηθεί η εξέλιξη των ακουστικών φαινομένων	Είναι δυνατός ο έλεγχος σε κατασκευές που έχουν επικαλυφθεί με μονωτικό υλικό χωρίς να απαιτείται η αφαίρεση του	
Ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους που οδηγούν σε αλλοίωση των αποτελεσμάτων	Είναι δυνατός ο έλεγχος ολόκληρης της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο	Υπάρχουν υλικά (όπως το ξύλο) τα οποία μειώνουν σημαντικά το πλάτος των σημάτων ακουστική εκπομπής και δυσκολεύουν τον εντοπισμό τους

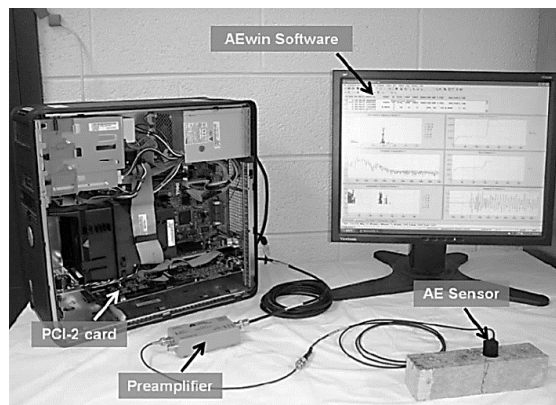
4.2.1 Πειραματική διάταξη ακουστικής εκπομπής

Η τεχνική της ΑΕ ανιχνεύει και καταγράφει τα ελαστικά κύματα που εκλύονται μετά από μη αντιστρεπτές διαδικασίες στο εσωτερικό ενός υλικού, (Εικόνα 24). Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν έναρξη και διάδοση βλάβης σε οποιαδήποτε μορφή όπως ρωγμές, αποκολλήσεις, εξόλκευση ινών, την ανάπτυξη διάβρωσης, διαρροών κ.α. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανίχνευση και μέτρηση των παραγόμενων κυμάτων, συνήθως εφαρμόζονται πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες στην επιφάνεια του υλικού με κατάλληλο μέσο σύζευξης (γράσο, τζελ, μέλι). Οι αισθητήρες αυτοί μετατρέπουν οποιαδήποτε μεταβολή της πίεσης στην επιφάνεια τους σε ηλεκτρική κυματομορφή. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Eitzen & Wadley, 1984), (Holford, 2008), (Mistras Group Hellas, ABEE, 2005), (Padfield, David, 2018), (Wadley, Scruby, & Speake, 1980), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)



Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής της ακουστικής εκπομπής.⁵⁶

Η συνήθης διάταξη της μεθόδου περιλαμβάνει εφαρμογή εξωτερικής δύναμης προκειμένου να αναπτυχθεί ελαστικό κύμα λόγω εξέλιξης ατέλειας της δομής, τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων στην επιφάνεια του υλικού με εφαρμογή κατάλληλου μέσου σύζευξης, ενίσχυση του παραγόμενου σήματος μέσω κατάλληλων ενισχυτών ΑΕ και τέλος μελέτη και επεξεργασία των τελικών σημάτων και κυματομορφών μέσω της κάρτας καταγραφής ΑΕ, (Εικόνα 25). (Σταματούλης, 2013), (Zhou, 2011), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)



Εικόνα 25: Τυπική διάταξη ΑΕ στα πλαίσια εργαστηριακής πειραματικής μελέτης.⁵⁷

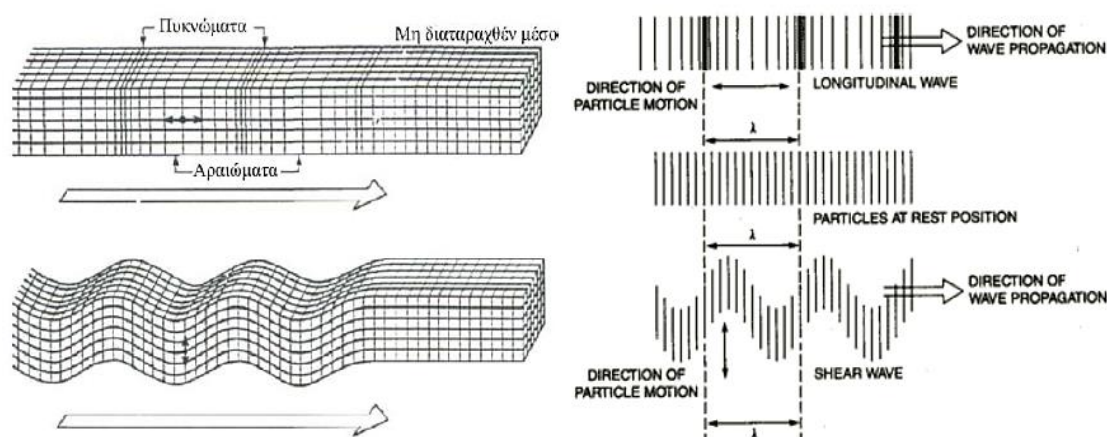
4.2.2 Φύση των κυμάτων ΑΕ

Τα φαινόμενα ακουστικής εκπομπής σχετίζονται με την παραγωγή και μετάδοση ελαστικών υπερηχητικών κυμάτων στο εσωτερικό ενός υλικού, με την εφαρμογή εξωτερικών καταπονήσεων. Τα ακουστικά κύματα που αναπτύσσονται λόγω της παραμόρφωση του υλικού σε στερεά είναι κυρίως δύο ειδών. Τα επιμήκη κύματα κατά τα οποία έχουμε διάδοση μεταβολής όγκου ή πυκνότητας του μέσου διάδοσης και

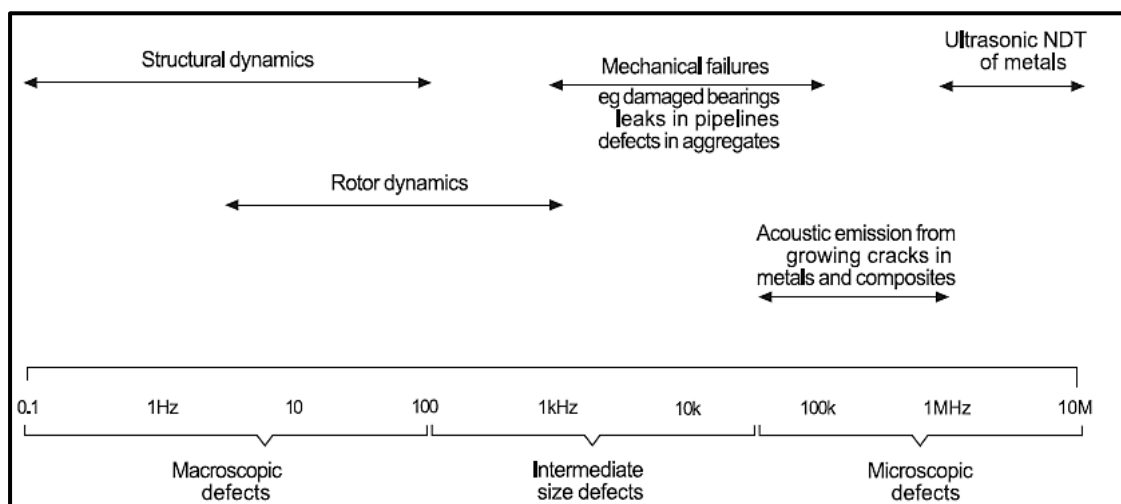
⁵⁶ <https://mistrasgroup.co.uk/products-and-systems/ae-systems/>

⁵⁷ <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1721&context=etds>

τα εγκάρσια στα οποία έχουμε διάδοση εγκάρσιας παραμόρφωσης του μέσου διάδοσης, (Σχήμα 19). Τα παραγόμενα ελαστικά κύματα ανιχνεύονται με αισθητήρες μεταξύ εύρους μερικών δεκάδων kHz έως 1 MHz. Ανάλογα με τη μορφή της ατέλειας και το μηχανισμό ανάπτυξης της ρωγμής, εντοπίζονται χαρακτηριστικές συχνότητες ταύτισης, (Εικόνα 26). (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Wadley, Scruby, & Speake, 1980), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κουσίδης, 2013), (Μουρτζόπουλος, 2014)



Σχήμα 19: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών ειδών ελαστικών κυμάτων.^{58,59}



Εικόνα 26: Κατηγορίες συχνοτήτων διαφόρων πηγών ακουστικής εκπομπής.⁶⁰

⁵⁸https://www.nde_ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/wavepropagation.htm

⁵⁹ <https://slideplayer.gr/slide/1990437/>

⁶⁰https://www.researchgate.net/publication/230258957_Applications_of_Acoustic_Emission_for_SHM_A_Review

Ωστόσο, ενώ τα κύματα ΑΕ χαρακτηρίζονται ως ελαστικά διατηρώντας τις ιδιότητες τους κατά την διάδοση τους στο υλικό, υποφέρουν από θέματα εξασθένησης αλλοιώνοντας τα χαρακτηριστικά του. Όταν ένας ήχος διαδίδεται σε κάποιο μέσο η ένταση του μειώνεται με την απόσταση. Η περαιτέρω μείωση του πλάτους του σήματος οφείλεται σε ένα σύνολο από παράγοντες όπως *τη γεωμετρική διασπορά, την εσωτερική τριβή, τη σκέδαση και την αλλαγή ιδιομορφής*. (Beattie, 2013), (Holford, 2008), (Κουσίδης, 2013), (Μουρτζόπουλος, 2014)

Ένας από τους σημαντικότερους λόγους εφαρμογής της ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης της πηγής των κυμάτων. Ο υπολογισμός της θέσης της ΑΕ βασίζεται στους χρόνους άφιξης των σημάτων ή χαρακτηριστικών των σημάτων στους αισθητήρες. Οι χρόνοι άφιξης εκτός από την απόσταση των αισθητήρων εξαρτώνται και από τις ταχύτητες διάδοσης των ακουστικών κυμάτων. Λόγω του παραπάνω, κρίνεται αναγκαία ανάγκη περιγραφής της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο μέσο. Ο ήχος ταξιδεύει με διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικά υλικά λόγω της μάζας και την ταλαντωτικής συμπεριφοράς των σωματιδίων του υλικού. Η μάζα των σωματιδίων σχετίζεται με την πυκνότητα του υλικού ενώ η ταλαντωτική συμπεριφορά με τις ελαστικές σταθερές του υλικού. Η ταχύτητας διάδοσης περιγράφεται μέσω της *Εξίσωσης 4.1* : (Eitzen & Wadley, 1984), (Zhou, 2011), (Κουσίδης, 2013), (Κυπριωτάκη, 2012), (Μουρτζόπουλος, 2014).

$$c = \sqrt{\frac{K_{ij}}{\rho}} , \quad (Eξ. 4.1)$$

όπου c , η ταχύτητα του κύματος διάδοσης σε m/sec, K_{ij} , η ελαστική σταθερά και ρ , η πυκνότητα του υλικού. Ωστόσο, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές ανάλογα με τον τύπο του κύματος και τις αντίστοιχες ελαστικές σταθερές που χρησιμοποιούνται. Οι χαρακτηριστικές ελαστικές σταθερές ενός υλικού αποτελούν το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, το μέτρο ελαστικότητας όγκου, το μέτρο διάτμησης και οι σταθερές Λαμέ. (Κουσίδης, 2013), (Κυπριωτάκη, 2012), (Μουρτζόπουλος, 2014)

Όπως είναι φανερό από την μορφή της εξίσωσης της ταχύτητας διάδοσης, ο ελαστικός συντελεστής K_{ij} που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί στην αντίστοιχη διεύθυνση του κύματος για αυτό εμφανίζεται σε μορφή μητρώου. Στο *Πίνακα 11* αναγράφονται χαρακτηριστικές τιμές των ταχυτήτων διάδοσης σε διάφορα μέσα. (Beattie, 2013), (Κυπριωτάκη, 2012), (Μουρτζόπουλος, 2014)

Πίνακας 11: Ταχύτητες του ήχου για επιμήκη και εγκάρσια κύματα σε διαφορετικά μέσα διάδοσης.⁶¹

Υλικά	Ταχύτητες διαμήκη κυμάτων (m/sec)	Ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων (m/sec)
<i>Αλουμίνιο</i>	6320	3130
<i>Χάλυβες 1018</i>	5918	3251
<i>Χάλυβες 1020</i>	5890	3240
<i>Ανοξείδωτος Χάλυβας 347</i>	5740	3130
<i>Χυτοσίδηρος</i>	4800	2400
<i>Πλεξιγκλάς</i>	2740	1320
<i>Λάδι</i>	1440	-
<i>Νερό</i>	1480	-

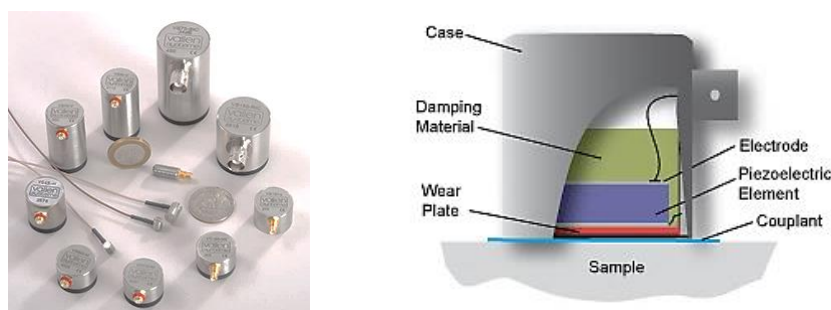
4.2.3 Αισθητήρες της ΑΕ

Το κυριότερο στοιχείο της πειραματικής διάταξης της ΑΕ είναι οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που μετατρέπουν τις μεταβολές πίεσης στην επιφάνεια σε ηλεκτρικά σήματα. Στη συνέχεια τα σήματα τροφοδοτούνται στον προ-ενισχυτή και στην κάρτα καταγραφής, όπου λαμβάνει χώρα η ψηφιοποίηση, ενώ μετρώνται οι κύριες παράμετροι της κυματομορφής σε πραγματικό χρόνο. Συνήθως ο μετατροπέας του αισθητήρα είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Οι μετατροπείς επιλέγονται σύμφωνα με την συχνότητα λειτουργίας, την ευαισθησία τους και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά και χωρίζονται σε μετατροπείς συντονισμού και σε ευρυζωνικούς μετατροπείς, (Εικόνα 43). Η πλειονότητα των συστημάτων μέτρησης ΑΕ αποκρίνεται σε κινήσεις σε ένα τυπικό εύρος συχνοτήτων από 30 kHz έως 1 MHz. (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Holford, 2008), (Wadley, Scruby, & Speake, 1980), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)

Οι συνηθισμένοι αισθητήρες ΑΕ δομούνται από ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT, το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπείς. Τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα είναι το κέλυφος του αισθητήρα, μέσα στο

⁶¹<https://dspace.uowm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/118/MKE%20με%20την%20Μέθοδο%20των%20Υπερήχων%20-%20Kousidis%20Savvas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

οποίο βρίσκονται ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας ή κρύσταλλος και τα ηλεκτρόδια, η θήκη στήριξης του μετατροπέα καθώς και το υλικό που προσδίδει απόσβεση στο σύστημα, (Εικόνα 27). Επιπλέον κάτω από τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο τοποθετείται ένα στρώμα προστασίας, προκειμένου να περιοριστούν οι ταλαντώσεις του κρυστάλλου. Σημαντικό επίσης για την εφαρμογή του αισθητήρα στο υπό εξέταση υλικό είναι η τοποθέτηση στο σημείο επαφής τους με την κατασκευή ενός παχύρρευστου μέσου για την μείωση των απωλειών. Το μέσο σύζευξης ενώ είναι εξωτερικό στοιχείο του αισθητήρα, αναφέρεται στη πειραματική διάταξη καθώς δεν υφίσταται ακουστική μέτρηση και παρατήρηση χωρίς την παρουσία του. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Holford, 2008), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)



Εικόνα 27: Πραγματικές εικόνες αισθητήρων ακουστικής εκπομπής και σχηματική αναπαράσταση της δομής του.^{62,63}

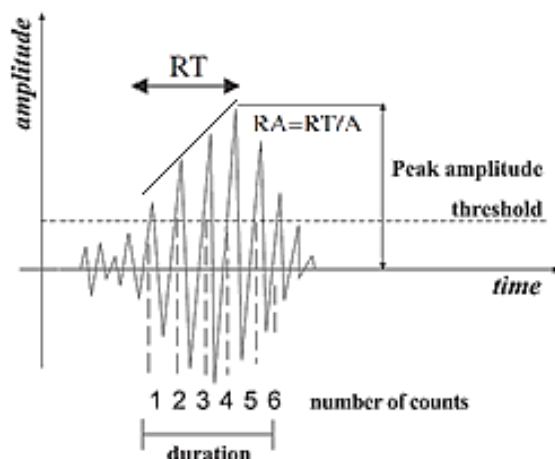
4.2.4 Ανάλυση βασικών παραμέτρων ΑΕ

Ο βαθμός εξέλιξης μίας ατέλειας καθώς και η ποσοτικοποίηση της εντάσεως της ακουστικής πηγής στηρίζεται αρχικά στον αριθμό των ακουστικών γεγονότων καθώς και την ένταση του πλάτους των ηχητικών κυμάτων. Η συνολική δραστηριότητα ΑΕ είναι ενδεικτική της έκτασης της βλάβης ή αριθμού ρωγμών και είναι το πιο σημαντικό δεδομένο, αφού σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη και διάδοση βλάβης. Επιπρόσθετα, το σχήμα της καταγεγραμμένης κυματομορφής προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή του σήματος. Η αναλυτική μελέτη των στοιχείων και χαρακτηριστικών της κυματομορφής κρίνεται απαραίτητη για την ερμηνεία και τη φύση των ακουστικών πηγών. Τα κυριότερα στοιχεία των κυματομορφών αποτελούν

⁶²https://www.nde_ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.php

⁶³ <https://www.edaphic.com.au/acoustic-emissions-xylem-cavitation/>

το εύρος της κυματομορφής, ο αριθμός των υπερβάσεων του κατωφλίου, το κατώφλι της έντασης, η διάρκεια του γεγονότος, ο χρόνος ανύψωσης και η μέση συχνότητα. Στο Σχήμα 20 παρουσιάζονται ποιοτικά τα κύρια στοιχεία των ηχητικών κυματομορφών κατά την ανάλυση της ΑΕ. (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Holford, 2008), (Zhou, 2011), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κυπριωτάκη, 2012)



Σχήμα 20: Αναπαράσταση τυπικής κυματομορφής ΑΕ με τα βασικά χαρακτηριστικά που την περιγράφουν.⁶⁴

Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των κυματομορφών ΑΕ περιγράφονται μέσω: (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Zhou, 2011), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κυπριωτάκη, 2012)

- **Εύρος - Amplitude:** Το εύρος σχετίζεται με την ένταση της κυματομορφής και μετριέται σε Volt. Το εύρος προσδιορίζεται από τη μέγιστη κορυφή της κυματομορφής σε κάθε ένα ακουστικό γεγονός.
- **Κατώφλι έντασης - Threshold:** Το κατώφλι έντασης αποτελεί μία οριακή τιμή εύρους έντασης, κατά την οποία μόλις ξεπεραστεί ξεκινάει η καταγραφή της ΑΕ. Η σημασία του κατωφλίου είναι ιδιαίτερα σημαντική και σχετίζεται άμεσα με την έννοια του θορύβου. Επιλέγοντας ιδανικές τιμές, περιορίζεται σημαντικά ο θόρυβος κατά την μέτρηση του κύματος ΑΕ. Ωστόσο, κατά την επιλογή υψηλών τιμών είναι δυνατόν να απορριφθούν δεδομένα που προέρχονται από πραγματικές πηγές ΑΕ στο εσωτερικό του υλικού. Συνοψίζοντας, η επιλογή της τιμής εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή, το είδος των ατελειών που

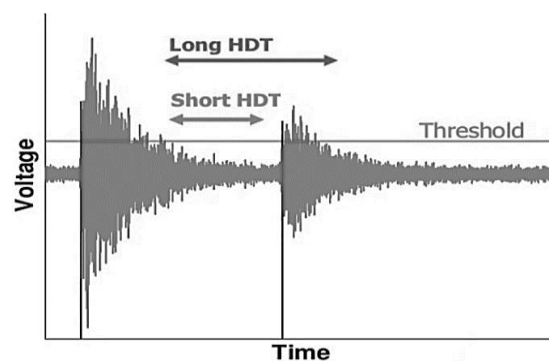
⁶⁴https://www.researchgate.net/publication/230258957_Applications_of_Acoustic_Emission_for_SHM_A_Review

αναπτύσσονται, τις εξωτερικές εφαρμοζόμενες δυνάμεις και το είδος του αισθητήρα ΑΕ.

- **Αριθμός υπερβάσεων του κατωφλίου - *Counts*:** Κάθε φορά που η ένταση του ηχητικού σήματος της ΑΕ ξεπερνάει την οριακή τιμή του κατωφλίου, ο αριθμός υπερβάσεων ή *hits* αυξάνεται κατά μία μονάδα. Ο αριθμός των υπερβάσεων σε συνάρτηση με την συνολική διάρκεια της ΑΕ μας προσδίδει στοιχεία σχετικά με το είδος και τον τρόπο εξέλιξης της ατέλειας στο εσωτερικό του υλικού.
- **Διάρκεια - *Duration*:** Η διάρκεια ορίζεται από το εκάστοτε μοναδικό σήμα ή αλλιώς κυματομορφή της ΑΕ. Ορίζεται ως η χρονική διάρκεια μεταξύ της πρώτης υπέρβασης του κατωφλίου έντασης και της τελευταίας υπέρβασης του.
- **Χρόνος Ανύψωσης - *Rise Time*:** Ο χρόνος ανύψωσης αποτελεί τη διαφορά των χρόνων μεταξύ της πρώτης υπέρβασης του κατωφλίου και της πραγμάτωσης της μέγιστης κορυφής της κυματομορφής. Η τιμή του χρόνου ανύψωσης επηρεάζεται από το είδος και τον ρυθμό εξέλιξης της ατέλειας στο εσωτερικό του υλικού.
- **Μέση συχνότητα - *Average Frequency*:** Η μέση συχνότητα σχετίζεται με τον αριθμό των υπερβάσεων και τη συνολική διάρκεια του ακουστικού γεγονότος ΑΕ. Συγκεκριμένα, η μέση συχνότητα ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των υπερβάσεων μίας κυματομορφής προς τη χρονική διάρκεια αυτής όπως ορίστηκε παραπάνω. Η μέση συχνότητα προσδίδει μία πρώτη και γρήγορη εκτίμηση του ρυθμού διάδοσης της ατέλειας στο εσωτερικό του υλικού.

Τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν τα κύρια γνωρίσματα που μπορούν να μετρηθούν ή να υπολογιστούν άμεσα ή έμμεσα μέσω κάποιου μαθηματικού μοντέλου, προσδίδοντας μας πληροφορίες σχετικά με την πηγή της ΑΕ ή την αναπτυσσόμενη ατέλεια ή τον μετασχηματισμό μικροδομής στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού. Ο τρόπος που οι πληροφορίες εξάγονται από τις μετρήσεις ΑΕ εξαρτάται από τη εφαρμογή, τη διάταξη του πειράματος και την προτίμηση του χρήστη. Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Ορισμένες βασίζονται στη συνολική δραστηριότητα ΑΕ σε σχέση με τη φόρτιση, άλλες χρησιμοποιούν το εύρος και την κατανομή του εύρους των κυματομορφών, ενώ άλλες χρησιμοποιούν τις παραμέτρους κυματομορφών με τη χρήση απλών ή πιο εξελιγμένων εργαλείων ανάλυσης. (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Κυπριωτάκη, 2012)

Πριν παρουσιαστούν οι τρόποι προσδιορισμού της γεωμετρικής θέσης της πηγής της ΑΕ, κρίνεται αναγκαίο να αναλυθεί η έννοια του ακουστικού γεγονότος ή *AE event*. Ο όρος αυτός σχετίζεται άμεσα με τον εξίσου σημαντικό όρο HDT (*hit definition time*). Όπως προαναφέρθηκε, με την πρώτη υπέρβαση του κατωφλίου έντασης, πραγματοποιείται έναρξη της ΑΕ και συνεχίζεται μέχρι την τελευταία υπέρβαση. Ο όρος HDT προσδιορίζει το μέγιστο χρόνο αδράνειας του αισθητήρα αμέσως μετά την καταγραφή μίας υπέρβασης. Εφόσον ακολουθεί νέα υπέρβαση με χρόνο πραγμάτωσης μικρότερο του HDT, ο χρόνος αδράνειας μηδενίζεται και υπολογίζεται εκ νέου. Ωστόσο, εφόσον ο χρόνος αδράνειας ξεπεράσει τον HDT τότε η προηγούμενη κυματομορφή ή σήμα ολοκληρώνεται και οποιαδήποτε ηχητική καταγραφή θα θεωρηθεί ως νέο συμβάν, διαμορφώνοντας έτσι το νέο ακουστικό γεγονός ή *AE event*. Επιπροσθέτως, πολλές φορές υπάρχει μία διαφοροποίηση στον όρο HDT σε *Short-HDT* και *Long-HDT*, (Σχήμα 21). Ο *Short-HDT* αναφέρεται στο χρόνο αδράνειας του αισθητήρα από την τελευταία μέτρηση υπέρβασης έντασης της ΑΕ. Αντίθετα ο *Long-HDT* αναφέρεται στο χρόνο μεταξύ της τελευταίας υπέρβασης έντασης του πρώτου ηχητικού σήματος και της τελευταίας υπέρβασης του επόμενου ηχητικού σήματος. Η χρήση του εκάστοτε όρου εξαρτάται άμεσα από το χρήστη και την εφαρμογή της ΑΕ. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Beattie, 2013), (Zhou, 2011), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κυπριωτάκη, 2012)



Σχήμα 21: Αναπαράσταση κυματομορφών ΑΕ με ανάδειξη των όρων Long/Short HDT.⁶⁵

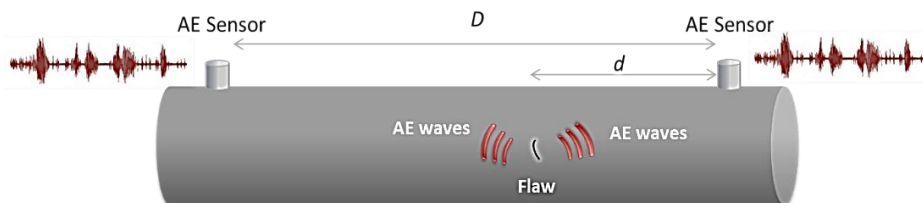
4.2.5 Γεωμετρικός προσδιορισμός της θέσης της ΑΕ

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα στην ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης των πηγών της ΑΕ στο εσωτερικό του υλικού. Ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής μπορεί

⁶⁵ <https://slideplayer.com/slide/5734198/>

να πραγματοποιηθεί με εφαρμογή δύο ή περισσότερων αισθητήρων. Προκειμένου να εντοπιστεί η θέση της πηγής έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες. Σε κάθε περίπτωση ο εντοπισμός της θέσης της πηγής γίνεται με εκτίμηση των χρόνων άφιξης των σημάτων ή χαρακτηριστικών αυτών σε διαφορετικούς αισθητήρες, (Εικόνα 28). Ωστόσο, τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται η γραμμική διαφορά των χρόνων άφιξης των κυμάτων διάδοσης με χρήση δύο αισθητήρων AE, κυρίως σε μονοαξονικά μηχανικά στοιχεία ή εργαστηριακά δοκίμια. Βέβαια στα πλαίσια του υπολογισμού, απαραίτητη είναι η εύρεση της ταχύτητας διάδοσης του ελαστικού κύματος στο εσωτερικό του υπό μελέτη υλικού. (Beattie, 2013), (Eitzen & Wadley, 1984), (Holford, 2008), (Mistras Group Hellas, ABEE, 2005), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας των ελαστικών κυμάτων μπορεί να μετρηθεί εύκολα μέσω μίας πρότυπης διέγερσης μέσω της μύτης ενός μηχανικού μολυβιού, για δεδομένη θέση διέγερσης. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το υλικό, ενώ θεωρείται ως πλήρως ομοιογενές, στην πραγματικότητα παρουσιάζει κάποιου βαθμού ανομοιογένειας επηρεάζοντας τα χαρακτηριστικά διάδοσης του κύματος και αλλοιώνοντας τα στοιχεία της AE. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Zhou, 2011), (Padfield, David, 2018), (Wevers & Surgeon, 2000), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)

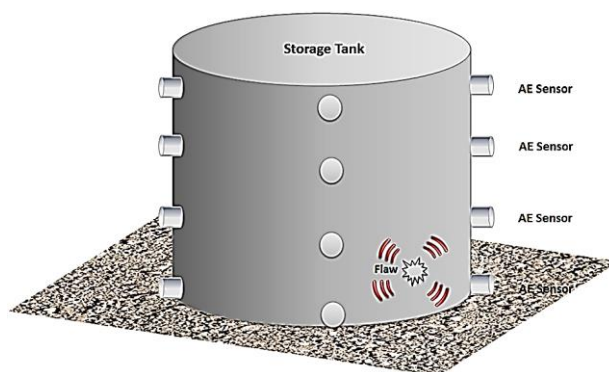


Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση μίας τυπικής διάταξης γεωμετρικού προσδιορισμού πηγής AE σε μηχανικό στοιχείο μίας διεύθυνσης.⁶⁶

Παράλληλα για το γεωμετρικό προσδιορισμό πηγής AE σε δύο ή τρεις διαστάσεις, απαραίτητη είναι η εφαρμογή τριών ή περισσότερων αισθητήρων, (Εικόνα 29). Ωστόσο, ενώ η χρήση περισσότερων αισθητήρων προσδίδει ακριβέστερα τη θέση της πηγής, αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο ειδικά σε περιπτώσεις μετασχηματισμού Fourier. Συνήθως σε πραγματικά προβλήματα εφαρμόζουμε έναν μικρό αλλά απαραίτητο για την έκταση της διάταξης αριθμό αισθητήρων προκειμένου

⁶⁶ <http://www.idinspections.com/acoustic-emission-phenomenon/>

να πραγματοποιηθεί ένας γενικός έλεγχος. Σε περίπτωση που εντοπιστεί πιθανή ατέλεια στο στοιχείο, περιορίζουμε τη μελέτη γύρω από την εντοπισμένη περιοχή, αυξάνοντας τους αισθητήρες ΑΕ προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ακριβής θέση της. (Beattie, 2013), (Zhou, 2011), (Padfield, David, 2018), (Κυπριωτάκη, 2012), (Πάππου, 2012)



Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση μίας τυπικής διάταξης γεωμετρικού προσδιορισμού πηγής ΑΕ σε μηχανικό στοιχείο τριών διευθύνσεων με εφαρμογή πολλαπλών αισθητήρων.⁶⁷

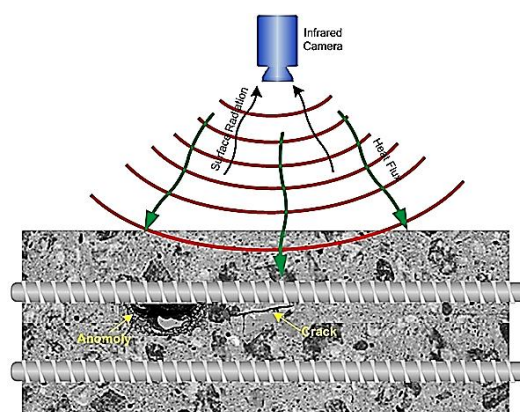
4.3 Θερμογραφία Υπερύθρου (*Thermography IR*)

