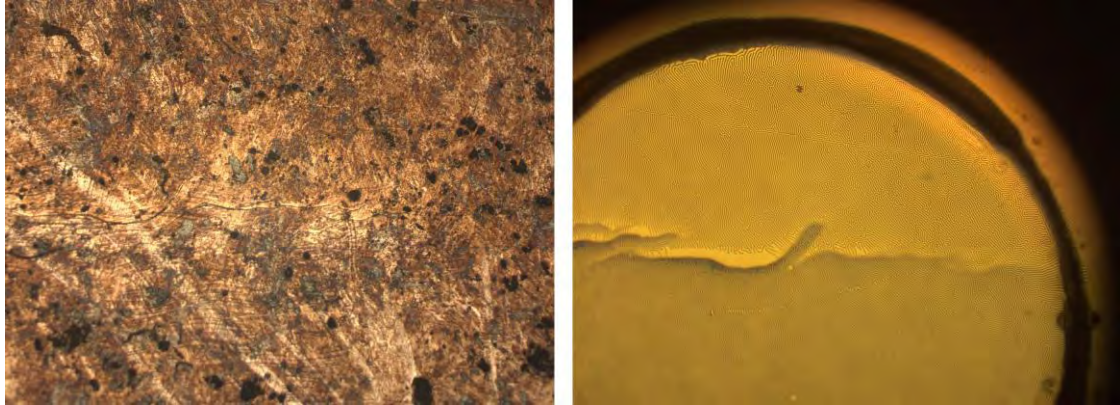




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ RCF (Rolling
Contact Fatigue) ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΗ
ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟΥ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ**

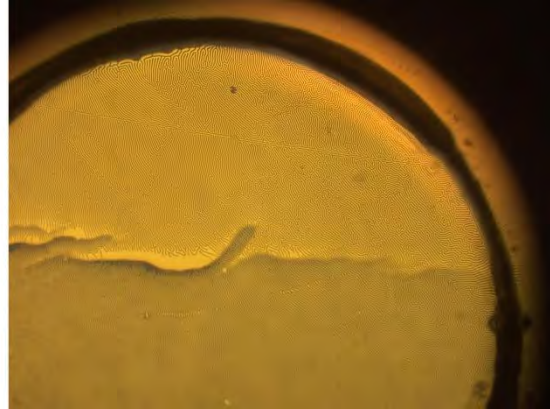
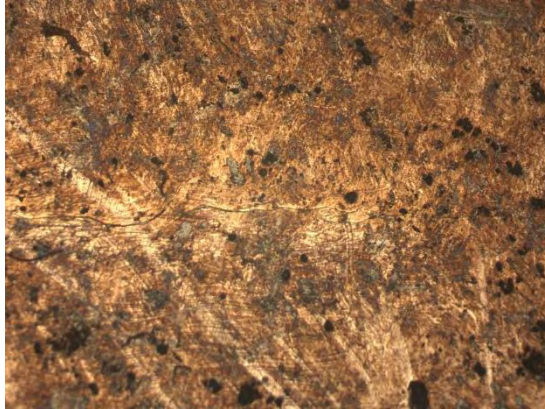
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΡΟΠΑΚΗΣ

Βόλος, Οκτώβριος 2016



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ RCF (Rolling
Contact Fatigue) ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΗ
ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟΥ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΡΟΠΑΚΗΣ

Βόλος, Οκτώβριος 2016

© 2016 Νικόλαος Μαροπάκης

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ / ΜΜ / ΕΕΕΕ

Δρ. Άννα Ζερβάκη, (Υπογραφή)

Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος, (Υπογραφή)

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης, (Υπογραφή)

Βόλος, Οκτώβριος 2016

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την παρακολούθηση και μελέτη του φαινομένου της κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση (RCF) μέσω του δικτύου των ρωγμών που δημιουργούνται στις σιδηροτροχιές του Μετρό Αθηνών. Η έγκαιρη ανίχνευση του δικτύου των ρωγματώσεων αποτελεί βασική προτεραιότητα του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, προκειμένου να σχεδιάζονται μέτρα αντιμετώπισης ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αστοχίας των σιδηροτροχιών (derailing).

Η μελέτη περιλαμβάνει την αποτύπωση του δικτύου όδευσης των ρωγμών σε σιδηροτροχιά που έχει υποστεί τρόχισμα μία φορά για την απομάκρυνση των ρωγμών, τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό της, με δύο διαφορετικές μεθόδους.

- Η πρώτη μέθοδος αφορά τη μεταλλογραφική ανάλυση δοκιμίων της ράγας, με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου και στερεοσκοπίου, και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρωγματώσεων (καταστρεπτική μέθοδος).
- Στη δεύτερη μέθοδο πραγματοποιείται αποτύπωση των ρωγμών του ίδιου δοκιμίου, με την βοήθεια ενός μαγνητοοπτικού αισθητήρα, βασιζόμενη στο διαφεύγον μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του φερρομαγνητικού υλικού της ράγας, λόγω των ασυνεχειών που προκύπτουν από τις ρωγμές (μη καταστρεπτική μέθοδος).

Στο τελικό στάδιο της εργασίας, γίνεται αξιολόγηση και σύγκριση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τις δύο μεθόδους, και διερευνάται το κατά πόσο συγκλίνουν οι δύο τρόποι προσέγγισης του φαινομένου.

Τα αποτελέσματα της εργασίας συμβάλλουν στην ανάπτυξη μεθόδων παρακολούθησης του φαινομένου RCF, και δύναται να αξιοποιηθούν στην ανάπτυξη μιας μη καταστρεπτικής μεθόδου ανίχνευσης επιφανειακών ρωγμών στα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Abstract

The object of the current diploma thesis is the monitoring and study of the rolling contact fatigue (RCF) phenomenon, through the network of cracks that arise in the Athens Metro rails. Early detection of the cracks is a key priority in order to plan effective ways of coping with RCF and avoid failures leading to derailment.

This study includes the mapping of the crack network, both in the surface and the subsurface area of a rail which has been subjected to grinding for the removal of RCF cracks once, prior to the investigation.

During the investigation two different methods were used:

- The first method involves the metallographic analysis of a rail specimen, using an optical microscope and a stereoscope and determining the geometrical characteristics of the cracks (Destructive technique).
- Through the second method, mapping of the cracks performed on the same specimen, by means of a magneto-optical sensor, based on the measurements of the stray magnetic field that occurs on the surface of the rail, due to discontinuities resulting from the cracks (Nondestructive technique).

In the final stage of the study, the results collected by the two different methods were evaluated and compared, in order to decide whether the two methods converge.

The results of this study are able to assist in monitoring the RCF phenomenon, as well as to be used to develop a non-destructive method of detecting surface defects on railway networks.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής Δρ. Άννα Ζερβάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την αποδοχή της συνεργασίας μας, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, τους καθηγητές, Δρ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και Δρ. Αλέξη Κερμανίδη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή, άλλα και για την ώθηση που μου έδωσαν μέσα από την διδασκαλία τους, ώστε να ασχοληθώ με τον τομέα της Επιστήμης των Υλικών.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», και συγκεκριμένα τον Δρ. Μιχάλη Πίσσα, που παρείχε τα μέσα και την τεχνογνωσία για την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής μεθόδου ανίχνευσης των ρωγμών, καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε για τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Επιπλέον, οφείλω ένα ευχαριστώ στον φοιτητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αλέξανδρο Χοτζόγλου, για τον χρόνο του και την βοήθειά του στη χρήση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Ακόμα, είμαι ευγνώμων σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου, και ιδιαίτερα στους Φώτη Στρατηγό και Κωνσταντίνο Καραγιάννη. Στον πρώτο για την πολύτιμη συμβολή του στα πρώτα βήματα αυτής της εργασίας, ενώ στον δεύτερο για την πολύ σημαντική ηθική υποστήριξή του, από την πρώτη μέρα των σπουδών μου μέχρι και την τελευταία.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στους γονείς μου και την αδερφή μου, Στέλλα, για την δυνατότητα που μου έδωσαν να σπουδάσω και την κάθε μορφής υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ RCF | 3 |
| 1.1. Κόπωση εξ επαφής σε κύλιση (Rolling Contact Fatigue-RCF) | 3 |
| 1.2. Εντατικό πεδίο και καταπονήσεις | 3 |
| 1.2.1. Τάσεις επαφής | 4 |
| 1.2.2. Καμπτικές τάσεις | 5 |
| 1.2.3. Παραμένουσες και θερμικές τάσεις | 7 |
| 1.3. Σφάλματα λόγω RCF | 8 |
| 1.4. Αντιμετώπιση του RCF | 10 |
| 2. ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ | 13 |
| 2.1. Φυσική αρχή Μαγνητοοπτικού φαινομένου | 13 |
| 2.2. Διαφεύγον μαγνητικό πεδίο | 17 |
| 2.3. Μαγνητοοπτική αντίθεση | 19 |
| 3. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ | 21 |
| 3.1. Χρονική εξέλιξη | 21 |
| 3.2. Μικροδομή και μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα Grade 900A | 22 |
| 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ | 26 |
| 4.1. Προετοιμασία δοκιμών | 26 |
| 4.1.1. Δοκίμιο A | 27 |
| 4.1.2. Δοκίμιο B | 28 |
| 4.2. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι | 28 |
| 4.3. Μεταλλογραφική ανάλυση | 28 |
| 4.4. Ανίχνευση ρωγμών με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα | 29 |
| 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 32 |
| 5.1. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι στο δοκίμιο A | 32 |
| 5.2. Μεταλλογραφική ανάλυση | 33 |
| 5.2.1. Εγκάρσια τομή δοκιμίου A | 33 |
| 5.2.2. Επιφάνεια δοκιμίου A | 37 |
| 5.2.3. Εγκάρσια τομή δοκιμίου B | 41 |
| 5.2.4. Επιφάνεια δοκιμίου B | 46 |
| 5.3. Ανίχνευση ρωγμών με την χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα | 49 |
| 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 55 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 57 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.2.1: Συνολικό εντατικό πεδίο κατά την κύλιση του τροχού στην σιδηροτροχιά [9]..... | 4 |
| Εικόνα 1.3.1: Εκτεταμένο shelling στην επιφάνεια σιδηροτροχιάς [8]..... | 8 |
| Εικόνα 1.3.2: Spalling στην επιφάνεια του gauge corner [8]..... | 9 |
| Εικόνα 1.3.3: Το φαινόμενο των Head checks στην επιφάνεια σιδηροτροχιάς [16]..... | 10 |
| Εικόνα 1.4.1: Magic Wear Rate..... | 12 |
| Εικόνα 2.1.1: Το αρχικά μη πολωμένο φως, περνάει μέσα από πολωτή και εξέρχεται ως γραμμικά πολωμένο [21] | 14 |
| Εικόνα 2.1.2: Κυκλικά πολωμένο φως..... | 15 |
| Εικόνα 2.1.3: Το φαινόμενο Faraday. Στροφή του πεδίου πόλωσης κατά γωνία φ όταν το κύμα διαδίδεται μέσω μαγνητικού πεδίου παράλληλο στην διεύθυνση διάδοσης..... | 16 |
| Εικόνα 2.2.1: Διαφεύγον μαγνητικό πεδίο λόγω ασυνέχειας στην επιφάνεια..... | 18 |
| Εικόνα 2.2.2: Προσομοίωση, με πεπερασμένα στοιχεία, μαγνητικού πεδίου μοντέλου φερρομαγνητικού υλικού με ρωγμή κάθετη στην επιφάνεια [22] | 18 |
| Εικόνα 3.1.1: Η επιφάνεια της σιδηροτροχιάς του μπαινιτικού χάλυβα (αριστερά) και του περλιτικού (δεξιά) [24] | 22 |
| Εικόνα 3.2.1: Η περλιτική μικροδομή του χάλυβα Grade 900A. Οι σκούρες γραμμές ανάμεσα στον φερρίτη είναι οι λαμέλες του σεμεντίτη | 23 |
| Εικόνα 3.2.2: Προετνηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς..... | 25 |
| Εικόνα 4.1.1: Τμήμα της σιδηροτροχιάς από το οποίο κόπηκαν τα δοκίμια, όπως παραλήφθηκε από το μηχανουργείο. Το βέλος δείχνει την φορά κίνησης της αμαξοστοιχίας..... | 27 |
| Εικόνα 4.4.1: Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας της εταιρίας MATESY που χρησιμοποιήθηκε στην ανίχνευση των ρωγμών..... | 29 |
| Εικόνα 5.1.1: Η επιφάνεια του δοκιμίου μετά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά. Το βέλος δείχνει την φορά κίνησης της αμαξοστοιχίας | 32 |
| Εικόνα 5.1.2: Η επιφάνεια του δοκιμίου μετά τον έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια..... | 32 |
| Εικόνα 5.2.1: Το σημείο έναρξης της ρωγμής 1 στο οποίο εμφανίζονται τα ανοιγμένα “χείλη” στην επιφάνεια της ρωγμής | 34 |
| Εικόνα 5.2.2: Η ρωγμή 4 σε μεγέθυνση x100 και το σημείο όπου αυτή στρίβει προς το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς. | 35 |
| Εικόνα 5.2.3: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 8. Στο τέλος της ρωγμής φαίνεται πως αυτή στρίβει με πορεία το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς..... | 35 |
| Εικόνα 5.2.4: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 9 η οποία εξελίσσεται σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια..... | 36 |
| Εικόνα 5.2.5: Εικόνα από την εγκάρσια τομή στην περιοχή του gauge corner..... | 36 |
| Εικόνα 5.2.6: Οι ρωγμές 16 (α) και 5 (β) εμφανίζονται ως μία (γ) σε μεγαλύτερο βάθος | 38 |
| Εικόνα 5.2.7: Η ρωγμή 8 από την 1 ^η λείανση (α) ταυτίστηκε με την ρωγμή 4 (β) μετά την 2 ^η λείανση | 39 |
| Εικόνα 5.2.8: Εικόνα της αποφλοιώσης στην περιοχή του gauge corner..... | 40 |
| Εικόνα 5.2.9: Η ρωγμή 15 ξεκινάει από σημείο της σιδηροτροχιάς που έχει υποστεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση | 40 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 5.2.10: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 1. Φαίνεται το σημείο εκκίνησης της ρωγμής και το σημείο όπου η γωνία εξέλιξης αλλάζει σε βάθος 230 μm | 42 |
| Εικόνα 5.2.11: Η ρωγμή 2 στην εγκάρσια τομή και το σημείο που αυτή αλλάζει κλίση ως προς την επιφάνεια | 43 |
| Εικόνα 5.2.12: Η ρωγμή 3 στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου | 43 |
| Εικόνα 5.2.13: Η ρωγμή 4 στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου | 44 |
| Εικόνα 5.2.14: Οι ρωγμές 5 (αριστερά) και 6 (δεξιά) εξελίσσονται σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια του δοκιμίου | 44 |
| Εικόνα 5.2.15: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 7 και το υποεπιφανιακό δίκτυο δευτερευουσών ρωγμών..... | 45 |
| Εικόνα 5.2.16: Εικόνα της αποφλοιώσης στην περιοχή του gauge corner..... | 46 |
| Εικόνα 5.2.17: Η αποφλοιώση στην επιφάνεια του gauge corner | 47 |
| Εικόνα 5.2.18: Η επιφάνεια του δοκιμίου κάτω από το στερεοσκόπιο. Οι ρωγμές 1 έως 7 αντιστοιχούν στις ρωγμές που παρατηρήθηκαν στην εγκάρσια τομή | 48 |
| Εικόνα 5.3.1: Εικόνα από τον αισθητήρα κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (αριστερά), και η μεγέθυνση μιας περιοχής ώστε να διακρίνεται η δομή «λαβύρινθου» (δεξιά) | 49 |
| Εικόνα 5.3.2: Εικόνα μαγνητοοπτικής αντίθεσης περιοχής της σιδηροτροχιάς με ρωγμή. Φαίνεται το πώς αλλάζει η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο σημείο της ρωγμής..... | 50 |
| Εικόνα 5.3.3: Μαγνητοοπτική αντίθεση ρωγμής για γωνίες πολωτή προς αναλυτή (α) 75°, (β) 80°, (γ) 85°, (δ) 90° | 51 |
| Εικόνα 5.3.4: Ρωγμή στην επιφάνεια του δοκιμίου. Εικόνα από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς την παρεμβολή του αισθητήρα (αριστερά) και με την παρεμβολή (δεξιά)..... | 51 |
| Εικόνα 5.3.5: Σύμπλεγμα τριών διαφορετικών ρωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου. Εικόνα από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς την παρεμβολή του αισθητήρα (αριστερά) και με την παρεμβολή (δεξιά) | 52 |
| Εικόνα 5.3.6: Ρωγμές στην επιφάνεια του δοκιμίου. Εικόνα από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς την παρεμβολή του αισθητήρα (αριστερά) και η μαγνητοοπτική αντίθεση με την γωνία πολωτή προς αναλυτή στις 90° (δεξιά)..... | 52 |
| Εικόνα 5.3.7: Οι ρωγμές 5 (αριστερά) και 6 (δεξιά) όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην επιφάνεια του αισθητήρα. Η μαγνητοοπτική αντίθεση παρουσιάζεται ασθενής | 52 |
| Εικόνα 5.3.8: Οι ρωγμές 2 και 3 χωρίς την παρεμβολή αισθητήρα (αριστερά) και μετά την παρεμβολή του αισθητήρα (δεξιά). Σε κύκλο οι δύο μικρές ρωγμές που παρατηρήθηκαν στην εικόνα μαγνητοοπτικής αντίθεσης..... | 53 |
| Εικόνα 5.3.9: Η ρωγμή 4 (αριστερά) και η μαγνητοοπτική αντίθεση αυτής (δεξιά)..... | 53 |
| Εικόνα 5.3.10: Η ρωγμή 1 (αριστερά) και η μαγνητοοπτική αντίθεση με την παρεμβολή του αισθητήρα (δεξιά). Σε κύκλο το σημείο από το οποίο ξεκινάει η ρωγμή | 54 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1.2.1: Απεικόνιση του πεδίου τάσεων Hertz στις τρεις διαστάσεις [10]..... | 4 |
| Σχήμα 1.2.2: Καμπτικές τάσεις συναρτήσει της θέσης του άξονα του τροχού (αριστερά), κάθετες και οριζόντιες συνιστώσες της δύναμης που επιβάλλεται στην σιδηροτροχιά (δεξιά) [10]..... | 6 |
| Σχήμα 1.2.3: Κατανομή παραμενουσών τάσεων πριν και μετά την χρήση του δικτύου [10] | 7 |
| Σχήμα 2.1.1: Το φως σαν σύνθεση του ηλεκτρικού (E) και του μαγνητικού (B) πεδίου .13 | |
| Σχήμα 2.1.2: Γραμμικά πολωμένο φως ως σύνθεση ενός δεξιόστροφου (σ^+) και ενός αριστερόστροφου (σ^-) κυκλικά πολωμένου φωτός..... | 15 |
| Σχήμα 2.3.1: Απεικόνιση των μαγνητικών μικροπεριοχών εναλλασσόμενης φοράς μαγνήτισης..... | 19 |
| Σχήμα 2.3.2: Σχηματική αναπαράσταση του πως δημιουργείται η μαγνητοοπτική αντίθεση όταν τοποθετηθεί ένας μαγνητοοπτικός αισθητήρας σε μαγνητισμένο υλικό με μία ρωγμή..... | 20 |
| Σχήμα 3.1.1: Η τάση στην ανάπτυξη χάλυβα σιδηροτροχιών [24] | 21 |
| Σχήμα 3.2.1: Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα Grade 900A..... | 24 |
| Σχήμα 4.1.1: Εξαγωγή των δοκιμίων από κομμάτι της ράγας..... | 26 |
| Σχήμα 4.1.2: Σχηματική αναπαράσταση της γωνίας με την οποία εγκιβωτίστηκε το δοκίμιο και των τριών λείανσεων που έγιναν για τα διαφορετικά βάθη..... | 28 |
| Σχήμα 4.4.1: Οι περιοχές του κρυστάλλου με ομόρροπη μαγνήτιση σχηματίζουν την δομή «λαβύρινθου» | 30 |
| Σχήμα 4.4.2: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης για την ανίχνευση των ρωγμών με την χρήση του μαγνητοοπτικού αισθητήρα..... | 31 |
| Σχήμα 5.2.1: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν κατά την μελέτη της εγκάρσιας τομής του δοκιμίου A και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν..... | 33 |
| Σχήμα 5.2.2: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δοκιμίου A μετά την 1 ^η λείανση | 37 |
| Σχήμα 5.2.3: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δοκιμίου A μετά την 2 ^η λείανση | 37 |
| Σχήμα 5.2.4: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν κατά την μελέτη της εγκάρσιας τομής του δοκιμίου B και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν..... | 41 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 3.2.1: Χημική σύσταση (% κ.β.) της σιδηροτροχιάς και η συμφωνία με τις προδιαγραφές για χάλυβα Grade 900A [8]..... | 23 |
| Πίνακας 3.2.2: Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα της σιδηροτροχιάς και της προδιαγραφής UIC 860 [8]..... | 24 |
| Πίνακας 5.2.1: Αναλυτικά οι μετρήσεις των ρωγμών στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου A | 33 |
| Πίνακας 5.2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών που εμφανίστηκαν στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου B..... | 42 |
| Πίνακας 5.2.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου B... | 47 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας οι σιδηρόδρομοι αποτελούν ένα από τα ανερχόμενα μέσα μαζικής μεταφοράς, και έτσι δημιουργείται η απαίτηση υψηλών πρότυπων ασφάλειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα ανά τον κόσμο. Η ασφαλής κίνηση των συρμών στο δίκτυο εξασφαλίζεται από τις σιδηροτροχιές, που έχουν ως κύριο ρόλο να παραλαμβάνουν τα δυναμικά φορτία από τον τροχό και να τα μεταφέρουν στο έδαφος. Τα υψηλά φορτία και οι αυξημένες ταχύτητες και επιταχύνσεις στα σημερινά δίκτυα, έχουν οδηγήσει σε αύξηση της φθοράς του συστήματος τροχός-σιδηροτροχιά [1-3]. Μία από τις μεγαλύτερες απειλές στην ασφάλεια των σιδηροδρομικών δικτύων, είναι η αστοχία λόγω κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση (Rolling Contact Fatigue-RCF), και των σφαλμάτων που δημιουργούνται από την επαφή μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς [4]. Το φαινόμενο ενεργοποιείται και κατευθύνεται από τις τάσεις επαφής Hertz, και έχει σαν αποτέλεσμα αρχικά την εμφάνιση σφαλμάτων στην επιφάνεια με διάφορες μορφές, όπως, pitting, spalling και head checks, και στην συνέχεια την εξέλιξή τους σε ένα δίκτυο υποεπιφανειακών ρωγμών.

Παρά την χρήση νέων τύπων χάλυβα στις σιδηροτροχιές και των ανεπτυγμένων τρόπων συντήρησης και παρακολούθησης του φαινομένου, πολλές σιδηροτροχιές αστοχούν λόγω φθοράς και σφαλμάτων RCF. Σφάλματα που εμφανίζονται σε επίπεδο εγκάρσιο προς το εμβαδόν της διατομής της σιδηροτροχιάς, και αναπτύσσονται κάθετα προς την επιφάνεια έως την βάση της ράγας, έχουν σαν αποτέλεσμα την ολική θραύση της σιδηροτροχιάς. Πολλές φορές η εμφάνιση ολικής θραύσης σε κάποιο σημείο του δικτύου, μπορεί να αποφέρει τον εκτροχιασμό της αμαξοστοιχίας. Έρευνες έδειξαν ότι σφάλματα λόγω κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση ευθύνονται για το 10% των εκτροχιασμών που προήλθαν από ολική θραύση της σιδηροτροχιάς στην Βόρεια Αμερική [5]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το δυστύχημα στο Ellicot City του Maryland, στις ΗΠΑ τον Αύγουστο του 2012, όπου ένα εμπορικό τρένο εκτροχιάστηκε, με αποτέλεσμα τον θανάσιμο τραυματισμό δύο ατόμων. Στο σημείο του εκτροχιασμού, η ράγα είχε υποστεί ολική θραύση, αποτέλεσμα ενός εγκάρσιου σφάλματος με σημείο έναρξης κάποια head checks στην περιοχή του gauge corner.

Η παρουσία ολικής θραύσης μέρους του δικτύου, εκτός από τον προφανή κίνδυνο εκτροχιασμού, αποτελεί ακόμα και ένα διαρκώς αυξανόμενο κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των σιδηροτροχιών. Σύμφωνα με το τμήμα συντήρησης της Αττικό Μετρό, το μεγαλύτερο μέρος του κόστους αυτού σε ετήσια βάση, προέρχεται από προληπτικές ενέργειες λόγω έλλειψης αξιόπιστου συστήματος ποιοτικού ελέγχου. Έτσι γεννάται η ανάγκη ανάπτυξης ενός μη καταστρεπτικού ελέγχου που να μπορεί να εντοπίσει τη θέση και το μέγεθος επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών στο δίκτυο. Η έγκαιρη ανίχνευση και κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων κοντά στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, μπορεί να βοηθήσει στην μείωση του κόστους συντήρησης αλλά και στην πρόληψη ατυχημάτων.

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να πραγματοποιηθεί ένας πρώτος έλεγχος της αξιοπιστίας μίας μη καταστρεπτικής μεθόδου ανίχνευσης ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά αντικείμενα, η οποία βασίζεται στο μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Για να είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για τα αποτελέσματα της μεθόδου, ήταν σημαντικό να γίνει

πρώτα κατανοητή η φύση, οι αιτίες και οι συνέπειες των διάφορων μορφών σφαλμάτων.

Σε προηγούμενες εργασίες [6-8] έχει πραγματοποιηθεί εκτενής μεταλλουργική διερεύνηση της κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση, σε διαμήκεις και εγκάρσιες τομές σιδηροτροχιών, και έδειξε πως οι ράγες εμφανίζουν ένα δίκτυο σχεδόν παράλληλων μεταξύ τους ρωγμών, ως αποτέλεσμα του φαινομένου. Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη του φαινομένου με την χαρτογράφηση των ρωγμών RCF σε τμήμα της σιδηροτροχιάς που είχε υποστεί προηγουμένως λείανση και κατόπιν επαναχρησιμοποιήθηκε, με μεταλλογραφία και παράλληλα η ίδια χαρτογράφηση να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο μαγνητοοπτικού αισθητήρα, βασιζόμενη στο διαφεύγον μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του φερρομαγνητικού υλικού της ράγας, λόγω των ασυνεχειών που προκύπτουν από τις ρωγμές. Η εργασία διαρθρώνεται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο κεφάλαιο 1, δίδεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου RCF. Περιγράφεται το εντατικό πεδίο κατά την κύλιση του τροχού στην σιδηροτροχιά και αναφέρονται κάποιοι από τους τρόπους αντιμετώπισης που εφαρμόζονται στα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η φυσική αρχή που διέπει το μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Στην φυσική αυτή αρχή βασίζεται η μη καταστρεπτική μέθοδος που εφαρμόζεται στην συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, και η γνώση της είναι απαραίτητη ώστε να γίνουν κατανοητά τα αποτελέσματα της μεθόδου.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια αναφορά στους χάλυβες των σιδηροτροχιών και στην εξέλιξή τους, ενώ παρέχονται στοιχεία για τον χάλυβα της ράγας που μελετήθηκε.

Ακολουθεί στο κεφάλαιο 4 η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που εφαρμόστηκε σε τμήμα σιδηροτροχιάς από το δίκτυο του Μετρό Αθηνών, και αποτελείται από δύο στάδια:

- Αρχικά πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική ανάλυση σε δύο δοκίμια ώστε να αποτυπωθεί το δίκτυο των ρωγμών. Η ανάλυση έγινε τόσο στην επιφάνεια όσο και στις εγκάρσιες τομές.
- Ακολούθησε η ανίχνευση του διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου από την επιφάνεια του δοκιμίου, που δημιουργήθηκε από τις υπάρχουσες ρωγμές, με την χρήση κατάλληλου αισθητήρα.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας τέθηκαν σε σύγκριση στο κεφάλαιο 5, και έγινε ένας πρώτος συσχετισμός της μαγνητοοπτικής αντίθεσης που παρουσιάστηκε με την υποεπιφανειακή όδευση των ρωγμών, όπως αυτή μετρήθηκε κατά την μεταλλογραφική ανάλυση.

Τέλος στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, και γίνεται αναφορά στις δυνατότητες που αυτά παρέχουν για μελλοντική έρευνα πάνω στην εξέλιξη και αντιμετώπιση του φαινομένου RCF.

1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ RCF

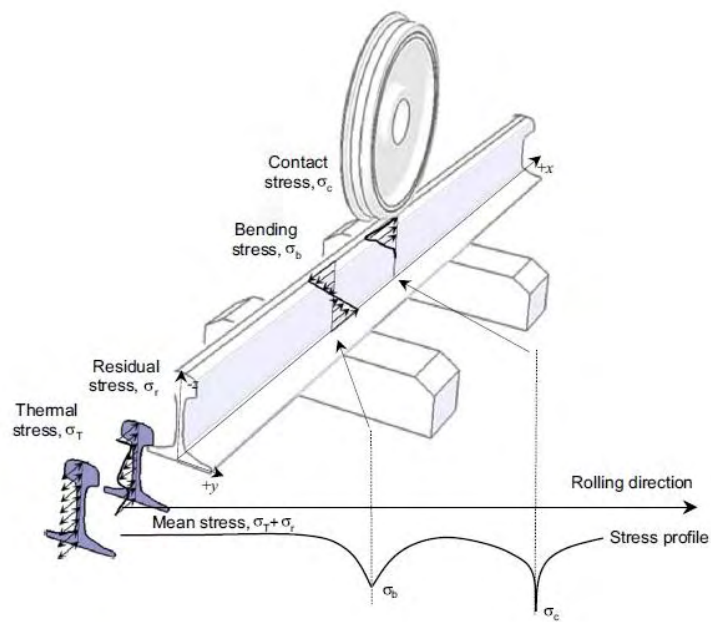
1.1. Κόπωση εξ επαφής σε κύλιση (Rolling Contact Fatigue-RCF)

Ένα μεταλλικό κατασκευαστικό στοιχείο, εκτός από τα στατικά ή μονοτονικά φορτία που δέχεται, μπορεί παράλληλα να υποβάλλεται και σε κυκλική εναλλασσόμενη φόρτιση, δηλαδή τάσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής. Η εφαρμογή τέτοιων φορτίσεων στο υλικό προκαλούν αυτό που ονομάζουμε κόπωση (fatigue) του μετάλλου. Η κόπωση έχει σαν αποτέλεσμα την προοδευτική συσσωρευση βλάβης στο στοιχείο, υποβαθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Έτσι εισάγεται η έννοια της διάρκειας ζωής (N_f) του υλικού, που εκφράζεται σε κύκλους φορτίσεως έως ότου το υλικό αστοχήσει. Η διάρκεια ζωής σε κόπωση διακρίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά τους κύκλους που απαιτούνται για την δημιουργία ή τον σχηματισμό της ρωγμής, ενώ η δεύτερη φάση αναφέρεται στους κύκλους της μεταβατικής ανάπτυξης και εξέλιξης της ρωγμής μέχρι την αστοχία του υλικού.

Ανάλογα με τον τύπο της κυκλικής φόρτισης, αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν, συναντάμε διάφορους τύπους κοπώσεως στην μηχανολογία. Η κυκλική φόρτιση με ταυτόχρονη κύλιση μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών προκαλεί κόπωση εξ επαφής σε κύλιση. Οι ράγες στο δίκτυο της Αττικό Μετρό δέχονται επαναλαμβανόμενες φορτίσεις από τους χιλιάδες κύκλους επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς που πραγματοποιούνται καθημερινά. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την εμφάνιση καταστρεπτικών σφαλμάτων στην επιφάνεια ή εσωτερικά των σιδηροτροχιών τα οποία οφείλονται στην κόπωση εξ επαφής σε κύλιση του χάλυβα.

1.2. Εντατικό πεδίο και καταπονήσεις

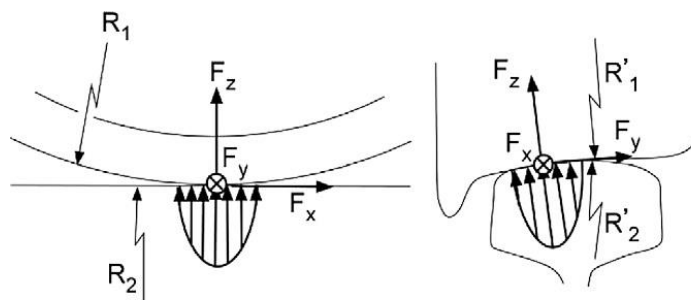
Το πρόβλημα του καθορισμού του εντατικού πεδίου κατά την κύλιση τροχού σε ράγα απασχολεί την επιστημονική έρευνα και απαντάται σε πολλά σημεία αυτής. Ο λόγος είναι η περιπλοκότητα και η εξάρτηση του εντατικού πεδίου από πολλές παραμέτρους (**Εικόνα 1.2.1**), καθώς και η συνεισφορά αυτών στον τομέα των μεταφορών. Για να προσδιοριστεί η επίδοση του συστήματος τροχού-ράγας, συνυπολογίζοντας την κόπωση εξ επαφής σε κύλιση λαμβάνονται υπόψη όλοι οι διαφορετικοί τύποι καταπόνησης.



Εικόνα 1.2.1: Συνολικό εντατικό πεδίο κατά την κύλιση του τροχού στην σιδηροτροχιά [9]

1.2.1. Τάσεις επαφής

Οι τάσεις επαφής εμφανίζονται στην περιοχή επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Τα πιο κοινά προβλήματα επαφής με κύλιση περιγράφονται από το αναλυτικό μοντέλο της πίεσης Hertz, το οποίο υπολογίζει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια τις τοπικές τάσεις. Παρόλο που η θεωρία του Hertz ισχύει για ελαστικές επαφές, μπορεί να είναι χρήσιμη και στην περίπτωση μας. Μετά από μεγάλο αριθμό περασμάτων του συρμού, οι παραμένουσες τάσεις θα αποτρέψουν την περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση (elastic shakedown), και θα ικανοποιείται η θεωρία Hertz. Για να είναι δυνατή η εφαρμογή της θεωρίας Hertz απαιτείται η υπόθεση γραμμικώς ελαστικών υλικών, μικρής επιφάνειας επαφής συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις της διάταξης (ημίαιπρο μέσο) και τέλος της ύπαρξης λείων επιφανειών ράγας-τροχού. Σχηματική αναπαράσταση του πεδίου τάσεων Hertz δίνεται στο **Σχήμα 1.2.1**[10].



Σχήμα 1.2.1: Απεικόνιση του πεδίου τάσεων Hertz στις τρεις διαστάσεις [10]

Όταν ο τροχός έρχεται σε επαφή με την σιδηροτροχιά, στα πλαίσια της δράσης του φορτίου του τροχού, η κατανομή της πίεσης προκύπτει ημιελλειπτική βάση της θεωρίας του Hertz. Για απόλυτα κάθετο φορτίο χωρίς επαπτομενικές συνιστώσες η φύση της τάσης στην επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί υδροστατική σε μία ελλειπτική περιοχή με ημιάξονες a και b . Για την απλοποίηση της ανάλυσης θεωρούμε δυσδιάστατο μοντέλο, παίρνοντας μόνο τις μέγιστες τάσεις στην διεύθυνση κύλισης (x διεύθυνση). Θεωρώντας ακόμα συνθήκες πλήρους ολίσθησης, οι τάσεις στην επιφάνεια επαφής προκύπτουν [11]

$$\sigma_x = -p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \pm 2\mu \frac{\chi}{a} \quad (1.2.1)$$

$$\sigma_y = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (1.2.2)$$

$$\tau_{xz} = \mp \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (1.2.3)$$

όπου μ ο συντελεστής τριβής, ενώ p_0 είναι η μέγιστη πίεση που δίνεται από τον τύπο

$$p_0 = \frac{3N}{2\pi ab} \quad (1.2.4)$$

με N το κάθετο φορτίο και a, b οι ημιάξονες της ελλειπτικής κατανομής πίεσης.

1.2.2. Καμπτικές τάσεις

Οι καμπτικές τάσεις που δέχεται η σιδηροτροχιά προέρχονται από το στατικό φορτίο που επιβάλλει ο συρμός κατά την κίνηση του, και περιλαμβάνουν μία κάθετη και μία οριζόντια συνιστώσα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2.2** [10]. Η μέγιστη τάση εμφανίζεται σε διαφορετικό σημείο (x_0) από το σημείο επαφής. Ο παράγοντας έντασης τάσης (stress intensity factor) λόγω καμπτικής τάσης, τείνει να αυξάνεται με την περεταίρω διάδοση της ρωγμής, κάτω από το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο. Η καμπτική τάση σε μία συνεχή, επαρκώς μεγάλη ράγα με καμπτική δυσκαμψία $E \cdot I_{zz}$, η οποία φορτίζεται με μία καμπτική ροπή υπολογίζεται σύμφωνα με τον Zimmermann [12]

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I_{zz}} \quad (1.2.5)$$

όπου c είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου μέγιστης καμπτικής τάσης και του κάθετου άξονα του τροχού, και I_{zz} η ροπή αδρανείας στην κάθετη διεύθυνση.

Οι καμπτικές ροπές μπορούν να εξαχθούν από τις σχέσεις

$$M_y(x) = -\frac{F_v}{4\lambda_v} (\cos \lambda_v x - \sin \lambda_v x) \cdot \exp(-\lambda_v x) \quad (1.2.6)$$

και

$$M_z(x) = -\frac{F_L}{4\lambda_L} (\cos \lambda_L x - \sin \lambda_L x) \cdot \exp(-\lambda_L x) \quad (1.2.7)$$

με x να είναι η θέση κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, F_v και F_L το κάθετο και οριζόντιο φορτίο του τροχού αντίστοιχα. Τα λ_v και λ_L είναι παράμετροι που εξαρτώνται από την γεωμετρία της σιδηροτροχιάς και τις ελαστικές σταθερές k_v και k_L , με $k_L=0.85 k_v$ για τις περισσότερες περιπτώσεις, και προκύπτουν από τους τύπους

$$\lambda_v = \sqrt[4]{\frac{k_v}{4E \cdot I_{yy}}} \quad (1.2.8)$$

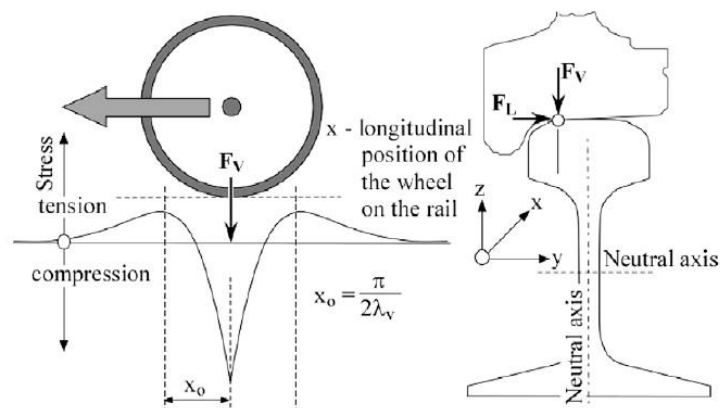
και

$$\lambda_L = \sqrt[4]{\frac{k_L}{4E \cdot I_{zz}}} \quad (1.2.9)$$

Έτσι το σημείο μέγιστης εφελκυστικής τάσης στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, προκύπτει από την **Εξίσωση 1.2.6** σε απόσταση

$$x_0 = \frac{\pi}{2\lambda_v} \quad (1.2.10)$$

από το σημείο επαφής τροχού σιδηροτροχιάς (**Σχήμα 1.2.2**).

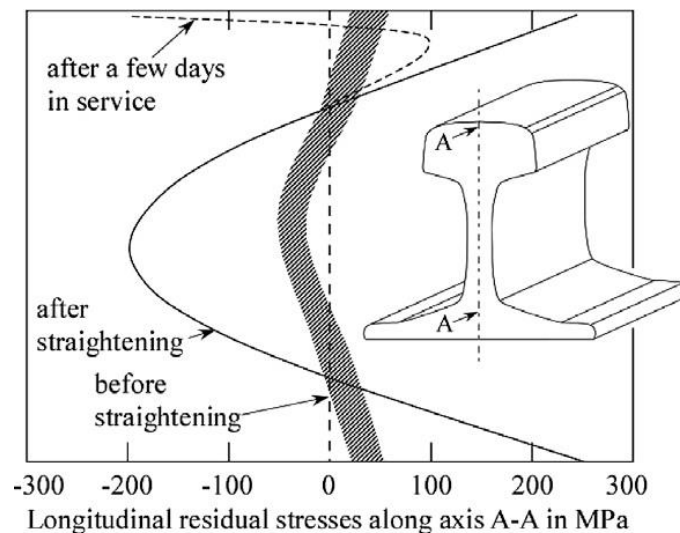


Σχήμα 1.2.2: Καμπτικές τάσεις συναρτήσει της θέσης του άξονα του τροχού (αριστερά), κάθετες και οριζόντιες συνιστώσες της δύναμης που επιβάλλεται στην σιδηροτροχιά (δεξιά) [10]

1.2.3. Παραμένουσες και θερμικές τάσεις

Πέρα από τις προαναφερθείσες τάσεις, η σιδηροτροχιά δέχεται και κάποιες περεταίρω φορτίσεις όπως οι παραμένουσες τάσεις από την διαδικασία παραγωγής και εγκατάστασης του δικτύου, και οι θερμικές τάσεις που παράγονται από τις θερμοκρασιακές διαφορές που προκύπτουν. Οι τάσεις αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία και ανάπτυξη ρωγμών στην επιφάνεια της ράγας.

Οι παραμένουσες τάσεις υπάρχουν χωρίς την ύπαρξη κάποιου εξωτερικού φορτίου. Μετά την εγκατάσταση του δικτύου και την ευθυγράμμιση του, εφελκυστηκές παραμένουσες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια και στην βάση του προφίλ της σιδηροτροχιάς, ενώ οι τάσεις στο κέντρο είναι θλιπτικές. Μετά από μερικές διελεύσεις του συρμού, το προφίλ των παραμενουσών τάσεων αλλάζει, με την εμφάνιση θλιπτικών τάσεων στην επιφάνεια της ράγας λόγω πλαστικών παραμορφώσεων σε βάθος 4-10 mm [10]. Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς σε διάφορα στάδια φαίνεται στο **Σχήμα 1.2.3**.



Σχήμα 1.2.3: Κατανομή παραμενουσών τάσεων πριν και μετά την χρήση του δικτύου [10]

Οι θερμικές τάσεις αναπτύσσονται λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ της λεγόμενης ουδέτερης θερμοκρασίας ράγας T_N και της θερμοκρασίας λειτουργίας T . Η ουδέτερη θερμοκρασία αναφέρεται στην θερμοκρασία κατά την οποία εγκαταστάθηκε η σιδηροτροχιά, και οι δυνάμεις κατά μήκος της ράγας είναι μηδέν. Η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζεται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και από την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την ολίσθηση του τροχού. Οι θερμικές τάσεις μπορούν να εξαχθούν από την σχέση

$$\sigma_T = \alpha \cdot E(T_N - T) \quad (1.2.11)$$

όπου α ο συντελεστής θερμικής διαστολής και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Για θερμοκρασίες λειτουργίας υψηλότερες από την ουδέτερη θερμοκρασία, εμφανίζονται θλιπτικά φορτία, με τον κίνδυνο να λυγίσει η σιδηροτροχιά και να επέλθει εκτροχιασμός του συρμού. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας αναπτύσσονται εφελκυστηκές τάσεις που δρουν σαν πρόσθετο στατικό φορτίο μαζί με τις παραμένουσες τάσεις και το φορτίο από τον τροχό. Έτσι μεγαλύτερος κίνδυνος για

ολική θραύση παρουσιάζεται κατά τους χειμερινούς μήνες όπου, λόγω των εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών, οι εφελκύστηκες θερμικές τάσεις φτάνουν το μέγιστό τους και παράλληλα έχουμε την μετάβαση του υλικού από την όγκιμη στην ψαθυρή περιοχή.