Η θερμογραφία υπερύθρου αποτελεί μία κατηγορία ΜΚΕ, μέσω της οποίας ανιχνεύουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών λόγω της εκπεμπόμενης θερμικής τους ενέργειας. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή της. Η θερμογραφία όπως και οι άλλες ΜΚΕ χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση υλικών και μηχανικών διατάξεων ως προς την ακεραιότητα της δομής και της λειτουργίας του. Ο έλεγχος υλικών με θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό εξαρτημάτων που λειτουργούν σε θερμοκρασίες υψηλότερες άλλων εξαρτημάτων, για την ανίχνευση βλάβης σε υλικά ή για τον εντοπισμό ενεργειακών απωλειών σε κτίρια, γραμμές κρυογενικών υγρών ή σωληνώσεων ατμού. (FLIR Systems, 2018), (La Rosa, Clienti, & Lo Savio, 2014), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Lixin Gao, et al., 2010), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

⁶⁷ <http://www.idinspections.com/acoustic-emission-phenomenon/>

4.3.1 Εισαγωγή θερμογραφίας

Γενικά, οποιοδήποτε σώμα βρίσκεται σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν δηλαδή στους $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, εκπέμπει θερμική υπέρυθη ακτινοβολία. Θερμογραφία είναι η επιστήμη της ανάλυσης των θερμικών δεδομένων που συλλέγονται μέσα από ειδικές θερμικές κάμερες, οι οποίες ανιχνεύουν θερμική ακτινοβολία και την απεικονίζουν σε ραδιομετρικές εικόνες. Με την θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας ενός σώματος ή στοιχείου, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Έτσι οι πιθανές υπό επιφανειακές ανωμαλίες ή αναπτυσσόμενες ατέλειες στο υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία, προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες όπου υφίστανται, (Εικόνα 30). Στις μέρες μας, η επιστήμη της θερμογραφίας λόγω των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων που την χαρακτηρίζουν, χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία, σε κτιριακές και οικιακές εφαρμογές, στην ναυτιλία και σε πολλές ακόμα εφαρμογές, όπου τα θερμικά πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Σταματούλης, 2013), (FLIR Systems, 2018), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001), (Αιβαλιώτης & Θεοφράστου, 2008), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)



Εικόνα 30: Γραφική παρουσίαση εφαρμογής θερμογραφίας υπέρυθρου προς έλεγχο δομικής ακεραιότητας οπλισμένου σκυροδέματος.⁶⁸

⁶⁸ https://fhwaapps.fhwa.dot.gov/ndep/DisplayTechnology.aspx?tech_id=14

Η υπέρυθρη ακτινοβολία ανακαλύφθηκε το 1800 από τον αστρονόμο *William Herschel* (1738-1822), ο οποίος γνώριζε ότι το ηλιακό φως εκπέμπει θερμότητα και ότι αποτελείται από τα χρώματα του ορατού φάσματος. Στόχος του ήταν να μάθει το ποσό της θερμότητας, που εκπέμπει κάθε διαφορετικό χρώμα του ορατού φάσματος και γι' αυτό επινόησε και πραγματοποίησε ένα πείραμα, όπου μέτρησε την θερμοκρασία του κάθε χρώματος που προερχόταν από την ανάλυση του ηλιακού φωτός από ένα πρίσμα. Παρατήρησε ότι η θερμοκρασία αυξανόταν καθώς μετατόπιζε το θερμόμετρο από το ιώδες (βιολετί) στο κόκκινο χρώμα. Επίσης η θερμοκρασία είχε την υψηλότερη τιμή πέρα από το κόκκινο χρώμα, σε μια περιοχή όπου δεν υπάρχει ορατό φως. Με αυτό τον τρόπο ανακάλυψε την ύπαρξη ακτινοβολίας έξω από την περιοχή του ορατού φάσματος (πέρα από ερυθρό χρώμα), η οποία ανιχνεύτηκε από το θερμικό αποτέλεσμα. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η περιοχή πέρα του ορατού φωτός καθώς και του ερυθρού χρώματος ονομάζεται υπέρυθρη ακτινοβολία. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Αιβαλιώτης & Θεοφράστου, 2008), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η υπέρυθρη θερμογραφία στηρίζεται στην ακτινοβολία ή αλλιώς στα μήκη κύματος που εκπέμπουν τα θερμά σώματα. Η θερμότητα μετατρέπεται σε χρώματα μέσω της κάμερας θερμογραφίας, παρουσιάζοντας τις διάφορες πιθανές αποκλίσεις στην επιφάνεια του λόγω της διαφοράς θερμικής εκπομπής. Η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να υφίσταται στο υλικό εγγενώς από το εξωτερικό περιβάλλον λειτουργίας του ή να δημιουργηθεί λόγω εφαρμοζόμενης εξωτερικής πηγής θερμότητας. (FLIR Systems, 2018), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

Στον *Πίνακα 12*, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής θερμογραφίας υπέρυθρου. (FLIR Systems, 2018), (Maldague, 2001), (Αιβαλιώτης & Θεοφράστου, 2008)

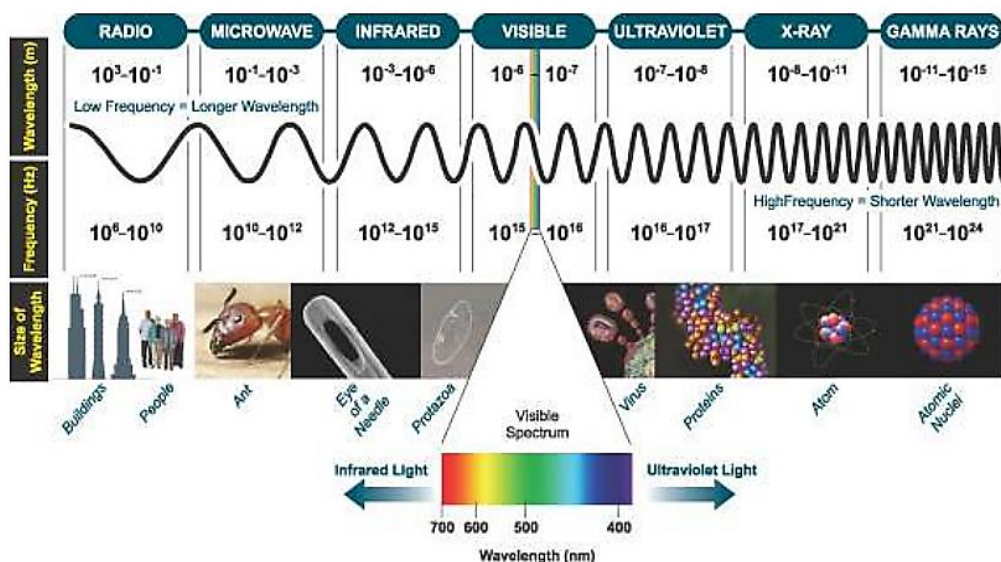
Πίνακας 12: Παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της θερμογραφίας IR.⁶⁹

Πλεονεκτήματα Θερμογραφίας IR	Μειονεκτήματα Θερμογραφίας IR
Η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι τύπου non-contact (άνευ επαφής).	<i>Επίδραση των θερμικών, εκ μεταφοράς και ακτινοβολίας απωλειών, που προκαλούν ψεύτικες μεταβολές θερμοκρασίας με επιπτώσεις στην αξιοπιστία της μέτρησης.</i>
Παρέχει γρήγορες, αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις, χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας του μηχανικού στοιχείου ή διάταξης.	<i>Δυνατότητα επιθεώρησης ενός περιορισμένου πάχους υλικού κάτω από την επιφάνεια.</i>
Τεχνική πλήρους πεδίου (full field) με ταχύ ρυθμό ελέγχου.	<i>Λανθασμένες εκτιμήσεις λόγω απειρίας του προσωπικού κατά τη χρήση, διότι αντί για θερμά σημεία εντοπίζονται ανακλάσεις ή χρησιμοποιούνται λανθασμένες γωνίες θερμογράφησης, μειώνοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων.</i>
Ο χειρισμός του εξοπλισμού της υπέρυθρης θερμοκάμερας είναι αρκετά εύκολος και δεν απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις ή ικανότητες.	
Παρέχει πρόβλεψη στη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι υποψήφιες βλάβες μπορούν να αποφευχθούν, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και χρήμα. Αποτελεί μοναδικό εργαλείο ΜΚΕ για ορισμένες εφαρμογές.	<i>Πολλές φορές υπάρχει πρόβλημα που αφορά την αδυναμία ή τη δυσκολία προσδιορισμού του συντελεστή εκπεμπικότητας (emissivity).</i>

4.3.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και υπέρυθρη ακτινοβολία

Φάσμα με τη φυσική έννοια, είναι η απεικόνιση της έντασης μίας μίξης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα ή το μήκος κύματος αυτών. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καλύπτει μία πολύ μεγάλη περιοχή μηκών κύματος και χωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες ακτινοβολίας με κριτήρια την προέλευση, τη δημιουργία και τις εφαρμογές που χαρακτηρίζουν την ακτινοβολία για κάθε συγκεκριμένο διάστημα μήκους κύματος, (Εικόνα 31). Όλοι οι τύποι ακτινοβολίας που αντιστοιχούν στις διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ακτίνες X, υπεριώδεις – UV, ορατό φως, υπέρυθρες – IR, μικροκύματα, ραδιοκύματα) διέπονται από τους ίδιους φυσικούς νόμους και οι μόνες τους διαφορές είναι εκείνες που οφείλονται στο διαφορετικό τους μήκος κύματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τα αντίστοιχα στοιχεία που τα χαρακτηρίζουν. (FLIR Systems, 2018), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Αιβαλιώτης & Θεοφράστου, 2008), (Σωτηρόπουλος, 2012)

⁶⁹https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3599/2/00_master_document-KOY.pdf



Εικόνα 31: Παρουσίαση ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.⁷⁰

Όλοι οι τύποι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιγράφονται υπακούν στις ίδιες φυσικές αρχές που αφορούν την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη σκέδασή τους. Η ταχύτητα διάδοσης θεωρείται ίδια με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός και για κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύει η παρακάτω θεμελιώδης σχέση, (Εξίσωση 4.2): (FLIR Systems, 2018), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

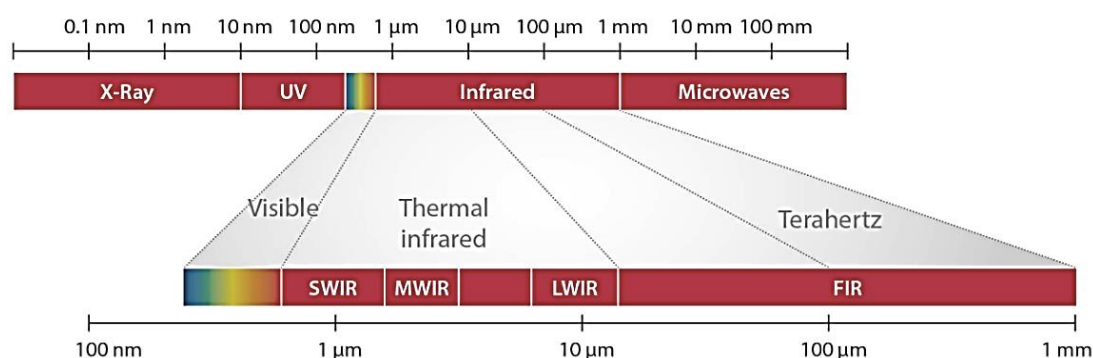
$$\lambda \times f = C, \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

όπου λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, f η συχνότητα διάδοσής της και c η ταχύτητα του φωτός. Σύμφωνα με τα παραπάνω για σταθερή ταχύτητα διάδοσης στο μέσο διάδοσης, το μήκος κύματος και η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογα προκειμένου να διατηρηθεί το γινόμενο. Γενικά η περιοχή πέρα από τις υπέρυθρες ακτινοβολίες χαρακτηρίζονται με μεγάλα μήκη κύματος, χαμηλές συχνότητες και χαμηλή ικανότητα διείσδυσης. Αντίθετα η περιοχή πέρα από τις υπεριώδεις ακτινοβολίες χαρακτηρίζονται με μικρά μήκη κύματος, υψηλές συχνότητες και υψηλή ικανότητα διείσδυσης πράγμα που τις καθιστούν άκρως επιβλαβείς για τους έμβιους οργανισμούς. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

Η υπέρυθη ακτινοβολία καλύπτει μία πολύ μικρή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ξεκινάει από την περιοχή της ορατής ακτινοβολίας,

⁷⁰ https://blogs.sch.gr/ggkalios/files/2012/10/SpectruM_electromagnetic.png

περίπου $0,78\mu\text{m}$ κι εκτείνεται μέχρι τα $10\mu\text{m}$ περίπου. Η θερμογραφία αξιοποιεί τη ζώνη της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην πλευρά των μικρότερων μηκών κύματος, το σύνορο της ζώνης των υπέρυθρων βρίσκεται στο όριο του ορατού φάσματος, στο βαθύ κόκκινο. Στην πλευρά των μεγαλύτερων μηκών κύματος, η ζώνη των υπέρυθρων συγχωνεύεται με τα μήκη κύματος της ζώνης των μικροκυμάτων, της τάξης του χιλιοστού. Η μελέτη της υπέρυθρης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος διαιρείται σε πέντε υποπεριοχές: το *Εγγύς Υπέρυθρο* (*Near-IR*) από $0.75\mu\text{m}$ έως $1\mu\text{m}$, το *Κοντινό Υπέρυθρο* (*Short Wave-IR*) από $1\mu\text{m}$ έως $3\mu\text{m}$, το *Μέσο Υπέρυθρο* (*Mid Wave-IR*) από $3\mu\text{m}$ έως $5\mu\text{m}$, το *Απω Υπέρυθρο* (*Long Wave-IR*) από $8\mu\text{m}$ έως $14\mu\text{m}$ και το *Απώτερο Υπέρυθρο* (*Very Long Wave-IR*) από $14\mu\text{m}$ έως $1.000\mu\text{m}$, (Εικόνα 32). (FLIR Systems, 2018), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)



Εικόνα 32: Διαίρεση φασματικών ζωνών στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως συνάρτηση του μήκους κύματος.⁷¹

4.3.3 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

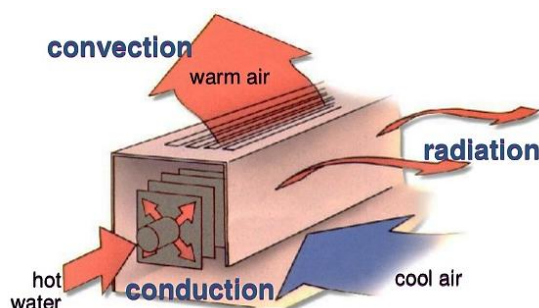
Σύμφωνα με τις παραπάνω ενότητες, η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Έπειτα, η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας

⁷¹ <https://www.opticsforhire.com/blog/2015/7/15/design-of-ir-lenses>

ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία. Επομένως καθώς μελετάμε την διάδοση και εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας, θα πρέπει να μελετηθούν οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας από το εσωτερικό του υλικού προς την επιφάνεια και το αντίστροφο. (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

Η μετάδοση θερμότητας ασχολείται με τη διερεύνηση των μηχανισμών με τους οποίους η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ των σωμάτων και η ποσοτικοποίηση αυτής της συναλλαγής. Σύμφωνα με διάφορους ορισμούς που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, η μετάδοση θερμότητας είναι η μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, όταν υφίσταται θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο μέσων ή συστημάτων, παρατηρείται μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007)

Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς καθώς και συνδυασμό αυτών. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται σε ακίνητο μέσο και ονομάζεται αγωγή. Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται στην μετάδοση θερμότητας μεταξύ μίας στερεής συνήθως επιφάνειας και ενός κινούμενου μέσου και ονομάζεται συναγωγή. Τέλος, ο τρίτος μηχανισμός δεν απαιτεί κάποιο μέσο μετάδοσης και στηρίζεται στην αρχή της εκπομπής θερμικής ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από οποιοδήποτε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας διάφορης της απόλυτης θερμοκρασίας των 0 kelvin . Στην *Εικόνα 33*, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι διάδοσης θερμότητας καθώς και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)



Εικόνα 33: Παρουσίαση των μεθόδων μετάδοσης θερμότητας κατά την λειτουργία εναλλάκτη θερμότητας.⁷²

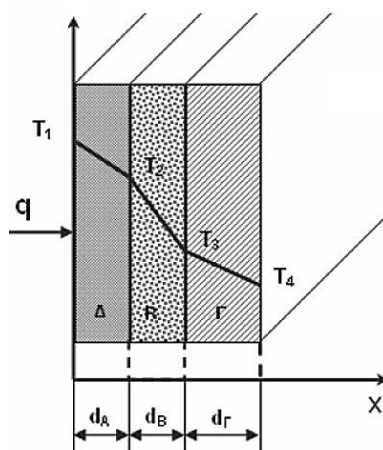
⁷² <https://nptel.ac.in/courses/103103027/pdf/mod1.pdf>

Αγωγή (Conduction): Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο, χωρίς να συνοδεύεται από αλλαγή φάσης καθώς και στην περίπτωση σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Ο ρυθμός μετάδοσης οφείλεται στην θερμοκρασιακή διαφορά των δύο σωμάτων και μεταβαίνει από μια μάζα υψηλής θερμοκρασίας σε μια μάζα χαμηλής θερμοκρασίας, (Σχήμα 22). Θεωρώντας μονοδιάστατη αγωγή, μόνιμες συνθήκες, ισότροπο υλικό και στερεό επίπεδο σώμα, ο υπολογισμός της μετάδοσης δίνεται από την Εξίσωση 4.3 του Fourier: (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

$$Q_i = \lambda \times A \times \frac{T_2 - T_1}{d} , \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

όπου Q είναι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας (W ή KJ/h), λ είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα ($W/m.K$), A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας (m^2), ΔT είναι η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο σωμάτων και d είναι το πάχος του υλικού ή η απόσταση των θερμικών σωμάτων σε επαφή. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ είναι η κυρίαρχη θερμική ιδιότητα που επηρεάζει την μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής. Αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μετάδοσης σε ένα αγωγίμο σώμα, ανά μονάδα επιφάνειας, για θερμοκρασιακή διαφορά $1^\circ C$. Καλοί θερμικοί μονωτές έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μικρότερο από $1 W.m/K$, την ίδια ώρα που υλικά με συντελεστή μεγαλύτερο του $100 W.m/K$. Γενικά η τιμή του συντελεστή θεωρείται σταθερή (αν και εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία εφαρμογής) και εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Ο συντελεστής αυτός επηρεάζει την κλίση της παραπάνω εξίσωσης μετάδοσης, δηλαδή των ρυθμό διάδοσης θερμότητας ή αλλιώς το χρόνο αποκατάστασης θερμικής ισορροπίας μεταξύ δύο θερμικών σωμάτων. Οι τιμές του συντελεστή για κάθε υλικό εντοπίζονται σε θερμοδυναμικούς πίνακες της βιβλιογραφίας. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)



Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση θερμικής μετάδοσης μέσω αγωγής ενός συνθέτου.⁷³

Συναγωγή (Convection): Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή συμβαίνει μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού σώματος και ενός ρευστού (υγρού ή αέριου σώματος) που έρχονται σε επαφή και έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Στην πραγματικότητα στα πλαίσια της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή λαμβάνουν χώρα δύο μηχανισμοί διάδοσης της θερμικής ενέργειας. Ο πρώτος περιλαμβάνει διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων, ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, (Σχήμα 23). Επιπλέον ανάλογα με τη μορφή της ροής και τη φύση της ή το αίτιο ανάπτυξης της, κατηγοριοποιεί το φαινόμενο της συναγωγής σε φυσική και εξαναγκασμένη. Αναλυτικά, στη περίπτωση που η ανάπτυξη της ροής οφείλεται σε φυσικά αίτια και ανήκουν στο σύστημα μελέτης της μετάδοσης αποκαλείται συναγωγή με φυσική κυκλοφορία. Αντίθετα όταν η ροή συντηρείται και αναπτύσσεται από εξωτερικό αίτιο, τότε η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Η σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, σύμφωνα με την Εξίσωση 4.4 : (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

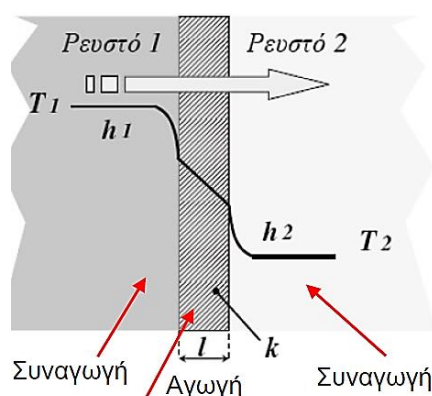
$$Q = h_m \times A \times (T_s - T_\infty), \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

όπου Q είναι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας (W ή KJ/h), h είναι η ειδική θερμική συναγωγιμότητα (W/m².K), A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας (m²), ΔT είναι η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο σωμάτων (K) με T_s

⁷³ [http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20\(1\).pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20(1).pdf)

η θερμοκρασία της επιφάνειας ή του ρευστού. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ενέργεια μετάδοσης είναι ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας. Η τιμή του εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που δομούν το σύστημα μετάδοσης όπως της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, το είδος της ροής, της ταχύτητας του ρευστού, το δυναμικό ιξώδους, της πυκνότητας του ρευστού, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση του ρευστού και των γεωμετρικών συνθηκών. Γενικά ο ακριβής προσδιορισμός του συνήθως απαιτεί γνώσεις ρευστομηχανικής, ενώ για τυπικές ροές η τιμή του προσδιορίζεται με χρήση πινάκων και διαγραμμάτων. Τέλος, σε διάφορες μηχανολογικές διατάξεις ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας εμπεριέχει τόσο μηχανισμούς συναγωγής όσο και αγωγής όπως τους εναλλάκτες θερμότητας. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)



Σχήμα 23: Σχηματική αναπαράσταση θερμικής μετάδοσης μέσω συναγωγής και αγωγής ενός αγωγού.⁷⁴

Ακτινοβολία (Radiation): Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί κάποιο μέσο προκειμένου να επιτευχθεί και υφίσταται όταν ένα σώμα βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθιστώντας την ιδιαίτερα σημαντική στα πλαίσια εφαρμογής της θερμογραφίας. Η ακτινοβολία δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων των σωμάτων που συμμετέχουν στην μετάδοση θερμότητας. Η μετάδοση αυτής της μεθόδου βασίζεται στην ικανότητα των σωμάτων να απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που δέχονται και να την επανεκπέμπουν, (Σχήμα 24). Η συμπεριφορά

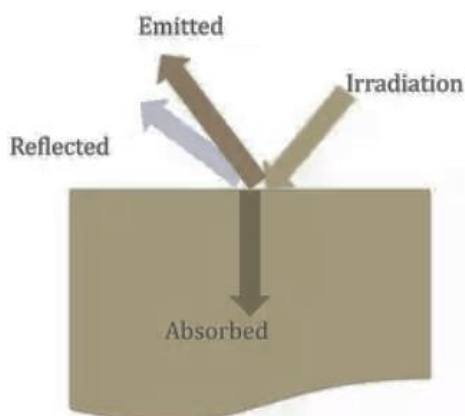
⁷⁴ [http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20\(1\).pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22034/Presentation_heat_transfer1%20(1).pdf)

των διάφορων σωμάτων κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια τους θα αναλυθεί περαιτέρω στην επόμενη ενότητα. Ο ρυθμός με τον οποία εκπέμπεται ενέργεια, με μορφή θερμότητας, από ένα σώμα που ακτινοβολεί υπολογίζεται μέσω της *Εξίσωσης 4.5* του *Stefan – Boltzmann*: (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

$$H = e \times A \times \sigma \times T^4, \quad (E\acute{\xi}. 4.5)$$

όπου **H** είναι το θερμικό ρεύμα λόγω ακτινοβολίας (W ή KJ/h), **e** είναι ο συντελεστής εκπομπής που αποτελεί καθαρό αριθμό, **A** είναι το εμβαδόν της επιφάνειας ακτινοβολίας (m²), **σ** είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann 5,7605 x 10⁻⁸ (W/m².K⁴) και **T** είναι η θερμοκρασία του σώματος που ακτινοβολεί. (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ποσότητα της ακτινοβολίας ενός θερμικού σώματος αποτελεί ο συντελεστής εκπομπής. Συνοπτικά, ο συντελεστής εκπομπής αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού και της επιφάνειας του. Βάση αυτού του αδιάστατου συντελεστή, χαρακτηρίζονται τα υλικά σε ιδανικά (μέλαν σώμα) και πραγματικά με τιμές από 0.10 έως 1. Ωστόσο, η τιμή του συντελεστή εκπομπής επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες που θα περιγράψουν στην επόμενη ενότητα. Γενικά, ο συντελεστής εκπομπής είναι ιδιαίτερα σημαντικός κατά την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας, όπου πραγματοποιείται προσπάθεια αύξησης της τιμής του κοντά στην μονάδα. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Yunus & Michel, 2011), (Νικολός, 2007), (Πανίδης, 2010)



Σχήμα 24: Σχηματική αναπαράσταση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός υλικού.⁷⁵

⁷⁵ https://www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-transfer-d_431.html

4.3.4 Μηχανισμοί ανταλλαγής ακτινοβολίας

Προκειμένου να κατανοηθεί και να αναλυθεί η υπέρυθη θερμογραφία και η αρχή λειτουργίας της, πρέπει πρώτα να κατανοηθεί η συμπεριφορά της ακτινοβολίας κατά την πρόσπτωσή της σε διάφορες επιφάνειες σωμάτων. Ειδικότερα θα πρέπει να γίνουν πλήρως κατανοητές έννοιες που σχετίζονται με την ακτινοβολία όπως προσπίπτουσα, εκπεμπόμενη και διεισδύουσα δέσμη καθώς και η έννοια του μέλανος σώματος. (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001), (Πανίδης, 2010)

Συνήθως κατά την ανταλλαγή ακτινοβολίας λαμβάνουν χώρα τέσσερα θερμικά φαινόμενα, η **μετάδοση** θερμότητας μεταξύ των θερμικών σωμάτων, η **απορρόφηση** όπου προσλαμβάνεται ενέργεια και διατηρείται εσωτερικά στο υλικό, η **αντανάκλαση** όπου η ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού ξαναφεύγει χωρίς αλληλεπίδραση με αυτό και τέλος η **εκπομπή** όπου ένα τμήμα της ενέργειας απορρόφησης εκπέμπεται σε μορφή ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Τα παραπάνω φαινόμενα επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά του υλικού σώματος καθώς και την θερμοκρασιακή μεταβολή τόσο εσωτερικά όσο και στην επιφάνεια. (Πανίδης, 2010)

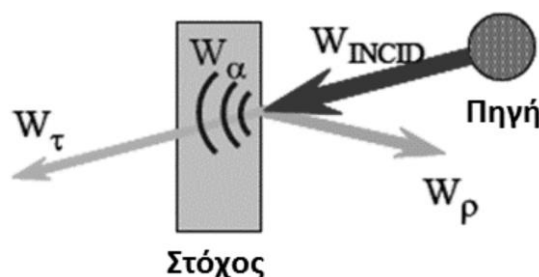
Προσπίπτουσα ακτινοβολία: Ο ορισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αναφέρεται στην ακτινοβολία που χτυπάει σε ένα σώμα από το εξωτερικό περιβάλλον του. Θεωρητικά κατά την πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός σώματος, ενέργειας W_{INCID} , τρία φαινόμενα μπορούν να συμβούν. Ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα απορροφηθεί από το ίδιο το σώμα, ενέργειας W_A , ένα άλλο μέρος θα ανακλαστεί χωρίς να αλληλοεπιδράσει με το εσωτερικό του, ενέργειας W_P , και τέλος ένα τμήμα θα περάσει στο εσωτερικό του διαπερνώντας το σώμα, ενέργειας W_T . (Lixin Gao, et al., 2010), (Πανίδης, 2010)

Το παραπάνω φαινόμενο σε συνδυασμό του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την *Εξίσωση 4.6* : (Maldague, 2001), (Πανίδης, 2010)

$$W_A + W_P + W_T = W_{\text{INCID}} = 100\% \quad (\text{Εξ. 4.6})$$

Ο ακριβής προσδιορισμός των ποσοστών ενέργειας που μεταδίδεται, αντανακλάται και απορροφάται από ένα σώμα εξαρτάται από τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών που αναφέρθηκαν στην αρχή της παρούσας ενότητας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι κάθε αντικείμενο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη ικανότητα να

απορροφά (A) , να αντανακλά (P) και να μεταδίδει (T) ενέργεια, (Σχήμα 25). Το άθροισμα των τριών αυτών συντελεστών ενός υλικού ισούται με τη μονάδα σε αντιστοιχία με τα ποσοστά ενέργειας τις παραπάνω εξίσωσης. (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Maldague, 2001), (Πανίδης, 2010)



Σχήμα 25: Αναπαράσταση προσπίπτουσας δέσμης στην επιφάνεια ενός σώματος και ανάδειξη των επιμέρους μηχανισμών ακτινοβολίας που λαμβάνουν χώρα.⁷⁶

Εκπεμπόμενη ακτινοβολία: Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι όλη η ακτινοβολία που απομακρύνεται από την επιφάνεια ενός αντικειμένου άσχετα με της αρχικές εξωτερικές πηγές της. Η προσπίπτουσα και η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι διαφορετικές σε ένα πολύ σημαντικό σημείο. Στα πλαίσια μελέτης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην προέλευση της ενέργειας, αρκούσε η αναφορά σε μία εξωτερική πηγή του συστήματος αναφοράς. Αντίθετα, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προέρχεται τόσο από το ίδιο θερμικό σώμα καθώς και από τις ανακλάσεις στην επιφάνεια του άλλων πηγών ακτινοβολίας. Ωστόσο στα πλαίσια εφαρμογής της υπέρυθρης ακτινοβολίας και του ελέγχου μέσω αυτής των θερμικών διακυμάνσεων ενός υλικού, απαιτείται μείωση των εξωτερικών επιδράσεων προκειμένου τα αποτελέσματα της θερμογραφίας να αντιστοιχούν στις πραγματικές θερμικές ροές του υλικού. Λόγω του παραπάνω πρέπει να αναλυθεί η έννοια της εκπομπής ενέργειας ή αλλιώς η ικανότητα εκπομπής ενός υλικού. (Maldague, 2001)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κάθε θερμικό σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η συχνότητα ή το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος. Ωστόσο, λόγω ατελειών της εσωτερικής δομής ή της φύσης της επιφάνειας του σώματος το ποσοστό εκπεμπόμενης ενέργειας δεν αντανακλά την πλήρη θερμοκρασιακή κατάσταση του. (Lixin Gao, et al., 2010)

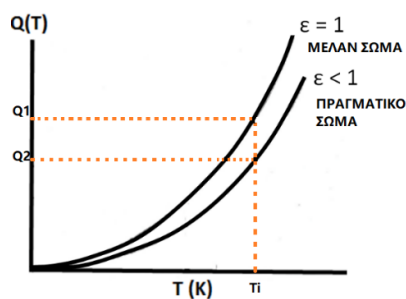
⁷⁶ <https://clubtechnical.com/absorptivity-reflectivity-transmissivity>

Το παραπάνω φαινόμενο περιγράφεται μέσω του συντελεστή εκπομπής « ε » που εμφανίζεται στην Εξίσωση 4.7 των Stefan – Boltzmann: (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001)

$$W(T) = \varepsilon(\lambda, T, \theta, \varphi) \times \sigma \times T^4, \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

όπου W είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια (W/m^2), ε είναι ο συντελεστής εκπομπής ή ικανότητα εκπομπής ή εκπεμπικότητα του υλικού (αδιάστατος αριθμός), σ η σταθερά Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$) και T η θερμοκρασία του σώματος (K). Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, ο συντελεστής εκπομπής επηρεάζεται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία και τη γωνία εκπεμπόμενης δέσμης.