1.3. Σφάλματα λόγω RCF

Στα σιδηροδρομικά δίκτυα παγκοσμίως, οι σιδηροτροχιές εκτός από το να εξασφαλίζουν την κίνηση του συρμού στην σωστή διεύθυνση, έχουν και τον ρόλο της μεταφοράς των δυναμικών φορτίων στο έδαφος. Τα επαναλαμβανόμενα δυναμικά φορτία, που προέρχονται από την επαφής τροχού-ράγας, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις τριβής, έχουν σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση. Η υψηλή αυτή κόπωση του χάλυβα των σιδηροτροχιών, γεννά μια οικογένεια σφαλμάτων, τα λεγόμενα RCF-σφάλματα. Τα RCF-σφάλματα μπορούν να εμφανιστούν σε διάφορες μορφές, είτε στην επιφάνεια της ράγας είτε υποεπιφανιακά, και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. [8, 13-15]

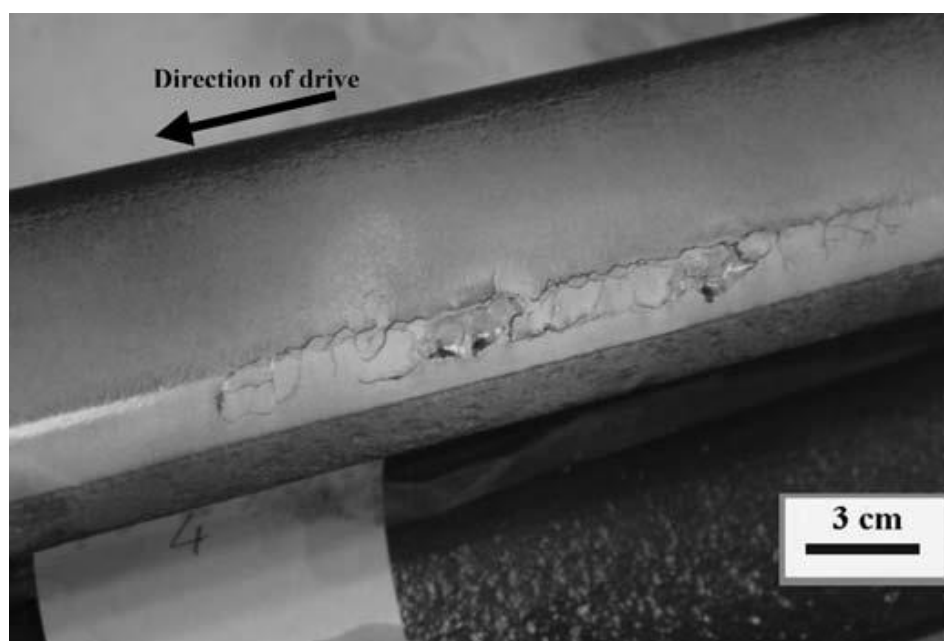
Shelling: Εμφανίζεται κυρίως στην εξωτερική πλευρά καμπύλων τμημάτων του δικτύου. Λεπτές ρωγμές ξεκινούν κάτω από την επιφάνεια του gauge corner, και επεκτείνονται προς την επιφάνεια της ράγας (**Εικόνα 1.3.1**). Φτάνοντας στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, οι ρωγμές αυτές είναι πολύ πιθανόν να προκαλέσουν αποφλοιώση στο υλικό.



Εικόνα 1.3.1: Εκτεταμένο shelling στην επιφάνεια σιδηροτροχιάς [8]

Spalling: Η αλλιώς αποφλοιώση (**Εικόνα 1.3.2**). Εμφανίζεται στο gauge corner της ράγας. Στο σημείο αυτό το πεδίο των τάσεων επαφής συγκεντρώνεται σε μια μικρή περιοχή κάτω από την επιφάνεια επαφής και προκαλεί πλαστική παραμόρφωση. Λόγω της επαναλαμβανόμενης φύσης των τάσεων που δέχεται η σιδηροτροχιά, η πλαστική

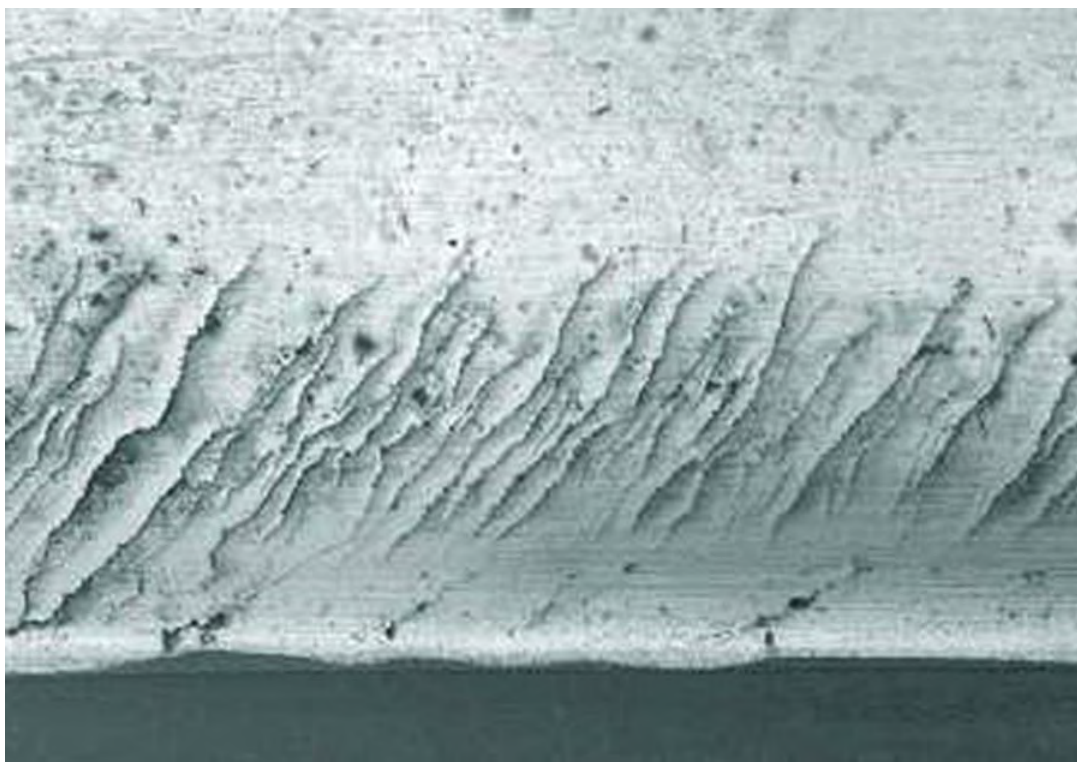
παραμόρφωση αυξάνεται και οδηγεί στον σχηματισμό ρωγμών που επιφέρουν την αποφλοίωση στην επιφάνεια του υλικού.



Εικόνα 1.3.2: Spalling στην επιφάνεια του gauge corner [8]

Pitting: Επιφανειακά σφάλματα, παρόμοια με αυτά της αποφλοίωσης, εμφανίζονται όμως σε βάθος 2-10 φορές μικρότερο. Έχουν την μορφή μικροσκοπικών εγκοπών και κοιλοτήτων, και η εμφάνισή τους οφείλεται σε συνδυασμό του φαινομένου RCF και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι οπές αυτές είναι πολλές φορές σημεία έναρξης ρωγμών RCF.

Head checks: Είναι η σημαντικότερη μορφή εμφάνισης του φαινομένου RCF. Τα head checks αποτελούν μια ομάδα πυκνών εγκάρσιων ρωγμών (Εικόνα 1.3.3) που ξεκινούν από το εσωτερικό του gauge corner και κατευθύνονται με μικρή γωνία προς το εσωτερικό της ράγας. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση των head checks παίζουν οι πλαστικές παραμορφώσεις στο gauge corner. Το δίκτυο των ρωγμών είναι εμφανές στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και εξελίσσεται σε όλη τη διατομή της. Τυπικό είδος εγκάρσιας ρωγμής αυτής της κατηγορίας είναι η ρωγμή σχήματος «νεφρού». Αυτές οι εγκάρσιες ρωγμές αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο του φαινομένου RCF, καθώς η εξέλιξη τους σε όλη την διατομή και προς την βάση της σιδηροτροχιάς μπορεί να προκαλέσει ολική θραύση και εκτροχιασμό του συρμού.



Εικόνα 1.3.3: Το φαινόμενο των Head checks στην επιφάνεια σιδηροτροχιάς [16]

1.4. Αντιμετώπιση του RCF

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση στις απαιτήσεις κυκλοφορίας στους σιδηροδρόμους ανά τον κόσμο, η οποία έχει οδηγήσει σε αύξηση του φορτίου του άξονα των τροχών. Η αύξηση αυτή δημιούργησε την ανάγκη παρακολούθησης και αντιμετώπισης των σφαλμάτων RCF ώστε να εξασφαλισθεί η ασφαλής μετακίνηση επιβατών και φορτίων στα σιδηροδρομικά δίκτυα. Σήμερα υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός πρακτικών τεχνικών για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων που συνδέονται με την κόπωση εξ επαφής σε κύλιση όπως:

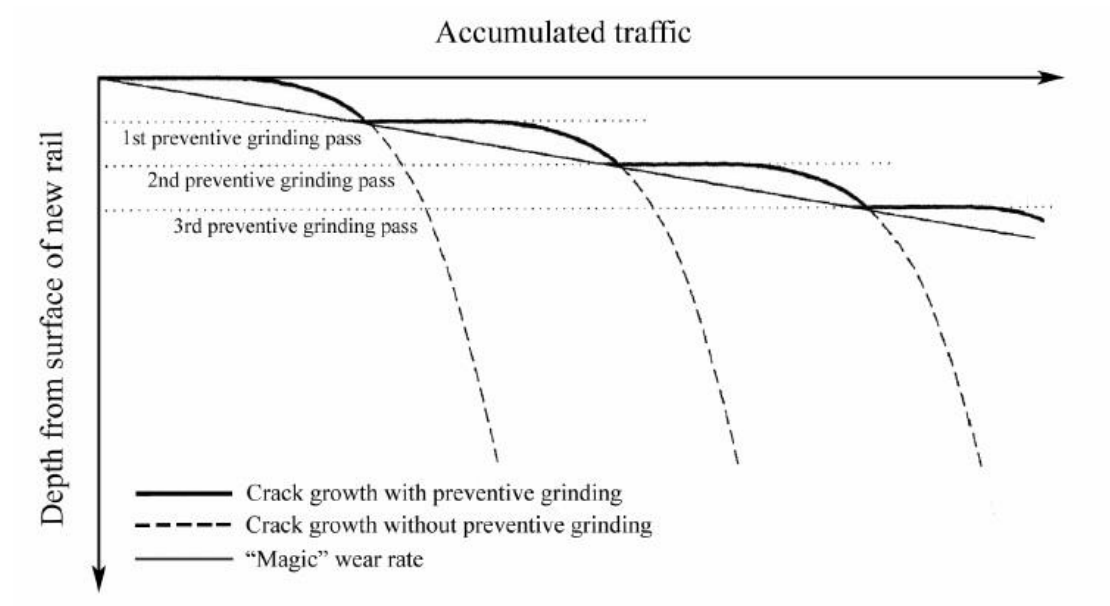
- Τρόχισμα της επιφάνειας (Grinding)
- Βελτίωση του προφίλ της σιδηροτροχιάς ώστε να μειωθούν οι τάσεις επαφής
- Επιλογή σκληρότερου χάλυβα
- Διαχείριση τριβής μέσω επαρκούς αλλά όχι υπερβολικής λίπανσης

Από αυτές η πιο ευρέως διαδεδομένη είναι το τρόχισμα της επιφάνειας των σιδηροτροχιών (grinding), μια μέθοδος που εφαρμόζεται από το 1980. Η τεχνική έχει πλέον εξελιχθεί και προσφέρει πολλαπλά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της. Η διατήρηση του βέλτιστου προφίλ της ράγας, η μείωση των θορύβων κατά την διέλευση του συρμού και η αφαίρεση των head checks που γεννά το RCF είναι οι βασικοί λόγοι που χρησιμοποιείται το τρόχισμα. Υπάρχουν 3 διαφορετικοί τύποι τρόχισματος:

1. **Τρόχισμα κατά την παραγωγή:** Καθαρισμός από κατασκευαστικά σφάλματα πριν εγκατασταθούν οι ράγες, ώστε να εξασφαλισθούν οι βέλτιστες αρχικές συνθήκες στο δίκτυο.
2. **Προληπτικό τρόχισμα:** Αφαίρεση παραμορφωμένου υλικού προτού οι μικρορωγμές οδηγήσουν σε πιο σοβαρά σφάλματα.
3. **Διορθωτικό τρόχισμα:** Στοχευόμενο τρόχισμα σε περιοχές που έχουν υποστεί εκτεταμένα σφάλματα με κίνδυνο ολικής θραύσης.

Το διορθωτικό τρόχισμα αφαιρεί το επιφανειακό στρώμα που έχει υποστεί εργοσκήρυνση, αφήνοντας πίσω μια επιφάνεια μαλακού χάλυβα, αλλά ταυτόχρονα και ορισμένες ρωγμές που εκτείνονται πέρα από το στρώμα που αφαιρέθηκε. Διαφορετικά αν εφαρμοστεί το προληπτικό τρόχισμα, η επιφάνεια προκύπτει χωρίς ρωγμές και αρκετά σκληρή λόγω της εργοσκήρυνσης που προκαλείται από το τρόχισμα. Με την εφαρμογή προληπτικού τροχίσματος, ο συνολικός όγκος του υλικού που αφαιρείται είναι σημαντικά μικρότερος, με αποτέλεσμα να παρατείνεται η διάρκεια ζωής της ράγας. Το σημαντικό πλεονέκτημα του προληπτικού τροχίσματος είναι ότι μπορεί να προγραμματιστεί μιας και τα σφάλματα θα εμφανίζονται πιο αραιά και προβλεπόμενα. Η σιδηροτροχιά τότε θα μπορεί να αντικατασταθεί όταν φθαρεί πέρα από μία συγκεκριμένη τιμή που θα είναι σχετικά εύκολο να προβλεφθεί, αντί να γίνει αντικατάστασή της με την εμφάνιση των πιο απρόβλεπτων σφαλμάτων κόπωσης. Οι μη προγραμματισμένες ενέργειες για την συντήρηση του δικτύου είναι αρκετά δαπανηρές, καθώς τις περισσότερες φορές έχουν σαν αποτέλεσμα την διακοπή της κυκλοφορίας στο δίκτυο.

Η ιδανική ποσότητα υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί, είτε από φυσική φθορά είτε τεχνητά κατά το προληπτικό τρόχισμα, ώστε να βελτιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής της σιδηροτροχιάς, ορίζεται ως “magic wear rate” (MWR) (**Σχήμα 1.4.1**). Στην περίπτωση υψηλότερου ρυθμού φθοράς από τον MWR οι ράγες θα είναι λειτουργικές για μικρότερο χρονικό διάστημα. Για να επιτευχθεί αυτός ο ρυθμός απαιτείται επαρκής λίπανση του δικτύου όσο και συγκεκριμένη στρατηγική προληπτικού τροχίσματος. Ο MWR πρέπει να υπολογιστεί για κάθε δίκτυο ξεχωριστά, καθώς παράγοντες όπως το αξονικό φορτίο, οι ταχύτητες και το υλικό του συστήματος τροχός-σιδηροτροχιά παίζουν σημαντικό ρόλο. Ακόμα τον MWR επηρεάζουν και εξωτερικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος, οι οποίοι μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Παρακολουθώντας έτσι τακτικά το δίκτυο μπορεί να υπολογισθεί ο MWR και να προγραμματιστεί το πότε και σε πιο βαθμό χρειάζεται το προληπτικό τρόχισμα [17, 18].



Εικόνα 1.4.1: Magic Wear Rate

Το κόστος συντήρησης που προκύπτει από την αντιμετώπιση του φαινομένου με τους διάφορους τύπους τροχίσματος, είναι αρκετά υψηλό και διαμορφώνεται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Περιορισμένη κυκλοφορία στο δίκτυο κατά την διαδικασία τροχίσματος
- Κόστος τροχίσματος ανά μέτρο
- Κόστος αντικατάστασης φθαρμένων σιδηροτροχιών
- Κόστος επιθεώρησης και επισκευής σε κομμάτια του δικτύου που έχουν υποστεί θραύση
- Κόστος λίπανσης

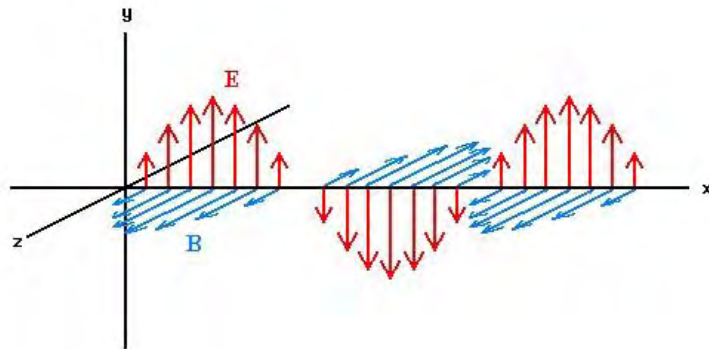
Το συνολικό κόστος συντήρησης προέρχεται από το άθροισμα όλων των παραπάνω. Η ανάγκη μείωσης αυτού του υψηλού κόστους, είναι αυτή που έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στην ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού, μη καταστρεπτικού τρόπου παρακολούθησης του φαινομένου RCF. Στόχος είναι η συντήρηση να μπορεί να γίνεται στοχευμένα και με καλύτερο προγραμματισμό, περιορίζοντας έτσι κάποιες μη αναγκαίες διορθωτικές ενέργειες που συνήθως είναι και αρκετά δαπανηρές [19].

2. ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το μαγνητοοπτικό φαινόμενο πάνω στο οποίο βασίστηκε η μέθοδος ανίχνευσης των ρωγμών με την χρήση του μαγνητοοπτικού αισθητήρα, προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ του γραμμικά πολωμένου φωτός και ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η αλληλεπίδραση αυτή περιγράφεται από το φαινόμενο Faraday και παρουσιάζεται παρακάτω.

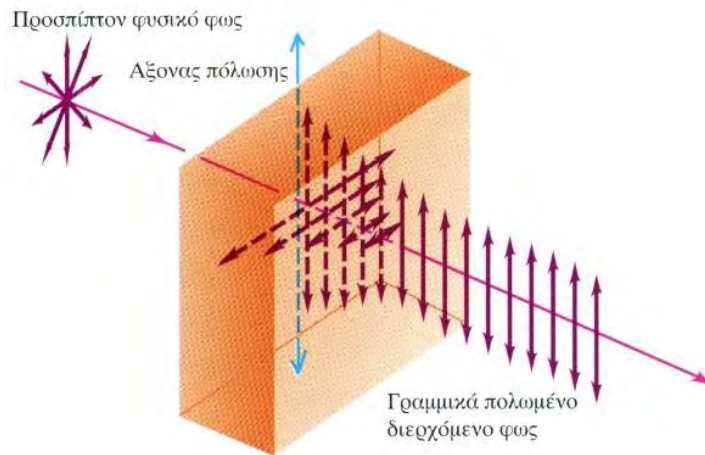
2.1. Φυσική αρχή Μαγνητοοπτικού φαινομένου

Η κλασική κυματική θεωρία του φωτός, θεωρεί πως το φως διαδίδεται και συμπεριφέρεται ως ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο αποτελείται από το ηλεκτρικό (E) και το μαγνητικό (B) πεδίο. Τα δύο αυτά κάθετα μεταξύ τους πεδία, είναι και κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του φωτός (**Σχήμα 2.1.1**).



Σχήμα 2.1.1: Το φως σαν σύνθεση του ηλεκτρικού (E) και του μαγνητικού (B) πεδίου

Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, συνεπώς και το φως, στρέφουν τα διανύσματα E και B προς όλες τις διευθύνσεις, και θεωρούνται μη πολωμένα. Η επιλογή μίας και μόνο διεύθυνσης στον χώρο ονομάζεται πόλωση. Ο όρος πόλωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος περιγράφει τον προσανατολισμό της ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου ως προς τον άξονα διάδοσης, και εάν η ταλάντωση διαμορφώνεται προς μία αυστηρά ορισμένη διεύθυνση, τότε θεωρούμε το φως ως γραμμικά πολωμένο. Οι ταλαντώσεις του πεδίου και η διεύθυνση διάδοσης z , ορίζουν το επίπεδο πόλωσης, έτσι που ένα γραμμικά πολωμένο κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδα πολωμένο. Μία δέσμη φωτός μπορεί να πολωθεί γραμμικά περνώντας δια μέσου ενός πολωτή, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.1.1** [20].



Εικόνα 2.1.1: Το αρχικά μη πολωμένο φως, περνάει μέσα από πολωτή και εξέρχεται ως γραμμικά πολωμένο [21]

Το φως μπορεί ακόμα να παρουσιάζει και κυκλική πόλωση. Στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως το φως, το διάνυσμα E του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται ημιτονοειδώς στο ίδιο επίπεδο και λαμβάνει τιμές από $E=0$ $E_{\max}=E_0$. Έτσι η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε χρονική στιγμή σε κάθε σημείο του χώρου θα δίνεται από την σχέση:

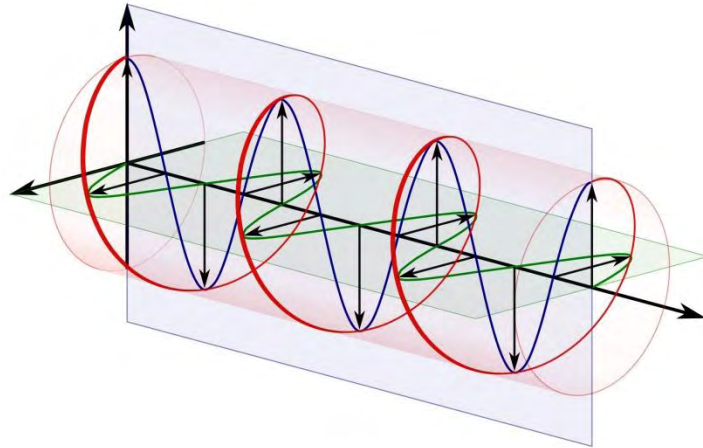
$$E(x, t) = E_0 \sin(\omega t - kx) \quad (2.1.1)$$

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, δύο κύματα της μορφής της **Εξίσωσης 2.1.1** με παράλληλη διεύθυνση διάδοσης, μας δίνουν το συνιστάμενο κύμα:

$$E(x, t) = 2E_0 \cos(\delta/2) \sin(\omega t - kx - \delta/2) \quad (2.1.2)$$

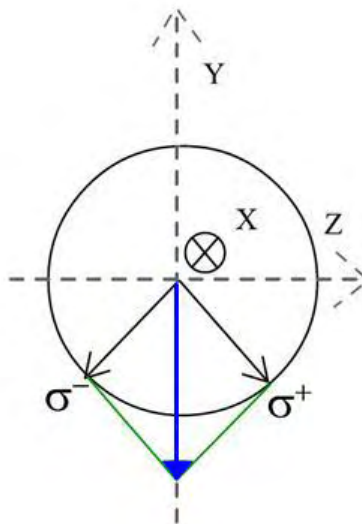
όπου δ η διαφορά φάσης, από την οποία εξαρτάται και το πλάτος του κύματος.

Στην περίπτωση που τα δύο ηλεκτρικά πεδία είναι κάθετα μεταξύ τους και συγχρόνως έχουν διαφορά φάσης $\delta=\pi/2$, το ηλεκτρικό πεδίο που θα προκύψει ως διανυσματικό άθροισμα των δύο κάθετων μεταξύ τους πεδίων θα έχει σταθερό πλάτος E_0 και θα περιστρέφεται κυκλικά, σαν σπείρα (**Εικόνα 2.1.2**), γύρω από τον άξονα διάδοσης. Το φως αυτό λέγεται κυκλικά πολωμένο.



Εικόνα 2.1.2: Κυκλικά πολωμένο φως

Από την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, προκύπτει ότι το γραμμικά πολωμένο φως είναι αποτέλεσμα ενός δεξιόστροφου (σ^+) και ενός αριστερόστροφου (σ^-) κυκλικά πολωμένου φωτός (**Σχήμα 2.1.2**).



Σχήμα 2.1.2: Γραμμικά πολωμένο φως ως σύνθεση ενός δεξιόστροφου (σ^+) και ενός αριστερόστροφου (σ^-) κυκλικά πολωμένου φωτός

Ο Faraday το 1845 παρατήρησε πως όταν το γραμμικά πολωμένο φως περνά μέσα από ένα μαγνητισμένο μέσο, το πεδίο πόλωσης στρέφεται κατά γωνία φ , κάτι που ονομάστηκε φαινόμενο του Faraday (**Εικόνα 2.1.3**). Η στροφή αυτή του πεδίου πόλωσης είναι αποτέλεσμα αυτού που ονομάζουμε κυκλικό διχρωισμό (circular birefringence) , που σημαίνει ότι οι ταχύτητες διάδοσης του δεξιόστροφου και του αριστερόστροφου κυκλικά πολωμένου φωτός είναι διαφορετικές, λόγω διαφορετικού δείκτη διάθλασης (n^+, n^-). Ο δείκτης διάθλασης ορίζεται ως:

$$n = c/v \quad (2.1.3)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και v η ταχύτητα στο μέσο από το οποίο περνάει.

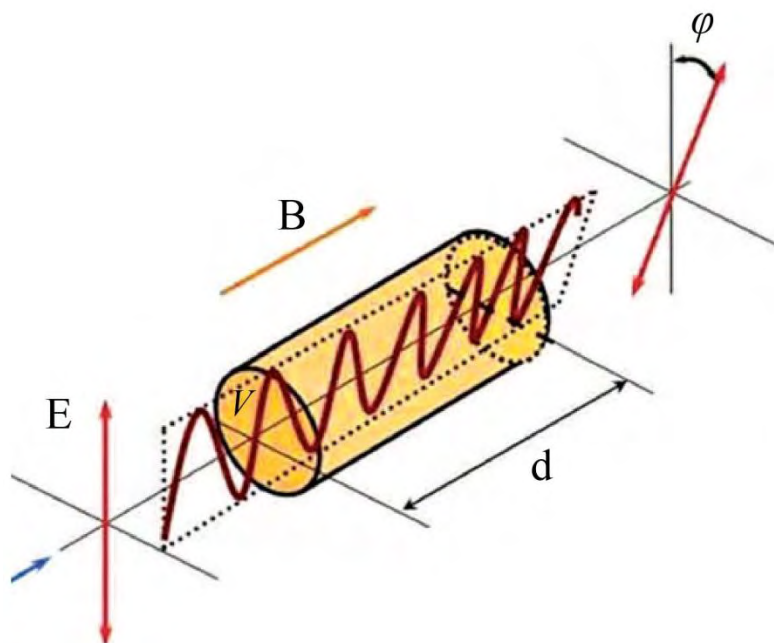
Η οπτική περιστροφή παρατηρείται καθώς το φως περνά μέσα από κάποιο μαγνητισμένο υλικό. Η σχέση μεταξύ της γωνίας περιστροφής και του ασκούμενου μαγνητικού πεδίου δόθηκε από τον Faraday:

$$\varphi = B \cdot V \cdot d \quad (2.1.4)$$

με B να είναι το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, d το μήκος κατά το οποίο το μαγνητικό πεδίο δρα πάνω στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα του φωτός και V η σταθερά Verdet. Η σταθερά Verdet διαφέρει από υλικό σε υλικό, και εξαρτάται από τους δείκτες διάθλασης n^+ , n^- . Θεωρώντας το φως ως ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα με μήκος κύματος λ , που διαδίδεται στο μέσο με ταχύτητα c/n , και πως $n^+ \neq n^-$ η σταθερά Verdet προκύπτει:

$$V = \left(\frac{dn}{d\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{2c^2}\right) \cdot \frac{e}{m} \quad (2.1.5)$$

εδώ το e/m συμβολίζει τον λόγο του φορτίου προς μάζα ενός ηλεκτρονίου.



Εικόνα 2.1.3: Το φαινόμενο Faraday. Στροφή του πεδίου πόλωσης κατά γωνία φ όταν το κύμα διαδίδεται μέσω μαγνητικού πεδίου παράλληλο στην διεύθυνση διάδοσης

Το φως που εξέρχεται από το μαγνητικό πεδίο είναι γραμμικά πολωμένο σε γωνία φ σε σχέση με αυτό που εξέρχεται από τον πολωτή. Εάν τοποθετήσουμε έναν δεύτερο, ίδιο με τον πρώτο, πολωτή στο τέλος της διάταξης αυτής ώστε να προσπίπτει το φως μετά την στροφή του πεδίου πόλωσης, μπορούμε να αναλύσουμε την κατάσταση πόλωσης της δέσμης. Ο δεύτερος αυτός πολωτής ονομάζεται αναλυτής. Αν η διεύθυνση του αναλυτή σχηματίζει γωνία θ με την διεύθυνση πόλωσης του φωτός, θα διέλθει μέσα από αυτόν μόνο μια συγκεκριμένη ποσότητα του πεδίου ίση με $E_0 \cos\theta$. Η ένταση του φωτός που θα περάσει από τον αναλυτή είναι ανάλογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου και περιγράφεται από τον νόμο του Malus:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta) \quad (2.1.6)$$

Επομένως ο νόμος του Malus συνδέει την ένταση του γραμμικά πολωμένου φωτός που περνάει από τον αναλυτή με την γωνία που σχηματίζεται από την διεύθυνση πόλωσης. Είναι προφανές ότι η μέγιστη ένταση παρατηρείται όταν $\theta=0$, δηλαδή πολωτής και αναλυτής έχουν παράλληλα επίπεδα πόλωσης.

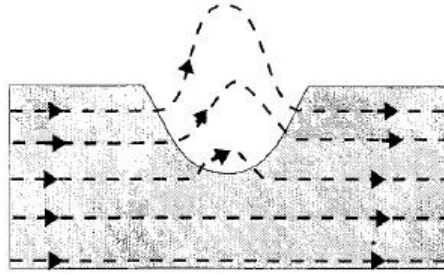
Η γραμμική εξάρτηση της γωνίας περιστροφής Faraday με το μαγνητικό πεδίο, όπως βλέπουμε στην **Εξίσωση 2.1.4**, σε συνδυασμό με την διάταξη πολωτή-μαγνητοοπτικού υλικού-αναλυτή που περιγράφηκε παραπάνω, είναι αυτά που μας επιτρέπουν να εκμεταλλευόμαστε το μαγνητοοπτικό φαινόμενο με την χρήση μαγνητοοπτικών αισθητήρων.

2.2. Διαφεύγον μαγνητικό πεδίο

Παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου η ύλη μαγνητίζεται, αυτό σημαίνει πως σε ατομική κλίμακα περιέχει πολλά μικρά μαγνητικά δίπολα τα οποία παρουσιάζουν μια συνισταμένη ευθυγράμμιση. Η μαγνήτιση ενός υλικού, M , είναι η μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου. Εφαρμόζοντας έναν μαγνήτη σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως η χαλύβδινη σιδηροτροχιά, αυτό αποκτά μία μόνιμη μαγνήτιση με συγκεκριμένο προσανατολισμό, άρα και ανάλογη μαγνητική επαγωγή B στο εσωτερικό του (**Εξίσωση 2.2.1**).

$$B = \mu_0(M + H) \quad (2.2.1)$$

Στο εξωτερικό της επιφάνειας του υλικού, η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής είναι μηδέν ($B_z=0$). Η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του υλικού διαταράσσεται από επιφανειακές ασυνέχειες που προκαλούν μεταβολή της κάθετης συνιστώσας, δίνοντάς της διαφορετικές τιμές σε σύγκριση με μία συνεχή επιφάνεια. Έτσι δημιουργείται το φαινόμενο του διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου (stray magnetic field) (**Εικόνα 2.2.1**).



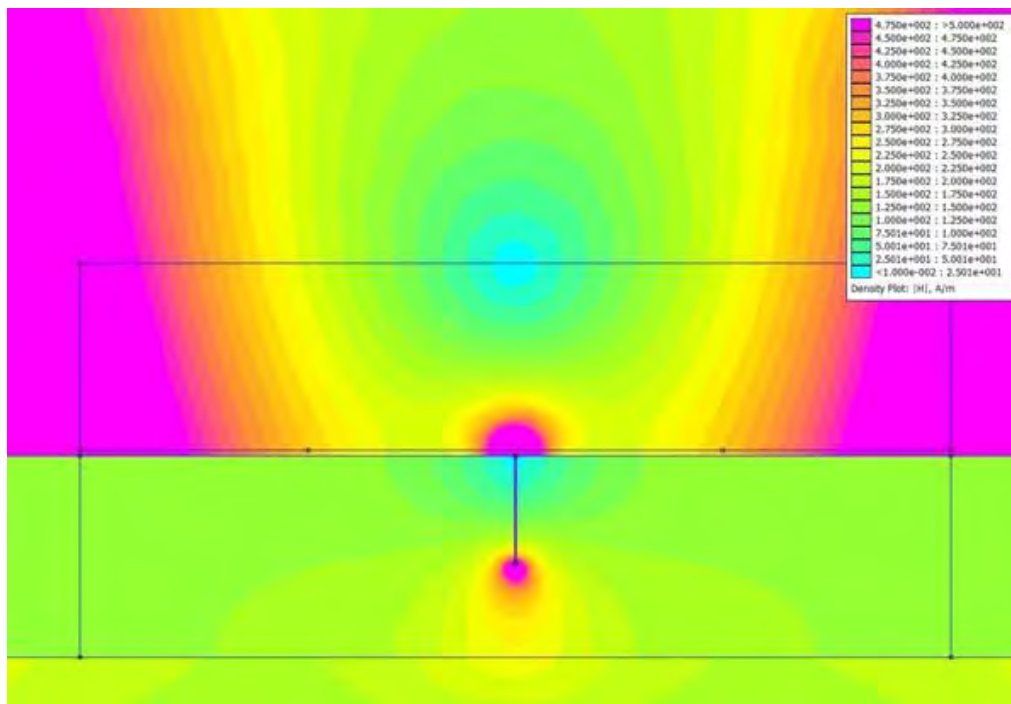
Εικόνα 2.2.1: Διαφεύγον μαγνητικό πεδίο λόγω ασυνέχειας στην επιφάνεια

Η μεταβολή αυτή στο μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί λύνοντας το μαγνητοστατικό πρόβλημα που προκύπτει από τις εξισώσεις του Maxwell για τα μαγνητικά πεδία στην ύλη:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2.2)$$

$$\nabla \times H = J = 0 \quad (2.2.3)$$

Στην εργασία [22] ο Πίσσας Μ. έλυσε το μαγνητοστατικό αυτό πρόβλημα με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, για ένα σύστημα ενός φερρομαγνητικού υλικού και μιας κάθετης στην επιφάνεια ασυνέχειας που αντιπροσωπεύει την ρωγμή. Στην **Εικόνα 2.2.2** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα, όπου εύκολα διακρίνεται το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο στην θέση της ασυνέχειας.

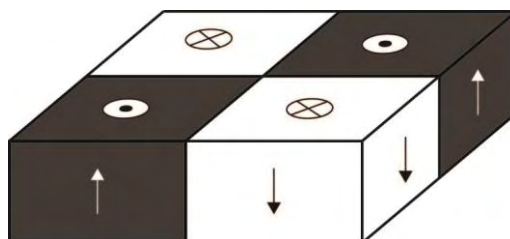


Εικόνα 2.2.2: Προσομοίωση, με πεπερασμένα στοιχεία, μαγνητικού πεδίου μοντέλου φερρομαγνητικού υλικού με ρωγμή κάθετη στην επιφάνεια [22]

2.3. Μαγνητοοπτική αντίθεση

Έχοντας γνώση όλων των παραπάνω μπορεί να περιγραφεί πως δημιουργείται η μαγνητοοπτική αντίθεση στις περιοχές των ρωγμών με την χρήση του πολωτικού μικροσκοπίου και ενός μαγνητοοπτικού αισθητήρα.

Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας είναι συνήθως ένα λεπτό υμένιο κάποιου γρανίτη. Μακροσκοπικά ο αισθητήρας είναι αμαγνήτιστος. Στην αμαγνήτιστη αυτή κατάσταση όμως, παρουσιάζει μαγνητικές μικροπεριοχές με κάθετη προς την επιφάνεια μαγνητική επαγωγή, εναλλασσόμενης φοράς (Σχήμα 2.3.1). Το άθροισμα της συνολικής κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στον αισθητήρα είναι πάντα ίσο με μηδέν. Αυτό σημαίνει πως για κάθε μικροπεριοχή με μαγνητική επαγωγή $B_z > 0$ (\uparrow), υπάρχει αντίστοιχη μικροπεριοχή όπου $B_z < 0$ (\downarrow). Τοποθετώντας τον αισθητήρα κάτω από ένα πολωτικό μικροσκόπιο μπορούμε να δούμε τις μικροπεριοχές αυτές με την βοήθεια του μαγνητοοπτικού φαινομένου.



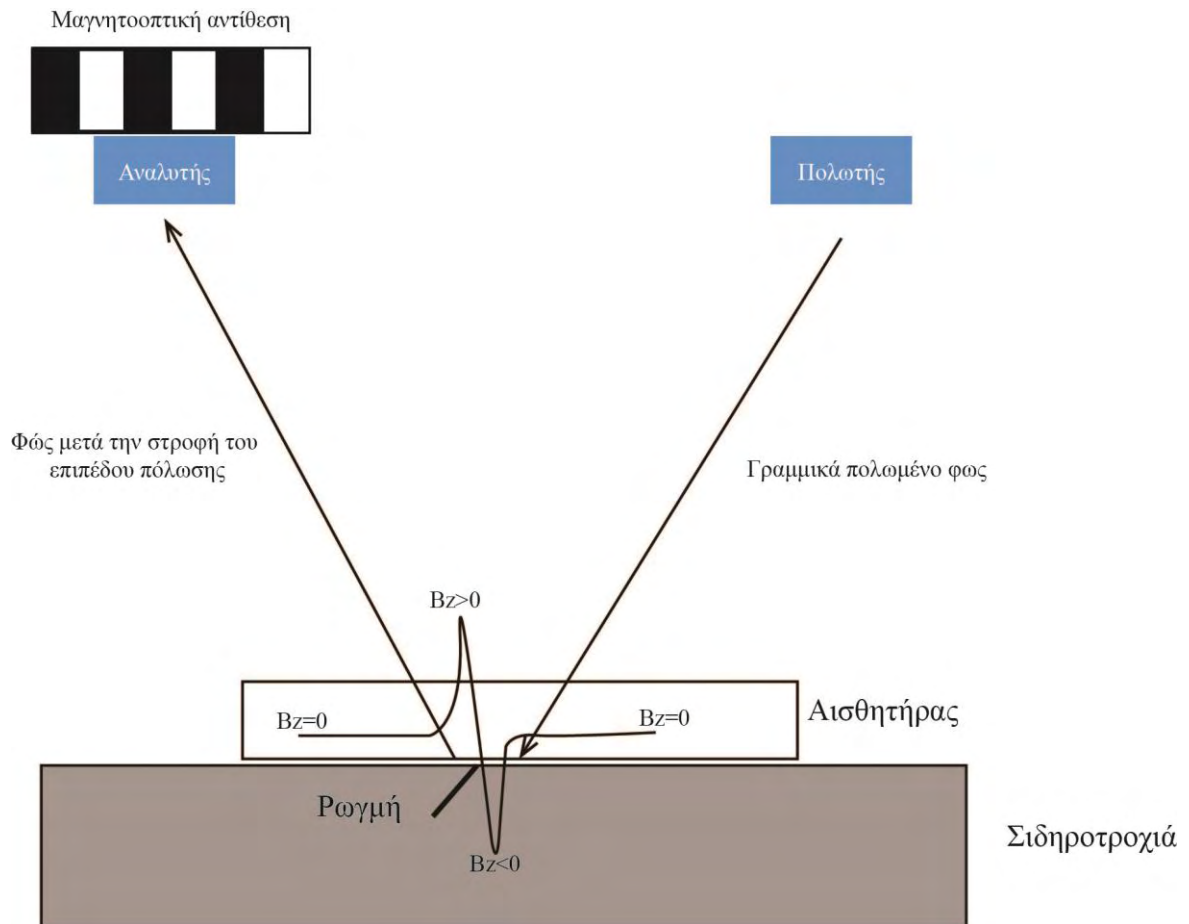
Σχήμα 2.3.1: Απεικόνιση των μαγνητικών μικροπεριοχών εναλλασσόμενης φοράς μαγνήτισης

Το φως περνάει μέσα από τον πολωτή του μικροσκοπίου και πολώνεται γραμμικά. Στη συνέχεια διέρχεται μέσα από το μαγνητοοπτικό υλικό του αισθητήρα, ανακλάται και διέρχεται εκ νέου από το υλικό. Σύμφωνα με το φαινόμενο του Faraday που αναφέρθηκε προηγουμένως, το φως θα υποστεί στροφή του επιπέδου πόλωσης ανάλογη της μαγνήτισης και του διπλάσιου πάχους του μαγνητοοπτικού υλικού (Εξίσωση 2.1.4). Το φως αφού υποστεί την στροφή στο επίπεδο πόλωσης, οδηγείται στον δεύτερο πολωτή του πολωτικού μικροσκοπίου (τον αναλυτή), και ανάλογα με την ένταση του φωτός και την γωνία μεταξύ πολωτή και αναλυτή, αναλύουμε την γωνία στροφής που υπέστη το επίπεδο πόλωσης. Υπό σταθερή γωνία μεταξύ πολωτή και αναλυτή, οι περιοχές με διαφορετική φορά μαγνήτισης προκαλούν διαφορετική στροφή στο πολωμένο φως, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αυτό που αποκαλούμε μαγνητοοπτική αντίθεση.

Εάν ο αισθητήρας τοποθετηθεί στην επιφάνεια ενός μαγνητισμένου υλικού το οποίο έχει ρωγμές, το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο στην περιοχή των ρωγμών θα προκαλέσει την κίνηση των μαγνητικών μικροπεριοχών του αισθητήρα, διατηρώντας όμως την συνολική κάθετη μαγνητική επαγωγή ίση με μηδέν. Στην περιοχή όπου υπάρχουν οι ρωγμές, ο αισθητήρας παρουσιάζει εναλλασσόμενη μαγνήτιση, με αποτέλεσμα και την εναλλασσόμενη στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός που προσπίπτει στον αισθητήρα. Η εναλλαγή της μαγνήτισης ακολουθεί την πορεία της ρωγμής, αφού

εξαρτάται από το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο, και δημιουργεί μία έντονη μαγνητοοπτική αντίθεση. Η μαγνητοοπτική αντίθεση αυτή, είναι στην ουσία μία έμμεση αποτύπωση της ρωγμής στον μαγνητοοπτικό αισθητήρα.