Συντελεστής εκπομπής: Αναλυτικά ο συντελεστής εκπομπής ποσοτικοποιεί την αποδοτικότητα μίας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα όταν σε αυτό προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι τιμές του αδιάστατου παράγοντα είναι μεταξύ $\{ 0,1 \}$. Όταν ένα σώμα χαρακτηρίζεται με συντελεστή εκπομπής ίση με τη μονάδα τότε συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα. Αντίστοιχα σώματα με συντελεστή εκπομπής ίση με το μηδέν θεωρούνται ως πλήρως απορροφητές θερμότητας χωρίς να αφήνουν τη θερμότητα να διαφύγει από την επιφάνειά τους. Επομένως, ο συντελεστής εκπομπής ενός σώματος προκύπτει ως ο λόγος της θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο πεπερασμένης θερμοκρασίας T προς τη θερμική ενέργεια που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα αντίστοιχης θερμοκρασίας T , (Σχήμα 26). Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω η θερμοκρασία της επιφάνειας ενός θερμικού σώματος μπορεί να υπολογιστεί αν μετρηθεί η εκπεμπόμενη θερμική ενέργεια και εφόσον έχει προσδιοριστεί σωστά ο συντελεστής εκπομπής. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004)



Σχήμα 26: Ανάδειξη της σχέσης ανάμεσα στη θερμοκρασία, την εκπεμπόμενη υπέρυθη ακτινοβολία και τον συντελεστή εκπομπής.⁷⁷

⁷⁷https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3599/2/00_master_document-KOY.pdf

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, ένα θερμικό σώμα σταθερής θερμοκρασίας T_i , αν συμπεριφερόταν ως μέλαν σώμα θα αντιστοιχούσε σε εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας Q_1 ενώ ως πραγματικό σώμα αντιστοιχεί σε μικρότερες τιμές θερμικής ακτινοβολίας. Αντίστοιχα, μετρώντας μία θερμική ροή, μέσω υπέρυθρης θερμογραφίας, ενός σώματος όπου θεωρούμε πλήρη εκπομπή (συμπεριφορά μέλαν σώματος) η θερμοκρασία που υπολογίζουμε είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πραγματική. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Lixin Gao, et al., 2010)

Συνοψίζοντας, ο συντελεστής εκπομπής δεν σχετίζεται με τη θερμοκρασία του αντικείμενου, αλλά με την ενέργεια της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το αντικείμενο. Ο συντελεστής εκπομπής επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα σχετικά με τη θερμοκρασία και την ενέργεια που εκπέμπει ένα θερμό αντικείμενο. Ωστόσο λόγω του ότι επηρεάζει όλο το εύρος των θερμοκρασιών, δεν ενδιαφέρει τόσο η επιλογή κατάλληλης τιμής κατά τη μελέτη των μεταβολών και διακυμάνσεων των θερμοκρασιών. Αντίθετα, επηρεάζει σημαντικά τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των θερμοκρασιών άρα και τις αντίστοιχες ενέργειες εκπομπής. (FLIR Systems, 2018), (Maldague, 2001)

Στόχος λοιπόν κατά την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι η αύξηση του συντελεστή εκπομπής του υπό μελέτη θερμικού σώματος. Πέρα από την φύση του υλικού ο συντελεστής εκπομπής επηρεάζεται σημαντικά από την κατάσταση της επιφάνειας του. Χαρακτηριστικά λειασμένες μεταλλικές επιφάνειες έχουν μικρή απορροφητικότητα και έτσι έχουν μικρό συντελεστή εκπομπής, περίπου 5% εκείνου 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 εκπομπής κατά 5, 10 ή 20% σε σύγκριση με τον συντελεστή εκπομπής του μέλανος σώματος. Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή εκπομπής. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (FLIR Systems, 2018), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004)

Πίνακας 13: Συνηθέστεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή εκπομπής.^{78,79}

Παράγοντας	Αποτέλεσμα στο συντελεστή εκπομπής	Παράγοντας	Αποτέλεσμα στο συντελεστή εκπομπής
Υλικό	α) αποτελεί ηλεκτρομαγνητική φυσική ιδιότητα, β) εξαρτάται από το χρώμα	Ασυνέχειες (κοιλότητες, οπές & γωνίες)	α) ύπαρξη ασυνεχειών στην επιφάνεια οδηγεί σε αύξηση τιμών, β) αύξηση του βάθους οπών οδηγεί σε αύξηση τιμών
Επιφάνεια	α) εξαρτάται από την κατάσταση και τη τραχύτητα της επιφάνειας, β) ο βαθμός διάβρωσης της επιφάνειας	Γωνίες μέτρησης	α) κάθετη γωνία πρόσπτωσης έως περίπου τις 50° οδηγεί σε σταθερές τιμές, β) μετά από τις 60° μειώνεται δραστικά, γ) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή θερμογραφίας υπό κλίση λόγω αλλαγής απόστασης σώματος
Θερμοκρασία	σε μεταλλικά στοιχεία, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της τιμής του συντελεστή εκπομπής		

Οι συνηθέστεροι τρόποι αντιμετώπισης των χαμηλών τιμών του συντελεστή εκπομπής είναι ο καθαρισμός της επιφάνειας, καθιστώντας έναν χαμηλότερο αλλά ομοιόμορφο συντελεστή εκπομπής, καθώς και εφαρμογή μαύρης βαφής εξωτερικά. Η κάλυψη μεταλλικών επιφανειών πριν τη λήψη αποτελεσμάτων με χρώμα υψηλού συντελεστή εκπομπής, αυξάνει την τιμή του θεαματικά πλησιάζοντας 0.9 – 0.98.

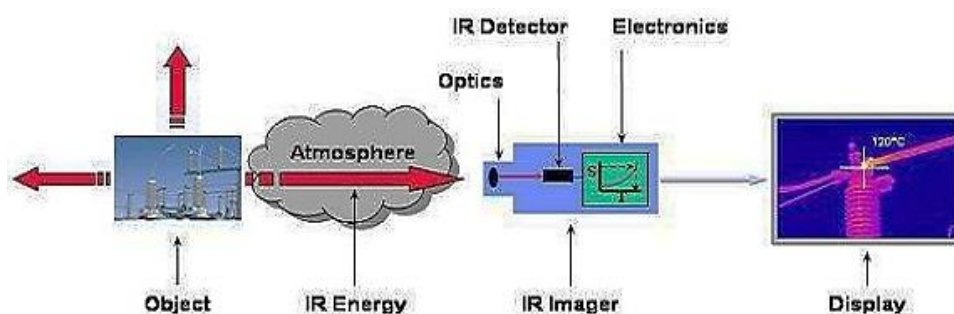
4.3.5 Τεχνικές θερμογραφικού ελέγχου

Σύμφωνα με όσα περιεγράφησαν στις παραπάνω ενότητες, η θερμογραφία αποτελεί μία μη καταστροφική τεχνική που εφαρμόζεται για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας ενός μηχανικού στοιχείου κάτω από την επιφάνεια του. Ο θερμογραφικός έλεγχος βασίζεται στη μέτρηση και στην καταγραφή της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, (Σχήμα 27). Όπως δηλώνει και η ονομασία της τεχνικής θερμογραφίας υπέρυθρου, χαρτογραφεί την κατανομή (- γραφία) της θερμοκρασίας (θερμο -) στην επιφάνεια του υπό εξέταση στοιχείου, καθιστώντας έτσι

⁷⁸https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3599/2/00_master_document-KOY.pdf

⁷⁹https://books.google.gr/books/about/Theory_and_Practice_of_Infrared_Technology.html?id=ts9RAAAAMAAJ&source=kp_cover&redir_esc=y

δυνατό τον εντοπισμό μη φυσιολογικών θερμοκρασιακών βαθμίδων, που με τη σειρά τους αποκαλύπτουν την ύπαρξη επιφανειακών ή/και υπό επιφανειακών ανωμαλιών. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (FLIR Systems, 2018), (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)



Σχήμα 27: Τυπική αναπαράσταση της διάταξης θερμογραφίας υπερύθρου.⁸⁰

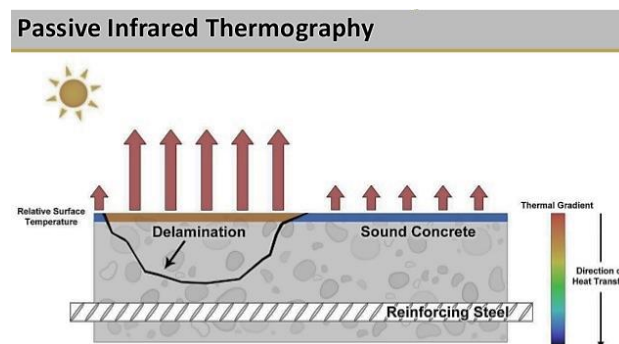
Το κύριο πλεονέκτημα της θερμογραφίας έναντι των άλλων ΜΚΕ έγκειται στη δυνατότητα επιθεώρησης μεγάλων επιφανειών με γρήγορο και ασφαλή τρόπο χωρίς άμεση επαφή με το στοιχείο και χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει πρόσβαση και στις δύο πλευρές του υπό ελέγχου αντικειμένου. Πέρα των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, η θερμογραφία υπερύθρου περιορίζεται στον εντοπισμό σχετικά ρηχών ατελειών (σε βάθος μερικών χιλιοστών κάτω από την επιφάνεια) επειδή επηρεάζεται από τη διάχυση της θερμότητας στον όγκο του υλικού και άλλα φαινόμενα απόσβεσης του σήματος στο εσωτερικό του στοιχείου. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

Η θερμογραφία υπερύθρου μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική. Αυτοί οι δυο τύποι θερμογραφικού ελέγχου χρησιμοποιούνται ανάλογα με το εάν το υπό έλεγχο αντικείμενο βρίσκεται ή όχι σε θερμική ισορροπία. Η κάθε μία τεχνική εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην συνέχεια θα περιγραφούν αναλυτικά οι δύο τεχνικές θερμογραφίας καθώς και οι υποκατηγορίες που τις διέπουν. (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016), (Σωτηρόπουλος, 2012)

⁸⁰ <https://www.slideshare.net/aakashjain2025/infrared-thermography-46935717>

4.3.5.1 Παθητική θερμογραφία υπερύθρου

Η παθητική θερμογραφία υπερύθρου στηρίζεται στους θερμοδυναμικούς νόμους, διατήρηση της ενέργειας και τη συνεχή μετατροπή της σε διάφορες μορφές. Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία του μηχανικού στοιχείου ποσότητες ενέργειας μετατρέπονται σε θερμικά κύματα τα οποία αναπτύσσονται στο εσωτερικό του υλικού, (Εικόνα 34). Τα παραπάνω θερμικά κύματα αλληλοεπιδρούν με την μικροδομή του στοιχείου καθώς και με τις πιθανές ατέλειες, αναπτύσσοντας ένα ανομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο στην εξωτερική επιφάνεια του. Εφόσον οι θερμοκρασιακές διαφορές είναι ανιχνεύσιμες από μία κάμερα υπερύθρου, συνήθως $\Delta T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, μπορούν να ανιχνευτούν οι πιθανές ανωμαλίες της μικροδομής ή των ατελειών κάτω από την επιφάνεια του στοιχείου. Γενικά οι ασυνήθιστες, μη-φυσιολογικές θερμοκρασιακές διαφορές αποτελούν ένδειξη ύπαρξης κάποιου προβλήματος. (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016)



Εικόνα 34: Εφαρμογή παθητικής θερμογραφίας κατά τον έλεγχο οπλισμένου σκυροδέματος⁸¹

Η παθητική προσέγγιση θερμογραφικού ελέγχου εφαρμόζεται συνήθως σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο σώμα, λόγω ενδογενούς παραγωγής θερμικής ενέργειας, βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία από το περιβάλλον καθώς και σε περιπτώσεις που η μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί παράμετρο για την αξιολόγηση της υπάρχουσας κατάστασης ή της σωστής λειτουργίας ενός αντικειμένου. Ενδεικτικά, η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση βιομηχανικών διεργασιών, στην εξέταση ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού εξοπλισμού, στην εξέταση κτηριακής ακεραιότητας καθώς και στην διάγνωση ιατρικών παθήσεων και θεμάτων υγείας. Στον

⁸¹ <https://www.slideshare.net/JasonCattelino/condition-assessment-of-concrete-bridge-elements-using-active-ir-thermography>

Πίνακα 14, παρουσιάζονται ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της παθητικής θερμογραφίας. (Παυλόπουλος, 2016)

Πίνακας 14: Παρουσίαση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων παθητικής θερμογραφίας.^{82,83}

1. Έγκαιρη ανίχνευση δυσλειτουργιών και περιπτώσεων φθοράς σε εγκαταστάσεις και κατασκευές. 2. Ελάχιστες απαιτήσεις για την προετοιμασία και εκτέλεση μιας μέτρησης. 3. Ανάκτηση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο συνήθως κατά την πλήρη λειτουργία του υπό εξέταση στόχου.	1. Επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών (θερμοκρασία περιβάλλοντος, βροχή, υγρασία). 2. Περιορισμοί σε περιπτώσεις θερμογράφησης επιφανειών αποτελούμενων από υλικά με διαφορετικούς συντελεστές εκπομπής. 3. Αδυναμία ανάπτυξης ανιχνεύσιμων θερμοκρασιακών διαφορών κάτω από κανονικές συνθήκες σε ορισμένες διατάξεις.
--	---

4.3.5.2 Ενεργητική θερμογραφία υπερύθρου

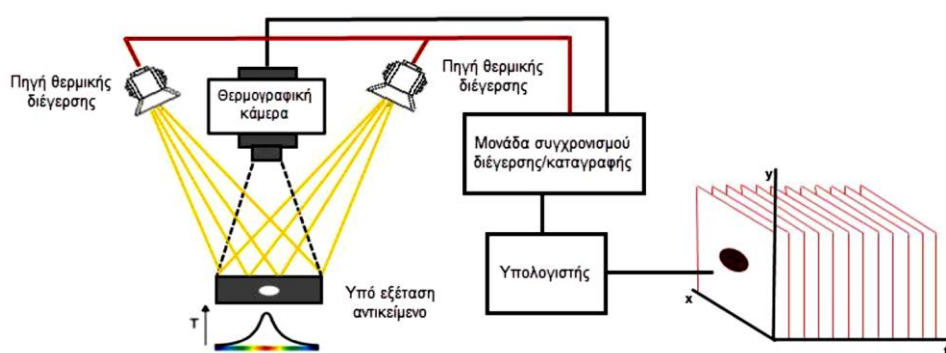
Στις περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασιακές διαφορές που περιεγράφησαν στην ενότητα της παθητικής θερμογραφίας ενός μηχανικού στοιχείου είναι αρκετά μικρές και μη ανιχνεύσιμες από τις θερμογραφικές κάμερες, εφαρμόζεται ενεργητική θερμογραφία υπερύθρου. Συνεπώς η ενεργητική θερμογραφία εστιάζει στην απαίτηση εξωτερικής παρεχόμενης ενέργειας σε διάφορες μορφές προκειμένου να αναπτυχθεί ένα ανιχνεύσιμο θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια του στοιχείου, (Εικόνα 35). Στοιχεία όπως η μορφή της ενεργειακής διέγερσης καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος διέγερσης εξαρτώνται από το είδος του υλικού και τις θερμικές ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν. (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001), (Παυλόπουλος, 2016)

Συνοπτικά η εκτέλεση του ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου μπορεί να περιγραφεί ως εξής. Αρχικά, το υπό εξέταση σώμα διεγείρεται θερμικά με τη χρήση μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας και κατά τη διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του γίνεται καταγραφή της χωροχρονικής μεταβολής της επιφανειακής θερμοκρασιακής κατανομής σε μία ακολουθία θερμικών εικόνων. Η ανακτώμενη ακολουθία μπορεί να οπτικοποιηθεί σε ένα μόνιτορ, ενώ η ερμηνεία και η ανάλυση των

⁸²https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3599/2/00_master_document-KOY.pdf

⁸³https://books.google.gr/books/about/Theory_and_Practice_of_Infrared_Technolo.html?id=ts9RAA-AAMAAJ&source=kp_cover&redir_esc=y

αποτελεσμάτων βασίζεται στον εντοπισμό θερμοκρασιακών διαφορών στην υπό εξέταση επιφάνεια, οι οποίες αποδίδονται στην παρουσία θερμικών ανομοιογενειών στο εσωτερικό του υλικού που επηρεάζουν τον ρυθμό διάχυσης της θερμότητας στις συγκεκριμένες περιοχές. Στην περίπτωση ενός ομοιογενούς μέσου η διάχυση της θερμότητας έχει σταθερό ρυθμό, ενώ στην περίπτωση ύπαρξης μιας εσωτερικής ατέλειας οι διαφορετικές θερμικές της ιδιότητες μπορούν να επιβραδύνουν ή να επιταχύνουν τη διάχυση, με αποτέλεσμα την τοπική μεταβολή του αντίστοιχου ρυθμού και την ταυτόχρονη ανάπτυξη θερμοκρασιακών μεταβολών στην επιφάνεια. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Παυλόπουλος, 2016)



Εικόνα 35: Σχηματική απεικόνιση εκτέλεσης ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου.⁸⁴

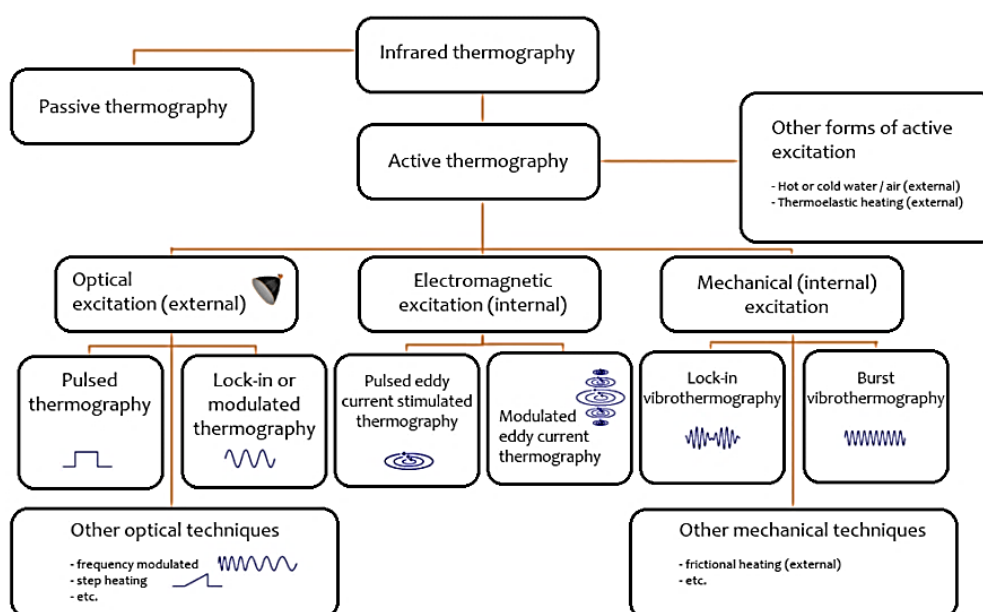
Προκειμένου να επιτευχθεί η ενεργειακή θερμική διέγερση έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέσα παραγωγής ενέργειας όπως οπτικά μέσα, πηγές διάδοσης μηχανικής ενέργειας, πηγές ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης ή άλλα μέσα όπως διατάξεις διάχυσης ζεστού ή κρύου αέρα. Σε γενικές γραμμές, τα εξωτερικά ερεθίσματα μπορεί να είναι οπτικά, μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Παυλόπουλος, 2016)

Αναλυτικά, η οπτική διέγερση παράγεται από εξωτερικές πηγές, όπως λαμπτήρες, δημιουργεί θερμότητα στην επιφάνεια του υλικού η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται ως θερμικό κύμα μέσω του δοκιμίου στις υποεπιφανειακές ανωμαλίες και τέλος επιστρέφει πάλι στην επιφάνεια, όπου ανιχνεύεται από τη θερμική κάμερα. Αντίθετα, η μηχανική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ως ένας εσωτερικός τρόπος διέγερσης καθώς η θερμότητα παράγεται στη διεπιφάνεια μεταξύ ατέλειας και υλικού και στη συνέχεια διαδίδεται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Τέλος, κατά την ηλεκτρομαγνητική διέγερση, δημιουργούνται δινορεύματα σε αγώγιμο δοκίμιο με τη

⁸⁴ https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6170/2/01_chapter_2.pdf

βοήθεια εξωτερικού πηγίου, τα οποία στη συνέχεια παράγουν εσωτερική θερμότητα στο υλικό. (Maldague, 2001)

Βάση των παραπάνω, η ενεργητική θερμογραφία υπερύθρου κατηγοριοποιείται σε θερμογραφία παλμού πλάτους, θερμογραφία τύπου *Lock-in*, θερμογραφία δονήσεων και θερμογραφία ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης ή δινορρευσμάτων, (Σχήμα 28). Παράλληλα, στον ενεργητικό θερμογραφικό έλεγχο έχουν υιοθετηθεί δύο κύριες διαδικασίες θερμικής διέγερσης, αυτή της *παλμικής (pulsed)* και αυτή της *περιοδικής (modulated)* διέγερσης αντίστοιχα. Παράλληλα, η διαδικασία της *σταδιακής διέγερσης (stepped)* έχει επίσης προταθεί σε περιπτώσεις ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου με οπτικά μέσα και αναφέρεται κυρίως στη διάδοση ενός θερμικού παλμού μεγάλης χρονικής διάρκειας. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement, 2004), (Maldague, 2001)



Σχήμα 28: Συνοπτική παρουσίαση τεχνικών ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου ως συνάρτηση της πηγής διέγερσης.⁸⁵

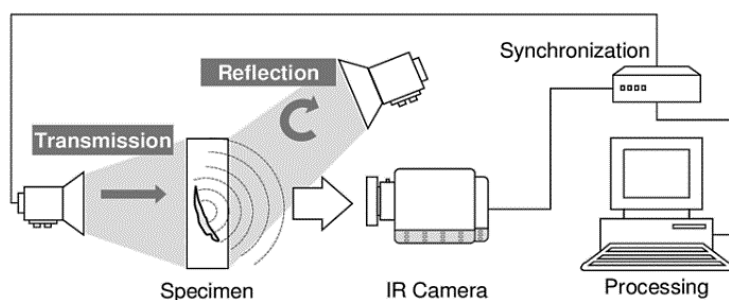
4.3.5.3 Θερμογραφία παλμού (*Pulsed Thermography*)

Η θερμογραφία παλμού αποτελεί μία από τις συνηθέστερες διατάξεις ενεργητικής θερμογραφίας. Η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στην επιβολή μίας σύντομης χρονικά θερμικής διέγερσης με μορφή παλμού προκειμένου να αναπτυχθεί

⁸⁵ <https://www.workswell-thermal-camera.com/workswell-active-thermoinspector/>

μία ομοιόμορφη αρχική κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία στη συνέχεια λόγω φαινομένων διάχυσης μεταβάλλεται στις διάφορες θερμοδυναμικές περιοχές αποκαλύπτοντας πιθανές ανομοιογένειες και ατέλειες στο εσωτερικό της δομής του, (Σχήμα 29). Ο παλμός αυτός μπορεί να δημιουργηθεί από λαμπτήρες αλογόνου, δέσμη λέιζερ, αέρα ή δέσμη νερού. Ο χρόνος εφαρμογής της εξωτερικής θερμικής διέγερσης περιλαμβάνει τιμές από μερικά *ms* για υλικά υψηλής αγωγιμότητας μέχρι μερικά δευτερόλεπτα για υλικά χαμηλής αγωγιμότητας. Συνοπτικά, η ανάλυση των ανακτώμενων δεδομένων βασίζεται στο γεγονός ότι η ύπαρξη υποεπιφανειακών ατελειών μεταβάλλει τοπικά τις θερμικές ιδιότητες του εξεταζόμενου στόχου με αποτέλεσμα ο ρυθμός επιφανειακής ψύξης στις περιοχές αναφοράς και στις περιοχές ύπαρξης ατελειών να είναι διαφορετικός. (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001)

Στα πλαίσια εφαρμογής της θερμογραφίας παλμού, υπάρχει η δυνατότητα δύο τυπικών διατάξεων αυτή της ανάκλασης και αυτή της μετάδοσης. Σύμφωνα με την πρώτη διάταξη, η πηγή θερμικής διέγερσης και η υπέρυθρη κάμερα είναι τοποθετημένα μπροστά από το δοκίμιο και η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη θερμότητα που ανακλάται. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τη δεύτερη διάταξη, η θερμική κάμερα ανιχνεύει τη μετάδοση της θερμότητας μέσω του δοκιμίου, καθώς η πηγή διέγερσης και η κάμερα είναι τοποθετημένες εκατέρωθεν του δοκιμίου. (Lixin Gao, et al., 2010), (Maldague, 2001)



Σχήμα 29: Σχηματική αναπαράσταση ενεργητικής θερμογραφίας παλμού. 86

Μερικές από τις εφαρμογές του παλμικού θερμογραφικού ελέγχου αφορούν την εξέταση επιφανειών σε κελύφη αεροσκαφών, τον εντοπισμό διαφορετικών τύπων φθοράς σε σύνθετα υλικά και την παρακολούθηση φαινομένων διάβρωσης σε μεταλλικά υλικά. Η παλμική θερμογραφία έχει επίσης προταθεί για τον εντοπισμό υγρασίας σε δομικά υλικά και την εξέταση έργων τέχνης και αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Τέλος, θερμογραφία παλμού έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό

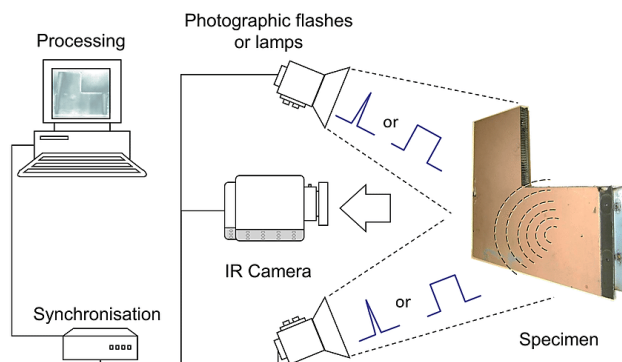
⁸⁶ <https://www.picswe.com/pics/pulsed-thermographic-aa.html>

πορώδους, χαρακτηρισμού του βάθους και μεγέθους ατέλειας καθώς και θερμικών ιδιοτήτων ενός υλικού. (Maldague, 2001)

4.3.5.4 Διαμορφωμένη Θερμογραφία (*Lock-in Thermography*)

Η διαμορφωμένη θερμογραφία η οποία είναι γνωστή και ως θερμογραφία περιοδικών κυμάτων, χρησιμοποιεί παρόμοια πειραματική διάταξη με αυτήν του παλμικού θερμογραφικού ελέγχου, αλλά στην προκειμένη περίπτωση η θερμική διέγερση λαμβάνει χώρα με τη διάδοση περιοδικών θερμικών κυμάτων διαμορφωμένης συχνότητας και όχι με τη διάδοση ενός απότομου θερμικού παλμού, (Σχήμα 30). Η περιοδική διέγερση είναι συνήθως ημιτονοειδής, παρόλο που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλες περιοδικές μορφές. (Lixin Gao, et al., 2010)

Συγκεκριμένα, 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*, μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου. Οι εσωτερικές ατέλειες ενεργούν ως εμπόδια στη διάδοση της θερμότητας, και προκαλούν μεταβολές στο πλάτος και καθυστέρηση φάσης του σήματος απόκρισης στην επιφάνεια.