Στο **Σχήμα 2.3.2** φαίνεται σχηματικά πως δημιουργείται η μαγνητοοπτική αντίθεση από την μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στην περιοχή της ρωγμής.



Σχήμα 2.3.2: Σχηματική αναπαράσταση του πως δημιουργείται η μαγνητοοπτική αντίθεση όταν τοποθετηθεί ένας μαγνητοοπτικός αισθητήρας σε μαγνητισμένο υλικό με μία ρωγμή

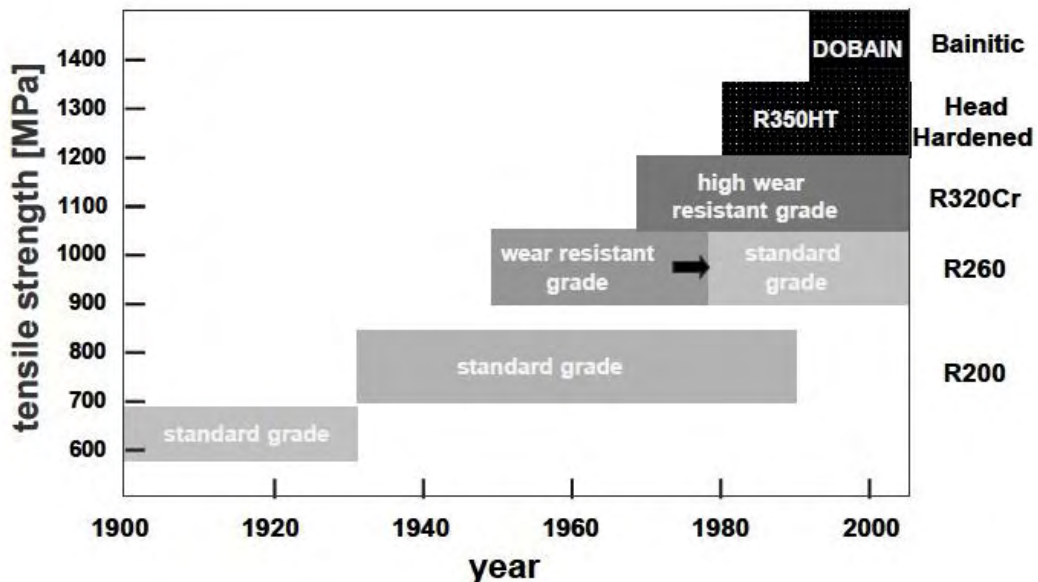
3. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ

3.1. Χρονική εξέλιξη

Στα σύγχρονα σιδηροδρομικά δίκτυα οι αμαξοστοιχίες ταξιδεύουν με μεγάλες ταχύτητες και αυξημένα αξονικά φορτία, με αποτέλεσμα οι σιδηροτροχιές να υποβάλλονται σε έντονες καταπονήσεις. Η επιλογή κατάλληλου υλικού που να μπορεί να δέχεται αυτά τα φορτία και παράλληλα να έχει αυξημένη αντίσταση στην φθορά, ώστε η επιφάνεια να διατηρεί την ομαλότητά της είναι πολύ σημαντική. Τραχείς και ανάγλυφες επιφάνειες, και γενικά ατέλειες στην επιφάνεια μπορούν να αποτελέσουν σημείο έναρξης ρωγμών που μπορεί να οδηγήσουν μέχρι και την στην ολική θραύση της σιδηροτροχιάς. Οι κύριες ιδιότητες που πρέπει να καλύπτει το υλικό είναι:

- Αντίσταση στην φθορά
- Αντοχή στον εφελκυσμό
- Αντοχή στην κόπωση

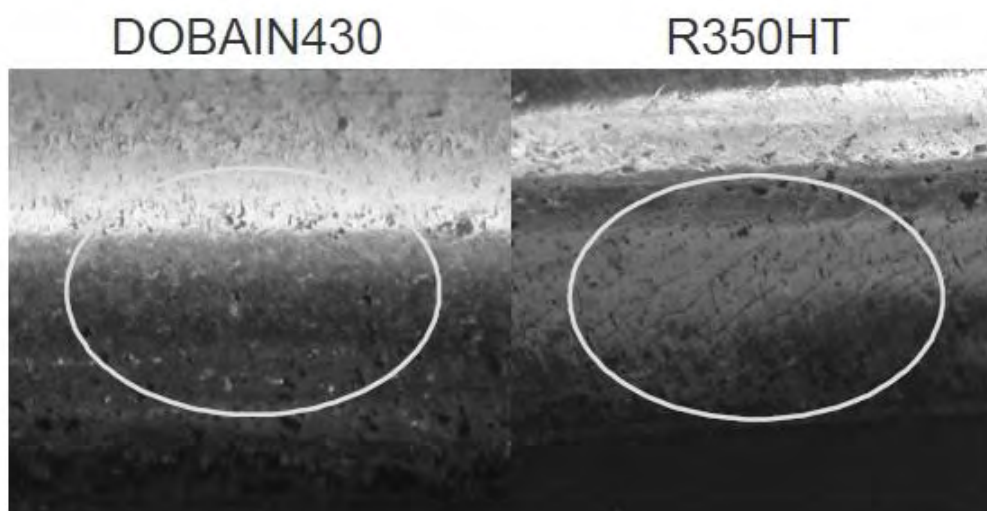
Η βέλτιστη επιλογή για την κατασκευή των ραγών των σιδηροδρομικών δικτύων είναι ο χάλυβας, και οι πιο συνηθισμένοι χάλυβες που χρησιμοποιούνται είναι οι περιλιτικοί. Παρατηρώντας την χρονική εξέλιξη του χάλυβα των σιδηροτροχιών (Σχήμα 3.1.1), βλέπουμε μία τάση για συνεχή αύξηση της σκληρότητας, στην προσπάθεια να επιτευχθεί η επιθυμητή αντίσταση στην φθορά. Αυτό οδήγησε τα τελευταία 15-20 χρόνια την επιστημονική κοινότητα στην έρευνα για την χρήση χάλυβα με μπαινιτική δομή, χωρίς όμως να υπάρξουν ξεκάθαρα αποτελέσματα ακόμα. Αυτό οφείλεται στην περίπλοκη δομή του μπαινιτικού χάλυβα [23].



Σχήμα 3.1.1: Η τάση στην ανάπτυξη χάλυβα σιδηροτροχιών [24]

Ο μπαινίτης που σχηματίζεται σε θερμοκρασίες όχι πολύ κατώτερες της θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στο όριο της περλιτικής περιοχής (550 °C), ο άνω μπαινίτης δηλαδή, παρουσιάζει στην μικροδομή του φερρίτη με την μορφή βελόνων, και η σκληρότητά του είναι μεγαλύτερη αυτής του λεπτόκοκκου περλίτη.

Στην [24] περλιτικοί χάλυβες διαφορετικής σκληρότητας αλλά και μπαινιτικοί χάλυβες τοποθετήθηκαν εντός δικτύου, ώστε να δοκιμαστούν και να γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς τους κάτω από τις ίδιες φορτίσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο χάλυβας μικρότερης σκληρότητας εμφάνισε τα μεγαλύτερα και πιο αραιά head checks. Η έρευνα επιβεβαίωσε ότι όσο αυξάνεται η σκληρότητα στους περλιτικούς χάλυβες, τα σφάλματα μικραίνουν σημαντικά, όπως και ο ρυθμός διάδοσής τους. Ενδιαφέρον παρουσίασε η συμπεριφορά του μπαινιτικού χάλυβα, που έδειξε πολύ μικρά επιφανειακά σφάλματα (**Εικόνα 3.1.1**).



Εικόνα 3.1.1: Η επιφάνεια της σιδηροτροχιάς του μπαινιτικού χάλυβα (αριστερά) και του περλιτικού (δεξιά) [24]

Οι μπαινιτικοί χάλυβες μπορούν να αποτελέσουν το μέλλον όσον αφορά τους χάλυβες στα σιδηροδρομικά δίκτυα, προσφέροντας αυξημένη αντοχή στο φαινόμενο της κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση.

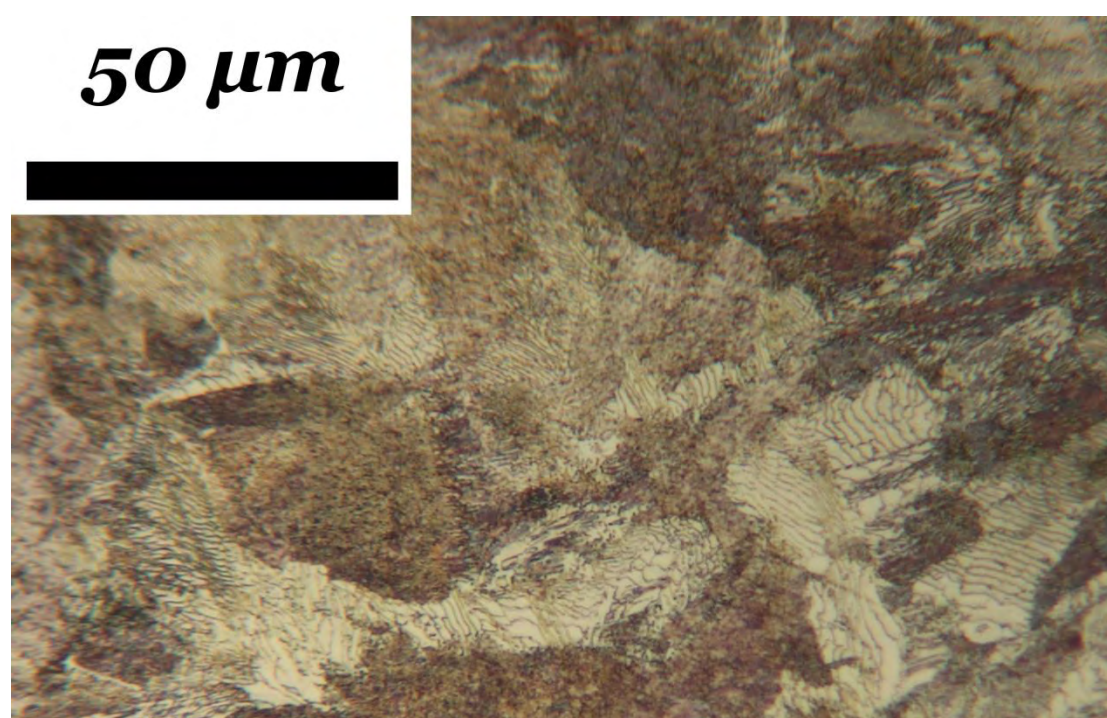
3.2. Μικροδομή και μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα Grade 900A

Από προηγούμενες μελέτες που έγιναν στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας [8], προσδιορίστηκε η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα της σιδηροτροχιάς που μελετήθηκε (**Πίνακας 3.2.1**). Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές UIC 860 (International Union of Railways) ο χάλυβας ανήκει στην κατηγορία Grade 900A.

Πίνακας 3.2.1: Χημική σύσταση (% κ.β.) της σιδηροτροχιάς και η συμφωνία με τις προδιαγραφές για χάλυβα Grade 900A [8]

| | C | Si | Mn | P | S |
|-----------------------------|-----------|---------|---------|----------|---------|
| Grade 900A (UIC 860) | 0.60-0.80 | 0.1-0.5 | 0.8-1.3 | 0.04 max | 0.04max |
| Τμήμα C | 0.72 | 0.37 | 1.12 | 0.014 | 0.020 |

Ο χάλυβας αυτός, με ποσοστό άνθρακα 0.72 είναι λίγο κάτω από τον ευτηκτοειδή χάλυβα (Fe-0.76C). Από την χημική σύσταση της σιδηροτροχιάς και το διάγραμμα φάσεων του σιδήρου με τον άνθρακα περιμένουμε να έχουμε μία σχεδόν πλήρη περλιτική μικροδομή, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 3.2.1**.

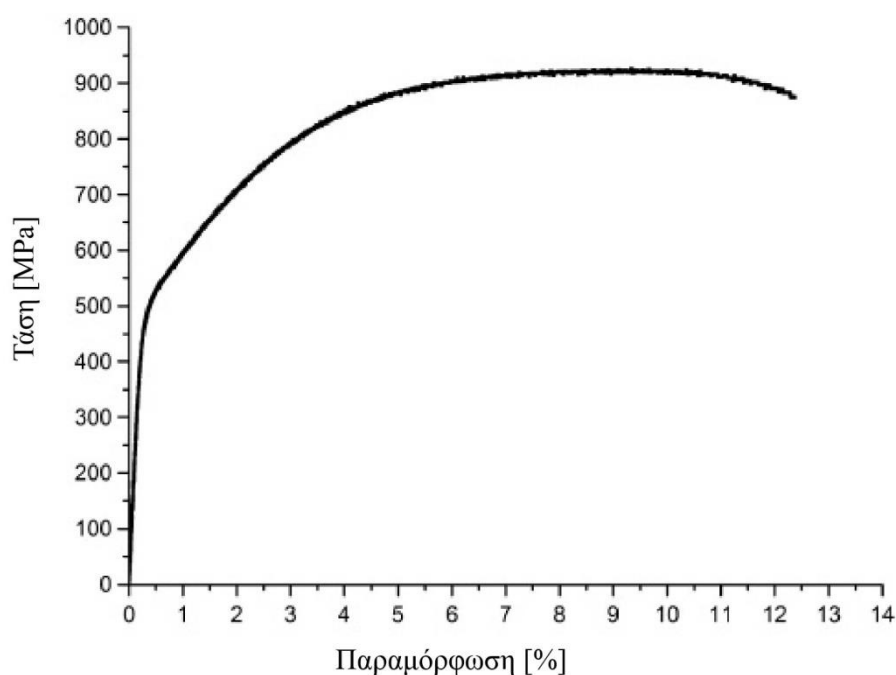


Εικόνα 3.2.1: Η περλιτική μικροδομή του χάλυβα Grade 900A. Οι σκούρες γραμμές ανάμεσα στον φερρίτη είναι οι λαμέλες του σεμεντίτη

Ο περλίτης αποτελείται από μία συνεχή και σχετικά μαλακή φάση, τον φερρίτη (α -Fe), και από έναν τύπο σκληρού καρβιδίου, τον σεμεντίτη (Fe_3C). Μορφολογικά ο σεμεντίτης σχηματίζει παράλληλα πλακίδια μέσα στον φερρίτη. Το πλεονέκτημα που έχουν οι περλιτικοί χάλυβες είναι η υψηλή αντίσταση στην φθορά που τους προσδίδει το σκληρό καρβίδιο του σεμεντίτη, σε συνδυασμό με την δυσθραυστότητα που έχουν ως αποτέλεσμα της ικανότητας της πιο μαλακής φάσης, του φερρίτη, να ρέει πλαστικά. Η σκληρότητα του περλιτικού χάλυβα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εδνολαμελική απόσταση (λ_p). Όσο πιο μικρό το λ_p , τόσο πιο λεπτόκοκκος είναι ο περλίτης και τόσο μεγαλύτερη η σκληρότητά του, λόγω των πολλών διαφασικών συνόρων που παρεμποδίζουν την ολίσθηση των γραμμοαταξιών. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα της σιδηροτροχιάς μετρήθηκαν επίσης στην [8] και δίνονται στον **Πίνακα 3.2.2**, μαζί και το διάγραμμα σ - ϵ (τάσης-παραμόρφωσης) (**Σχήμα 3.2.1**).

Πίνακας 3.2.2: Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα της σιδηροτροχιάς και της προδιαγραφής UIC 860 [8]

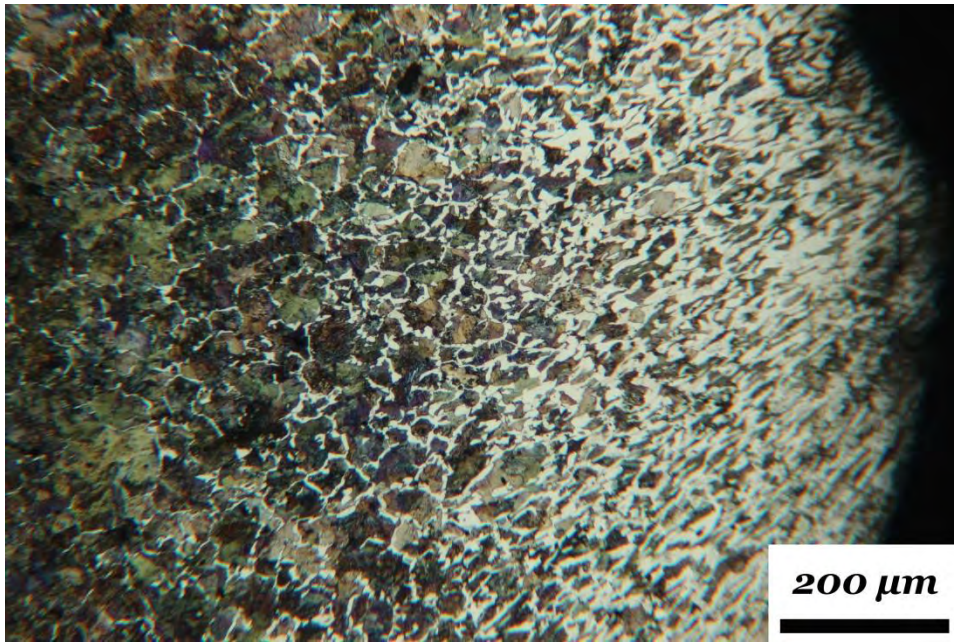
| | UTS [MPa] | Elongation [%] |
|-------------------------|-----------|----------------|
| Grade 900A (UIC 860) | 880-1030 | ≥10 |
| Τμήμα C | 936 | 10.8 |



Σχήμα 3.2.1: Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα Grade 900A

Στην επιφάνεια της ράγας και κοντά στο gauge corner η κατάσταση της μικροδομής είναι διαφορετική. Όπως έδειξαν προηγούμενες έρευνες [8,7] μετά από μικροσκληρομετρήσεις, παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι μαλακότερη από τον πυρήνα της. Παρατηρώντας την μικροδομή στο οπτικό μικροσκόπιο μπορούμε να δούμε ένα δίκτυο προευτηκτοειδούς φερρίτη στα σύνορα των κόκκων (Εικόνα 3.2.2). Ο προευτηκτοειδής φερρίτης δημιουργείται στα σύνορα των κόκκων κατά την διαδικασία παραγωγής των σιδηροτροχιών με εξέλαση.

Στις έρευνές τους, οι Franklin *et al.* [25] και Garnham *et al.* [26] μελέτησαν την επιρροή του προευτηκτοειδή φερρίτη στα σύνορα περιλιπτικών κόκκων. Η έναρξη παρουσιάστηκε κατά κύριο λόγο στις περιοχές έντονης πλαστικής παραμόρφωσης του προευτηκτοειδή φερρίτη, όπου η μικροδομή του είναι πολύ λεπτή.



Εικόνα 3.2.2: Προευτηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς

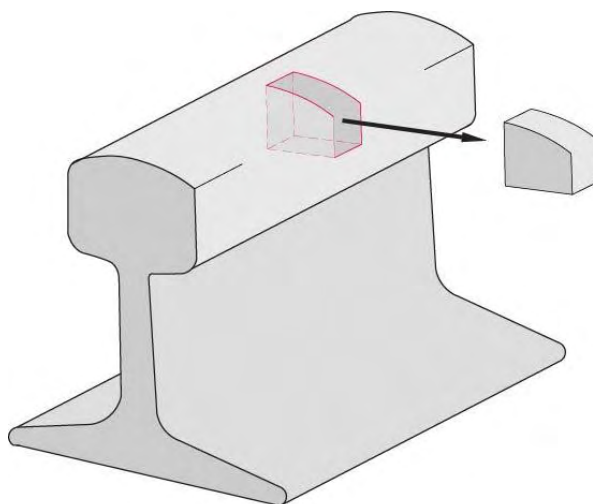
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε ήταν η αναγνώριση και η καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σφαλμάτων RCF στις σιδηροτροχιές, και στη συνέχεια η συσχέτισή αυτών με τα αποτελέσματα ανίχνευσης των σφαλμάτων με μαγνητοοπτικό αισθητήρα. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δοκίμια σιδηροτροχιάς του Μετρό της Αθήνας.

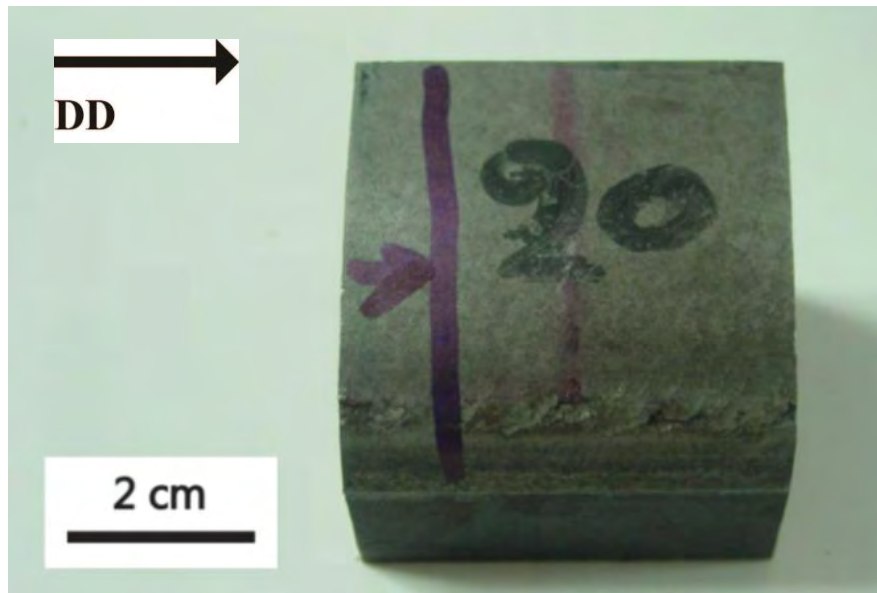
Τα δοκίμια που εξετάστηκαν κόπηκαν από τμήμα μίας εκ των πέντε σιδηροτροχιών, και συγκεκριμένα της ράγας C, που στάλθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας τον Φεβρουάριο του 2013 από την εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. με σκοπό την μελέτη των ρωγμών που δημιουργήθηκαν από κόπωση εξ επαφής σε κύλιση. Η ράγα είχε υποστεί μία φορά τρόχισμα και επαναχρησιμοποιήθηκε για 1,5-2 χρόνια.

4.1. Προετοιμασία δοκιμίων

Το πρώτο τμήμα της διαδικασίας αφορούσε την προετοιμασία των δοκιμίων ώστε η επιφάνεια αλλά και η διατομή της ράγας να είναι πλήρως ελεγχόμενες από διαδικασίες όπως ο έλεγχος με μικροσκόπιο και στερεοσκόπιο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.1.1**. Η σιδηροτροχιά αρχικά δόθηκε σε εξωτερικό μηχανουργείο ώστε να γίνει η κοπή της σε κομμάτια μικρότερου μεγέθους (**Εικόνα 4.1.1**). Ακολούθησε η κοπή των δοκιμίων στο εργαστήριο, με το κοπτικό Struers-Unitom 2. Για τις ανάγκες της έρευνας ετοιμάστηκαν δύο διαφορετικά δοκίμια.



Σχήμα 4.1.1: Εξαγωγή των δοκιμίων από κομμάτι της ράγας



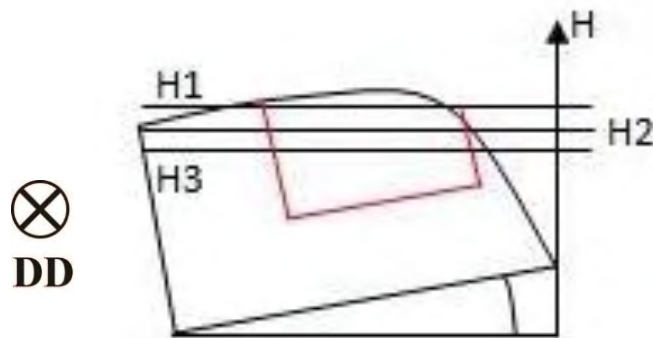
Εικόνα 4.1.1: Τμήμα της σιδηροτροχιάς από το οποίο κόπηκαν τα δοκίμια, όπως παραλήφθηκε από το μηχανουργείο. Το βέλος δείχνει την φορά κίνησης της αμαξοστοιχίας

4.1.1. Δοκίμιο A

Το πρώτο δοκίμιο (δοκίμιο A) κόπηκε με σκοπό αρχικά να υποβληθεί σε δύο τυπικούς μη καταστρεπτικούς ελέγχους για την ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων, τον έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια και αυτόν με διεισδυτικά υγρά. Ακολούθησε η διαδικασία λείανσης της εγκάρσιας επιφάνειας, στην συσκευή Struers-Knuth-Rotor 3, με περιστρεφόμενους λειαντικούς δίσκους καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και ψυκτικό μέσο το νερό. Η διαδικασία λείανσης ήταν σταδιακή με δίσκους από 120 έως 2400 grit. Η επιφάνεια στη συνέχεια στιλβώθηκε με αιώρημα διαμαντόπαστας 3 μm . Τέλος πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή με Nital 2% (98 mL αιθυλική αλκοόλη, 2 mL HNO_3), ώστε να εμφανιστεί η μικροδομή του υλικού.

Στη συνέχεια, για την καταγραφή των επιφανειακών ρωγμών, το δοκίμιο κόπηκε περαιτέρω και εγκιβωτίστηκε σε εποξική ρητίνη ώστε να είναι δυνατή η σταδιακή λείανση του σε ελεγχόμενο βάθος. Λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας, ο εγκιβωτισμός του δοκιμίου έγινε σε κλίση γωνίας 10° . Η επιφάνεια του, εγκιβωτισμένου πλέον, δοκιμίου λειάνθηκε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτήν της εγκάρσιας επιφάνειας. Η διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές (τρεις λειάνσεις) επιτρέποντάς έτσι την παρατήρηση των ρωγμών σε διαφορετικά βάθη της ράγας (**Σχήμα 4.1.2**).

- 1^η λείανση: $H_1=23.9$ mm
- 2^η λείανση: $H_2=23.3$ mm
- 3^η λείανση: $H_3=22.5$ mm



Σχήμα 4.1.2: Σχηματική αναπαράσταση της γωνίας με την οποία εγκιβωτίστηκε το δοκίμιο και των τριών λειάνσεων που έγιναν για τα διαφορετικά βάθη

4.1.2. Δοκίμιο Β

Σκοπός του δεύτερου δοκιμίου (δοκίμιο Β) ήταν αφού γίνει μεταλλογραφική ανάλυση να υποβληθεί σε έλεγχο με την χρήση του μαγνητοοπτικού αισθητήρα. Πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της λείανσης, της στίλβωσης και της χημικής προσβολής, τόσο στην εγκάρσια επιφάνεια όσο και στην επιφάνεια του δοκιμίου.

4.2. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι

Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι στην επιφάνεια του δοκιμίου Α έγιναν σε εργαστήριο της EBETAM A.E. , στην Βιομηχανική Περιοχή του Βόλου.

Αρχικά έγινε ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά. Το διεισδυτικό υγρό (μωβ χρώμα) εφαρμόστηκε, με την μορφή σπρέι, στην επιφάνεια του δοκιμίου και αφέθηκε για μικρό χρονικό διάστημα, ώστε να δοθεί χρόνος στο υγρό να εισχωρήσει στις ασυνέχειες τις επιφάνειας. Ακολούθησε ο ψεκασμός με υγρό που τραβά στην επιφάνεια τα διεισδυτικά υγρά (λευκό χρώμα), δημιουργώντας έτσι το προφίλ των ρωγμών επάνω στην επιφάνεια ψεκασμού.

Για τον έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια η επιφάνεια καλύφθηκε με λευκό σπρέι ώστε να είναι ορατά τα μαγνητικά σωματίδια. Το δοκίμιο φορτίστηκε μαγνητικά με την βοήθεια ενός συνεχή μαγνήτη. Οι ροϊκές γραμμές του μαγνητικού πεδίου αδυνατούν να περάσουν από τις ασυνέχειες του υλικού και κινούνται παράλληλα και περιμετρικά από αυτές. Με την εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων, αυτά ακολουθούν τις ροϊκές γραμμές του πεδίου και σχηματίζουν το προφίλ των ρωγμών.

4.3. Μεταλλογραφική ανάλυση

Προκειμένου να μελετηθεί η εγκάρσια τομή της ράγας μεταλλογραφικά, και να μετρηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών, τα δοκίμια εξετάστηκαν κάτω από οπτικό μικροσκόπιο σε μεγέθυνση x50. Με την βοήθεια της ενσωματωμένης στο μικροσκόπιο κάμερας λήφθηκαν φωτογραφίες της κάθε ρωγμής ώστε να επεξεργαστούν αργότερα. Για να σχηματιστεί μια τρισδιάστατη εικόνα των ρωγμών,

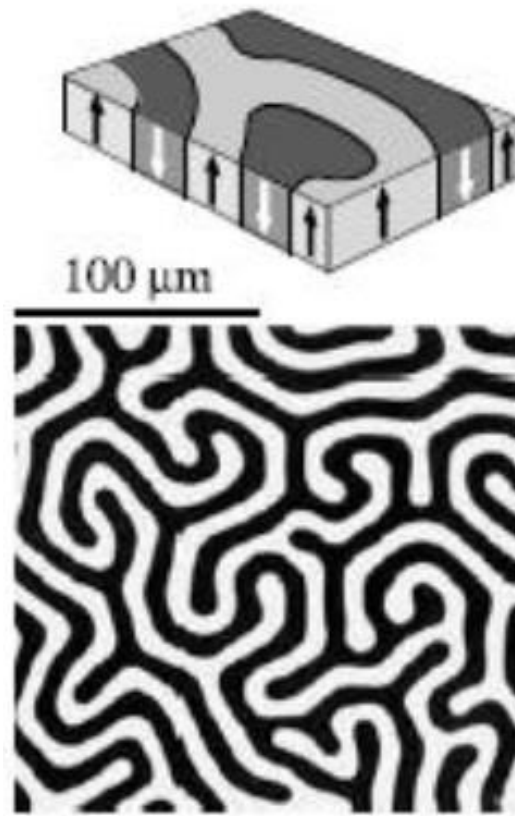
τραβήχτηκαν φωτογραφίες των ρωγμών και από την επιφάνεια του δοκιμίου, αυτή τη φορά κάτω από στερεοσκόπιο σε μεγέθυνση x6.5. Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν επεξεργάστηκαν με το open source λογισμικό Image J, και συγκεκριμένα μετρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών, που αφορούν το μήκος, το βάθος και την γωνία που σχηματίζουν με την επιφάνεια της ράγας.

4.4. Ανίχνευση ρωγμών με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα

Στο δοκίμιο B, εφαρμόστηκε μέθοδος ανίχνευσης βασισμένη στο μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Τα μέσα για την ανίχνευση και την αποτύπωση των ρωγμών με την χρήση της μεθόδου αυτής, τα παρείχε το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος. Η μελέτη έγινε με την χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα της εταιρίας MATESY (**Εικόνα 4.4.1**). Ο αισθητήρας αποτελείται από υψηλής ποιότητας λεπτό υμένιο του μικτού γρανίτη $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$, και είναι ικανός να ανιχνεύει το τυχόν διαφεύγον μαγνητικό πεδίο με την κίνηση των μαγνητικών περιοχών του. Εν τη απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ο αισθητήρας αποτελείται από μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές, με μαγνήτιση κάθετη στην επιφάνεια του υμενίου με εναλλασσόμενη φορά. Οι περιοχές με ομόρροπη μαγνήτιση σχηματίζουν μια δομή «λαβύρινθου» όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.4.1**.

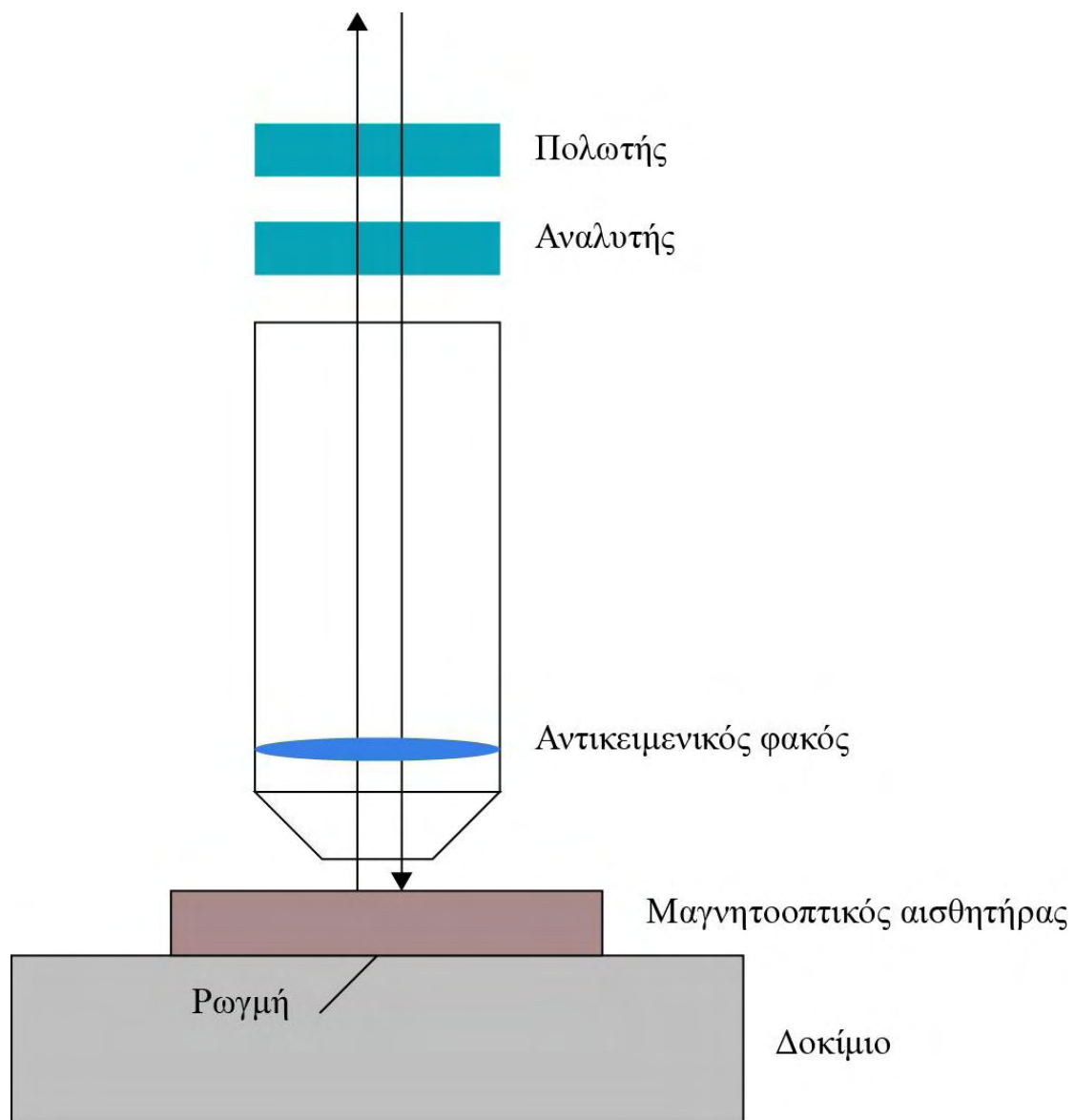


Εικόνα 4.4.1: Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας της εταιρίας MATESY που χρησιμοποιήθηκε στην ανίχνευση των ρωγμών



Σχήμα 4.4.1: Οι περιοχές του κρυστάλλου με ομόρροπη μαγνήτιση σχηματίζουν την δομή «λαβύρινθου»

Ο αισθητήρας προσαρμόστηκε σαν κεφαλή σε πολωτικό μικροσκόπιο Leica DM R, με ενσωματωμένο σύστημα φωτογράφισης. Αφού το δοκίμιο μαγνητίστηκε με την βοήθεια ενός μαγνήτη, τοποθετήθηκε κάτω από το πολωτικό μικροσκόπιο και η γωνία μεταξύ πολωτή και αναλυτή τέθηκε στις 80° , όπου τα αποτελέσματα παρουσίαζαν την μεγαλύτερη ευκρίνεια. Μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του δοκιμίου παρεμβάλετε ένα στρώμα λεπτού πολυμερούς για προστασία. Χάρης αυτήν την πειραματική διάταξη, λήφθηκαν οι μαγνητοοπτικές εικόνες από την επιφάνεια του δοκιμίου. Με την χρήση αυτών των εικόνων και λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις από την μεταλλογραφική ανάλυση, έγινε μια πρώτη υπόθεση για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία αυτής της μη καταστρεπτικής μεθόδου ανίχνευσης σφαλμάτων RCF.

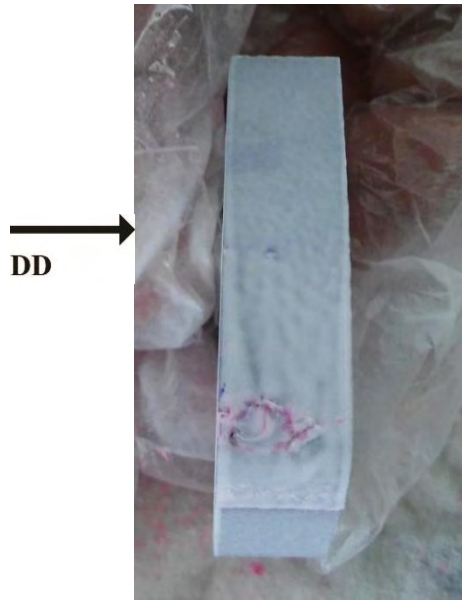


Σχήμα 4.4.2: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης για την ανίχνευση των ρωγμών με την χρήση του μαγνητοοπτικού αισθητήρα

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

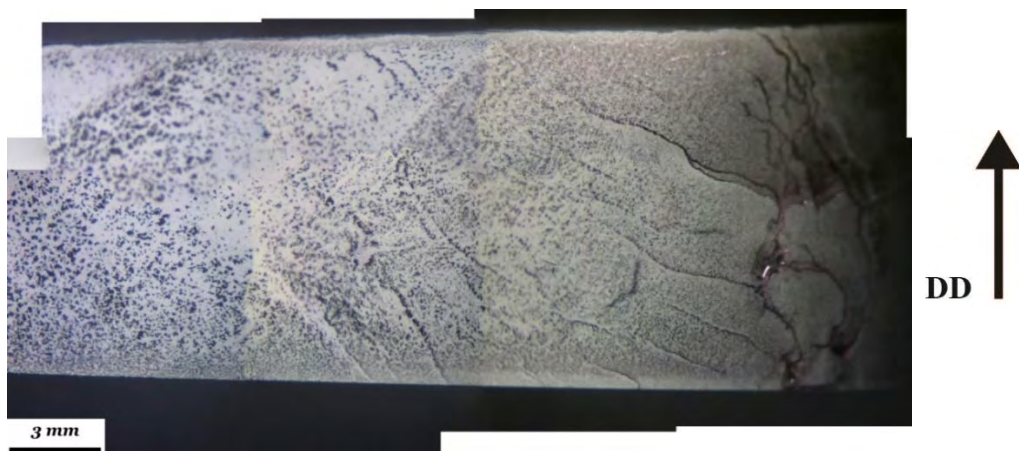
5.1. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι στο δοκίμιο A

Κατά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά δεν κατέστη δυνατή η εμφάνιση του δικτύου των ρωγμών. Εμφανή αποτελέσματα είχαμε μόνο στην περιοχή του gauge corner όπου παρουσιάζεται αποφλοιώση σε μεγάλο βαθμό (Εικόνα 5.1.1).



Εικόνα 5.1.1: Η επιφάνεια του δοκιμίου μετά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά. Το βέλος δείχνει την φορά κίνησης της αμαξοστοιχίας

Ο έλεγχος με την εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων αποκάλυψε την ύπαρξη πυκνών επιφανειακών ρωγματώσεων, με αρχή το gauge corner και κατεύθυνση το κέντρο της σιδηροτροχιάς αναπτυσσόμενες υπό γωνία. Στην **Εικόνα 5.1.2** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του ελέγχου κάτω από το στερεοσκόπιο σε μεγέθυνση x6.5. Στην εικόνα φαίνεται πολύ καθαρά και η περιοχή που έχει υποστεί εκτεταμένη αποφλοιώση.



Εικόνα 5.1.2: Η επιφάνεια του δοκιμίου μετά τον έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια.

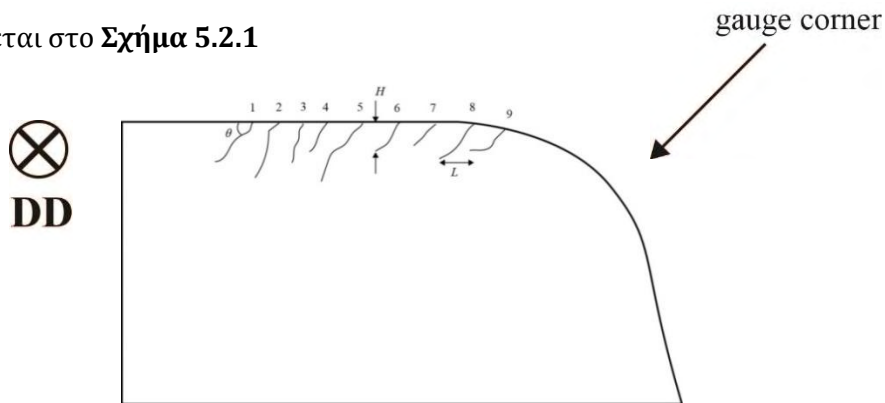
5.2. Μεταλλογραφική ανάλυση

5.2.1. Εγκάρσια τομή δοκιμίου A

Αρχικά το δοκίμιο εξετάστηκε κατά την εγκάρσια τομή ώστε να γίνει κατανοητή η μορφή και η εξέλιξη του υποεπιφανιακού δικτύου των ρωγμών, καθώς και να προσδιοριστούν οι περιοχές από όπου ξεκινούν. Καταγράφηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών και πιο συγκεκριμένα, με την βοήθεια του προγράμματος Image j, μετρήθηκαν:

- Το μήκος L των ρωγμών
- Το βάθος H από την επιφάνεια της ράγας
- Και η γωνία θ με την οποία εξελίσσονται

όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.2.1**



Σχήμα 5.2.1: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν κατά την μελέτη της εγκάρσιας τομής του δοκιμίου A και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν

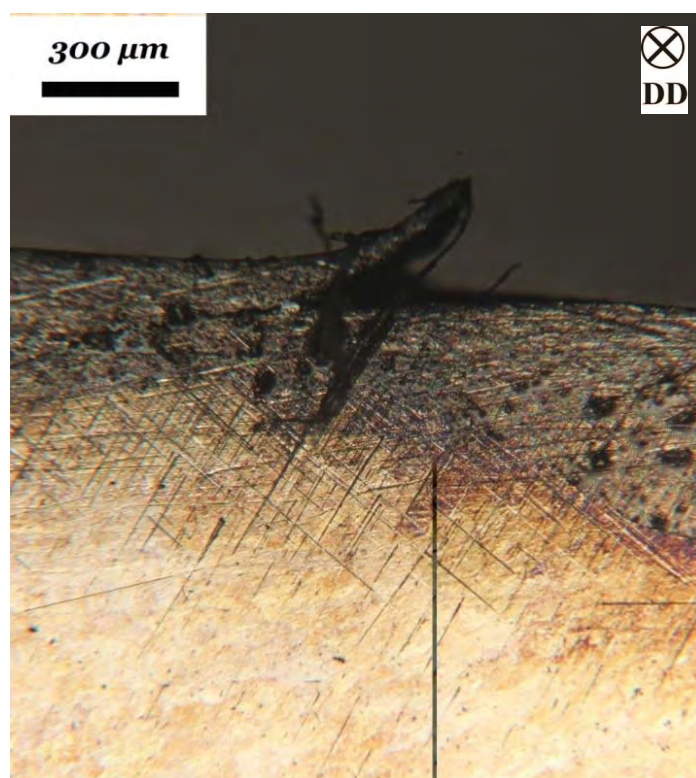
Η παρατήρηση της εγκάρσιας τομής του πρώτου δοκιμίου αποκάλυψε εννέα ρωγμές. Οι ρωγμές αυτές ξεκινάνε από την επιφάνεια και κατευθύνονται με κλίση προς το εσωτερικό της ράγας. Στον **Πίνακα 5.2.1** που ακολουθεί παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών, όπως αυτά μετρήθηκαν κατά την μεταλλογραφική ανάλυση.