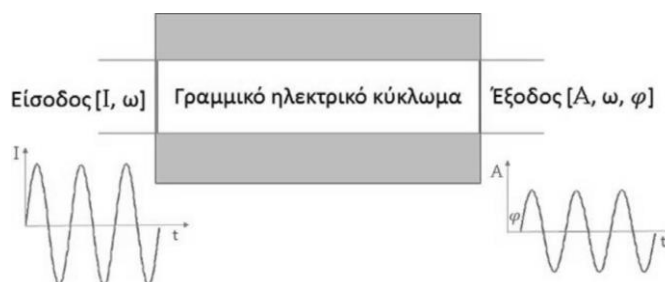
Σχήμα 30: Σχηματική αναπαράσταση ενεργητικής θερμογραφίας διαμορφωμένου παλμού.⁸⁷

Χαρακτηριστικό του ελέγχου με την τεχνική της διαμορφωμένης θερμογραφίας είναι η απαραίτητη παρατήρηση τόσο του σήματος εξόδου όσο και του σήματος εισόδου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων και να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των διακυμάνσεων πλάτους και φάσης του σήματος εξόδου σε σχέση με το πλάτος και τη φάση του σήματος εισόδου. Οι συνηθέστερες τεχνικές που εφαρμόζονται για την εξαγωγή της πληροφορίας πλάτους και φάσης

⁸⁷ <https://www.picswe.com/pics/pulsed-thermographic-aa.html>

περιλαμβάνουν μαθηματικά μοντέλα και μετασχηματισμούς όπως αυτά του Fourier ώστε να προκύψουν εικόνες φάσης (*phasegrams*) και πλάτους (*ampligrams*). (Maldague, 2001)

Σύμφωνα με το γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα, ένα ημιτονοειδές σήμα εισέρχεται στο κύκλωμα με χαρακτηριστική ημιτονοειδή είσοδο και γωνιακή συχνότητα, αλληλοεπιδρά με αυτό και επιφέρει ημιτονοειδές σήμα εξόδου σταθερής συχνότητας αλλά μεταβλητού πλάτους και φάσης. Στην εφαρμογή της θερμογραφίας *Lock-in* το γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα αντικαθίσταται από το δοκίμιο ή στοιχείο παρατήρησης, επηρεάζοντας τα στοιχεία του σήματος εισόδου, (Σχήμα 31). Αναλυτικά, όταν το κύμα εισόδου συναντά ασυνέχειες (ατέλειες), δηλαδή περιοχές με μη ομογενείς θερμοφυσικές ιδιότητες σε σχέση με το περιβάλλον υλικό, το κύμα εισόδου ανακλάται μερικώς. Το ανακλώμενο τμήμα του κύματος αλληλοεπιδρά με το εισερχόμενο κύμα εισόδου στην επιφάνεια του αντικειμένου, προκαλώντας ένα μοτίβο κατανομής της τοπικής επιφανειακής θερμοκρασίας, η οποία πάλλεται με την ίδια συχνότητα όπως το θερμικό κύμα. Στόχος επομένως της θερμογραφίας είναι η εκτίμηση και αξιολόγηση των ανακτώμενων σημάτων εξόδου μέσω της διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του στοιχείου και καταγράφεται μέσω ειδικών θερμικών καμερών. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015), (Maldague, 2001)



Σχήμα 31: Ερμηνεία της θερμογραφίας *lock-in* χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.⁸⁸

Βασικό πλεονέκτημα του διαμορφωμένου θερμογραφικού ελέγχου *Lock-in* είναι το γεγονός ότι ποσοτικές πληροφορίες για το βάθος μιας υποεπιφανειακής περιοχής ενδιαφέροντος μπορούν να ανακτηθούν απευθείας από τις πειραματικές μετρήσεις, καθώς το μήκος διάχυσης του θερμικού κύματος συνδέεται άμεσα με τη συχνότητά του. Επίσης, η διαδικασία θερμικής διέγερσης στη διαμορφωμένη

⁸⁸https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/3599/2/00_master_document-KOY.pdf

θερμογραφία μπορεί να εκτελεστεί με τη χρήση πηγών περιορισμένης ισχύος, περιορίζοντας σημαντικά την επίδραση τους στη δομή των στοιχείων μελέτης. Βέβαια, ο έλεγχος με την τεχνική της διαμορφωμένης θερμογραφίας απαιτεί μια σειρά μετρήσεων, μεταβαλλόντας κάθε φορά τη γωνιακή συχνότητα των διαδιδόμενων θερμικών κυμάτων. Το παραπάνω, κάνει τη διαμορφωμένη θερμογραφία μια χρονοβόρα πειραματική διαδικασία. Συνηθέστερες εφαρμογές της θερμογραφίας *lock-in* περιλαμβάνουν: προσδιορισμό πάχους των επικαλύψεων, ανίχνευση αποκολλήσεων μεταξύ στρώσεων σε σύνθετα υλικά, ανίχνευση διάβρωσης, ανίχνευση ρωγμών, έλεγχο μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς καθώς και ο ταχύς προσδιορισμός του ορίου μηχανικής κόπωσης προηγμένων τεχνολογικών υλικών. (Ματίκας & Αγγέλης, 2015)

Μέρος II : Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 5º: Πειραματική Διαδικασία

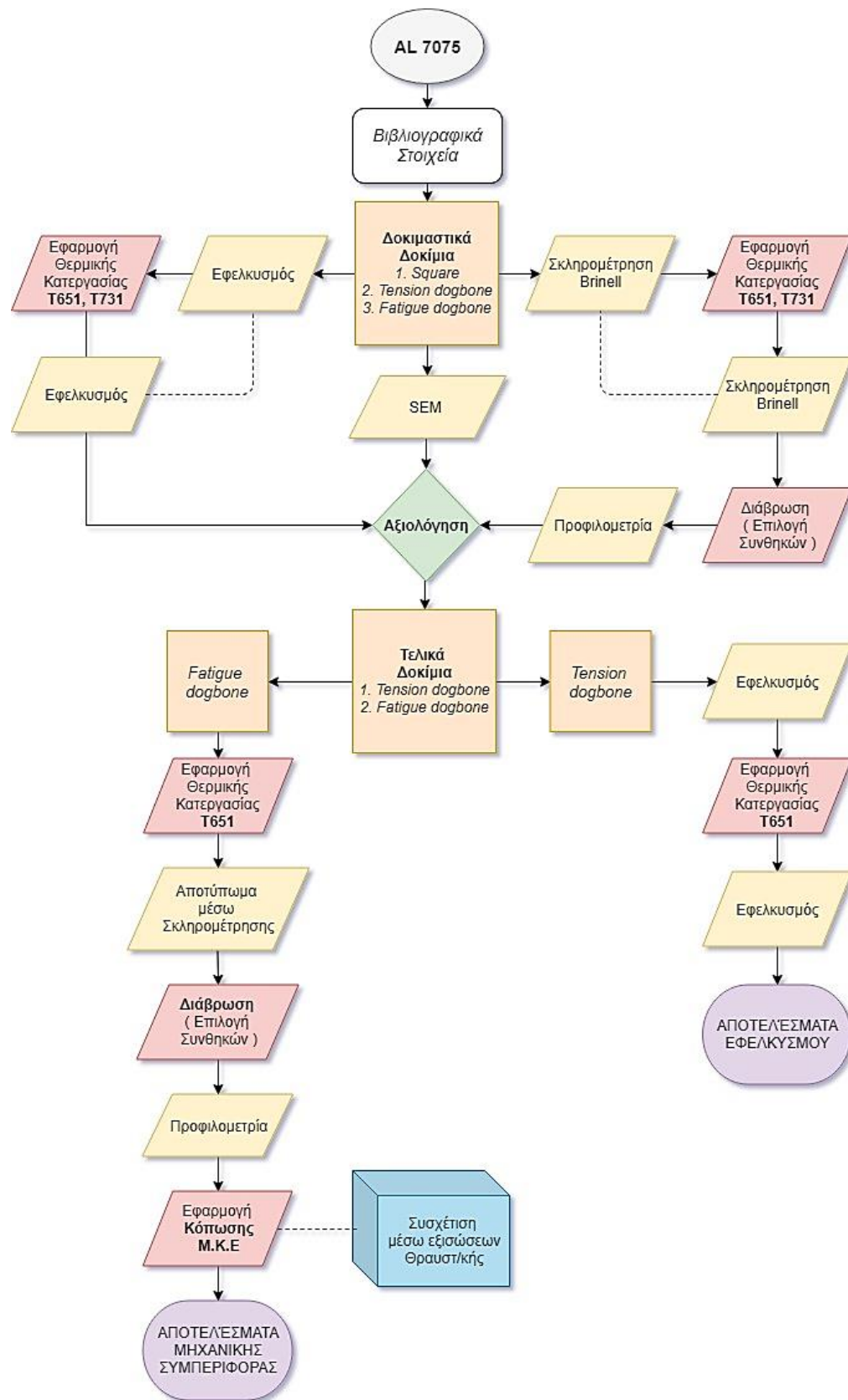
5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του πειραματικού μέρους της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν δοκίμια αλουμινίου τύπου *al - 7075* ως προς τη μηχανική τους συμπεριφορά κάτω από την επίδραση τεχνητού διαβρωτικού μηχανισμού. Συγκεκριμένα, σε δοκίμια αλουμινίου 7075 αυστηρού γεωμετρικού σχήματος αλτήρα/*dogbone* πραγματοποιήθηκαν τεχνητές οπές διάβρωσης στην επιφάνεια και στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε δυναμική μηχανική καταπόνηση προσδιορίζοντας το όριο διαρκούς αντοχής αυτών με παράλληλη εφαρμογή θερμογραφίας υπερύθρου και ακουστικής εκπομπής.

Αρχικά, τα προς μελέτη δοκίμια αλουμινίου επιδέχτηκαν θερμική κατεργασία *T651* ή *T731* προκειμένου να ενισχυθεί τόσο η μηχανική όσο και η διαβρωτική συμπεριφορά τους. Η θερμική κατεργασία που εφαρμόστηκε αξιολογήθηκε μέσω σκληρομέτρησης τύπου Brinell, δοκιμών εφελκυσμού και παρατήρησης ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αρχικές οπές διάβρωσης, με χρήση ποτενσιοδυναμικής διαβρωτικής διάταξης, οι οποίες προσδιορίστηκαν γεωμετρικά με χρήση οπτικής προφίλομετρίας λευκού φωτός, στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου. Τα επεξεργασμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δυναμική μηχανική καταπόνηση με παράλληλη εφαρμογή μη καταστροφικών διατάξεων, θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής, προκειμένου να προσδιοριστεί και να ταυτοποιηθεί το όριο διαρκούς αντοχής αυτών.

Τέλος, μέσω των αποτελεσμάτων των δοκιμών κόπωσης, θερμογραφίας υπερύθρου και ακουστικής εκπομπής πραγματοποιήθηκε προσπάθεια συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διαβρωμένων περιοχών με το όριο κόπωσης των δοκιμίων.

5.2 Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας



Διάγραμμα 1: Παρουσίαση πειραματικής πορείας με χρήση διαγράμματος ροής.

Στο *Διάγραμμα 1*, ροής (*flowchart*) παρουσιάζεται μία γενική εικόνα της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Το διάγραμμα ροής παρουσιάζει κατακόρυφη ιεραρχική δομή όπου στην κορυφή του υπάρχει το κύριο υλικό μελέτης ενώ στην συνέχεια αναπτύσσονται τα βήματα μελέτης και επεξεργασίας του με την σειρά που πραγματοποιήθηκαν.

Αναλυτικότερα το πρώτο μέρος του διαγράμματος περιλαμβάνει έναν κύκλο πειραμάτων με δοκιμαστικά δοκίμια προκειμένου να παρατηρηθούν και να επιλεγούν οι συνθήκες των τελικών πειραμάτων. Τα βέλη υποδεικνύουν την πορεία των πειραμάτων ενώ οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τις μετρικές συγκρίσεις των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαδικασιών. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι κύριες πειραματικές διαδικασίες της παρούσας διατριβής, όπως η εφαρμογή θερμικής κατεργασίας, η διάβρωση με κατάλληλη επιλογή συνθηκών και η δυναμική μηχανική καταπόνηση με παράλληλη εφαρμογή μη καταστροφικών μεθόδων. Αντίστοιχα με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται οι δευτερεύουσες πειραματικές διαδικασίες οι οποίες βοηθούν στην προετοιμασία των δοκιμίων πριν την εφαρμογή των κύριων διαδικασιών, όπως σκληρομέτρηση, αξονικός εφελκυσμός σταθερής ταχύτητας, προφίλομετρία και παρατήρηση με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Το πρώτο μέρος ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμαστικών δοκιμίων καθώς και την επιλογή συνθηκών των μετέπειτα κυρίως δοκιμίων. Η αξιολόγηση παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής με ρόμβο πράσινου χρώματος.

Ομοίως με το πρώτο μέρος του διαγράμματος, το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τον κύκλο των πειραμάτων με τα κύρια και τελικά δοκίμια της παρούσας διατριβής. Οι κύριες και δευτερεύουσες πειραματικές διαδικασίες εντοπίζονται αντίστοιχα και σε αυτό το μέρος. Η ολοκλήρωση του δεύτερου μέρους πραγματοποιείται με την ανάδειξη των τελικών αποτελεσμάτων και την ανάλυση τους. Τέλος, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια μελέτης και συσχέτισης των πειραμάτων με χρήση κατάλληλων μοντέλων μηχανικής. Ωστόσο λόγω περιορισμένου αριθμού δοκιμίων, η μελέτη των μοντέλων αναφέρεται στο κομμάτι της μελλοντικής μελέτης της παρούσας διατριβής. Η προσομοίωση παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής με τρισδιάστατο σχήμα μπλε χρώματος.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει μία γενική εικόνα της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παραλήφθηκαν μερικά βήματα διαδικασιών καθώς και να μην

υπήρξε ακριβής τήρηση της χρονικής εξέλιξης και ανάπτυξης των διαδικασιών. Στις επόμενες ενότητες του πειραματικού μέρους θα αναπτυχθούν εκτενέστερα οι προαναφερθείσες διαδικασίες, κύριες και δευτερεύουσες, με την σειρά που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα ροής.

5.3 Υλικό πειραματικής διαδικασίας

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν δοκίμια αλουμινίου σειράς 7XXX και συγκεκριμένα σειράς 7075. Το αλουμίνιο 7075 αποτελεί ένα τριμερές κράμα Al-Zn-Mg με διάφορες επιπλέον προσμίξεις κραματικών στοιχείων. Σύμφωνα με την *ASTM Handbook of Metals*, η τυπική σύσταση του κράματος αλουμινίου 7075 παρουσιάζεται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Τυπική χημική σύσταση κράματος Al 7075.

Zn wt%	Mg wt%	Cu wt%	Fe wt%	Si wt%	Mn wt%	Cr wt%	Ti wt%	Else wt%
5.1-6.1	2-2.9	1.2-2	0.5 max	0.4 max	0.3 max	0.18-0.28	0.2 max	0.2 max

Η επιλογή του συγκεκριμένου κράματος απορρέει λόγω της μεγάλης εφαρμογής του τόσο στην αεροναυπηγική βιομηχανία όσο και στην βιομηχανία κατασκευών. Η αυξημένη χρήση του σε διάφορες εφαρμογές εστιάζει στην καλή μηχανική συμπεριφορά του με ή χωρίς ύπαρξη διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η υψηλή μηχανική αντοχή και η καλή διαβρωτική συμπεριφορά οφείλεται στο ποσοστό ψευδαργύρου που περιέχει. Ορισμένες τυπικές τιμές των μηχανικών του χαρακτηριστικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Τυπικές τιμές ιδιοτήτων al 7075 χωρίς επεξεργασία, σε θερμοκρασία δωματίου.

Μηχανικές Ιδιότητες	Τυπικές τιμές ιδιοτήτων, σε θερμοκρασία δωματίου
Πυκνότητα, (gr/cm³)	2.81
Μέτρο ελαστικότητας, (GPa)	70 - 80
Όριο θραύσης, (MPa)	220

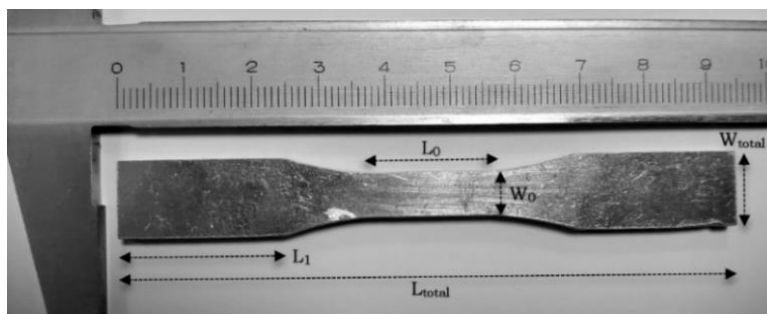
Όριο διαρροής, (MPa)	95
Επιμήκυνση, (%)	17
Σκληρότητα, (HB500)	60
Αντοχή σε κόπωση, (MPa)	160

Τα δοκίμια αλουμινίου 7075 που παρελήφθησαν στο εργαστήριο, περιλάμβαναν γεωμετρικές δοκιμίων εφελκυσμού (*tension Samples*), δοκιμίων κόπωσης (*fatigue Samples*) καθώς και τετράγωνα δοκίμια (*square Samples*) συγκεκριμένων διαστάσεων. Συνοπτικά τα είδη των διαθέσιμων δοκιμίων εμφανίζονται στην *Εικόνα 36*.

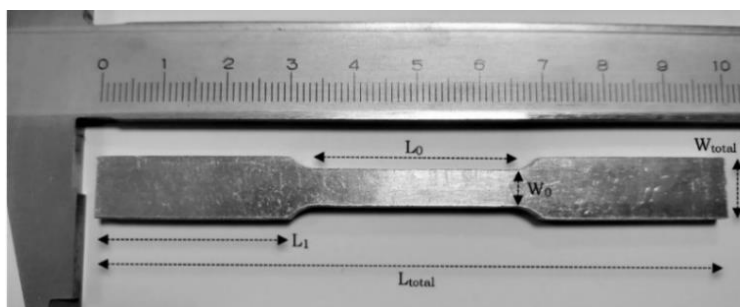


Εικόνα 36: Παρουσίαση των διαθέσιμων ειδών δοκιμίων αλουμινίου 7075, όπου (a) δοκίμιο εφελκυσμού, (b) δοκίμιο κόπωσης και (c) τετράγωνα δοκίμια.

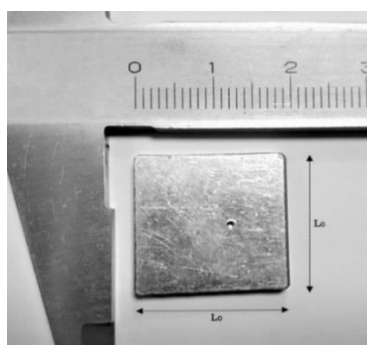
Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες και πίνακες με τους υπολογισμούς των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους, (*Εικόνα 37,38,39*). Η διαστάσεις υπολογίστηκαν με χρήση μηχανικού παχύμετρου ακριβείας τύπου *Vernier Caliper*. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο αριθμός των δοκιμίων του εκάστοτε είδους ήταν σημαντικά μικρός πράγμα που οδήγησε στον περιορισμό των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην συνέχεια.



Εικόνα 37: Διαστασιολόγηση του δοκίμιου εφελκυσμού.



Εικόνα 38: Διαστασιολόγηση του δοκίμιου κόπωσης.



Εικόνα 39: Διαστασιολόγηση του δοκίμιου τετράγωνου σχήματος.

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται οι μετρήσεις, ως αριθμητικοί μέσοι όροι, των διαστάσεων που λήφθηκαν από τα εκάστοτε διαθέσιμα δοκίμια.

Πίνακας 17: Συνοπτικός πίνακας διαστασιολόγησης των διαθέσιμων δοκιμών.

Τύπος διάστασης	Δοκίμιο Εφελκυσμού	Δοκίμιο Κόπωσης	Δοκίμιο Τετράγωνου Σχ.
L_0 , ενεργό μήκος	2.1085 cm	3.202 cm	2 cm
W_0 , ενεργό πλάτος	0.72 cm	0.61 cm	2 cm
Z_0 , πάχος	0.31 cm	0.31 cm	0.3 cm
L_1 , μήκος αρπάγης	2.5 cm	3 cm	-

W_{total} , πλήρες πλάτος	1.2 cm	1 cm	-
L_{total} , πλήρες μήκος	9.509 cm	9.95 cm	-

5.4 Εφαρμογή Θερμικής Κατεργασίας

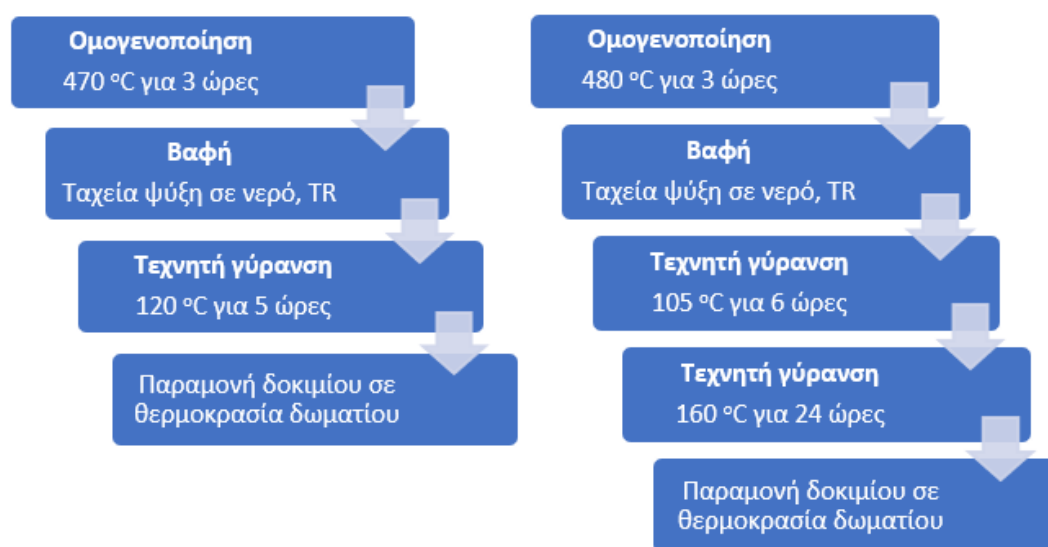
Σύμφωνα με την προηγούμενη ενότητα, η σειρά κράματος 7075 χαρακτηρίζεται από υψηλή μηχανική αντοχή, καλή διαβρωτική συμπεριφορά και ικανοποιητική διαμορφωσιμότητα και ικανότητα επεξεργασίας. Προκειμένου να ενισχυθούν οι παραπάνω ιδιότητες, κυρίως της μηχανικής αντοχής και της διαβρωτικής συμπεριφοράς, των δοκιμών αλουμινίου εφαρμόστηκαν κατάλληλες θερμικές κατεργασίες. (M.Dinesh, 2016)

Γενικά, με τον όρο θερμική κατεργασία, αναφερόμαστε σε κάθε είδους διαδικασία που περιλαμβάνει θέρμανση και ψύξη ενός υλικού προκειμένου να μεταβληθούν οι μηχανικές ιδιότητες, η μεταλλογραφική δομή ή να επιφέρει άλλου είδους μεταβολή σε οποιαδήποτε φυσική ή χημική ιδιότητα του. Τα κράματα αλουμινίου 7075 επιδέχονται ενίσχυση μέσω εφαρμογής θερμικών κατεργασιών κυρίως μέσω κατακρήμνισεων. Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι μία διαδικασία με την οποία δημιουργούμε μία λεπτομερή διασπορά σωματιδίων, εντός του μητρικού υλικού, ενισχύοντας έτσι την μηχανική συμπεριφορά του. Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση πραγματοποιείται συνήθως μέσω τριών θερμικών σταδίων, την ομογενοποίηση, την βαφή και τέλος την γήρανση. Το κάθε ένα στάδιο χαρακτηρίζεται από ένα θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής καθώς και ένα εύρος χρόνου παραμονής στην εκάστοτε διαδικασία. (ΜΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ, 2011)

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μελέτες σχετικά με την ενίσχυση των ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου 7075 μέσω εφαρμογής θερμικών κατεργασιών. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την *Adeyemi Dayo Isadere (2013)*, τα στάδια της γήρανσης και της ανόπτησης επηρεάζουν σημαντικά την σύσταση της μικροδομής και τις μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου 7075. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον *Tolga Dursun (2014)*, παρατηρήθηκε συστηματική βελτίωση στην μηχανική αντοχή, στην δυσθραυτότητα και στην διαβρωτική συμπεριφορά αεροναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, μεταξύ αυτών και κράματος 7075, μετά από εφαρμογή θερμικών κατεργασιών. Τέλος, σύμφωνα με τον *Ankitkumar K. Shriwas (2016)*, παρατηρήθηκε ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων όπως μέγιστο φορτίο αντοχής σε εφελκυσμό,

ολκιμότητα και δυσθραυτότητα σε κράματα αλουμινίου 7075 με παράλληλη εφαρμογή T651 θερμικής κατεργασίας. (Adeyemi Dayo Isadare, 2013), (Tolga Dursun, 2014), (Ankitkumar K. Shriwas, 2016)

Στα δοκίμια της παρούσας διατριβής εφαρμόστηκε θερμική κατεργασία T651 και T731 προκειμένου να βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου καθώς και η αντοχή τους σε διάβρωση. Τα βήματα της εκάστοτε θερμικής κατεργασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 32.



Σχήμα 32: Παρουσίαση των σταδίων των θερμικών κατεργασιών που εφαρμόστηκαν στα δοκίμια αλουμινίου, αριστερά της T651 και δεξιά της T731.

Στα πλαίσια των δοκιμαστικών δοκιμών τοποθετήθηκαν σε ειδικούς φούρνους δοκίμια τετραγωνικής διατομής και δοκίμια εφελκυσμού. Στην συνέχεια λόγω μικρού αριθμού δοκιμών, εφαρμόστηκε μόνο η θερμική κατεργασία T651 σε δοκίμια κόπωσης προκειμένου να διεξαχθούν τα υπόλοιπα πειράματα. Οι φούρνοι του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της ίδιας εταιρίας *Thermo Scientific* με δυναμικότητα 1100°C και 200°C αντίστοιχα. Στην *Εικόνα 40* παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι φούρνοι των θερμικών κατεργασιών.



Εικόνα 40: Εργαστηριακοί φούρνοι πραγμάτωσης των πειραμάτων, αριστερά υψηλών θερμοκρασιών και δεξιά χαμηλότερων.

5.5 Δοκιμές σκληρομέτρησης

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σκληρομέτρησης, συγκεκριμένα μάκρο-σκληρομέτρησης τόσο στα δοκιμαστικά όσο και στα τελικά δοκίμια πριν και μετά την εφαρμογή των θερμικών κατεργασιών. Η μάκρο-σκληρότητα αναφέρεται ως η μέτρηση της σκληρότητας ενός υλικού με εφαρμοζόμενα φορτία τάξης μεγέθους *50 έως 1500 N*.

Σκληρότητα (*hardness*) ενός υλικού ορίζεται ως η αντίσταση που προβάλλει η επιφάνεια του στην προσπάθεια κάθετης παραμόρφωσης της επιφάνειάς του και εξαρτάται από τη φύση του υλικού, την κρυσταλλική του δομή και τις τεχνικές κατασκευής και κατεργασίας του. Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες διατάξεις σκληρομέτρησης όπως στατικές δοκιμές, δυναμικές δοκιμές και δοκιμές χάραξης. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επιλέχθηκαν οι στατικές δοκιμές διείσδυσης που περιλαμβάνουν δοκιμές τεχνικών *Rockwell*, *Brinell*, *Knoop*, *Vickers* και *Ultrasonic*. Σε όλες τις παραπάνω τεχνικές η μέθοδος υπολογισμού της σκληρότητας ενός υλικού στηρίζεται στην παραμόρφωση που παράγεται στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου λόγω εφαρμογής κάθετου φορτίου μέσω ενός εισβολέα/διεισδυτή σκληρού υλικού, συνήθως χάλυβα ή διαμάντι, με κατάλληλη γεωμετρία. (Παπαδόπουλος, 2013)

Συγκεκριμένα, από τις παραπάνω τεχνικές σκληρομέτρησης πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός της μάκρο-σκληρότητας των διαθέσιμων δοκιμίων μέσω της διάταξης *Brinell*. Σύμφωνα με τη μέθοδο *Brinell*, η μέτρηση στηρίζεται στην κάθετη, αργή και σταθερή διείσδυση στο δοκίμιο, μίας πολύ σκληρής σφαίρας καρβιδίου του βολφραμίου ή παλαιότερα χαλύβδινης, με διάμετρο *D* σε mm,

υπό την εφαρμογή ενός σταθερού φορτίου F (σε kgf ή N) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η σφαίρα διεισδυσης έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο χωρίς κρούση και στη συνέχεια επιβάλλεται βαθμιαία η δύναμη F , αρχίζοντας από μηδενική τιμή και φθάνοντας στην πλήρη F μετά από 5 sec. Η δύναμη διατηρείται για 15 ή 30 sec και στη συνέχεια ο διεισδυτής απομακρύνεται. Στην επιφάνεια του δοκιμίου απομένει αποτύπωμα σχήματος σφαιρικού τμήματος. Μετά την αποφόρτιση μετριέται με μεγεθυντικό φακό η διάμετρος του αποτυπώματος d (σε mm). Το εφαρμοζόμενο φορτίο (kgf) προς την επιφάνεια του κυκλικού αποτυπώματος (mm^2) δίνει το μέτρο της σκληρότητας του υλικού. Συνήθως εφαρμόζονται συγκεκριμένοι λόγοι μεταξύ του φορτίου εφαρμογής και της διαμέτρου σφαίρας διεισδυτή υψωμένης στο τετράγωνο που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να υπάρχει συσχέτισή των μεθόδων και τιμών σκληρομέτρησης. (Δρ. Κ. Μέντρεα, 2010)

Η σκληρότητα σύμφωνα με τη μέθοδο Brinell προσδιορίζεται μέσω της Εξίσωσης 5.1 :

$$HB = (0.102) \times \frac{2F}{\pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (Eξ. 5.1)$$

όπου F είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο (kgf ή N), D είναι η διατομή της σφαίρας του διεισδυτή (mm) και d αριθμητικός μέσος των διαγώνιων του αποτυπώματος. Ο πρώτος πολλαπλασιαζόμενος όρος μπορεί να παραληφθεί εφόσον οι τιμές της φόρτισης αναφέρεται σε μονάδες kgf . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναφέρονται με το ακόλουθο πρότυπο (Δρ. Κ. Μέντρεα, 2010):

(τιμή) HB { D(mm) / F(kgf) / t(sec) }

Στις μετρήσεις των δοκιμίων που πραγματοποιήθηκαν εφαρμόστηκαν συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Οι τιμές που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 18. Επιπλέον να τονιστεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε κάποια πρότυπη διάταξη μεθόδου σύμφωνα με τις τιμές του εφαρμοζόμενου φορτίου και της διαμέτρου του σφαιρικού διεισδυτή, δημιουργώντας προβλήματα στη σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Τέλος, το μηχάνημα πραγματοποίησης των πειραμάτων ήταν της εταιρίας *Innovatest* και παρουσιάζεται στην Εικόνα 41.

Πίνακας 18: Τιμές παραμέτρων σκληρομέτρησης Brinell.

Παράμετρος μεθόδου Brinell	Τιμή της παραμέτρου
<i>Εφαρμοζόμενο φορτίο , F</i>	<i>306.5 (N) ή 31.25 (kgf)</i>
<i>Διάμετρος σφαίρας, D</i>	<i>2.5 (mm)</i>
<i>Διαγώνιοι αποτυπώματος, d_1 & d_2</i>	<i>X (mm)</i>
<i>Λόγος φόρτισης, S (F/D^2)</i>	<i>5 (N/mm²)</i>
<i>Χρόνος φόρτισης, t</i>	<i>15 (sec)</i>



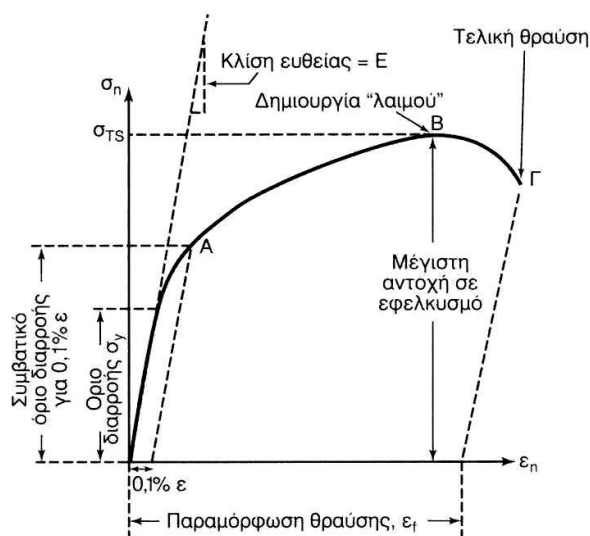
Εικόνα 41: Εργαστηριακός εξοπλισμός Brinell πραγματοποίησης σκληρομέτρησης.

5.6 Δοκιμές στατικού εφελκυσμού

Τα δοκίμια αλουμινίου της παρούσας διατριβής υπεβλήθησαν σε δοκιμές στατικού εφελκυσμού μέσω κατάλληλης διάταξης. Μέσω των δοκιμών προσδιορίστηκε η μηχανική αντοχή των δοκιμίων αλουμινίου πριν και μετά το στάδιο θερμικής κατεργασίας που υπέστησαν.