Πίνακας 5.2.1: Αναλυτικά οι μετρήσεις των ρωγμών στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου A

| α/α Ρωγμής | L [μm] Μήκος | H [μm] Βάθος | θ [$^\circ$] Γωνία |
|------------------------|--|--|--|
| 1 | 1032 | 431 | 18 |
| 2 | 642 | 408 | 22 |
| 3 | 711 | 396 | 27 |
| 4 | 1132 | 668 | 19 |
| 5 | 1081 | 537 | 27 |
| 6 | 260 | 179 | 28 |
| 7 | 748 | 322 | 23 |
| 8 | 3092 | 997 | 17 |
| 9 | 2488 | 635 | 10 |
| Μέσος Όρος | 1242 | 508 | 21,2 |
| Τυπική Απόκλιση | 876 | 224 | 5,53 |

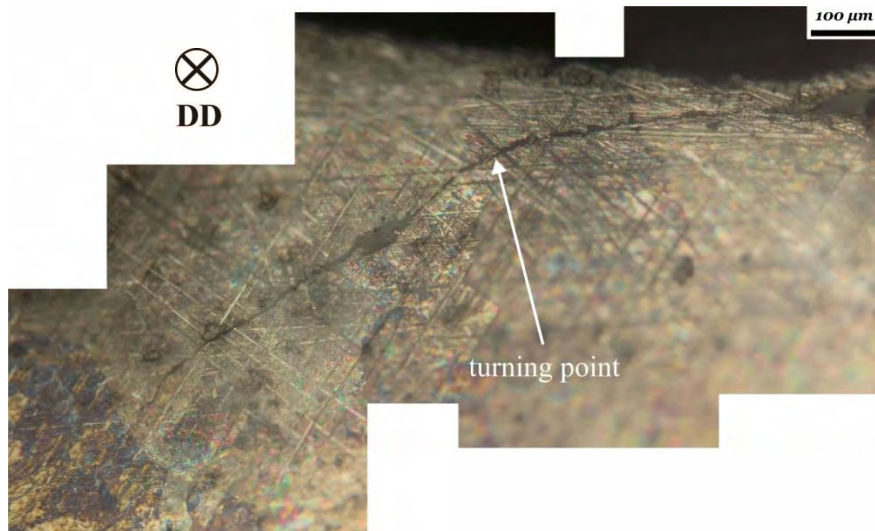
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα βλέπουμε πως οι ρωγμές κατευθύνονται προς το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς με μία μέση αρχική γωνία $\theta=21,2^\circ$ και αναπτύσσονται έως ένα μέσο βάθος $H=508 \mu\text{m}$. Το μήκος των ρωγμών είναι κατά μέσο όρο κοντά στο ένα χιλιοστό, με τις ρωγμές 8 και 9, οι οποίες βρίσκονται αρκετά κοντά στο gauge corner, να παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τον μέσο όρο.

Στην **Εικόνα 5.2.1** βλέπουμε το σημείο εκκίνησης της ρωγμής 1. Η ρωγμή φαίνεται να έχει ανοιγμένα “χείλη” κοντά στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, πιθανότητα από την πίεση που ασκεί το λιπαντικό στις επιφάνειες της ρωγμής. Κομμάτι της επιφάνειας της ράγας τείνει να αποκολληθεί, με αποτέλεσμα την δημιουργία επερχόμενου pitting. Η ρωγμή 1 εξελίσσεται με πολύ μικρή γωνία σε σχέση με την επιφάνεια, σχεδόν παράλληλα, και έτσι παρά το μήκος της, το βάθος της παραμένει σχετικά μικρό.



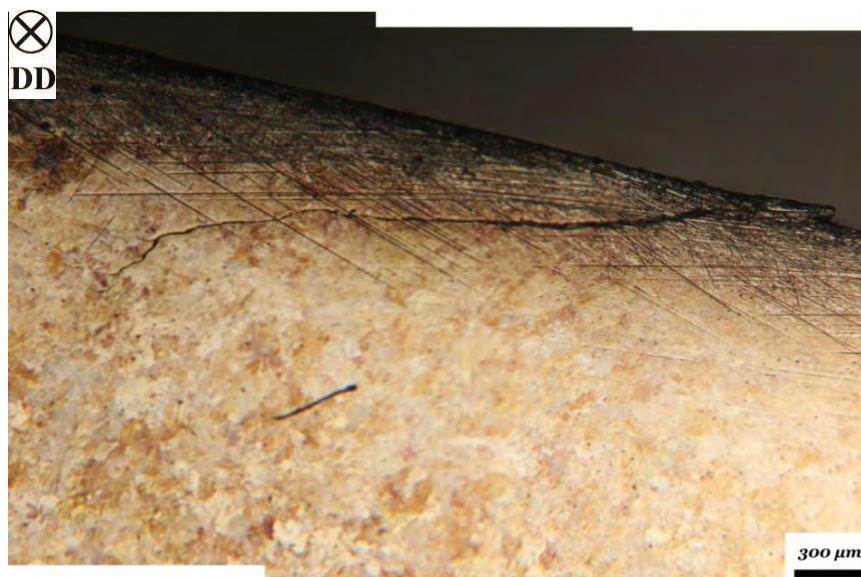
Εικόνα 5.2.1: Το σημείο έναρξης της ρωγμής 1 στο οποίο εμφανίζονται τα ανοιγμένα “χείλη” στην επιφάνεια της ρωγμής

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή της ρωγμής 4, η οποία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.2.2**. Η ρωγμή μήκους $1132 \mu\text{m}$ ξεκινάει να αναπτύσσεται υπό γωνία 19° ως προς την επιφάνεια, έως ότου φτάσει σε βάθος $170 \mu\text{m}$ όπου και φαίνεται να στρίβει, και με γωνία 42° να κατευθύνεται προς το κέντρο της ράγας. Η ρωγμή φτάνει σε βάθος μέχρι τα $668 \mu\text{m}$, και η γωνία με την οποία εξελίσσεται την καθιστά αρκετά επικίνδυνη για την ολική θραύση της σιδηροτροχιάς.

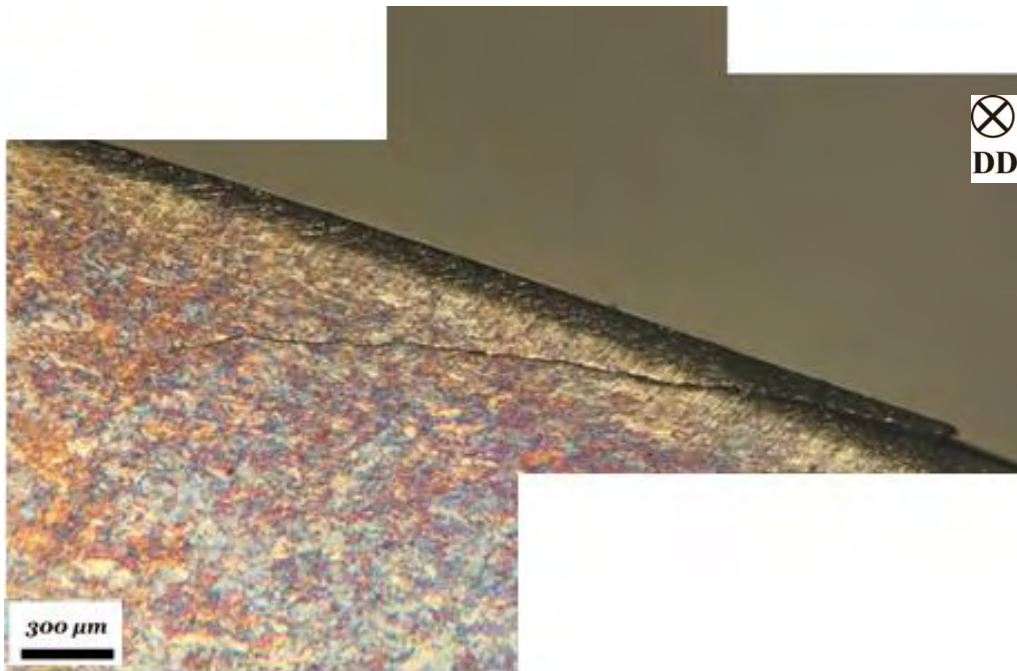


Εικόνα 5.2.2: Η ρωγμή 4 σε μεγέθυνση x100 και το σημείο όπου αυτή στρίβει προς το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες σε μήκος ρωγμές που εμφανίστηκαν κατά την εγκάρσια τομή, οι ρωγμές 8 (**Εικόνα 5.2.3**) και 9 (**Εικόνα 5.2.4**). Η ρωγμή 8 μήκους 3092 μm εξελίσσεται με γωνία 17° ως προς την επιφάνεια και φτάνει σε βάθος 997 μm. Στην περιοχή έναρξης της ρωγμής φαίνεται πως υπάρχει η τάση ανοίγματος του “χείλους” της ρωγμής, που μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση τμήματος του υλικού και την εμφάνιση pitting ή και αποφλοιώσης στην επιφάνεια. Ακόμα, λίγο πριν το τέλος της η ρωγμή δείχνει να στρίβει σχεδόν κάθετα με την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Αντίθετα η ρωγμή 9, μήκους 2488 μm και βάθους 635 μm, ξεκινά με γωνία 10° σε σχέση με την επιφάνεια και συνεχίζει να αναπτύσσεται σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια.

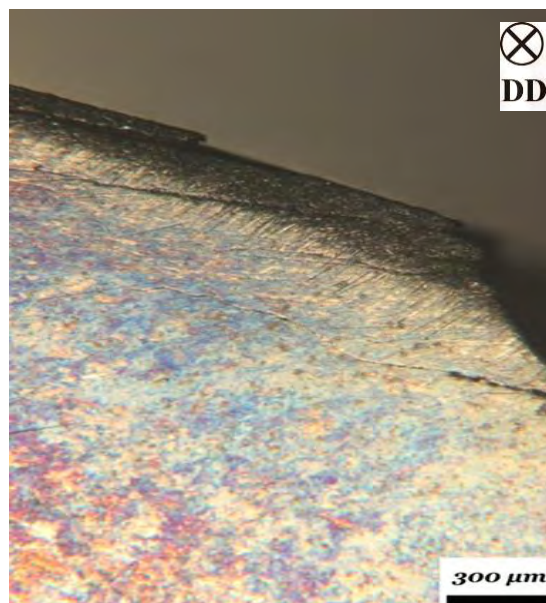


Εικόνα 5.2.3: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 8. Στο τέλος της ρωγμής φαίνεται πως αυτή στρίβει με πορεία το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς



Εικόνα 5.2.4: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 9 η οποία εξελίσσεται σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια

Ακολουθεί εικόνα της εγκάρσιας τομής στην περιοχή του gauge corner (**Εικόνα 5.2.5**). Βλέπουμε ότι η περιοχή έχει υποστεί εκτεταμένη αποφλοιώση, σε βαθμό που έχει παραμορφωθεί το προφίλ της σιδηροτροχιάς. Οι αποφλοιώσεις δείχνουν να προκαλούνται από ένα δίκτυο λεπτών, υποεπιφανιακών μικρορωγμών, οι οποίες διακλαδίζονται και φτάνουν μέχρι την επιφάνεια του gauge corner, όπου και κομμάτι του υλικού αποκολλάται. Αυτές οι μικρορωγμές αναπτύσσονται σε αρκετά μικρό βάθος από την επιφάνεια του gauge corner.

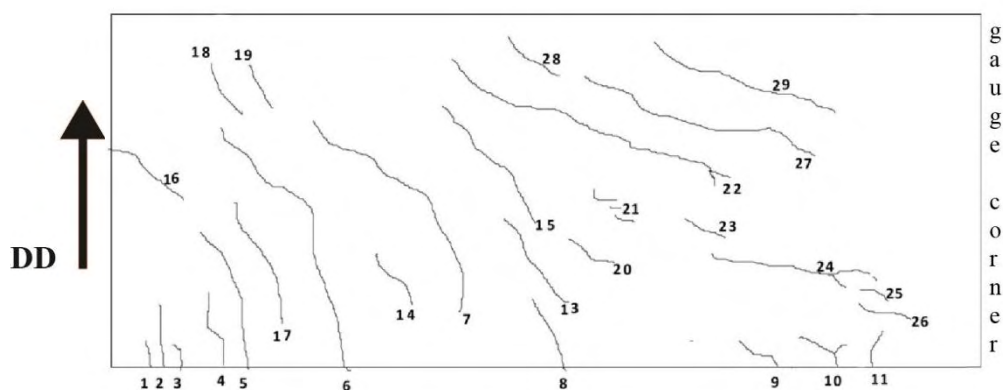


Εικόνα 5.2.5: Εικόνα από την εγκάρσια τομή στην περιοχή του gauge corner

5.2.2. Επιφάνεια δοκιμίου A

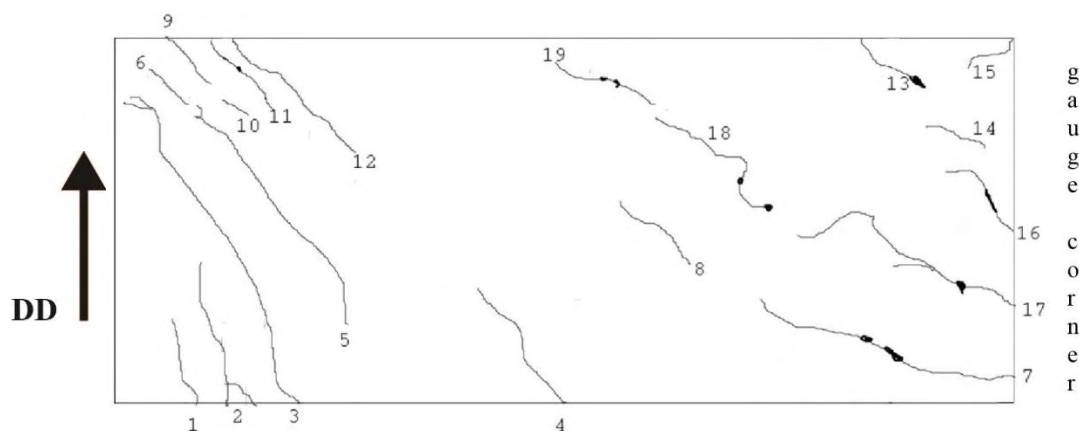
Ακολούθησε ο έλεγχος της επιφάνειας του δοκιμίου κάτω από το οπτικό μικροσκόπιο, όπου και εμφανίστηκαν πολλές και πυκνές ρωγμές, τα μήκη των οποίων ποικίλουν. Αυτό που μας ενδιέφερε ήταν να μετρηθεί το βάθος στο οποίο φτάνουν οι ρωγμές αυτές, και για το σκοπό αυτό έγιναν δύο ακόμα λειάνσεις με ελεγχόμενη αφαίρεση υλικού, ώστε να γνωρίζουμε σε τι βάθος βρισκόμαστε ως προς την αρχική επιφάνεια του δοκιμίου.

Στην αρχική επιφάνεια οι ρωγμές που εμφανίστηκαν μετρήθηκαν στις 29 με μέσο μήκος 2177 μm . Έγινε προσεκτική καταγραφή και σχηματική τους αναπαράσταση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.2.2**, ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση και ταύτιση των ρωγμών στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, σε μικρότερα βάθη.



Σχήμα 5.2.2: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δοκιμίου A μετά την 1^η λείανση

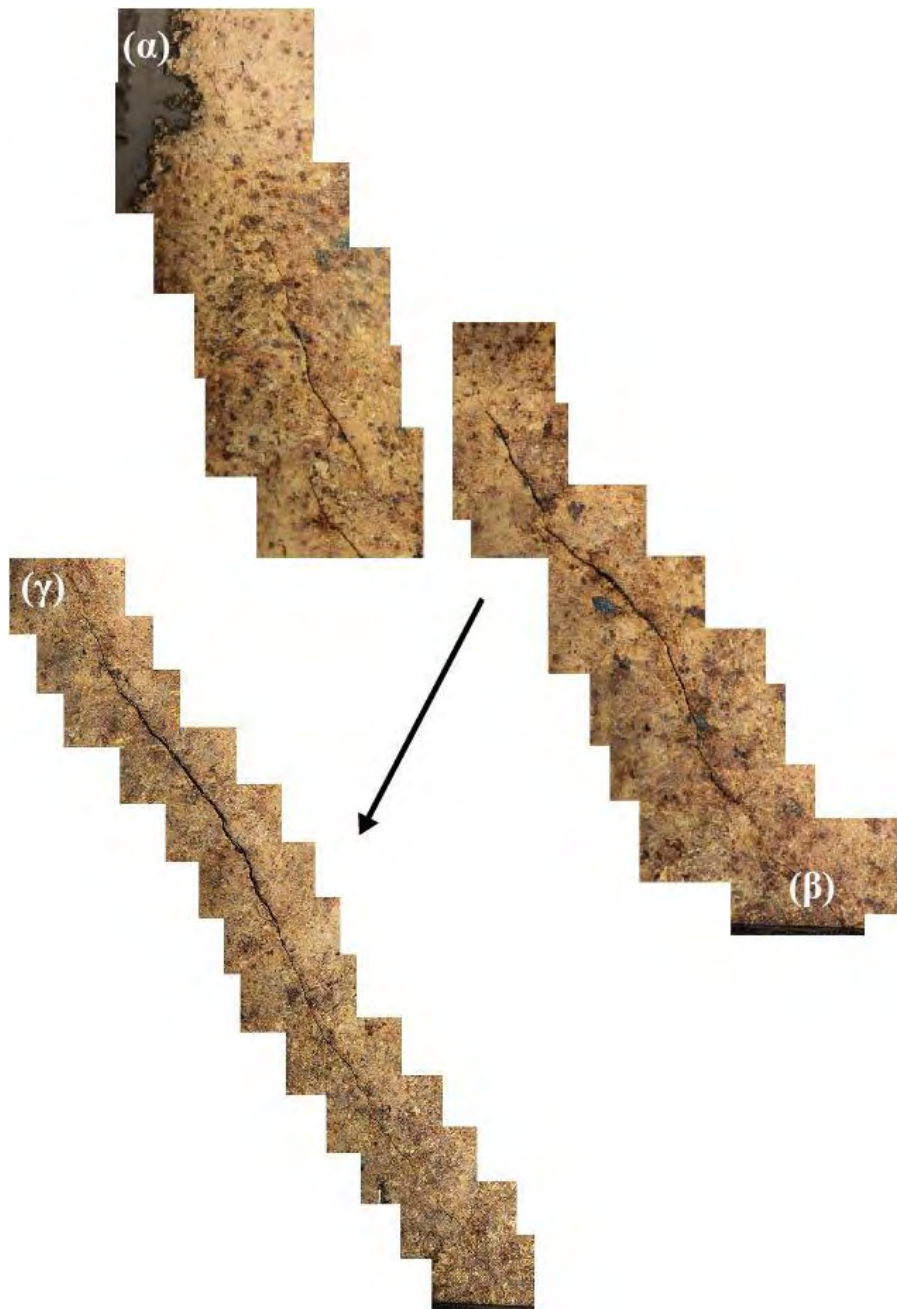
Ακολούθησε η 2^η λείανση, όπου η επιφάνεια του δοκιμίου κατέβηκε κατά 600 μm . Επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία ελέγχου με το μικροσκόπιο και καταγραφή των ρωγμών, όπως και στην αρχική επιφάνεια. Η μείωση του αριθμού των ρωγμών ήταν εμφανής, καθώς από τις αρχικές 29 παραμείνανε μόνο 19, ενώ έκαναν την εμφάνισή τους και κάποιες ρωγμές με σημείο εκκίνησης την περιοχή του spalling. Το μέσο μήκος των ρωγμών αυτών μετρήθηκε 1107 μm . Μετά την αποτύπωση των ρωγμών σε σκαρίφημα (**Σχήμα 5.2.3**) έγινε ταύτισή τους με αυτές από την αρχική επιφάνεια.