Η δοκιμή εφελκυσμού αποτελεί τη συνηθέστερη μηχανική δοκιμή και συνίσταται στην ευκολία προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων και συμπεριφοράς διαφόρων υλικών. Σύμφωνα με αυτήν, εφαρμόζονται δυνάμεις με ίσες οι αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου οι οποίες τείνουν να αυξήσουν ή να μειώσουν το μήκος του. Το μηχάνημα εφελκυσμού είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να επιφέρει επιμήκυνση ή θλιπτική παραμόρφωση με έναν ρυθμό, υπολογίζοντας παράλληλα το φορτίο που εφαρμόζεται στο στοιχείο καθώς και την τρέχουσα επιμήκυνση. Η δοκιμή εφελκυσμού διαρκεί σύντομο χρονικό διάστημα, πάντα συναρτήσει του ενεργού μήκους του δοκιμίου και του ρυθμού παραμόρφωσης, ενώ τερματίζεται με την αστοχία του δοκιμίου. Τέλος, το εφαρμοζόμενο φορτίο και η

αντίστοιχη παραμόρφωση καταγράφονται και σχεδιάζεται η λεγόμενη καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης. Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό και συγκεντρώνει όλη την πληροφορία που χρειαζόμαστε προκειμένου να αξιολογηθεί η μηχανική συμπεριφορά του σε στατικές καταπονήσεις. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 33. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005)



Σχήμα 33: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης που προκύπτει μέσω πειράματος εφελκυσμού.⁸⁹

Συνοπτικά μέσω της καμπύλης εφελκυσμού μπορούμε να συλλέξουμε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη μηχανική αντοχή και συμπεριφορά του υλικού. Αναλυτικότερα, κατά την διαδικασία εφελκυσμού αυξάνεται το μήκος του δοκιμίου συναρτήσει της εφαρμοζόμενης δύναμης η οποία μέσω της ενεργής διατομής του μεταφράζεται ως εφαρμοζόμενη τάση. Στο πρώτο κομμάτι η σχέση τάσης - παραμόρφωσης είναι γραμμική και υποδηλώνει την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου. Ωστόσο, με τη συνεχή αύξηση του φορτίου, μεταβαίνουμε από την ελαστική στην πλαστική ζώνη όπου η σχέση τάσης - παραμόρφωσης είναι παραβολική ή μη γραμμική. Το σημείο της τάσης όπου πραγματοποιείται η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά ονομάζεται όριο διαρροής και συμβολίζεται ως σ_y ή $\sigma_{0.2}$. Η περιοχή της πλαστικής συμπεριφοράς προσδίδει μόνιμη παραμόρφωση στο δοκίμιο ενώ παράλληλα παρατηρείται ισχυροποίηση του υλικού λόγω αύξησης και

⁸⁹ <https://docplayer.gr/44706028-Sholi-politikon-mihanikon-emp-tehnika-ylika-10-i-enotita-metalla-e-vintzilaioy-syntonistis-e-voygiokas-e-mpadogiannis.html>

αλληλεπίδρασης των εσωτερικών διαταραχών ή γραμμοαταξιών. Η παραπάνω ενίσχυση εντοπίζεται με συνεχή απαίτηση αύξησης της εφαρμοζόμενης τάσης προκειμένου να συνεχιστεί η παραμόρφωση του δοκιμίου. Ωστόσο, μετά από ένα σημείο φόρτισης, το οποίο ονομάζεται μέγιστη τάση αντοχής σε εφελκυσμό ή σ_{uts} , μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου ενώ παράλληλα αυξάνεται η παραμόρφωσή του. Η περιοχή από την μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο λαιμώσης δηλαδή σχηματισμού λαιμού, σταδιακή μείωση της ενεργής διατομής του δοκιμίου, κυρίως σε όλκιμα ή ημί-ψαθυρά υλικά. Τέλος, το εμβαδό κάτω από την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης προσδίδει την συνολική ενέργεια παραμόρφωσης καθόλη τη διάταξη εφελκυσμού. Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή. (Κατσαμάς, Χαϊδεμενόπουλος, & Κερμανίδης, 2005)

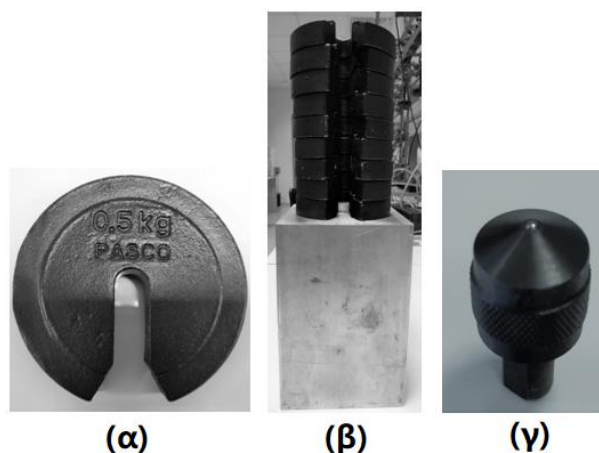
Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στατικού εφελκυσμού, σταθερής ταχύτητας παραμόρφωσης τάξης 1 mm/min , με χρήση μηχανήματος *Instron* 5967 δυναμικότητας $\pm 30 \text{ kN}$. Το μηχάνημα πραγματοποίησης των πειραμάτων εφελκυσμού παρουσιάζεται στην *Εικόνα 42*. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων εφελκυσμού είχαν συγκεκριμένη γεωμετρία αλτήρα ή *dogbone* που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3 του πειραματικού μέρους. Μέσω των πειραμάτων εφελκυσμού προσδιορίστηκε η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό σ_{uts} , το όριο διαρροής σ_y ή $\sigma_{0.2}$, το ποσοστό της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία S_f καθώς και την ενέργεια απορρόφησης στο μέγιστο φορτίο φόρτισης E_f . Όλα τα παραπάνω στοιχεία υπολογίστηκαν πριν και μετά τις θερμικές κατεργασίες. Μέσω των δοκιμών εφελκυσμού έγινε προσπάθεια αξιολόγησης της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων μετά από την εφαρμογή θερμικής κατεργασίας *T651* και *T731*. Τέλος, πέρα από την αξιολόγηση των δοκιμίων, τα πειράματα εφελκυσμού προσδιόρισαν το μέγιστο όριο φόρτισης σε εφελκυσμό σ_{uts} , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, που ήταν απαραίτητο στοιχείο για την εκτέλεση των μετέπειτα πειραμάτων δυναμικής καταπόνησης.



Εικόνα 42: Εργαστηριακός εξοπλισμός πειραμάτων στατικού εφελκυσμού.

5.7 Σχηματισμός αρχικών κοιλοτήτων

Πριν το στάδιο εφαρμογής διάβρωσης στα δοκίμια αλουμινίου πραγματοποιήθηκαν αρχικές κοιλότητες στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις κοιλότητες κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου. Ο λόγος σχηματισμού ομοιόμορφων αρχικών κοιλοτήτων ήταν ο περιορισμός της διάβρωσης, που πραγματοποιήθηκε στην συνέχεια, στις περιοχές αυτές. Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω κοιλότητες χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της σκληρομέτρησης που περιεγράφηκε στην ενότητα 5.5 του πειραματικού μέρους. Πιο αναλυτικά οι κοιλότητες πραγματοποιήθηκαν με διεισδυτή σφαιρικής γεωμετρίας διαμέτρου 1mm και φορτία τάξης μεγέθους 95 N και 306 N. Το φορτίο των 95 N πραγματοποιήθηκε μέσω σύνδεσης μερικών στοιχειωδών μηχανικών στοιχείων του εργαστηρίου ενώ το αντίστοιχο των 306 N μέσω της ίδιας της διάταξης σκληρομέτρησης. Φωτογραφίες των μηχανικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του φορτίου καθώς και ο διεισδυτής σκληρομέτρησης παρουσιάζονται στην *Εικόνα 43*.



Εικόνα 43: Μηχανικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχηματισμό αρχικών κοιλοτήτων, (α) μηχανικά στοιχεία, (β) τελικό στοιχείο εφαρμογής φόρτισης, (γ) διεισδυτής διατομής 1mm.

Συνοπτικά, παράχθηκαν τέσσερα δοκίμια κόπωσης με τρεις αρχικές κοιλότητες στο καθένα. Στα δύο δοκίμια πραγματοποιήθηκαν κοιλότητες μέσω του διεισδυτή και του φορτίου των 306 N και στα υπόλοιπα δύο πραγματοποιήθηκαν κοιλότητες μέσω του διεισδυτή και του φορτίου των 95 N. Τα αποτυπώματα του διεισδυτή στην επιφάνεια των δοκιμίων παρατηρήθηκαν μέσω διάταξης προφίλομετρίας λευκού φωτός, ενώ τα αποτελέσματα παρουσίαζαν έντονη επαναληψιμότητα. Οι κύριες παράμετροι που υπολογίστηκαν μέσω της προφίλομετρίας ήταν το βάθος, η διάμετρος καθώς και ο όγκος της εκάστοτε κοιλότητας.

5.8 Προφίλομετρία λευκού φωτός

Σε όλα τα στάδια επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός εξοπλισμός προφίλομετρίας λευκού φωτός. Η διάταξη της προφίλομετρίας χρησιμοποιήθηκε τόσο στα δοκιμαστικά όσο και στα τελικά δοκίμια πριν και μετά τη διαδικασία της διάβρωσης, που θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα. Μέσω αυτής παρατηρήθηκαν οι γεωμετρικές των αποτυπωμάτων του διεισδυτή στα πλαίσια σχηματισμού των αρχικών κοιλοτήτων καθώς και οι σχηματιζόμενες περιοχές διάβρωσης μετά τη διάβρωση των δοκιμίων.

Η διάταξη της προφίλομετρίας περιλαμβάνει τη μέτρηση και τον χαρακτηρισμό μίας επιφάνειας. Οι κύριες βασικές κατηγορίες της προφίλομετρίας είναι αυτή της προφίλομετρίας επαφής καθώς και της προφίλομετρίας χωρίς επαφή. Στην δεύτερη κατηγορία προφίλομετρίας υπάγονται οι διατάξεις οι οποίες καταγράφουν το προφίλ μίας επιφάνειας ενός στοιχείου χωρίς να έρχονται σε επαφή με αυτήν. Συγκεκριμένα,

στην κατηγορία ανήκουν τα συνεστιακά μικροσκόπια, τα μικροσκόπια ατομικών δυνάμεων καθώς και τα συμβολομετρικά προφιλόμετρα. Η προφίλομετρία λευκού φωτός ανήκει στην προφίλομετρία χωρίς επαφή και συγκεκριμένα στα συμβολομετρικά προφιλόμετρα. (Ορφανός, 2008)

Η προφίλομετρία λευκού φωτός στηρίζεται στην ανέπαφη οπτική προφίλομετρία μέσω της οποίας εξετάζεται η επιφάνεια ενός στοιχείου μέσω της αντανάκλασης κάποιας ακτίνας laser ή φωτός που επιστρέφει από το αντικείμενο και συγκρίνοντας αυτή με κάποια επιφάνεια αναφοράς μέσω ενός μικρό-συμβολόμετρου. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούνται λέιζερ χαμηλής ισχύος, τα οποία εκπέμπουν μια εστιασμένη ακτίνα φωτός, η οποία με τη χρήση ενός κατευθυντήριου μηχανισμού σαρώνει μια περιοχή. Στην πιο απλή εφαρμογή της μεθόδου η ακτίνα σαρώνει κάθετα μια περιοχή που περιλαμβάνει και το αντικείμενο. Στο αντίθετο από την ακτίνα άκρο υπάρχει ένας φακός που συλλέγει το φως, καθώς και ένα αισθητήρας που καταγράφει τη διακοπή στη λήψη φωτός, που προκαλεί η σκιά του αντικειμένου. Τα σχετικά δεδομένα τροφοδοτούνται σε ένα μικροεπεξεργαστή ο οποίος μετρά με ακρίβεια τον χρόνο που αντιστοιχεί στη σάρωση του αντικειμένου. (Giannatsis Ioannis, 2015)

Η προφίλομετρία λευκού φωτός εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο λόγω των πλεονεκτημάτων που την χαρακτηρίζουν όπως η έλλειψη δημιουργίας κάποιας ατέλειας στο στοιχείο, αυξημένη ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων, η δυνατότητα μέτρησης μεγάλης έκτασης ή ολόκληρης της επιφάνειας, η τρισδιάστατη απεικόνιση του επιφανειακού προφίλ καθώς και η μελλοντική επεξεργασία των στοιχείων μέσω κατάλληλου λογισμικού. Στην αντίθετη πλευρά, κύρια μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος εξοπλισμού καθώς και η αδυναμία μέτρησης επιφανειών χαμηλής ποιότητας ή έντονων ανωμαλιών λόγω αυξημένης διάχυσης του φωτός σε όλες τις κατευθύνσεις, αλλοιώνοντας τις τιμές των μετρήσεων. (Γιαννακόπουλος, 2010)

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός προφίλομετρίας λευκού φωτός της εταιρίας *Polytec* και συγκεκριμένα προφιλόμετρο λευκού φωτός υψηλής ανάλυσης τύπου *TMS-1200 TopMap μ.Lab*. Φωτογραφία του εργαστηριακού εξοπλισμού προφίλομετρίας παρουσιάζεται στην *Εικόνα 44*. Μέσω της παραπάνω διάταξης μελετήθηκαν τα προφίλ των επιφανειών των δοκιμίων καθώς και οι γεωμετρίες των διαβρωμένων περιοχών. Τα κύρια γεωμετρικά στοιχεία που υπολογίστηκαν μέσω του προφιλόμετρου ήταν το βάθος και η μέγιστη διαγώνιος των διαβρωμένων περιοχών καθώς και ο όγκος των αρχικά σχηματιζόμενων κοιλοτήτων.



Εικόνα 44: Εργαστηριακός εξοπλισμός προφίλομετρίας λευκού φωτός.

5.9 Ηλεκτροχημική Διάβρωση

Σύμφωνα με την εισαγωγή του πειραματικού μέρους, σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η επίδραση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης στη δομική ακεραιότητα κραμάτων αλουμινίου 7075 και τη μηχανική συμπεριφορά σε δυναμικές καταπονήσεις. Επομένως στα δοκίμια αλουμινίου 7075 εφαρμόστηκαν συνθήκες διάβρωσης και συγκεκριμένα ηλεκτροχημικής διάβρωσης, προκειμένου να αλλοιωθεί η εξωτερική τους επιφάνεια μέσω σχηματισμού διαβρωμένων περιοχών ή κοιλοτήτων. Τα διαβρωμένα δοκίμια στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε κυκλικές δυναμικές καταπονήσεις όπου πραγματοποιήθηκε προσπάθεια υπολογισμού του ορίου κόπωσης μέσω της μηχανικής τους συμπεριφοράς.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε του πειραματικού μέρους, *Κεφάλαιο 2^ο*, η διάβρωση αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των υλικών κατασκευών καθώς επιδρά στην δομική τους ακεραιότητα, αλλοιώνοντας τα στοιχεία και τις ιδιότητες τους και κατ' επέκταση τη μηχανική τους συμπεριφορά. Το φαινόμενο της διάβρωσης εντοπίζεται με διάφορες μορφές και επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα την δομική ακεραιότητα των υλικών στοιχείων με βραδείς ή ταχείς ρυθμούς. Ορισμένες από τις χειρότερες μορφές διάβρωσης είναι η βελονοειδής μορφή και η διάβρωση χαραγών καθώς ενώ προσβάλουν ένα πολύ μικρό κομμάτι της επιφάνειας του υλικού, δημιουργώντας την αίσθηση διασφάλισης της ακεραιότητάς του, ελαττώνουν σημαντικά την μηχανική αντοχή του. Ωστόσο, κοινός

παράγοντας όλων των παραπάνω προτάσεων είναι ότι τα φαινόμενα διάβρωσης επηρεάζουν αρνητικά τον λειτουργικό σκοπό των υλικών στοιχείων, αλλοιώνοντας τα χαρακτηριστικά τους και μειώνοντας τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους. Επομένως χρήζει ανάγκη βιβλιογραφικής και πειραματικής μελέτης των διαφόρων διαβρωτικών φαινομένων καθώς και ο τρόπος ή μηχανισμός επίδρασης αυτών στη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων υλικών στοιχείων και κατασκευών.

Μέχρι σήμερα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ερευνών σχετικά με την επίδραση της διάβρωσης στην δομική ή λειτουργική ή μηχανική συμπεριφορά διαφόρων υλικών, τόσο σε βιβλιογραφικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Η πλειονότητα αυτών των ερευνών στοχεύει στη μελέτη ανάπτυξης των διαβρωτικών συνθηκών, στην εξέλιξη των φαινομένων με το χρόνο και τέλος την επίδραση αυτών στην δομική ακεραιότητα ενός τύπου υλικού στοιχείου. Οι κύριες μορφές διάβρωσης που μελετώνται είναι η ομοιόμορφη διάβρωση για ναυπηγικές εφαρμογές και η εντοπισμένη διάβρωση όπως η βελονοειδής διάβρωση ή διάβρωση χαραγών λόγω της έντονης φθοράς που προκαλούν.

Ενδεικτικά, οι *Xin-Yan Zhang, Shu-Xin Li, Rui Liang και R. Akid (2013)* μελέτησαν την επίδραση των διαβρωτικών κοιλοτήτων που σχηματίζονται στα πλαίσια της βελονοειδούς διάβρωσης σε διάφορα μεταλλικά υλικά και την επίδραση αυτών στη μηχανική τους συμπεριφορά. Σύμφωνα με αυτούς, τα στάδια ανάπτυξης των κοιλοτήτων δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια καθώς επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως τη χημική σύσταση του υλικού, το εξωτερικό περιβάλλον εφαρμογής αλλά και την γεωμετρία της κοιλότητας. Ωστόσο η ανάπτυξη τους περιλαμβάνει το στάδιο πυρήνωσης (*nucleation*) και αρχικού σχηματισμού, την ανάπτυξη του από μικρό σε μεγάλο επίπεδο (*pit growth*) καθώς και τον μετασχηματισμό από μεγάλο ατέλεια σε αρχική ρωγμή (*transition from pit to short crack*). Επιπλέον ο κυριότερος παράγοντας μελέτης στα στάδια εξέλιξης των διαβρωτικών κοιλοτήτων ήταν το βάθος του καθώς και ο λόγος βάθους προς τη διατομή του. Συγκεκριμένα, το βάθος ανάπτυξης των κοιλοτήτων παρουσιάζει μία παραβολική εξάρτηση με το χρόνο διάβρωσης, $t^{1/2}$ ενώ το πλάτος μία γραμμική σχέση. Συμπερασματικά, ο παραπάνω λόγος προσδιορίστηκε να γίνεται κρίσιμος σε τιμές μεταξύ 0.1 έως 1, όπου και εντοπίζεται μείωση της μηχανικής αντοχής κατά 40% ενώ για τιμές 1 έως 2 η επίδραση μειώνεται σημαντικά. (Xin-Yan Zhang, 2013)

Αντίστοιχα, οι *Y. Yi, P. Cho, A. Al Zaabi, Y. Addad, C. Jang (2013)* μελέτησαν την συμπεριφορά του ανοξείδωτου χάλυβα 316 σε διαβρωτικό περιβάλλον χλωριόντων

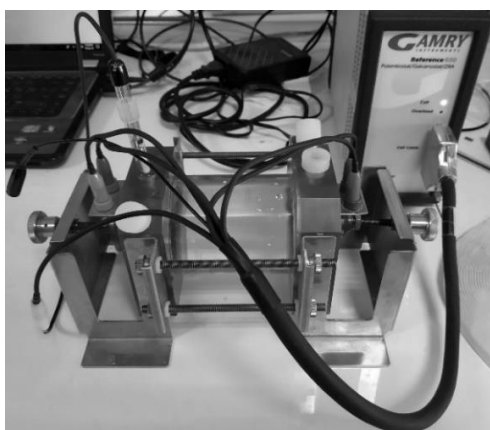
νατρίου. Οι δοκιμές διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν μέσω ποτενσιοδυναμικής διάταξης όπου παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της διάβρωσης μεταβαλλόταν ανάλογα με τον ρυθμό σάρωσης της ποτενσιοδυναμικής διάταξης. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν δοκιμές με διάφορους ρυθμούς σάρωσης μεταξύ 0.01 και 50 mV/sec, όπου παρατηρήθηκε ότι αύξηση του ρυθμού σάρωσης οδηγεί σε αλλοίωση της μορφής των ποτενσιοδυναμικών καμπυλών με έντονες μορφές βελόνων που υποδεικνύουν την μετάβαση των σταδίων εξέλιξης των διαβρωτικών κοιλοτήτων. (Y. Yi, 2013)

Επιπλέον, οι R.M. Chlistovsky, P.J. Heffernan, D.L. DuQuesnay (2007) μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 7075 - T651 σε δυναμικές καταπονήσεις με παράλληλη εφαρμογή διαβρωτικού περιβάλλοντος NaCl 3.5 wt%. Οι δυναμικές καταπονήσεις περιλάμβαναν διατάξεις κυκλικές καταπονήσεις σταθερού ή μεταβλητού πλάτους καθώς και εύρος στην εφαρμοζόμενη συχνότητα των καταπονήσεων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι με εφαρμογή σύνθετων παραμέτρων κόπωσης (πολλά στάδια διαφορετικών τιμών πλάτους κόπωσης) η επίδραση της διάβρωσης γίνεται εντονότερη και ο ρυθμός φθοράς του υλικού αυξάνεται θεαματικά. Επιπλέον, στα στάδια συμπίεσης των κυκλικών φορτίσεων παρατηρείται έντονη παραμόρφωση όπου οδηγεί στην ανάπτυξη των διαβρωτικών ατελειών ενώ στα στάδια εφελκυσμού παρατηρείται εξέλιξη των παραπάνω διαβρωτικών ατελειών. Παράλληλα, τα δοκίμια που επιδέχονται κυκλικές φορτίσεις χωρίς ταυτόχρονη εφαρμογή διαβρωτικού περιβάλλοντος εμφανίζουν ένα όριο διαρκούς αντοχής ενώ στα αντίστοιχα που εφαρμόζεται παράλληλα διάβρωση εμφανίζουν μία τυχαία συμπεριφορά κόπωσης χωρίς να μπορεί να προσδιοριστεί κάποιο όριο διαρκούς αντοχής. Τέλος, τα δοκίμια που καταπονήθηκαν με συχνότητα κυκλικής φόρτισης μεγαλύτερης των 20Hz δεν παρουσιάζουν υψηλούς ρυθμούς φθοράς σε αντίθεση με αυτά που καταπονήθηκαν με συχνότητες μικρότερες των 15Hz. (R.M. Chlistovsky, 2007)

Τέλος, οι S.I. Rokhlin, J.-Y. Kim, H. Nagy, B. Zoofan (1999) μελέτησαν την επίδραση της βελονοειδής διάβρωσης στην μηχανική συμπεριφορά σε κυκλικές καταπονήσεις κράματος αλουμινίου 2024 - T3. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια αλουμινίου σημειακές διαβρωτικές περιοχές/κοιλότητες διαφορετικού βάθους με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης αυτών στην μηχανική συμπεριφορά των στοιχείων κάτω από κυκλικά φορτία. Οι αρχικές κοιλότητες διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν μέσω spark erosion. Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής εμφανίζονται μέσω διαγραμμάτων μεταξύ του

λόγου του βάθους των διαβρωτικών κοιλοτήτων προς την διάμετρο αυτών και του χρόνου ζωής των δοκιμίων σε κύκλους ζωής. Παρατηρήθηκε ότι η παραπάνω καμπύλη εμφανίζει μία απότομη μετάβαση για λόγους κοιλότητας τιμών μεταξύ 0.15 και 0.25, όπου ο χρόνος ζωής μειώνεται εκθετικά. Επιπλέον η επίδραση του φαινομένου για τιμές συχνότητας κυκλικής καταπόνησης μεγαλύτερης των 20 Hz μειώνεται. (S.I. Rokhlin, 1998)

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εφαρμόστηκε διάταξη ηλεκτροχημικής και συγκεκριμένα ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης προκειμένου να αναπτυχθούν διαβρωτικές κοιλότητες στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων μετά την εφαρμογή θερμικής κατεργασίας καθώς και το σχηματισμό αρχικών κοιλοτήτων, όπως περιεγράφηκαν στην ενότητα 5.7 του πειραματικού μέρους. Συγκεκριμένα τα δοκίμια αλουμινίου επικαλύφθηκαν με ένα καθαρό διαφανές βερνίκι νυχιών, εκτός από τις κοιλότητες που σχηματίστηκαν στην ενότητα 5.7 του πειραματικού μέρους, προκειμένου να προστατευτεί η υπόλοιπη επιφάνεια από την επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια τα δοκίμια παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου προκειμένου να στεγνώσει το βερνίκι και να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της επίστρωσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ηλεκτροχημικό κελί τριών ηλεκτροδίων τύπου *Gamry Instruments Reference 600*, όπου ηλεκτρόδιο αναφοράς αποτελεί ένα ηλεκτρόδιο καλομέλανος ενώ ως ηλεκτρόδιο αντίθετης πόλωσης χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο γραφίτη. Το ηλεκτροχημικό κελί που περιεγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται στην *Εικόνα 45*.



Εικόνα 45: Εργαστηριακός εξοπλισμός ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης.

Στα πλαίσια των διαβρωτικών δοκιμών επιλέχθηκαν διάφορες συνθήκες διάβρωσης που παρουσιάζονται στον *Πίνακα 19*. Οι τιμές των παραμέτρων

επιλέχθηκαν από προηγούμενες μελέτες του εργαστηρίου. Ωστόσο, λόγω περιορισμού στον αριθμό των διαθέσιμων δοκιμίων εφαρμόστηκαν μόνο δύο από τις ακόλουθες συνθήκες διάβρωσης, επισημαίνονται με κίτρινο χρώμα. Σύμφωνα με τα παραπάνω κάθε μία συνθήκη διάβρωσης εφαρμόστηκε σε δύο δοκίμια αλουμινίου. Τέλος, ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε αλατόνερο με αναλογία 0.1 M NaCl, προκειμένου να κλείσει το ηλεκτρικό κύκλωμα διάβρωσης.

Πίνακας 19: Παρουσίαση τιμών των παραμέτρων των διαθέσιμων συνθηκών διάβρωσης.

Βαθμός Διάβρωσης	E_{init} (Volt)	E_{final} (Volt)	SR (mV/sec)	Χρόνος Διάβρωσης (min)
Χαμηλός	-0,5	0,5	0,5	~ 33
Μέτριος	-0,5	0,5	1,5	~ 11
Υψηλός	-2	2	1,5	~ 44
Πολύ υψηλός	-2	2	1	~ 67

Μετά το στάδιο διάβρωσης τα δοκίμια καθαρίστηκαν με ασετόν και οινόπνευμα προκειμένου να απομακρυνθεί το παραμένον βερνίκι νυχιών ενώ στη συνέχεια παρατηρήθηκαν οι σχηματιζόμενες διαβρωμένες περιοχές με χρήση προφίλόμετρου λευκού φωτός προκειμένου να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Μετά το στάδιο εφαρμογής ηλεκτροχημικής διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές μηχανικής καταπόνησης κυκλικών φορτίσεων προκειμένου να προσδιοριστεί η μηχανική τους συμπεριφορά. Η διάταξη της μηχανικής καταπόνησης με την παράλληλη εφαρμογή μη καταστροφικών τεχνικών, υπέρυθρης θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής, παρουσιάζεται εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα του πειραματικού κεφαλαίου.

5.10 Δοκιμές δυναμικών καταπονήσεων με παράλληλη εφαρμογή μη καταστροφικών διατάξεων χαρακτηρισμού

Τελευταίο κομμάτι της πειραματικής ροής της παρούσας διατριβής ήταν η πραγματοποίηση δοκιμών δυναμικών καταπονήσεων (κόπωση) στα δοκίμια αλουμινίου, που είχε προηγηθεί το στάδιο της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, προκειμένου να προσδιοριστεί το όριο διαρκούς αντοχής. Η παραπάνω διαδικασία

πραγματοποιήθηκε με παράλληλη εφαρμογή δύο μη καταστροφικών διατάξεων χαρακτηρισμού, της υπέρυθρης θερμογραφίας και της ακουστικής εκπομπής.

Το όριο κόπωσης ή όριο διαρκούς αντοχής αποτελεί ένα από τα κυριότερα στοιχεία μελέτης κατά την μηχανική συμπεριφορά ενός μεταλλικού υλικού σε δυναμικές καταπονήσεις. Η θεωρία της μηχανικής των δυναμικών καταπονήσεων έχει περιγραφεί πλήρως στο πρώτο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της παρούσας διατριβής. Ωστόσο, μέσω συμβατικών μεθόδων και διατάξεων το όριο διαρκούς αντοχής προσδιορίζεται μέσω των καμπύλων *Wöhler*, οι οποίες με την σειρά τους προκύπτουν από έναν μεγάλο αριθμό καταστροφικών και χρονοβόρων πειραμάτων μηχανικής καταπόνησης μεταλλικών δοκιμίων. Λόγω του παραπάνω φαινομένου καθώς και της σημαντικότητας γρήγορου υπολογισμού του ορίου κόπωσης, οδήγησε πολλές μελέτες να στραφούν στην αναζήτηση νέων μεθόδων και διατάξεων.

Αναλυτικότερα, οι *Pei.J.Hou, Xing.L. Guo, Fang.Han, Jun.L.Fan (2013)* παρατήρησαν τη μηχανική συμπεριφορά σε δυναμικές καταπονήσεις ανοξείδωτου χάλυβα τύπου *FV520B* με και χωρίς θερμική επεξεργασία, μέσω διατάξεων υπέρυθρης θερμογραφίας. Παράλληλα μέσω των επιφανειακών θερμικών διαφορών που δημιουργούνταν στα δοκίμια, λόγω της μηχανικής καταπόνησης, προσδιορίστηκε το όριο διαρκούς αντοχής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η διάταξη της υπέρυθρης θερμογραφίας θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον αξιόπιστο και γρήγορο τρόπο προσδιορισμού του ορίου κόπωσης καθώς και την παρατήρηση ανάπτυξης εσωτερικών φαινομένων και διαταραχών. (*Pei.J.Hou, 2013*)

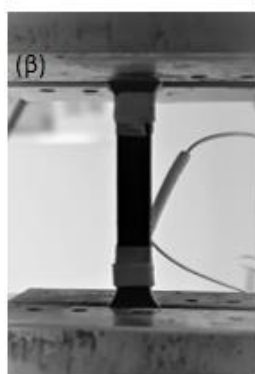
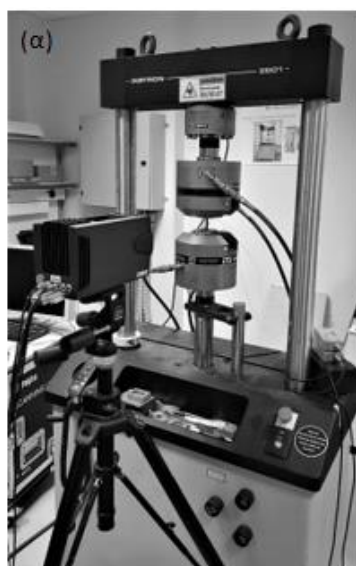
Αντίστοιχα, οι *G. Fargione, A. Geraci, Giovanni La Rosa, A. Risitano (2002)* προσπάθησαν να προσδιορίσουν διάφορες παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς σε δυναμικές καταπονήσεις διαφόρων μεταλλικών υλικών μέσω υπέρυθρης θερμογραφίας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία με όνομα «*Risitano*», βάση της οποίας προσδιορίζεται το όριο διαρκούς αντοχής ενός στοιχείου μέσω της επιφανειακής θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του (διαφορά θερμοκρασίας και επιφανειακής θερμότητας παραγωγής/απορρόφησης) καθώς υποβάλλεται σε κυκλικές καταπονήσεις. Στα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης επισημαίνεται άλλη μία φορά ότι η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτελεί μία αποτελεσματική και αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού της μηχανικής συμπεριφοράς και προσδιορισμού κρίσιμων παραμέτρων μηχανικής σε μεταλλικά υλικά που επιδέχονται δυναμικές καταπονήσεις. Επιπλέον, μέσω της μεθόδου «*Risitano*» ο παραπάνω προσδιορισμός του ορίου

κόπωσης επιτυγχάνεται μέσω ενός μόνο δοκιμίου περιορίζοντας σημαντικά τον απαιτούμενο πειραματικό χρόνο. (G. Fargione, 2001)

Παράλληλα, ο *Luong* (1995) πραγματοποίησε μία ολοκληρωμένη μελέτη τόσο σε θεωρητικό όσο και πειραματικό επίπεδο σχετικά με την αποτελεσματικότητα της παρατήρησης της μηχανικής συμπεριφοράς μεταλλικών υλικών υπό κυκλικές φορτίσεις μέσω εφαρμογής υπέρυθρης θερμογραφίας. Στα πλαίσια της παραπάνω διατριβής μελετήθηκε η αξιοπιστία της υπέρυθρης θερμογραφίας, στην απεικόνιση και ταχύ προσδιορισμό διαφόρων μηχανικών παραμέτρων, κατά την κυκλική φόρτιση δοκιμίων, όπως τη συσσώρευση βλάβης, την ανάπτυξη εσωτερικών ατελειών και ρωγματώσεων, το όριο διαρκούς αντοχής ως συνάρτηση των θερμικών ενεργειών που διαχέονται από την επιφάνεια των εκάστοτε δοκιμίων. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών έρχονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα θεωρητικά μοντέλα επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της διάταξης της υπέρυθρης θερμογραφίας ως μέθοδο παρατήρησης της μηχανικής συμπεριφοράς των στοιχείων που επιδέχονται κυκλικές καταπονήσεις. Τέλος, επισημαίνεται ότι η εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας ως ταχεία μέθοδος υπολογισμού του ορίου διαρκούς αντοχής, θα αποτελέσει ένα αξιόλογο εργαλείο στο χώρο της βιομηχανίας λόγω της ανέπαφης εφαρμογής της καθώς και της απλότητας της μεθόδου. (Luong, 1995)

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε προσπάθεια προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής δοκιμίων αλουμινίου 7075 που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία *T651*, μέσω κατάλληλης διάταξης υπέρυθρης θερμογραφίας *lock-in* και ακουστικής εκπομπής. Η παραπάνω διάταξη βασίζεται σε μία καινοτόμο μη καταστροφική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε μία προηγούμενη διδακτορική διατριβή, *Κορδάτος* (2013), του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων & Μη Καταστροφικού Ελέγχου (*MSS-NDE*) του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, με σκοπό τον ταχύ προσδιορισμό του ορίου κόπωσης. Μέσω της υπέρυθρης θερμογραφίας ανιχνεύονται σε πραγματικό χρόνο τα παραγόμενα επιφανειακά θερμικά κύματα που δημιουργούνται μέσω των δυναμικών κυκλικών καταπονήσεων. Παράλληλα, η ακουστική εκπομπή καταγράφει τα παραγόμενα ελαστικά κύματα που προκαλούνται λόγω συσσωρευμένης βλάβης του στοιχείου. Η επεξεργασία και ο συνδυασμός των δεδομένων των δύο μη καταστροφικών διατάξεων χαρακτηρισμού προσδιορίζουν το όριο διαρκούς αντοχής του εκάστοτε στοιχείου. (Κορδάτος, 2013)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέθοδος που προσδιορίζει το όριο διαρκούς αντοχής περιλαμβάνει μία σέρβο-υδραυλική μηχανή κυκλικών δοκιμών, μία υπέρυθρη κάμερα, τύπου *Cedip Jade 510* εταιρίας *CEDIP* με ανιχνευτή $3\text{-}5\ \mu\text{m}$ και με εστιακό φακό μεγέθους $320 \times 240\ \text{MWIR}$, καθώς και δύο pico πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, εταιρίας *Physical Acoustics PAC* με εύρος συχνοτήτων μεταξύ $50 - 750\text{kHz}$. Η υπέρυθρη κάμερα θερμογραφίας τοποθετήθηκε σε απόσταση $42\ \text{cm}$ για να επιτευχθεί το καλύτερο πεδίο εστίασης. Επιπλέον, για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός της σέρβο-υδραυλικής μηχανής με την υπέρυθρη κάμερα χρησιμοποιήθηκε ένας *lock-in* ενισχυτής ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την κάμερα αλλά και με τον ελεγκτή της μηχανής. Ο συγχρονισμός των δύο σημάτων επιτρέπει την καταγραφή θερμογραφημάτων φάσης. Η προετοιμασία των δοκιμών αλουμινίου περιελάμβανε την επικάλυψη της εξωτερικής επιφάνειας, απέναντι από την κάμερα θερμογραφίας, με μία λεπτή στρώση μαύρου ματ χρώματος προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή συντελεστή εκπομπής στην υπό-εξέταση επιφάνεια των δοκιμών τάξης 0.95. Στην πίσω πλευρά των δοκιμών τοποθετήθηκαν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες της ακουστικής εκπομπής, με απόσταση μεταξύ τους περίπου $24\ \text{mm}$, ενώ παράλληλα σημειώθηκαν τα πιθανά σημεία αστοχίας των δοκιμών (περιοχές διάβρωσης με μέγιστο βάθος και διάμετρο που προσδιορίστηκαν στην ενότητα 5.8 και 5.9 του πειραματικού μέρους). Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες κολλήθηκαν με μέλι προσδίδοντας καλή ακουστική σύζευξη καθώς και στήριξη στους αισθητήρες κατά τη διάρκεια της κόπωσης. Επιπλέον, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες συνδέθηκαν σε δύο προ ενισχυτές, τάξης $40\ \text{dB}$, ενώ τα σήματα καταγράφηκαν από δύο κανάλια σε κάρτα *PCI-2*, *PAC* με ρυθμό δειγματοληψίας $10\ \text{MHz}$. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται συνοπτικά στην *Εικόνα 46*.



Εικόνα 46: Πειραματική διάταξη προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής, (α) πειραματική διάταξη, (β) επιφάνεια δοκιμίου με επικάλυψη και (γ) πίσω πλευρά δοκιμίου στήριξης των αισθητήρων ΑΕ.

Σύμφωνα με την εκτέλεση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής, απαιτείται μία σειρά από κυκλικές δυναμικές φορτίσεις του εκάστοτε δοκιμίου με διαφορετικά τασικά επίπεδα. Συγκεκριμένα, στο πρώτο βήμα φόρτισης το δοκίμιο αλουμινίου υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση σταθερού πλάτους τιμής ίσης με το 10% του σ_{uts} , που είχε προσδιοριστεί στις δοκιμές εφελκυσμού που είχαν προηγηθεί, με διάρκεια 6000 κύκλους. Στο κάθε βήμα που ακολουθεί το πλάτος των κυκλικών φορτίσεων αυξάνεται κατά 10% του σ_{uts} μέχρι να φτάσει την τιμή του 60% του σ_{uts} . Μετά από αυτό το σημείο η αύξηση του πλάτους των κυκλικών φορτίσεων διαμορφώνεται στο 5% του σ_{uts} μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Προκειμένου να υπολογιστούν αριθμητικά οι τιμές των τασικών βημάτων της κυκλικής καταπόνησης δημιουργήθηκε ένα αρχείο *excel*, όπως αυτό που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 47*, στο οποίο εισάγεται ως δεδομένο η μέγιστη δύναμη αντοχής σε εφελκυσμό και υπολογίζονται αυτόματα οι υπόλοιπες τιμές.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Dog Bone Samples (Fatigue – Corrosion)								
2									
3	Ultimate Tensile Strength			529.424	MPa				
4				10011	N				
5									
6	Load %	Max Limit (N)		Min Limit (N)		Mean Value (N)		Amplitude (N)	
7	5%	500,55		50,055		275,3025		225,2475	
8	10%	1001,1		100,11		550,605		450,495	
9	15%	1501,65		150,165		825,9075		675,7425	
10	20%	2002,2		200,22		1101,21		900,99	
11	25%	2502,75		250,275		1376,5125		1126,2375	
12	30%	3003,3		300,33		1651,815		1351,485	
13	35%	3503,85		350,385		1927,1175		1576,7325	
14	40%	4004,4		400,44		2202,42		1801,98	
15	45%	4504,95		450,495		2477,7225		2027,2275	
16	50%	5005,5		500,55		2753,025		2252,475	
17	55%	5506,05		550,605		3028,3275		2477,7225	
18	60%	6006,6		600,66		3303,63		2702,97	
19	65%	6507,15		650,715		3578,9325		2928,2175	
20	70%	7007,7		700,77		3854,235		3153,465	
21	75%	7508,25		750,825		4129,5375		3378,7125	
22	80%	8008,8		800,88		4404,84		3603,96	
23	85%	8509,35		850,935		4680,1425		3829,2075	
24	90%	9009,9		900,99		4955,445		4054,455	
25	95%	9510,45		951,045		5230,7475		4279,7025	
26	100%	10011		1001,1		5506,05		4504,95	

Εικόνα 47: Παρουσίαση του φύλλου δεδομένων των τιμών τάσεων στα διάφορα επίπεδα φόρτισης.

Η κυματομορφή της κυκλικής μηχανικής καταπόνησης ήταν ημιτονοειδής, η συχνότητα της ορίστηκε στην τιμή των 10 Hz ενώ η τιμή του λόγου ελάχιστης προς μέγιστης τάσης ορίστηκε ίση με $0,1$. Στα πλαίσια εκτέλεσης όλων των παραπάνω βημάτων, η υπέρυθρη κάμερα και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες καταγράφουν τα θερμικά και τα ελαστικά φαινόμενα αντίστοιχα που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου. Ως αποτέλεσμα των πειραματικών δοκιμών, προκύπτουν καμπύλες όπου παρουσιάζονται οι ποσότητες της διαχεόμενης ενέργειας καθώς και τα ακουστικά σήματα αντίστοιχα για κάθε επίπεδο φόρτισης. Η μορφές αυτών των καμπυλών συνήθως χαρακτηρίζονται από μία μετάβαση της κλίσης σε κάποιο τασικό επίπεδο φόρτισης. Τέλος, το σημείο αλλαγής της κλίσης των παραπάνω καμπυλών προσδιορίζει το όριο κόπωσης ή όριο διαρκούς αντοχής.

Μέρος III : Αποτελέσματα

Κεφάλαιο 6^ο: Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε στάδιο της πειραματικής διαδικασίας που προηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, Κεφάλαιο 5^ο. Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ακολουθείται συνοπτικός σχολιασμός. Ωστόσο, συγκεντρωτική ανάπτυξη των συνολικών συμπερασμάτων παρουσιάζονται στο επόμενο μέρος της παρούσας διατριβής.

6.1 Αποτελέσματα μετρήσεων φυσικών χαρακτηριστικών

Πέρα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κυρίων δοκιμών κόπωσης αλουμινίου, που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογίστηκαν και προσδιορίστηκαν οι μάζες τους καθώς και η πυκνότητα αυτών. Αρχικά υπολογίστηκε η μάζα των δοκιμών πριν την πραγμάτωση οποιοδήποτε σταδίου επεξεργασίας. Η μάζα των δοκιμών υπολογίστηκε μέσω ζυγού ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών. Τα στοιχεία των μαζών παρουσιάζονται στον Πίνακα 20.

Πίνακας 20: Μετρήσεις μαζών δοκιμών κόπωσης αλουμινίου.

Αρίθμηση Δοκιμών	Μάζα (gr)
1	7,5361
2	7,3852
3	7,6100
4	7,5326

Προκειμένου να προσδιοριστεί η πυκνότητα των δοκιμών κόπωσης χρησιμοποιήθηκε η αρχή του Αρχιμήδη (*Εξίσωση 6.1*). Συγκεκριμένα, η μέθοδος προσδιορισμού περιλαμβάνει την μέτρηση του βάρους του στοιχείου στον αέρα και στην συνέχεια την μέτρηση του βάρους του σε υγρό γνωστής πυκνότητας, συνήθως νερό. Τα παραπάνω στοιχεία εισάγονται στον ακόλουθο τύπο:

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_o \quad (\text{Εξ. 6.1})$$

όπου ρ η τελική τιμή της πυκνότητας του δοκιμίου (gr/cm^3), A το βάρος του δοκιμίου στον αέρα (gr), B το βάρος του δοκιμίου μέσα σε υγρό γνωστής πυκνότητας (gr) και ρ η πυκνότητα του υγρού πλήρωσης (gr/cm^3). Στα δοκίμια της παρούσας διατριβής ως υγρό πλήρωσης χρησιμοποιήθηκε νερό με πυκνότητα 0.997 gr/cm^3 . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, προσδιορισμού της πυκνότητας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 21.

Πίνακας 21: Τιμές προσδιορισμού πυκνότητας δοκιμών κόπωσης αλουμινίου.

Αρίθμηση δοκιμίων	Βάρος (αέρα) gr	Βάρος (νερό) gr	Πυκνότητα νερού, gr/cm^3	Πυκνότητα δοκιμίων gr/cm^3
1	7,5361	4,8227	0,997	2,769
2	7,3852	4,7362	0,997	2,779
3	7,6100	4,8736	0,997	2,772
4	7,5326	4,8282	0,997	2,776

Βάση των παραπάνω τιμών η πυκνότητα των δοκιμών κόπωσης αλουμινίου 7075 προσδιορίστηκε στην τιμή $2,77\text{ gr/cm}^3$ η οποία συμφωνεί με την βιβλιογραφία όπου αναφέρεται η πυκνότητα των δοκιμών 7075 στην τιμή $2,81\text{ gr/cm}^3$.

6.2 Αποτελέσματα μετρήσεων μάκρο - σκληρότητας

Η διάταξη της σκληρομέτρησης και του εφελκυσμού περιεγράφηκε αναλυτικά στη πειραματική διαδικασία. Μέσω αυτών των δύο δοκιμών παρατηρήθηκε η επίδραση των θερμικών κατεργασιών, $T651$ και $T731$, που υποβλήθηκαν τα δοκιμαστικά δοκίμια. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα της πειραματικής διαδικασίας, στα κύρια δοκίμια κόπωσης εφαρμόστηκε μόνο η θερμική κατεργασία $T651$ λόγω περιορισμένου αριθμού δοκιμών. Επίσης είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μέθοδος σκληρομέτρησης ήταν η *Brinell* και συγκεκριμένα με διεισδυτή σφαιρικής γεωμετρίας διατομής $2,5\text{ mm}$, εφαρμοζόμενο φορτίο $306,5\text{ N}$ και λόγο αναλογίας 5 N/mm^2 . Οι παραπάνω τιμές δεν συντελούν μία πρότυπη δοκιμή σκληρομέτρησης, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε αδυναμία συσχέτισης των τιμών της παρούσας διατριβής με άλλες βιβλιογραφικές μελέτες. Ωστόσο, προς κάλυψη των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 22, οι τιμές της μάκρο σκληρότητας των δοκιμών πριν και μετά την εφαρμογή των θερμικών διεργασιών.

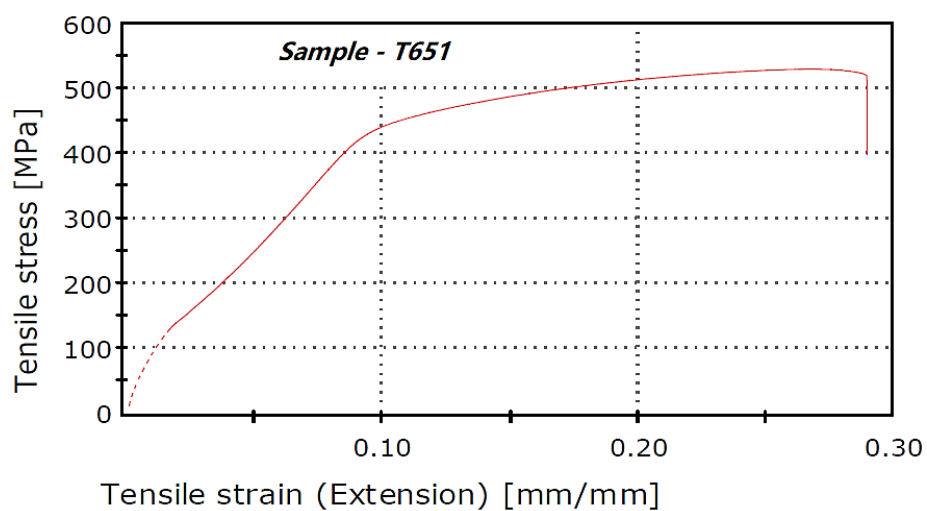
Πίνακας 22: Τιμές των δοκιμών σκληρομέτρησης *Brinell*.

Αριθμός μέτρησης	Δοκίμια χωρίς θερμική κατεργασία	Δοκίμια με θερμική κατεργασία <i>T651</i>	Δοκίμια με θερμική κατεργασία <i>T731</i>
1 ^η	27	30,7	37,8
2 ^η	27,5	31,4	37,4
3 ^η	28,6	31,6	36
4 ^η	28,6	31,5	35,4
M.O	27,9 HB	31,3 HB	36,7 HB

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι οι θερμικές κατεργασίες που επιδέχονται τα κράματα αλουμινίου σειράς 7075, όπως η *T651* και η *T731*, οδηγούν στην ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η παραπάνω πρόταση έρχεται σε συμφωνία με διάφορες μελέτες της βιβλιογραφίας. Ωστόσο, λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν δεν μπορεί να γίνει κάποια ταύτιση ή ποσοτική συσχέτιση των παραπάνω τιμών με τις αντίστοιχες των βιβλιογραφικών μελετών.

6.3 Αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να προσδιοριστεί η μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου 7075, που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία. Η διάταξη εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκε καθώς και οι παράμετροι της μεθόδου περιεγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο της πειραματικής διαδικασίας, ενότητα 5.6. Πέρα των μηχανικών στοιχείων που προσδιορίστηκαν κατά την εκτέλεση των στατικών δοκιμών (Πίνακας 23, 24) παρατίθενται οι καμπύλες εφελκυσμού (Εικόνα 48, 49) καθώς και φωτογραφίες αστοχίας των αντίστοιχων δοκιμών (Εικόνα 50, 51).



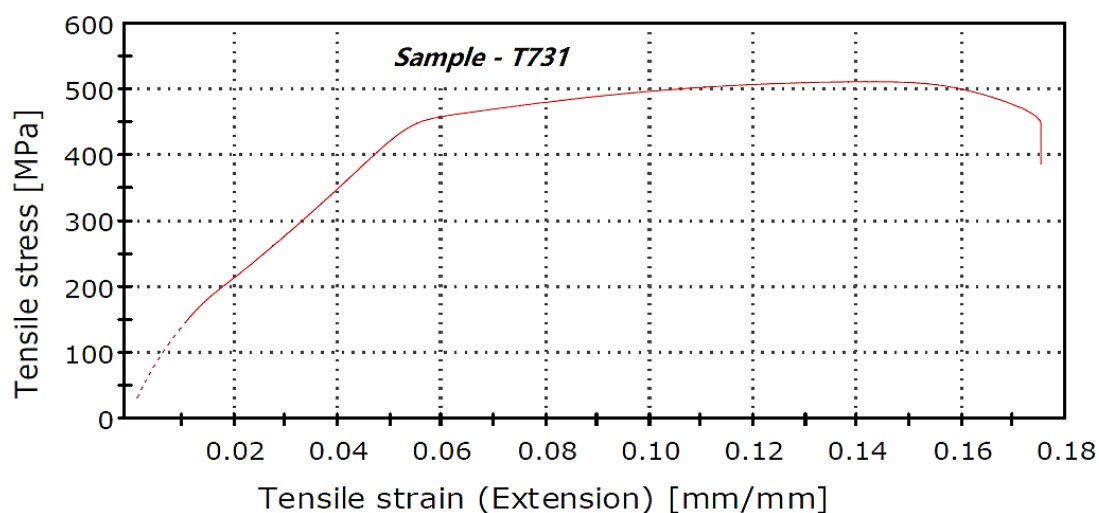
Εικόνα 48: Χαρακτηριστική καμπύλη δοκιμής εφελκυσμού δοκιμίου αλουμινίου 7075 - T651.



Εικόνα 49: Φωτογραφία περιοχής αστοχίας δοκιμίου αλουμινίου 7075 - T651.

Πίνακας 23: Τιμές παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς εφελκυσμού δοκιμίου al 7075 - T651.

Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου
Ultimate Tensile Stress , MPa	529,424	Young Parameter “ E ”, GPa	~ 3,968
Ultimate Tensile Load , kN	11,817	Extension at break , mm	6,17940
Tensile Stress at Yield Point , MPa	425	Strain at break , %	0,29314
Energy at break , J	56,78183		



Εικόνα 50: Χαρακτηριστική καμπύλη δοκιμής εφελκυσμού δοκιμίου αλουμινίου 7075 – T731.



Εικόνα 51: Φωτογραφία περιοχής αστοχίας δοκιμίου αλουμινίου 7075 – T731.

Πίνακας 24: Τιμές παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς εφελκυσμού δοκιμίου al 7075 - T731.

Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου
Ultimate Tensile Stress , MPa	511,7464	Young Parameter “ E ”, GPa	~ 6,818
Ultimate Tensile Load , kN	9,677	Extension at break , mm	5,29611
Tensile Stress at Yield Point , MPa	449	Strain at break , %	0,1764
Energy at break , J	41,66019		

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες αλλά και τη μορφή των καμπύλων εφελκυσμού, με την εφαρμογή των θερμικών κατεργασιών ενισχύεται η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων 7075. Συγκεκριμένα οι τιμές μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό, τόσο του δοκιμίου 7075 - T651 όσο και του 7075 - T731, συμπίπτουν με τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας. Αναλυτικότερα, οι τιμές της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Ενότητα 5.6) ορίζονται ως 280 MPa για καθαρό αλουμίνιο 7075, 510 - 540 MPa για αλουμίνιο 7075 με θερμική κατεργασία T6 και 505 MPa για

αλουμίνιο 7075 με θερμική κατεργασία T7. Οι τιμές της παρούσας διατριβής ορίζονται ως 529,42 MPa για αλουμίνιο 7075 - T651 και 511,74 για το T731 αντίστοιχα.

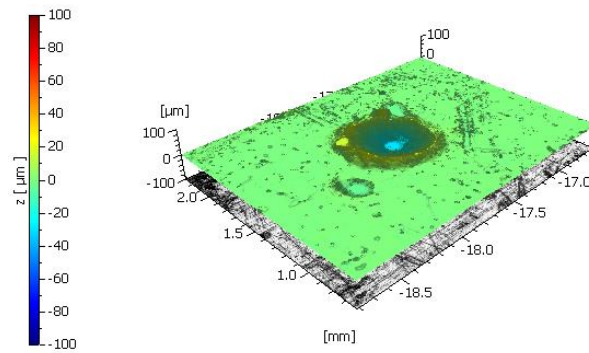
Επιπλέον, παρατηρώντας τα παραπάνω στοιχεία συμπεραίνεται ότι η γενική μορφή επίδρασης των θερμικών κατεργασιών στα δοκίμια αλουμινίου παρουσιάζουν έντονες ομοιότητες κυρίως στην μέγιστη τάση εφελκυσμού και το όριο διαρροής. Ωστόσο παρουσιάζουν διαφορές σχετικά με την πλαστική παραμόρφωση, την ολκιμότητα και την ενέργεια απορρόφησης μέχρι να επέλθει η θραύση των δοκιμίων. Η παραπάνω παρατήρηση ενώ αναφέρεται και σε άλλες βιβλιογραφικές διατριβές και μελέτες, δεν ερμηνεύεται πλήρως. Ωστόσο συνήθως σχετίζεται με το μέγεθος του κόκκου της φάσης που δημιουργείται στο πρώτο στάδιο των θερμικών κατεργασιών (ομογενοποίησης) καθώς και το ποσοστό επίτευξης ομοιομορφίας στην κατανομή των κραματικών στοιχείων.

Τέλος, οι περιοχές αστοχίας και των δύο δοκιμίων εφελκυσμού παρουσιάζουν όμοια χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα εμφανίζεται μία πλαστική παραμόρφωση γύρω από το σημείο αστοχίας, φαινόμενο λαίμωσης, ενώ η διάδοση της αστοχίας πραγματοποιείται σε διεύθυνση 45°, επίπεδο μέγιστης διατμητικής τάσης.

6.4 Χαρακτηριστικά διαμορφωμένων αρχικών κοιλοτήτων

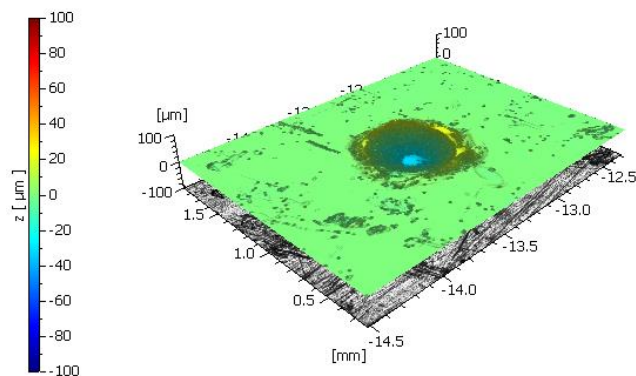
Σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία, πριν το στάδιο της διάβρωσης των δοκιμίων σχηματίστηκαν τρεις κοιλότητες όμοιας γεωμετρίας στην επιφάνεια του ενεργού μήκους του εκάστοτε δοκιμίου αλουμινίου. Ο αρχικός στόχος ήταν η διάβρωση που θα λάμβανε χώρα στη συνέχεια να περιοριζόταν μόνο στις περιοχές αυτές των αρχικών κοιλοτήτων. Ωστόσο, μετά την διάβρωση των δοκιμίων οι περιοχές αλλοιώθηκαν γεωμετρικά σημαντικά, καταρρίπτοντας την παραπάνω υπόθεση. Παρόλα αυτά για την πληρότητα των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στη συνέχεια ενδεικτικές εικόνες προφίλομετρίας λευκού φωτός των αρχικών διαμορφωμένων κοιλοτήτων (Εικόνα 52 - 55) καθώς και πίνακες με τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (Πίνακας 25).

Τα δοκίμια αλουμινίου καθώς και οι σχηματιζόμενες κοιλότητες αριθμήθηκαν πριν την διαμόρφωση των κοιλοτήτων προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της διάβρωσης και της δυναμικής καταπόνησης στη συνέχεια. Οι κοιλότητες σχηματίστηκαν μέσω διάταξης σκληρομέτρησης καθώς και με συνδυασμό μηχανικών στοιχείων βάρους, όπως περιεγράφηκαν στην ενότητα 5.7.



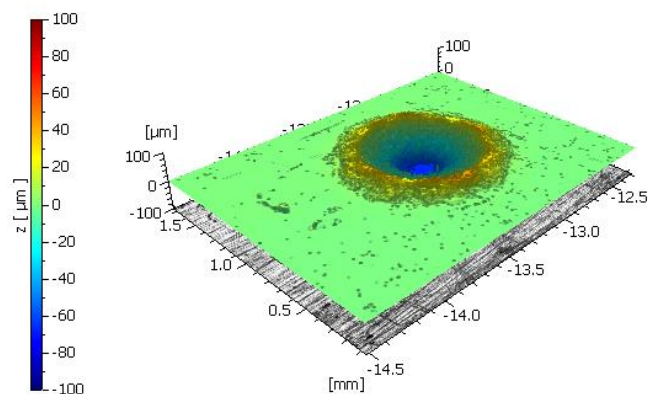
1ο Δοκίμιο

Εικόνα 52: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 1^{ου} δοκιμίου.



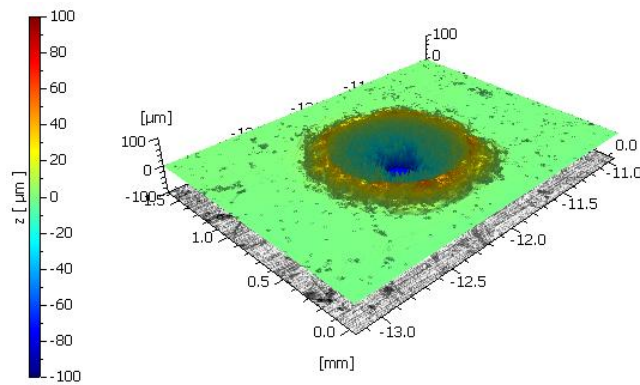
2ο Δοκίμιο

Εικόνα 53: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 2^{ου} δοκιμίου.



3ο Δοκίμιο

Εικόνα 54: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 3^{ου} δοκιμίου.



4ο Δοκίμιο

Εικόνα 55: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαμορφωμένης κοιλότητας του 4^{ου} δοκίμιου.

Πίνακας 25: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αρχικών διαμορφωμένων κοιλοτήτων.

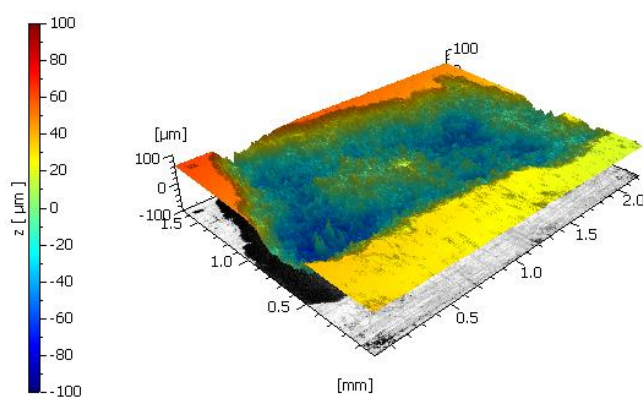
Αρίθμηση Δοκίμιων	Αρίθμηση Κοιλοτήτων	Διάταξη Διαμόρφωσης	Βάθος μm	Διάμετρος μm	Όγκος mm^3
1 ^ο Δοκίμιο	1 ^η	Μηχανική Σύνδεση	42	620	0,00442
	2 ^η		30,4	494	0,00306
	3 ^η		33,29	488	0,00301
2 ^ο Δοκίμιο	1 ^η	Μηχανική Σύνδεση	38,72	570	0,00322
	2 ^η		34,49	488	0,00327
	3 ^η		32,93	537	0,00275
3 ^ο Δοκίμιο	1 ^η	Σκληρομέτρηση	67,52	755	0,01404
	2 ^η		65,75	671	0,01545
	3 ^η		69,10	681	0,01764
4 ^ο Δοκίμιο	1 ^η	Σκληρομέτρηση	73,04	732	0,01210
	2 ^η		74,16	748	0,01323
	3 ^η		75,10	763	0,01867

Σύμφωνα με τιμές του παραπάνω πίνακα καθώς και τις εικόνες του προφίλομετρου, τόσο η διάταξη της σκληρομέτρησης όσο και η διάταξη των μηχανικών συνδέσεων προκάλεσαν όμοιες κοιλότητες. Επιπλέον, βάση του μέγιστου βάθους και του όγκου των κοιλιοτήτων η διάταξη με την μηχανική σύνδεση στοιχείων προκάλεσε μικρότερες κοιλότητες σε σχέση με την αντίστοιχη της σκληρομέτρησης.

Τέλος, σημειώθηκε η κοιλότητα με το μέγιστο βάθος κοιλότητας στο εκάστοτε δοκίμιο προκειμένου να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μετά το στάδιο της διάβρωσης που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

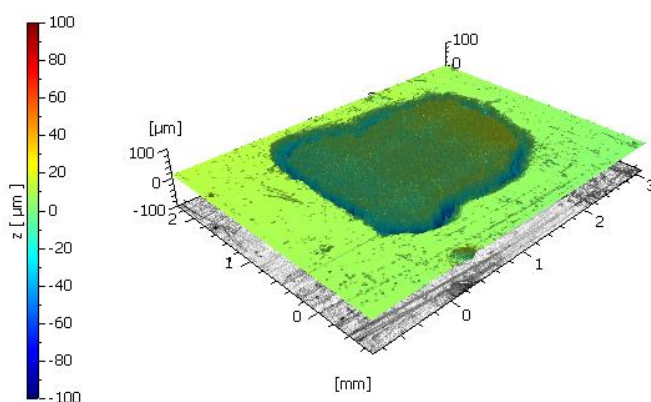
6.5 Αποτελέσματα ηλεκτροχημικής διάβρωσης

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια κατόπιν διεξαγωγής των δοκιμών ηλεκτροχημικής διάβρωσης των δοκιμών κόπωσης αλουμινίου 7075. Η πλήρης περιγραφή της ηλεκτροχημικής διάταξης περιεγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 5.9 της πειραματικής διαδικασίας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες προφίλομετρίας των διαβρωμένων περιοχών που σχηματίστηκαν κατά το στάδιο της ηλεκτροχημικής διάβρωσης (Εικόνα 56 - 59), ενώ τέλος παρατίθεται πίνακας με τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών (Πίνακας 26).



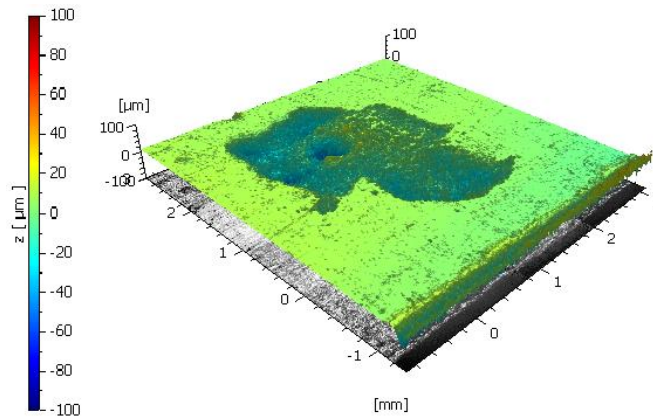
1ο Δοκίμιο

Εικόνα 56: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 1^{ου} δοκιμίου.



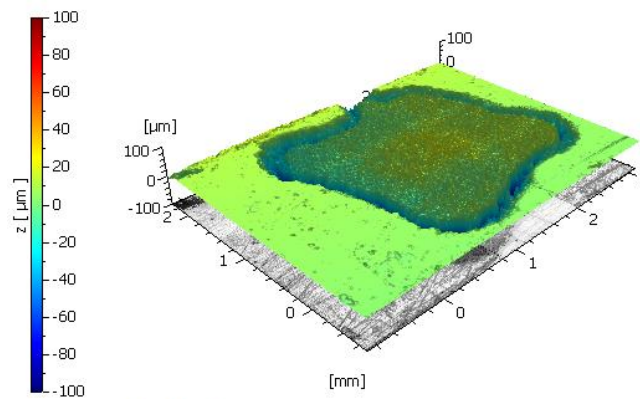
2ο Δοκίμιο

Εικόνα 57: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 2^{ου} δοκιμίου.



3ο Δοκίμιο

Εικόνα 58: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 3^{ου} δοκιμίου.



4ο Δοκίμιο

Εικόνα 59: Ενδεικτική φωτογραφία προφίλομετρίας λευκού φωτός διαβρωμένης περιοχής του 4^{ου} δοκιμίου.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα γεωμετρικά στοιχεία των διαβρωμένων περιοχών των δοκιμίων κόπωσης 7075. Ωστόσο, λόγω διαφόρων αστοχιών της πειραματικής διαδικασίας, που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.9, το κύριο μέγεθος μελέτης αποτέλεσε το μέγιστο βάθος των διαβρωμένων περιοχών. Παρόλα αυτά για την πληρότητα των αποτελεσμάτων, στον επόμενο πίνακα αναφέρονται οι συνθήκες διάβρωσης, τα μέγιστα βάθη και οι μέγιστες διαγώνιοι που σχηματίστηκαν στις διαβρωμένες περιοχές. Ο λόγος βάθους προς τη διαγώνιο των διαβρωμένων περιοχών δεν αναγράφεται καθώς οι διαβρωμένες περιοχές δεν παρουσιάζουν ομοιομορφία γεωμετρίας με αποτέλεσμα οι τιμές των λόγων να μην συσχετίζονται.

Πίνακας 26: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαβρωμένων περιοχών.

Αρίθμηση Δοκίμιων	Αρίθμηση Περιοχών	Στοιχεία Διάβρωσης	Χρόνος Διάβρωσης	Βάθος μm	Διαγώνιος mm
<i>1^ο Δοκίμιο</i>	1^η	$E : \{ - 0.5 , 0.5 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	11 min	75,86	2,232
	2 ^η			70,20	2,42
	3 ^η			74,13	2,27
<i>2^ο Δοκίμιο</i>	1 ^η	$E : \{ - 2 , 2 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	44 min	39,67	0,609
	2 ^η			96,40	3,305
	3^η			100,4	2,703
<i>3^ο Δοκίμιο</i>	1 ^η	$E : \{ - 0.5 , 0.5 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	11 min	70,29	0,918
	2 ^η			70,22	2,114
	3^η			70,47	3,416
<i>4^ο Δοκίμιο</i>	1^η	$E : \{ - 2 , 2 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	44 min	106,3	2,643
	2 ^η			84,10	3,018
	3 ^η			91,13	2,536

Σύμφωνα με τις φωτογραφίες προφίλομετρίας των διαβρωμένων περιοχών, παρατηρήθηκε ότι η γεωμετρία των αρχικών κυκλικών κοιλοτήτων αλλοιώθηκε σημαντικά στην εξέλιξη της διάβρωσης. Ο κύριος λόγος ήταν η αδυναμία εφαρμογής προστασίας, μέσω του βερνικιού νυχιών που εφαρμόστηκε στο στάδιο της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, ακριβώς γύρω από τις αρχικές διαμορφωμένες κοιλότητες, με αποτέλεσμα να διαβρωθεί ανομοιόμορφα η γύρω περιοχή. Σε αντίθεση με την μορφολογία, η παράμετρος του βάθους των διαβρωμένων περιοχών εμφανίζει κάποια αναλογία σχετικά με τις παραμέτρους διάβρωσης που εφαρμόστηκε. Συγκεκριμένα μικρή τάξη διάβρωσης, χρόνου *11 λεπτών*, προκάλεσε διάβρωση μέγιστου βάθους *75,86 μm* και *70,49 μm* στα αντίστοιχα δοκίμια ενώ μεγάλη τάξη διάβρωσης, χρόνου *44 λεπτών*, προκάλεσε διάβρωση μέγιστου βάθους *100,4 μm* και *106,3 μm* στα αντίστοιχα δοκίμια. Η σχέση μεταξύ του μέγιστου βάθους διαβρωμένης περιοχής και του αντίστοιχου χρόνου διάβρωσης εμφανίζει μία μη γραμμική συμπεριφορά, η οποία συμφωνεί με την βιβλιογραφική ανασκόπηση. Αντίθετα με το μέγιστο βάθος, η μέγιστη διαγώνιος των διαβρωμένων περιοχών δεν παρουσιάζει κάποια ομοιομορφία ή συσχέτιση με τις αντίστοιχες παραμέτρους διάβρωσης.

Τέλος, μετά το στάδιο της ηλεκτροχημικής διάβρωσης σημειώθηκαν οι μέγιστες τιμές του βάθους καθώς και οι αντίστοιχες περιοχές διάβρωσης με αρίθμηση προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση αυτών στην μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων σε δυναμικές καταπονήσεις καθώς και στον προσδιορισμό του ορίου διαρκούς αντοχής. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, *ενότητα 1.5 της βιβλιογραφικής ανασκόπησης*, τα σημεία με το μέγιστο βάθος διάβρωσης θα αποτελέσουν σημεία συγκέντρωσης τάσεων κατά την δυναμική καταπόνηση των στοιχείων, με αποτέλεσμα την πιθανή αστοχία αυτών στις εκάστοτε περιοχές. Τα αποτελέσματα των δυναμικών καταπονήσεων παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

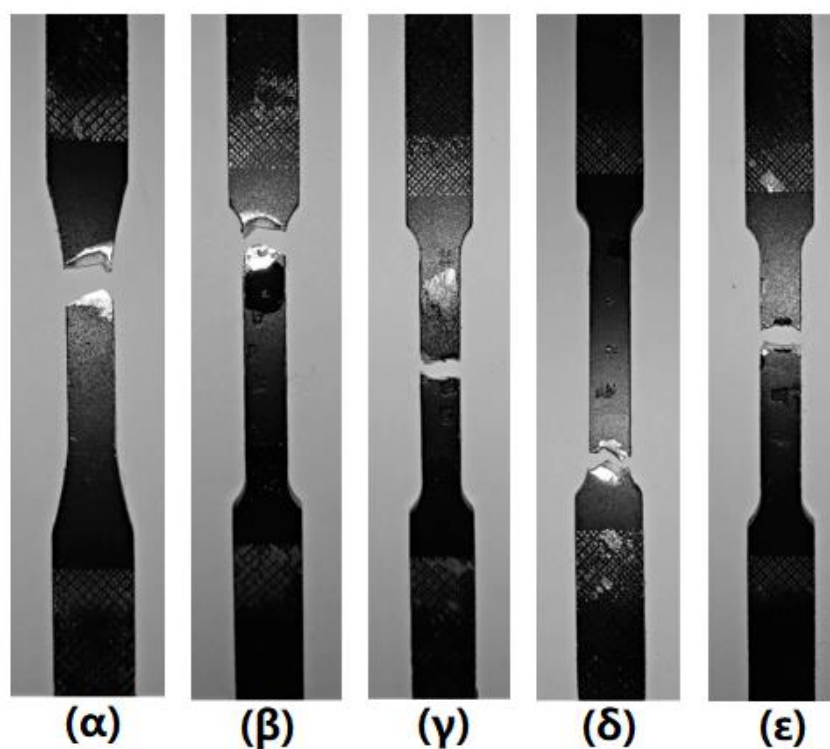
6.6 Αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης

Τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας αποτελούν οι δοκιμές κόπωσης προκειμένου να παρατηρηθεί η μηχανική συμπεριφορά των στοιχείων αλουμινίου 7075 που έχουν υποστεί ηλεκτροχημική διάβρωση. Η διάταξη των κυκλικών φορτίσεων καθώς και η μεθοδολογία πραγμάτωσης των δοκιμών αυτών περιεγράφηκε εκτενώς στην *ενότητα 5.10 της πειραματικής διαδικασίας*. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ξανά ότι πέρα από την παρατήρηση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων σε δυναμικές καταπονήσεις, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής ή ορίου κόπωσης μέσω μίας καινοτόμου διάταξης μη καταστροφικών μεθόδων, υπέρυθρης θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής. Η αναλυτική παρουσίαση της καινοτόμου μεθόδου ταχύ προσδιορισμού του ορίου κόπωσης πραγματοποιήθηκε στην *ενότητα 5.10 της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διατριβής*.

Στον *Πίνακα 27*, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης, ουσιαστικά οι τιμές του φορτίου αστοχίας σε μορφή ποσοστού της μέγιστης τάσης αντοχής σε εφελκυσμό που προσδιορίστηκε μέσω των αντίστοιχων δοκιμών εφελκυσμού, καθώς και φωτογραφίες αστοχίας των δοκιμίων μετά την πραγμάτωση των δοκιμών κόπωσης (*Εικόνα 60*).

Πίνακας 27: Ποσοστά κόπωσης αστοχίας των δοκιμών αλουμινίου, κατόπιν ηλεκτροχημικής διάβρωσης.

Αριθμός Δοκιμίου	Στοιχεία Διάβρωσης	Μέγιστο Βάθος, μm	Ποσοστό Κόπωσης για αστοχία, % σ_{uts}	Τάση Κόπωσης για αστοχία, kN
<i>Bulk Δοκίμιο</i>	-	-	70 %	7,007
<i>1^ο Δοκίμιο</i>	$E : \{ - 0.5 , 0.5 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	75,86	60 %	6,006
<i>2^ο Δοκίμιο</i>	$E : \{ - 2 , 2 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	100,4	50 %	5,005
<i>3^ο Δοκίμιο</i>	$E : \{ - 0.5 , 0.5 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	70,47	65 %	6,506
<i>4^ο Δοκίμιο</i>	$E : \{ - 2 , 2 \}$ $SR : 1.5 \text{ mV/s}$	106,3	50 %	5,005



Εικόνα 60: Συνοπτική παρουσίαση των περιοχών αστοχίας δοκιμών αλουμινίου μετά την επιβολή κυκλικών φορτίων, (α) καθαρό δοκίμιο χωρίς διάβρωση, (β) δοκίμιο με επιβολή μικρής τάξης διάβρωσης, (γ) δοκίμιο με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης, (δ) δοκίμιο με επιβολή χαμηλής τάξης διάβρωσης, (ε) δοκίμιο με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης.

Σύμφωνα με τις τιμές του παραπάνω πίνακα, η επίδραση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης στην μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων αλουμινίου ήταν σημαντική. Συγκεκριμένα η αντοχή σε κυκλικές καταπονήσεις των μεταλλικών δοκιμίων συσχετίζονται άμεσα με τις συνθήκες διάβρωσης και τον ρυθμό φθοράς που υπέστησαν κατά το στάδιο της ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Μάλιστα το ποσοστό κόπωσης προκειμένου να επέλθει η αστοχία των δοκιμίων συσχετίζεται άμεσα με το μέγιστο βάθος των διαβρωτικών περιοχών που προσδιορίστηκε κατά το στάδιο της οπτικής παρατήρησης πριν την εφαρμογή των δυναμικών φορτίσεων. Σύμφωνα με την παραπάνω πρόταση τα μεταλλικά δοκίμια, στα οποία εφαρμόστηκαν υψηλής τάξης και ρυθμοί διάβρωσης, παρουσίασαν χαμηλότερη αντοχή σε δυναμική καταπόνηση με αποτέλεσμα χαμηλότερο ποσοστό κόπωσης προκειμένου να επέλθει αστοχία. Μάλιστα, η μείωση της αντοχής και κατ'έκταση το ποσοστό κόπωσης εμφανίζει πλήρη αντιστοιχία με το μέγιστο βάθος διαβρωμένης περιοχής.

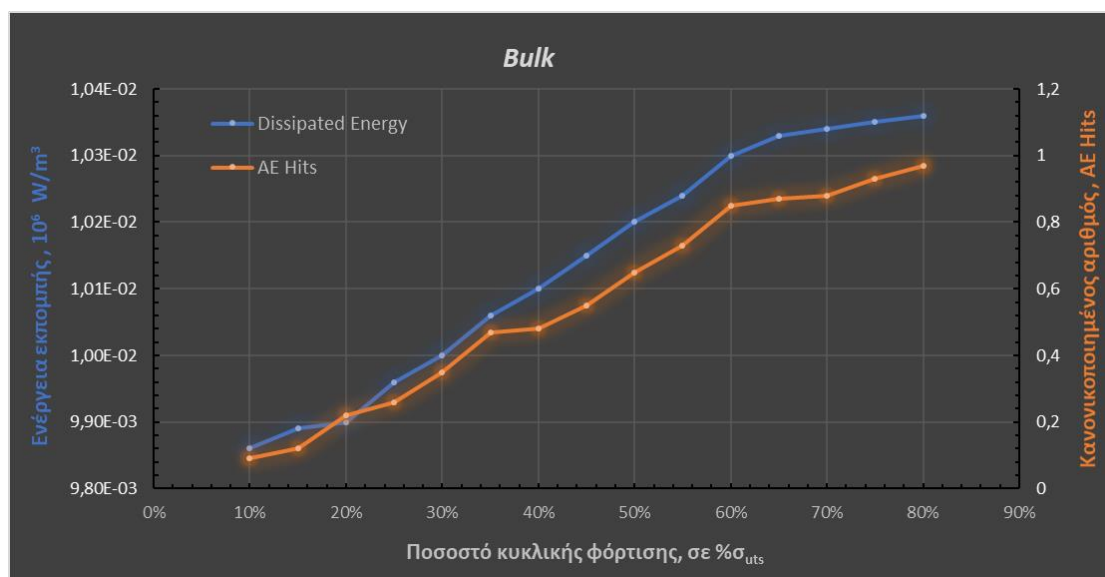
Παράλληλα πέραν των αριθμητικών στοιχείων, παρατηρείται και ποιοτική συσχέτιση της υποβάθμισης των μεταλλικών στοιχείων λόγω διάβρωσης με τον τρόπο και μηχανισμό αστοχίας. Σύμφωνα με την εικόνα όπου παρουσιάζονται οι περιοχές αστοχίας των μεταλλικών δοκιμίων, δοκίμια που περιείχαν διαβρωτικές περιοχές με υψηλό βάθος {δοκίμιο (γ) & (ε)} εμφανίζουν ενδιάμεσες περιοχές αστοχίας και συγκεκριμένα η περιοχή αστοχίας συμπίπτει με το σημείο μέγιστης φθοράς. Αντίθετα, οι περιοχές αστοχίας των δοκιμίων με χαμηλότερο βάθος φθοράς {δοκίμιο (β) & (δ)} δεν συμπίπτουν με τις περιοχές διάβρωσης μεγίστου βάθους. Το παραπάνω φαινόμενο ερμηνεύεται πλήρως μέσω της θεωρίας της μηχανικής συμπεριφοράς στοιχείων σε κυκλικές φορτίσεις με αρχικές ρωγμές, που παρουσιάστηκε στο 1^ο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους της παρούσας διατριβής. Σύμφωνα με αυτήν οι αρχικές περιοχές διάβρωσης οδηγούν στην συγκέντρωση τάσεων κατά την εφαρμογή κυκλικών φορτίσεων, οι οποίες με τη σειρά τους επιταχύνουν την υποβάθμιση της αντοχής των στοιχείων λόγω ανάπτυξης και διάδοσης ρωγμών. Ωστόσο, ο βαθμός υποβάθμισης σχετίζεται με την αρχική κατάσταση της επιφάνειας των στοιχείων με αποτέλεσμα προ υπάρχουσες ρωγμές ή ατέλειες μεγάλου βάθους (όπως στις παρούσες εργαστηριακές δοκιμές) να μειώνουν σημαντικά την μηχανική αντοχή των στοιχείων, καθώς δεν απαιτείται χρόνος ή ενέργεια μέσω φόρτισης για την ανάπτυξη των ρωγμών αλλά μόνο διάδοση αυτών σε κρίσιμες προκειμένου να επέλθει αστοχία.

Τέλος, στα δοκίμια όπου δεν ταυτίζεται η περιοχή αστοχίας με τις διαβρωτικές περιοχές μεγίστου βάθους καθώς και στο καθαρό δοκίμιο, η αστοχία παρατηρείται

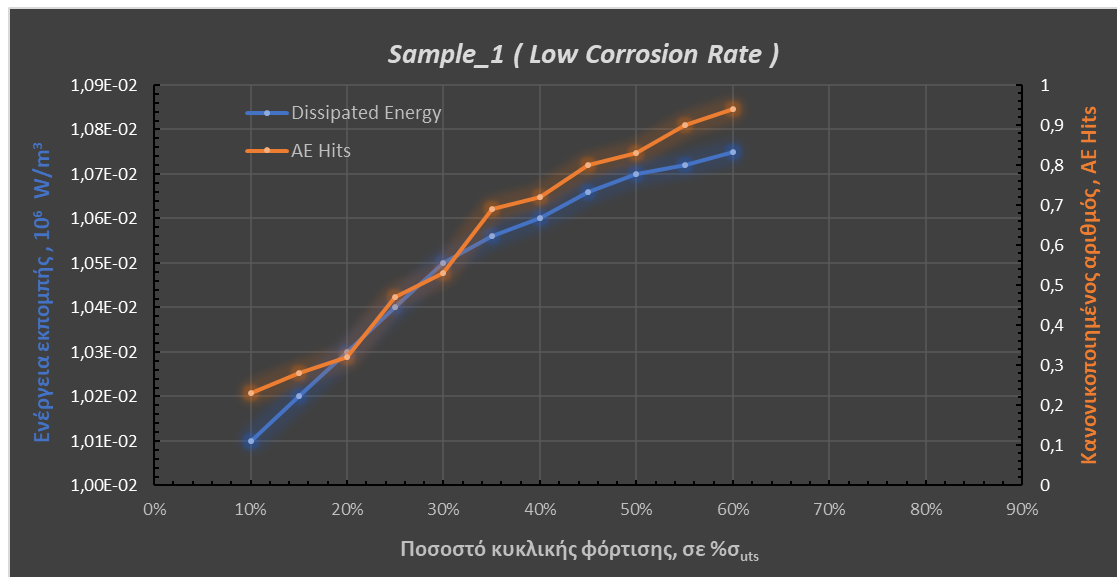
στην αλλαγή γεωμετρίας του ενεργού μήκους. Η παραπάνω συμπεριφορά, οφείλεται αφενός λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που δημιουργείται λόγω αλλαγής της ενεργής διατομής των στοιχείων και αφετέρου λόγω αρχικών εγκοπών ή ατελειών που προκλήθηκαν κατά το στάδιο της κοπής των διαθέσιμων δοκιμίων. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο τρόπος διάδοσης της αστοχίας είναι όμοιος σε όλα τα δοκίμια κόπωσης, προσανατολισμός 45° που υποδηλώνει επίπεδο μέγιστης διατμητικής φόρτισης.

6.7 Διαγράμματα Υπέρυθρης Θερμογραφίας & Ακουστικής Εκπομπής

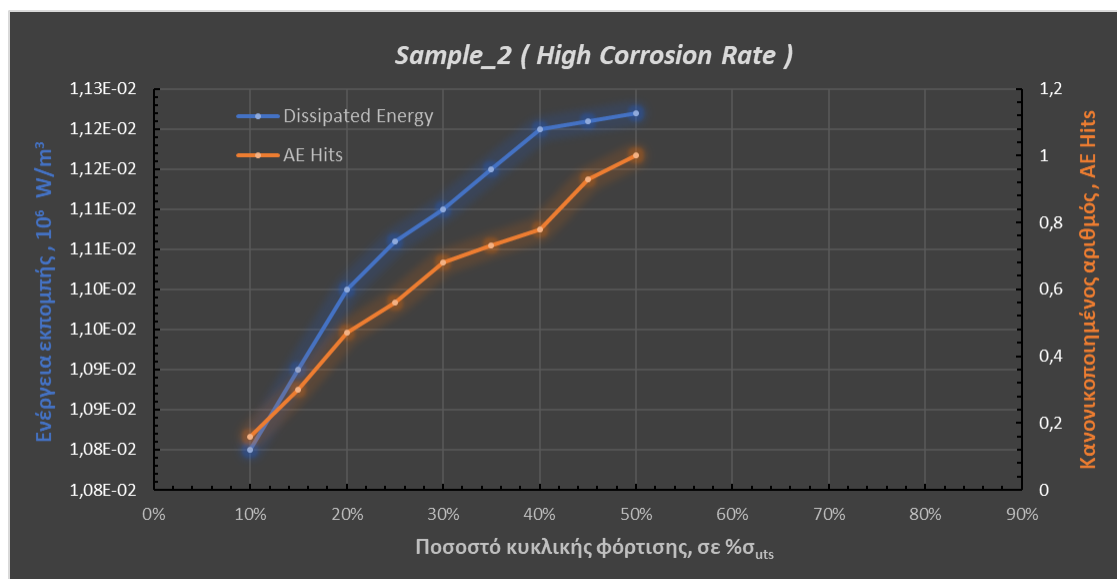
Στην τελευταία ενότητα της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται τα διαγράμματα Θερμογραφίας και Ακουστικής εκπομπής των δοκιμίων αλουμινίου που υπεβλήθησαν σε δυναμικές καταπονήσεις (Διάγραμμα 2 - 6). Στο κάθε ένα διάγραμμα εμφανίζονται δύο καμπύλες, μία της ενέργειας εκπομπής (μπλε χρώμα) και μία του κανονικοποιημένου αριθμού ακουστικών σημάτων (πορτοκαλί χρώμα), σε σχέση με το ποσοστό κυκλικής φόρτισης. Με βάση τα παρακάτω διαγράμματα, έγινε προσπάθεια μελέτης και προσδιορισμού του ορίου διαρκούς αντοχής ή αλλιώς του ορίου κόπωσης σε σχέση με τον ρυθμό διάβρωσης που υπέστησαν τα δοκίμια αλουμινίου.



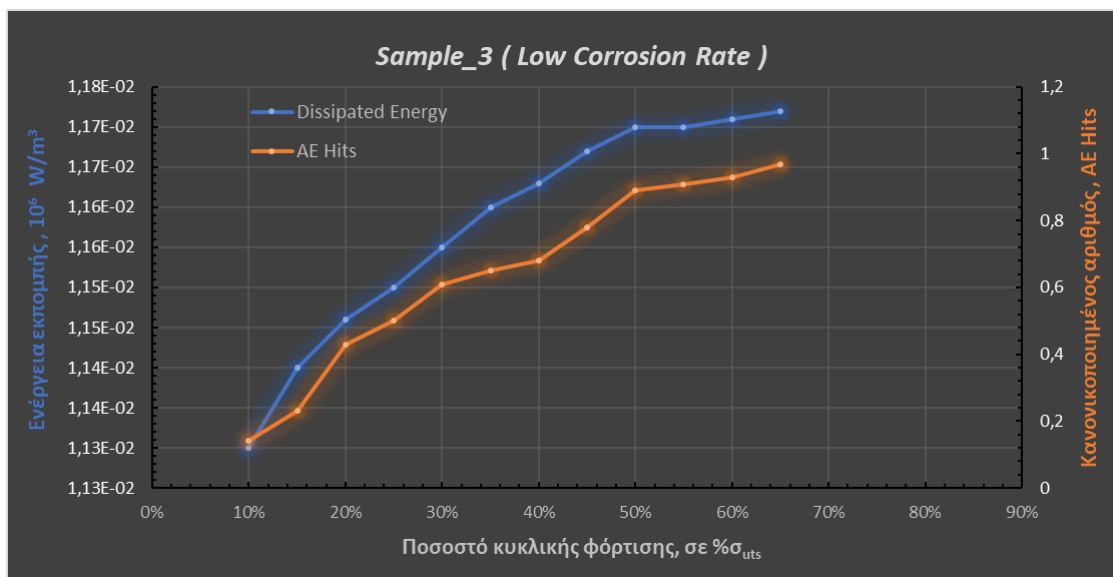
Διάγραμμα 2: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 χωρίς διάβρωση.



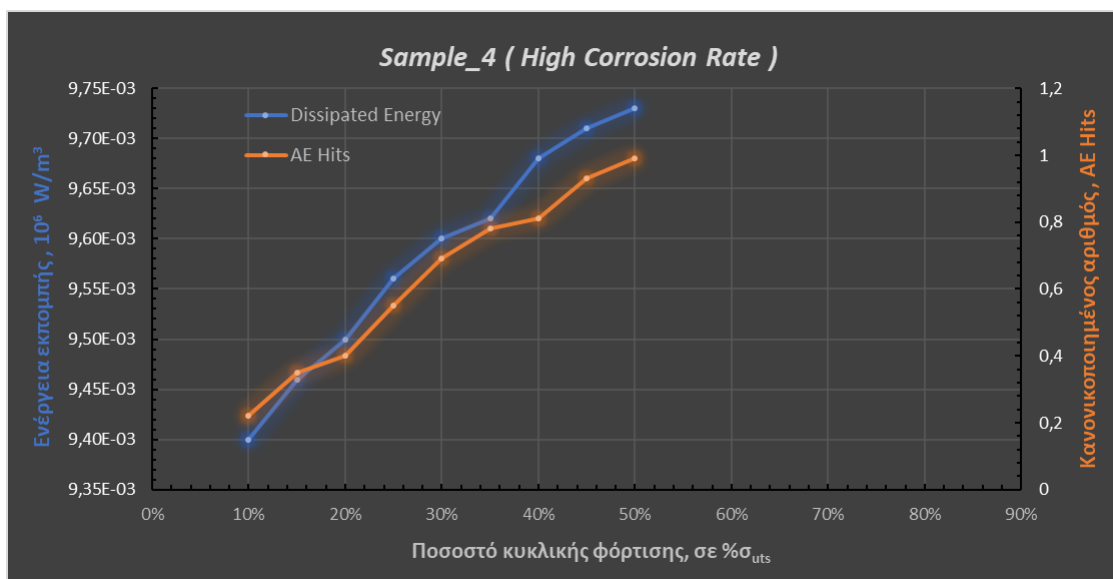
Διάγραμμα 3: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή μικρής τάξης διάβρωσης.



Διάγραμμα 4: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης.



Διάγραμμα 5: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή μικρής τάξης διάβρωσης.



Διάγραμμα 6: Καμπύλες θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής δοκιμίου 7075 - T651 με επιβολή υψηλής τάξης διάβρωσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, τα δοκίμια αλουμινίου που υπέστησαν σημειακή ηλεκτροχημική διάβρωση και στη συνέχεια κυκλικές καταπονήσεις, παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, τόσο οι καμπύλες θερμογραφίας όσο και οι αντίστοιχες ακουστικής εκπομπής παρουσιάζουν μία αυξητική τάση με μικρές μεταβολές κλίσης, σε σχέση με το ποσοστό κυκλικής φόρτισης. Η αυξητική τάση της εκπεμπόμενης ενέργειας και του κανονικοποιημένου αριθμού ηχητικών

σημάτων οφείλεται και ερμηνεύεται στα εσωτερικά αναπτυσσόμενα φαινόμενα όπως γραμμοολισθήσεις επιπέδων σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο, γραμμοαταξίες, ανάπτυξη και εξέλιξη ρωγματώσεων και λοιπά ενεργειακά φαινόμενα. Σύμφωνα με την παραπάνω πρόταση, η συνολική καταγραφή της εκπεμπόμενης ενέργειας και των ηχητικών σημάτων αντίστοιχα αποτελεί μία αθροιστική εικόνα όλων των εσωτερικά αναπτυσσόμενων διαταραχών καθώς και των αντίστοιχων της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, το όριο κόπωσης ή όριο διαρκούς αντοχής μπορεί να προσδιοριστεί μέσω αντίστοιχων διαγραμμάτων θερμογραφίας και ακουστικής εκπομπής, βάση της έντονης μεταβολής της κλίσης των καμπυλών κατά την σταδιακή φόρτιση των δοκιμίων. Παρατηρώντας τις καμπύλες των παραπάνω διαγραμμάτων εντοπίζεται έντονη μετάβαση της κλίσης σε ποσοστό **60% του σ_{uts} για παρθένο δοκίμιο** χωρίς διάβρωση, σε ποσοστό **50% του σ_{uts} για δοκίμια που είχαν υποστεί μικρή τάξη διάβρωσης** και σε ποσοστό **40% του σ_{uts} για δοκίμια που είχαν υποστεί υψηλή τάξη διάβρωσης**. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μετάβαση της κλίσης σημειώνεται στο ίδιο ποσοστό κυκλικής φόρτισης τόσο στις καμπύλες θερμογραφίας όσο και στις αντίστοιχες ακουστικής εκπομπής. Συνοψίζοντας, η εφαρμογή εντοπισμένης ηλεκτροχημικής διάβρωσης υποβαθμίζει σημαντικά την μηχανική αντοχή και συμπεριφορά των δοκιμίων αλουμινίου, μειώνοντας κατ' επέκταση το όριο κόπωσης αυτών.

Μέρος IV : Συμπεράσματα & Συζήτηση

Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διατριβής παραθέτονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας καθώς εξάγονται και συμπεράσματα βάση αυτών. Τέλος, αναφέρονται τρόποι βελτίωσης της παρούσας πειραματικής διαδικασίας προκειμένου να αντιμετωπιστούν μελλοντικά οι διάφορες αστοχίες που εντοπίστηκαν ενώ παράλληλα προτείνονται κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας σχετικά με το παρόν θέμα μελέτης.

7.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων & Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η επίδραση της εντοπισμένης ηλεκτροχημικής διάβρωσης στην μηχανική συμπεριφορά και αντοχή κράματος αλουμινίου 7075 υπό κυκλικές μηχανικές φορτίσεις. Προκειμένου να ενισχυθούν τα μηχανικά και διαβρωτικά χαρακτηριστικά των δοκιμών εφαρμόστηκαν θερμικές κατεργασίες *T651* και *T731*.

Πριν την εφαρμογή των διαφόρων πειραμάτων μηχανικής προσδιορίστηκε η πυκνότητα των διαθέσιμων δοκιμών ή οποία ταυτίζεται με την αντίστοιχη τιμή της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, μετά την εφαρμογή των θερμικών κατεργασιών, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης. Βάση των αποτελεσμάτων αυτών, η εφαρμογή θερμικών κατεργασιών ενισχύει σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά του κράματος. Επιπλέον η θερμική κατεργασία *T651* παρουσιάζει μία εντονότερη πλαστική συμπεριφορά, βάση των τιμών της ενέργειας παραμόρφωσης και βαθμού παραμόρφωσης των δοκιμών, σε σχέση με την *T731*. Η παραπάνω πρόταση επιβεβαιώνεται βάση της βιβλιογραφίας και οφείλεται στις σχηματιζόμενες ενδομεταλλικές φάσεις κατά τα στάδια των θερμικών κατεργασιών. Τέλος, η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και το όριο διαρροής παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και στις δύο θερμικές κατεργασίες.

Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μάκρο-σκληρότητας διάταξης *Brinell* πριν και μετά την εφαρμογή των θερμικών κατεργασιών. Σε αντιστοιχία με τα πειράματα εφελκυσμού, η εφαρμογή θερμικών κατεργασιών οδηγεί στην ενίσχυση της σκληρότητας των δοκιμίων αλουμινίου. Ωστόσο, λόγω προβλημάτων εκτέλεσης των δοκιμών, μη πρότυπες διατάξεις μετρήσεων, δεν μπορούν να συγκριθούν οι τιμές της παρούσας διατριβής με αντίστοιχες της βιβλιογραφίας. Παρόλα αυτά, η θερμική κατεργασία *T731* επιφέρει εντονότερη ενίσχυση της σκληρότητας του αλουμινίου η οποία συμφωνεί με τη βιβλιογραφία βάση της πιο ψαθυρής δομής που προκαλεί λόγω των δύο σταδίων γύρανσης που την χαρακτηρίζουν.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα δυναμικών καταπονήσεων σε δοκίμια κόπωσης που είχαν υποστεί θερμική κατεργασία *T651* και είχαν υποστεί στην εξωτερική τους επιφάνεια εντοπισμένη ηλεκτροχημική διάβρωση. Λόγω προβλημάτων και αστοχιών κατά τη μόνωση των δοκιμίων, οι διαβρωμένες περιοχές παρουσίαζαν έντονες ανομοιογένειες οδηγώντας στην αδυναμία προσδιορισμού κατάλληλων τιμών λόγου διαμέτρου προς βάθους διάβρωσης, περιορίζοντας την μελέτη της επίδρασης της διάβρωσης βάση του μέγιστου βάθους. Βάση των αποτελεσμάτων κόπωσης η επίδραση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης είναι σημαντική και οδηγεί στην αλλοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς και αντοχής των δοκιμίων αλουμινίου. Συγκεκριμένα, η τάξη της μηχανικής υποβάθμισης και αντοχής παρουσιάζει εξάρτηση και αναλογία με το βαθμό εφαρμοζόμενης διάβρωσης, χρόνος διάβρωσης και μέγιστο βάθος περιοχής διάβρωσης. Επιπλέον, στα δοκίμια όπου εφαρμόστηκε υψηλή τάξη διάβρωσης οι περιοχές διάβρωσης αποτέλεσαν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και ταυτίστηκαν με τις περιοχές που προκλήθηκε η αστοχία αυτών. Η παραπάνω πρόταση επιβεβαιώνει την θεωρία της θραυστομηχανικής σε κυκλικές καταπονήσεις σχετικά με την επιφανειακή φύση του φαινομένου της κόπωσης και την επίδραση των επιφανειακών ατελειών στην μηχανική αντοχή δομικών στοιχείων.

Τέλος, μέσω των καμπυλών εκλυόμενης ενέργειας και ακουστικής εκπομπής πραγματοποιήθηκε προσπάθεια προσδιορισμού του ορίου κόπωσης ή ορίου διαρκούς αντοχής τόσο σε παρθένο δοκίμιο όσο και σε δοκίμια που είχαν υποστεί ηλεκτροχημική διάβρωση. Αποτέλεσμα της παραπάνω μελέτης ήταν ότι η ηλεκτροχημική διάβρωση επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά κραμάτων αλουμινίου *7075 – T651*, μειώνοντας το όριο κόπωσης αυτών. Συγκεκριμένα σε δοκίμια αλουμινίου χωρίς αρχική διάβρωση το όριο κόπωσης προσδιορίστηκε σε ποσοστό 60% του σ_{uts} , σε

αντίθεση με δοκίμια αλουμινίου που είχαν υποστεί χαμηλή και υψηλή τάξη διάβρωση όπου το όριο κόπωσης προσδιορίστηκε σε ποσοστό 50% του σ_{uts} και 40% του σ_{uts} αντίστοιχα.

7.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Στην τελευταία ενότητα θα προταθούν τρόποι βελτίωσης της παρούσας πειραματικής διάταξης προκειμένου να αντιμετωπιστούν μελλοντικά τα προβλήματα και οι αστοχίες αυτής, όπως περιεγράφησαν στις παραπάνω ενότητες, καθώς και προτάσεις περαιτέρω μελέτης και έρευνας.

Αναλυτικότερα, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αστοχίες της παρούσας πειραματικής διαδικασίας προτείνονται οι παρακάτω προτάσεις:

- ❖ Παραγωγή νέων δοκιμίων αλουμινίου, τόσο εφελκυσμού όσο και κόπωσης, με έλλειψη αρχικών σχηματιζόμενων εγχοπών και στοιχείων φθοράς στην επιφάνεια τους, η παρουσία των οποίων επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα μηχανικής συμπεριφοράς.
- ❖ Εφαρμογή ειδικού φιλμ διάβρωσης έναντι του βερνικιού νυχιών, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφα η προστασία και μόνωση του δοκιμίου κατά την εφαρμογή ηλεκτροχημικής διάβρωσης και σχηματισμού κυκλικών οπών διάβρωσης.
- ❖ Κατάλληλη γεωμετρία διαμορφώμενων διαβρωμένων περιοχών στην επιφάνεια των δοκιμίων, προκειμένου να προσδιοριστεί ο λόγος (*diameter*)/(*depth*) και να πραγματοποιηθεί συσχέτιση αυτού με τους κύκλους κόπωσης και τη συμπεριφορά του κράματος σε δυναμικές καταπονήσεις.

Παράλληλα, παρατίθενται παρακάτω προτάσεις και κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας και μελέτης:

- ❖ Πραγματοποίηση πειραμάτων με άλλες εφαρμοζόμενες σειρές κραμάτων αλουμινίου όπως το *al - 2024* , προκειμένου να συγκριθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες και συμπεριφορές κατά την επιβολή δυναμικών καταπονήσεων με παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος.
- ❖ Εφαρμογή θερμικών κατεργασιών και μελέτη της επίδρασης αυτών στη μικροδομή των κραμάτων αλουμινίου με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας

σάρωσης, προκειμένου να μελετηθούν τα ενεργειακά – διαχυτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε όλα τα στάδια της κατεργασίας.

- ❖ Πραγματοποίηση πειραμάτων κόπωσης σύνθετων σταδίων κόπωσης (χαμηλών και υψηλών κύκλων κόπωσης) καθώς και μεταβολή της συχνότητας καταπόνησης, προκειμένου να μελετηθεί περαιτέρω η μηχανική συμπεριφορά του στοιχείου σε πραγματικές μηχανικές καταστάσεις.
- ❖ Συσχέτιση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας με αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοίωσης βάση των εξισώσεων θραυστομηχανικής, όπως *Basquin* και *Paris law*.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ματίκας, Θ., & Αγγέλης, Δ. (2015). *Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι*. ΙΩΑΝΝΙΝΑ: ΣΕΑΒ, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ. Ανάκτηση από https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3599/2/00_master_document-KOY.pdf
- Σταματούλης, Σ.-Γ. (2013). *Μη καταστροφικοί Έλεγχοι σε Υφιστάμενες Κατασκευές*. Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Πολιτικών Δομικών Έργων. ΠΕΙΡΑΙΑΣ: ΑΤΕΙΠ. Ανάκτηση από http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/1093/pol_00975.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Adeyemi Dayo Isadare, B. A. (2013). *Effect of Heat Treatment on Some Mechanical Properties of 7075 Aluminium Alloy*. Materials research. Ανάκτηση από http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392013000100024
- AFSA, ALUMINIUM FEDERATION OF SOUTH AFRICA. (2011). *CORROSION RESISTANCE OF ALUMINIUM AND PROTECTIVE MEASURES WHERE APPROPRIATE*. Ανάκτηση από www.afsa.org.za: http://www.conways.co.za/pdf/afsa_corrosion_pocket_guide.pdf
- ALFED, ALUMINIUM FEDERATION. (2010). <https://alfed.org.uk/>. Ανάκτηση από <http://www.alfed.org.uk/files/Fact%20sheets/2-aluminium-and-corrosion.pdf>.
- ALMET MARINE, Aluminium & Stainless Steel for Shipbuilding. (2015). *Almet-Marine*. Ανάκτηση από <http://www.almet-marine.com/en/>: <http://www.almet-marine.com/images/clients/EN/Aluminium-users-guide/Ch10-corrosion-behaviour-of-aluminium-in-marine%20environments.pdf>
- Ankitkumar K. Shriwas, V. C. (2016). *Impact of Aluminum Alloys and microstructures on Engineering Properties - Review*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Ανάκτηση από <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue3/Version-6/C1303061622.pdf>
- Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. (2010). *ΥΛΙΚΑ & Μηχανική, επιστήμη, επεξεργασία και σχεδιασμός* (2η Αγγλική Έκδοση εκδ.). (Γ. Χ. Φαρράς, Επιμ., & Κ. Καρανικολός, Μεταφρ.) Πάτρα: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ.
- Beattie, A. G. (2013). *Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques*. Sandia National Laboratories, Department of Wind Energy Technologies. California: U.S. Department of Commerce. Ανάκτηση από <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2013/137779.pdf>
- Benedyk, J. (2009, September). International temper designation systems for wrought aluminum alloys: Part I - Strain hardenable (H Temper) aluminum alloys.

- Researchgate*, σσ. 67. 26-30. Ανάκτηση από
<https://www.lightmetalage.com/PDFs/LMA-2009-10-026TempersPartI.pdf>
- Cerri, E., & Evangelista, E. (1999). *Metallography of Aluminium alloys*. Università di Ancona-Italy, Dipartimento di Meccanica. ANCONA: EAA - European Aluminium Association. Ανάκτηση από <https://www.slideshare.net/corematerials/talat-lecture-1202-metallography-of-aluminium-alloys-2318129>
- D., C. W. (2015). *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΑΙΚΩΝ* (9η Έκδοση εκδ.). (D. G. RETHWISH, Επιμ.) ΤΖΙΟΛΑ.
- Eitzen, D., & Wadley, H. (1984, January 23). Acoustic Emission: Establishing the Fundamentals. *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards*, σ. Vol. 89. Ανάκτηση από
http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/Documents/Publications/Acoustic_Emission_Establishing_Fundamentals.pdf
- Fatemi, A. (2010). *CYCLIC DEFORMATION & STRAIN-LIFE (e -N) APPROACH*. University of Toledo, Mechanical Engineering.
- FLIR Systems. (2018). THE ULTIMATE INFRARED HANDBOOK FOR R&D PROFESSIONALS. *Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry*. Ανάκτηση από
https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243_EN.pdf
- Giannatsis Ioannis, D. V. (2015). Τεχνολογίες Μέτρησης και Αντίστροφου Σχεδιασμού. Στο D. V. Giannatsis Ioannis, & A. Georgios (Επιμ.), *Σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής με τη βοήθεια H/Y*. Πειραια: Kallipos publications. Ανάκτηση από
<http://hdl.handle.net/11419/4526>
- Gustafsson, S. (2011). *Corrosion properties of aluminium alloys and surface treated alloys in tap water*. UPPSALA UNIVERSITET. Teknisk- Naturvetenskaplig Fakultet: JUNI. Ανάκτηση από <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:436113/FULLTEXT01.pdf>corrosion
- Holford, K. M. (2008, October). Acoustic Emission–Basic Principles and Future Directions. *ResearchGate*, σσ. 51 - 54. Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/publication/229786161_Acoustic_Emission-Basic_Principles_and_Future_Directions
- IMAD, A. S. (1996). *ΜΕΛΕΤΗ ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΙΙΚΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ. ΒΟΛΟΣ: Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly. Ανάκτηση από
<http://ir.lib.uth.gr/bitstream/handle/11615/13249/P0013249.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Jun , Z. (2011). *A Study Of Acoustic Emission Technique For Concrete Damage Detection*. MICHIGAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Civil Engineering, Michigan.
Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/publication/304090056_A_study_of_acoustic_emission_technique_for_concrete_damage_detection
- La Rosa, G., Clienti, C., & Lo Savio, F. (2014). Fatigue Analysis by Acoustic Emission and Thermographic Techniques. *Procedia Engineering*, Volume 74, σσ. 261-268.
Ανάκτηση από <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814008297>
- Land, Instruments International Infrared Temperature Measurement. (2004). A Basic Guide to Thermography. *Land Products and Services*. Ανάκτηση από
http://www.lirkorea.com/Landinstruments.net%20Website/infrared/downloads/pdf/thermography_guide.pdf
- Lixin Gao, Fenlou Zai, Shanbin Su, Huaqing Wang, Peng Chen, & Limei Liu. (2010, December 21). Study and Application of Acoustic Emission Testing in Fault Diagnosis of Low-Speed Heavy-Duty Gears. *Sensors*, σσ. 599-611. Ανάκτηση από
https://www.researchgate.net/publication/221844012_Study_and_Application_of_Acoustic_Emission_Testing_in_Fault_Diagnosis_of_Low-Speed_Heavy-Duty_Gears
- Lyon, S. (2010). Chapter 1: Overview of Corrosion Science. Στο S. Lyon, *Corrosion and Protection Centre*. University of Manchester, School of Materials, Oxford.
- M.Dinesh, R. (2016, June). Tensile And Hardness Behavior Of Aluminum 7075 And Zinc And Chromium Metal Matrix Composite By Stir-Casting Route. *International Archive of Applied Sciences and Technology*, σσ. 39-46.
doi:DOI.10.15515/iaast.0976-4828.7.2.3946
- MALDAGUE, X. P. (2001). *THEORY AND PRACTICE OF INFRARED TECHNOLOGY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING*. (W. S. CHANG, Επιμ.) CANADA: JOHN WILEY & SONS. Ανάκτηση από <https://www.wiley.com/en-us/Theory+and+Practice+of+Infrared+Technology+for+Nondestructive+Testing-p-9780471181903>
- Mars, F. G. (1987). *CORROSION ENGINEERING* (Third Edition εκδ.). Singapore: McGraw-Hill Book Co. Ανάκτηση από
<https://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/quimica/197.pdf>
- MISTRAS GROUP HELLAS, ABEE. (2005). http://www.mistrasgroup.gr/company_gr.htm.
Ανάκτηση από http://www.mistrasgroup.gr/acoustic_emission_theory_gr.htm.
- PADFIELD, DAVID;. (2018). *ACOUSTIC EMISSION GLOBAL INSPECTION TECHNIQUE*. Ανάκτηση από ATTAR, Advanced Technology Testing and Research:
<http://attar.com.au/Acoustic-Emission-Testing>

- Patibandla, S. B. (December 2011). *Metal Fatigue and Basic , Theoretical Models: A Review*. Vellore Institute of Technology, School of Mechanical and Building Sciences. India: Tamil Nadu.
- Pierre, R. R. (1999). *Handbook of Corrosion Engineering*. New York San Francisco Washington, D.C.: McGraw-Hill. Ανάκτηση από <https://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/quimica/197.pdf>
- R.B.C. Cayless. (1990). *Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Alcan Rolled Products Company. Ανάκτηση από <https://dl.asminternational.org/books/book/14/chapter-abstract/186968/Alloy-and-Temper-Designation-Systems-for-Aluminum?redirectedFrom=fulltext>
- R.M. Chlistovsky, P. H. (2007). *Corrosion-fatigue behaviour of 7075-T651 aluminum alloy subjected to periodic overloads*. Royal Military College of Canada,, Department of Mechanical Engineering. Canada: Elsevier. Ανάκτηση January 16, 2007, από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112307000333>
- Roylance, D. (May 1, 2001). *Fatigue*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Cambridge, MA 02139.
- S.I. Rokhlin, J.-Y. K. (1998). *Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life*. Ohio State University, Department of Industrial, Welding and Systems Engineering. USA: PERGAMON. Ανάκτηση October 30, 1999, από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794498001015>
- SABBAHAL, P. D. (2016). *PRINCIPLES OF CORROSIONELECTROCHEMICAL*. SABBAHAL-AZHAR UNIVERSITY, FACULTY OF SCIENCE, AL-AZHAR. Ανάκτηση από http://scib.azhar.live/wp-content/uploads/2016/03/CORROSION_PRINCIPLE_II_Modified.pdf
- Safiuddin, M. (2006, January). OCCURRENCES OF CORROSION: CAUSES AND PREVENTION. *BRAC University Journal* , Vol. III, No. 1, σσ. pp. 71-74. Ανάκτηση από <https://www.researchgate.net/publication/228372597>
- Sondalini, M. (2016). *Accendo Reliability, Reliability Engineering Professional Development*. Ανάκτηση από <https://accendoreliability.com>: <https://accendoreliability.com/metal-fatigue-failure/>
- Tatsuo Sakai, A. N. (2016, May 25). A review on fatigue fracture modes of structural metallic materials in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*, σσ. 339–351. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112316301372>

- Tolga Dursun, C. S. (2014). *Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys*. Materials and design. Ανάκτηση από <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/recent-developments-in-advanced-aircraft-aluminium-alloys-CeYk9O8Abc>
- Wadley, H. N., Scruby, C. B., & Speake, H. (1980). Acoustic emission for physical examination of metals. *International Metals Reviews*. Ανάκτηση από http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/Documents/Publications/Acoustic_Emission_Physical_Examination_Metals.pdf
- WEVERS, M., & SURGEON, M. (2000). *Acoustic Emission and Composites*. Elsevier Science Ltd.
- WINSTON , R. R., & HERBERT, U. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control* (FOURTH EDITION εκδ.). Canada: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/profile/Mohammad_Sadegh_Khanahmadi/publication/317589893_367Corrosion_and_Corrosion_Control/data/5941cf50a6fdcc13d688ce30/367Corrosion-and-Corrosion-Control.pdf
- Xin-Yan Zhang, S.-X. L. (2013). *Effect of corrosion pits on fatigue life and crack initiation*. Lanzhou University of Technology, School of PetroChemical Engineering. Beijing, China: 13th International Conference on Fracture. Ανάκτηση από <https://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/icf13/paper/download/11213/10592>
- Y. Yi, P. C. (2013). *Potentiodynamic polarization behaviour of AISI type 316 stainless steel*. Khalifa University, Department of Nuclear Engineering,. Elsevier. Ανάκτηση April 22, 2013, από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X13001534>
- Yunus, C. A., & Michel, B. A. (2011). *Thermodynamics: An Engineering Approach, Seventh Edition in SI Units*. (Π. Τσιακάρας, Επιμ., & Ε. Κοτσιαλος, Μεταφρ.) ΑΘΗΝΑ: ΤΖΙΟΛΑ. Ανάκτηση από http://www.academia.edu/24838652/Thermodynamics_An_Engineering_Approach_Seventh_Edition_in_SI_Units_Chapter_5_MASS_AND_ENERGY_ANALYSIS_OF_CONTROL_VOLUMES
- ΑΘΗΝΑ, Ι. (2009). *ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΙΚΟ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΠΙΓΜΕΝΤΟ ΑΠΟ ΑΝΟΞΕΙΩΤΟ ΧΑΛΥΒΑ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανάκτηση από http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/2921/iosifidoua_corrosion.pdf?sequence=3
- ΑΪΒΑΛΙΩΤΗΣ , Π., & ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΥ , Δ. (2008). *ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ

- ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ,
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ:
ΑΠΘ. Ανάκτηση από
https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_therm2.pdf
- ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ, Ν. (2010). *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο , ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ, ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ.
- Ασημακόπουλος, Α. (2007). *Συμπεριφορά των υλικών σε δυναμικές φορτίσεις-Κόπωση*. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών, Μηχανολόγων Μηχανικών. ΣΕΡΡΕΣ: ΤΕΙ ΣΕΡΡΩΝ.
- ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, Κ. (Οκτώβριος 2014). *Μελέτη της κόπωσης και ανοχής στη βλάβη & αστοχίες σε αεροπορικά μηχανολογικά στοιχεία*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΑΘΗΝΑ.
- ΓΕΩΡΓΑΤΗΣ, Ε. (2017). *ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ - ΑΝΟΔΙΩΣΗ*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ, ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ. ΙΩΑΝΝΙΝΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ.
Ανάκτηση από
http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/7_stoixeia%20antoxhs%20diavrosh%20anodiosi.pdf
- ΓΕΩΡΓΑΤΗΣ, Ε. (2017). *ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ - ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ*. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ. ΙΩΑΝΝΙΝΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ. Ανάκτηση από
http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a_aluminum_alloys.pdf
- ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Κ. (2010). *ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΣΚΕΥΑΣΜΑΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ*. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ.
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: Α.Π.Θ. Ανάκτηση από
<https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/23507>
- ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Σ. (2008). *ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΒΑΦΗ*. Τ.Ε.Ι ΣΕΡΡΩΝ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΣΕΡΡΕΣ: Τ.Ε.Ι ΣΕΡΡΩΝ. Ανάκτηση από
<http://apothesis.teicm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/736/sidiropoulos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΥ, Π. Κ. (2012). *ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟ- ΚΑΙ ΝΑΝΟ-ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ ΣΕ ΜΗΤΡΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

- ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανάκτηση από
http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/6573/diamantopoulosp_fsp.pdf?sequence=1
- Δρ. Κ. Μέντρεα, Π. (2010). *ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΗΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ, Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ, ΦΥΣΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ, ΠΕΙΡΑΙΑ. Ανάκτηση από
<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/CIVI124/02.1%20Σκληρομέτρηση%20Μεταλλικών%20Υλικών.pdf>
- ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ. (2018). *Aluminium*. Ανάκτηση από
<http://www.aluminium.org.gr/index.php>:
<http://www.aluminium.org.gr/%CF%84%CE%BF-%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CF%85%CE%BC%CE%AF%CE%BD%CE%B9%CE%BF-i-113.html>
- ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ, Μ. (2010). *ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΑΙΔΡΩΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ORMOSIL ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΚΡΑΜΑ ΑΡΓΙΛΙΟΥ 2024-T3 ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΔΟΧΕΙΩΝ ΕΜΠΙΟΥΤΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. ΠΑΤΡΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ. Ανάκτηση από
http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/3680/1/MSc_Mekeridis.pdf
- Ευκλείδου, Τ., Παναγιώτου, Σ., & Γιαννακουδάκης, Π. (2013). *Ηλεκτροχημικά στοιχεία*. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΧΗΜΕΙΑΣ ΑΠΘ. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΑΠΘ. Ανάκτηση από
<http://electrochemistry.web.auth.gr/cells/index.php/2013-07-26-23-05-42>
- Ιωάννης, Ο. (2008). *Οπτική προφίλομετρία λευκού φωτός*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών. Ηράκλειο: Παπάζογλου Δημήτριος. Ανάκτηση από www.optics-vision.gr/files/items/2/26/orphanos_ioannis_2008.pdf
- Κατσαμάς, Α. Ι., Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν., & Κερμανίδης, Α. (2005). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ* (Τόμ. VII ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΡΑΥΣΕΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ). ΒΟΛΟΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- Κατσαμάς, Α. Ι., Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν., & Κερμανίδης, Α. (2005). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ* (Τόμ. VIII. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ). ΒΟΛΟΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.

- Κατσαμάς, Α., Χαϊδεμενόπουλος, Γ., & Κερμανίδης, Α. (2005). *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ*. ΒΟΛΟΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- Κουσίδης, Σ. (2013). *Μη Καταστροφικός Έλεγχος Μέθοδος Υπερήχων*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη. Ανάκτηση από <https://dspace.uowm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/118/%CE%9C%CE%9A%CE%95%20%CE%BC%CE%B5%20%CF%84%CE%B7%CE%BD%20%CE%9C%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%20%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CE%A5%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%AE%CF%87%CF%89%CE%BD%20-%20Kousidis%20Savvas.pdf?s>
- Κυπριωτάκη, Α. (2012). *ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΔΟΠΛΟΥ & ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανάκτηση από <http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/7298/kypriotaki.pdf?sequence=1>
- ΛΑΓΑΡΗΣ, Δ. Α. (2009). *ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανάκτηση από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/3411>
- Λεκάτου, Α. (2005). *ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ*. ΙΩΑΝΝΙΝΑ: ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ.
- ΛΕΚΑΤΟΥ, Α. (2013). *Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΑΠΛΑ ΛΟΓΙΑ*. ΙΩΑΝΝΙΝΑ: ΝΗΜΕΡΤΗΣ.
- ΜΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ, Α. Α. (2011). *ΕΝΤΟΠΙΣΕΝΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 7XXX ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΗ ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ*. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: Α.Π.Θ. Ανάκτηση από <https://docplayer.gr/72229817-Didaktoriki-diatrivi-azarias-a-mayropoylos.html>
- ΜΟΥΡΤΖΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. (2014). *ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΚΥΜΑΤΑ, ΠΗΓΕΣ, ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΠΑΤΡΑ. Ανάκτηση από www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/
- Νικολός, Ι. Κ. (2007). *ΣΕΙΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ*. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ,

- XANIA. Ανάκτηση από http://users.uoi.gr/vkalpak/files/Notes_Heat-Transfer_Nikolos.pdf
- ΝΤΑΦΛΟΥ, Ε. (2012). *ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανάκτηση από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/6521>
- Παλτόγλου, Β. (2016). *Μηχανικές και Θερμικές Ιδιότητες Υλικών, ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ & ΘΡΑΥΣΗ*. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ, ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ, ΙΩΑΝΝΙΝΑ.
- ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, Μ. (2015). *ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΕΝΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΑΠΟ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΙΚΑ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ)*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ. Ανάκτηση από <https://core.ac.uk/download/pdf/45649220.pdf>
- ΠΑΝΙΔΗΣ, Θ. (2010). *ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΑΣ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΠΑΤΡΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΤΡΩΝ. Ανάκτηση από http://www.lat.upatras.gr/pdf/publications/shmeiwseis_metadosh_9ermothtas.pdf
- ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Χ. Α. (2013). *ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ* (2η ΈΚΔΟΣΗ εκδ.). ΠΑΤΡΑ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ: ΤΖΙΟΛΑ.
- ΠΑΠΠΟΥ, Ι. Π. (2012). *ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ*. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΠΑΤΡΑ. Ανάκτηση από <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/5735>
- Παυλόπουλος, Ε. (2016). *TECHNICAL MANUAL OF THERMAL INFRARED TESTING*. Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά ΤΤ, Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. ΑΘΗΝΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ. Ανάκτηση από <http://oceanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2670/%CE%A4%CE%95%CE%A7%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%95%CE%93%CE%A7%CE%95%CE%99%CE%A1%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%20%CE%A7%CE%A1%CE%97%CE%A3%CE%97%CE%A3%20%CE%A4%CE%97%CE%A3%20%CE%9C%CE%95%CE%98%C>
- Σαρμή, Ε., & Τσολπίδου, Δ. (2004). *ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΔΙΕΛΑΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ*. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΒΑΛΑΣ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ. ΚΑΒΑΛΑ: ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΒΑΛΑΣ.

- Στ., Δ. Γ. (2016). *ΑΝΤΟΧΗ ΥΛΙΚΩΝ & Πείραμα Κρούσης*, Εργαστηριακή Άσκηση 6η.
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ, ΤΕΙ Χαλκίδας, Τεχνολογίας Αεροσκαφών.
- ΣΩΤΗΡΑΚΗΣ, Σ. (2016). *ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ*.
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΑΘΗΝΩΝ, ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε., ΑΘΗΝΑ.
- ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ, Δ. Μ. (2012). *Επεξεργασία εικόνων θερμοκάμερας για την αποτίμηση
σφαλμάτων στις πλατείες Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
Ανάκτηση από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/8651?show=full>
- Τριανταφυλλίδης, Γ. Κ. (2016). *ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ* (3η Έκδοση εκδ.). ΑΘΗΝΑ: ΤΖΙΟΛΑ.
- Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν. (2006). *ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ*. ΒΟΛΟΣ: ΤΖΙΟΛΑ.
- Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν., & Κατσαμάς, Α. Ι. (2003). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΛΙΚΩΝ*. ΒΟΛΟΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- Χρήστος, Σ. (Οκτώβριος 2014). *Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών*.
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Αθήνα.
- Ψυλλάκη, Δ. Π. (2006). *ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ ΓΙΑ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ.
ΙΩΑΝΝΙΝΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ. Ανάκτηση από
[http://triblab.teipir.gr/files/UOI%202012-
2013/Failure%20Analysis%20and%20Materials%20Selection.pdf](http://triblab.teipir.gr/files/UOI%202012-2013/Failure%20Analysis%20and%20Materials%20Selection.pdf)