Σχήμα 5.2.3: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του δοκιμίου A μετά την 2^η λείανση

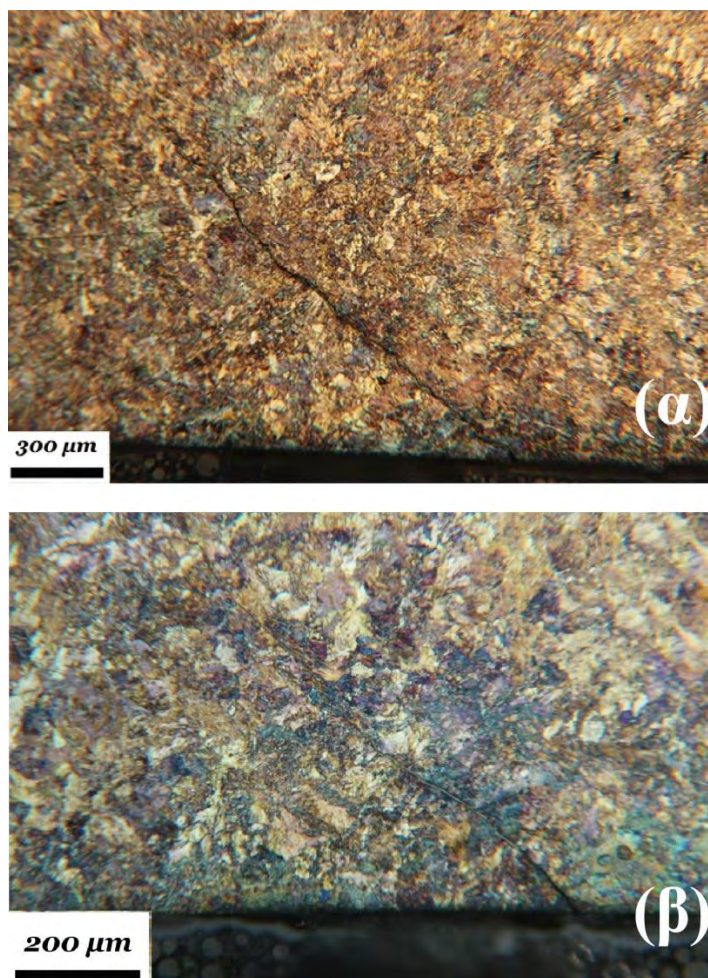
Στην επιφάνεια μετά την 2^η λείανση, το μήκος των ρωγμών φαίνεται να έχει μικρύνει αισθητά, σχεδόν στο μισό, δείγμα του ότι οι ρωγμές σε αυτό το βάθος τείνουν να εκλείψουν. Ακόμα το αποτύπωμα κάποιων ρωγμών δείχνει να αλλάζει μορφή σε μεγαλύτερο βάθος που σημαίνει ότι οι ρωγμές αυτές δεν αναπτύσσονται κάθετα με την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Κάποιες ρωγμές από την 1^η λείανση φάνηκαν να ενώνονται σε μεγαλύτερο βάθος και να εμφανίζονται ως μία ενιαία στην επιφάνεια μετά την 2^η λείανση. Άλλες εμφανίστηκαν με την ίδια μορφή αλλά με μικρότερο μήκος ενώ άλλες είχαν εκλείψει τελείως. Ακολουθούν φωτογραφίες από κάποιες χαρακτηριστικές ρωγμές στα δύο αυτά βάθη της σιδηροτροχιάς.

Στην **Εικόνα 5.2.6** φαίνονται οι ρωγμές 5 (β) και 16 (α) από την 1^η λείανση οι οποίες ενώνονται και εμφανίζονται ως μία, η ρωγμή 3 στην επιφάνεια της 2^{ης} λείανσης (γ).



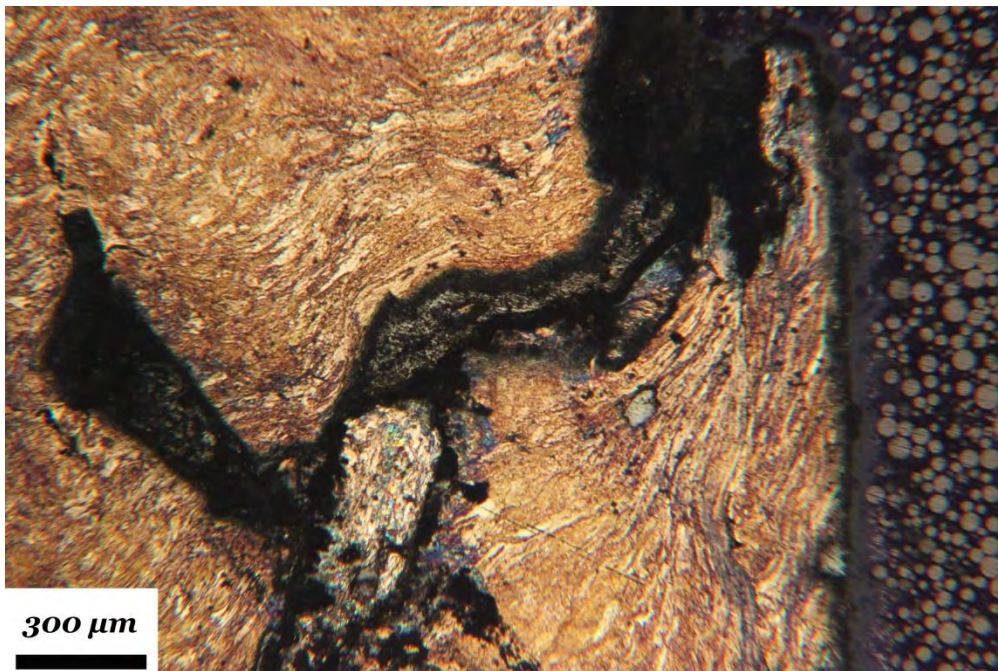
Εικόνα 5.2.6: Οι ρωγμές 16 (α) και 5 (β) εμφανίζονται ως μία (γ) σε μεγαλύτερο βάθος

Η ρωγμή 8 από την 1^η λείανση ταυτίστηκε με την ρωγμή 4 στην επιφάνεια μετά την 2^η λείανση. Η ρωγμή εμφανίζεται να έχει την ίδια μορφή, αλλά μικρότερο μήκος. Στην πρώτη περίπτωση το μέγεθος της ρωγμής μετρήθηκε 1.7 mm, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος αυτό μειώθηκε στα 0.9 mm. Η ρωγμή παρουσιάζεται στα δύο διαφορετικά βάθη στην **Εικόνα 5.2.7**.



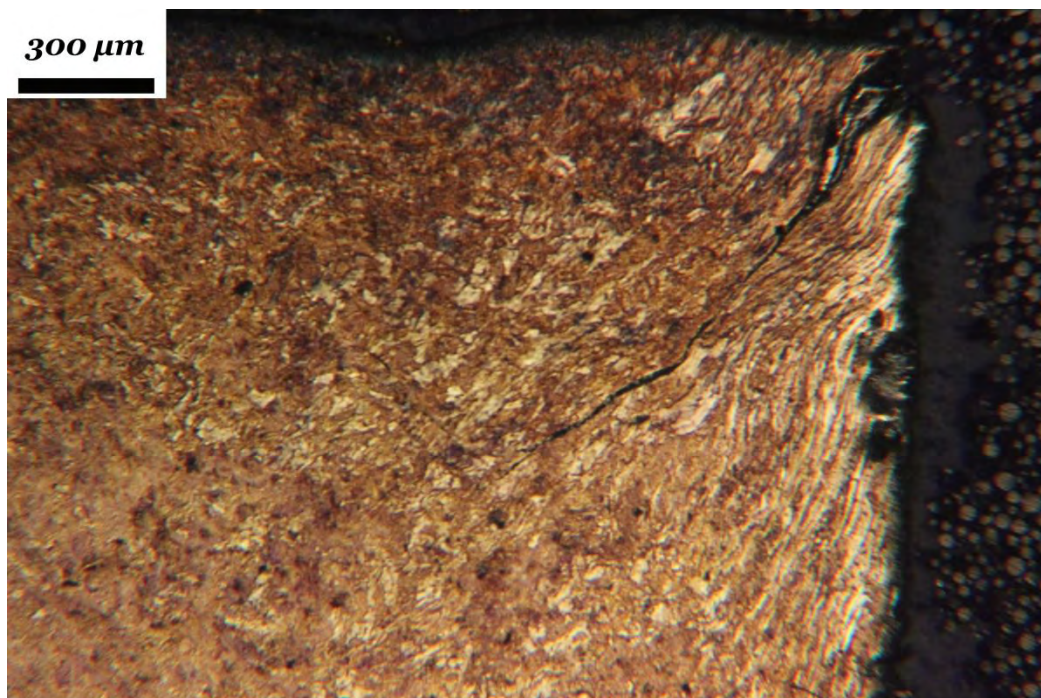
Εικόνα 5.2.7: Η ρωγμή 8 από την 1^η λείανση (α) ταυτίστηκε με την ρωγμή 4 (β) μετά την 2^η λείανση

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή κοντά στο gauge corner, που έχει υποστεί σημαντική αποφλοίωση. Στην **Εικόνα 5.2.8** είναι εμφανές το μέγεθος των σφαλμάτων που δημιουργεί η αποκόλληση μέρους του υλικού, με την μορφή κοιλοτήτων στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Ακόμα, στα σύνορα των κόκκων, βλέπουμε με λευκό χρώμα την παρουσία προετηκτοειδή φερρίτη. Λόγω των υψηλών πλαστικών παραμορφώσεων που δέχεται η περιοχή, η μαλακή φάση του φερρίτη, χάρη στην ικανότητά της να ρέει πλαστικά, έχει υποστεί σημαντικά ποσοστά παραμόρφωσης.



Εικόνα 5.2.8: Εικόνα της αποφλοιώσης στην περιοχή του gauge corner

Η πλαστική αυτή παραμόρφωση στην μικροδομή του υλικού, αποτελεί πολλές φορές σημείο έναρξης επιφανειακών σφαλμάτων, όπως οι ρωγμές στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της ρωγμής 15 από την επιφάνεια μετά την 2^η λείανση, και παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.2.9**. Η ρωγμή φαίνεται να ξεκινάει από το σημείο όπου οι κόκκοι έχουν παραμορφωθεί σημαντικά, και να αναπτύσσεται στα σύνορα των κόκκων όπου εμφανίζεται ο προευτηκτοειδής φερρίτης.

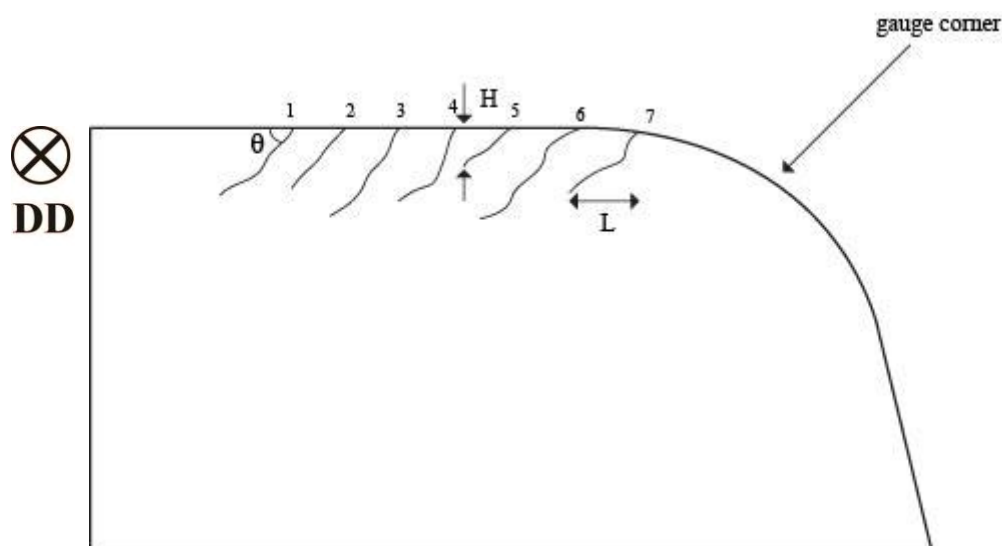


Εικόνα 5.2.9: Η ρωγμή 15 ξεκινάει από σημείο της σιδηροτροχιάς που έχει υποστεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση

Τέλος πραγματοποιήθηκε και 3^η λείανση στην επιφάνεια του δοκιμίου, κατά το οποίο η επιφάνεια κατέβηκε κατά 800 μm ακόμα, και σε συνολικό βάθος 1400 μm από την αρχική επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Η επιφάνεια που αποκαλύφθηκε κάτω από το οπτικό μικροσκόπιο, ήταν καθαρή από επιφανειακές ρωγμές. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από τον έλεγχο της εγκάρσιας τομής του δοκιμίου, όπου η πιο βαθιά ρωγμή βρέθηκε να φτάνει στα 997 μm βάθος. Αρκετά επιφανειακά σφάλματα εμφανίστηκαν μόνο στην περιοχή του gauge corner, τα οποία οφείλονταν στην αποφλοίωση και αποτελούν διαφορετική κατηγορία σφαλμάτων από αυτή των ρωγμών. Έτσι μπορεί να βγει ένα πρώτο συμπέρασμα για το μέγιστο βάθος στο οποίο φτάνουν οι επιφανειακές ρωγμές, δεν ξεπερνάει τα 1400 μm .

5.2.3. Εγκάρσια τομή δοκιμίου B

Στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου B εντοπίστηκαν εφτά ρωγμές (Σχήμα 5.2.4), οι οποίες ξεκινάνε από την επιφάνεια της ράγας και αναπτύσσονται σε μέσο βάθος $H=550 \mu\text{m}$, με μέση αρχική γωνία $\theta=23,5^\circ$, καθώς απομακρύνονται από το gauge corner. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών μετρήθηκαν όπως και στο δοκίμιο A, με σκοπό την συσχέτιση αυτών με τα αποτελέσματα του ελέγχου με τον μαγνητοοπτικό αισθητήρα. Στον Πίνακα 5.2.2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς ακολουθούν και φωτογραφίες των ρωγμών από το οπτικό μικροσκόπιο.

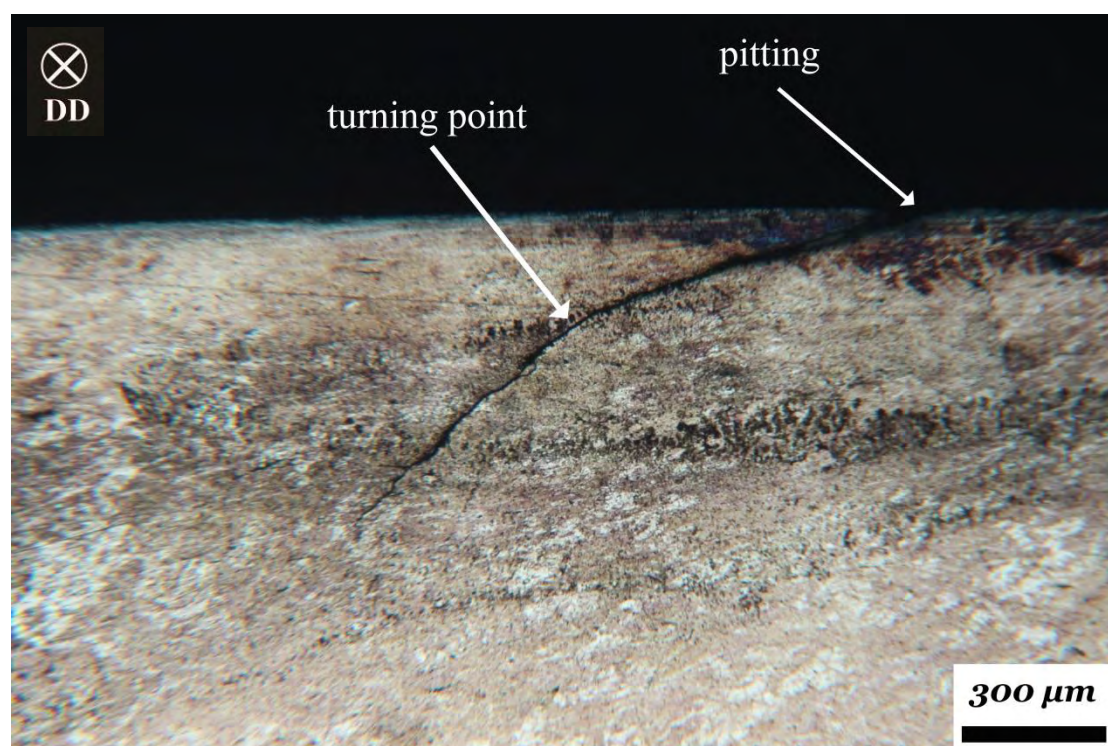


Σχήμα 5.2.4: Σχηματική αναπαράσταση των ρωγμών που εντοπίστηκαν κατά την μελέτη της εγκάρσιας τομής του δοκιμίου B και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν

Πίνακας 5.2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών που εμφανίστηκαν στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου Β

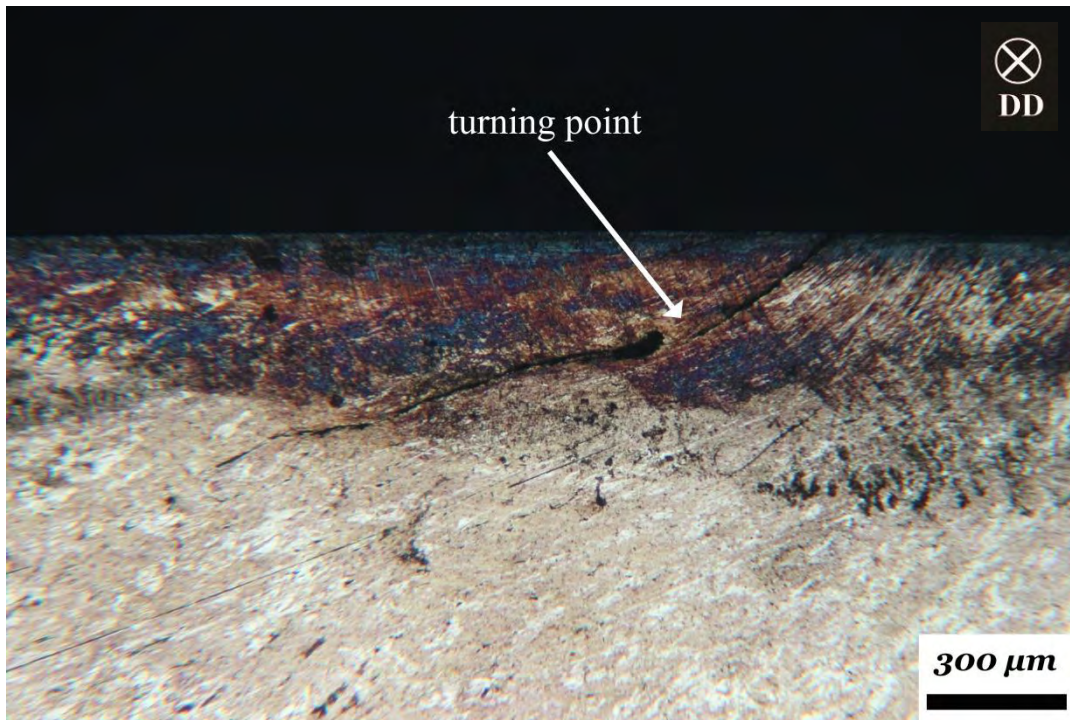
| α/α Ρωγμής | L [μm] Μήκος | H [μm] Βάθος | θ [$^\circ$] Γωνία |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 1334 | 619 | 16 |
| 2 | 1452 | 489 | 36 |
| 3 | 1065 | 632 | 34 |
| 4 | 874 | 510 | 37 |
| 5 | 1304 | 545 | 18 |
| 6 | 1514 | 420 | 11 |
| 7 | 2499 | 638 | 13 |
| Μέσος Όρος | 1434 | 550 | 23,5 |
| Τυπική Απόκλιση | 746 | 169 | 10,4 |

Στην **Εικόνα 5.2.10** απεικονίζεται η ρωγμή 1, η οποία φαίνεται να ξεκινάει από σημείο της επιφάνειας που έχει εμφανίσει pitting. Χαρακτηριστικό είναι ότι ενώ η ρωγμή εξελίσσεται αρχικά με γωνία 16° ως προς την επιφάνεια, σε βάθος $230 \mu\text{m}$ δείχνει να στρίβει προς την βάση της ράγας με γωνία 37° . Το συνολικό μήκος της ρωγμής μετρήθηκε $1334 \mu\text{m}$.



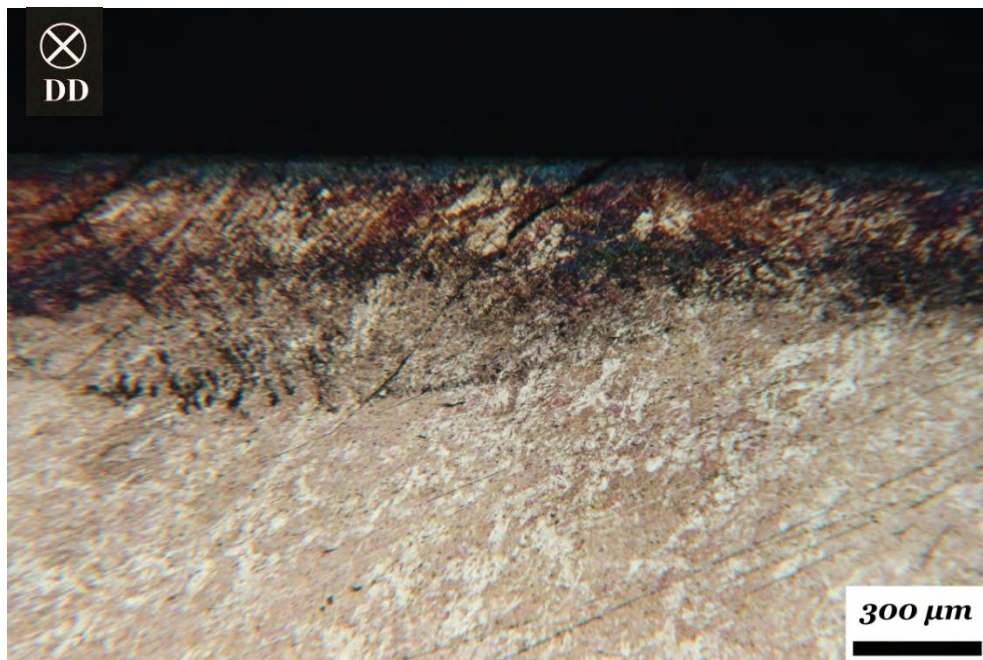
Εικόνα 5.2.10: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 1. Φαίνεται το σημείο εκκίνησης της ρωγμής και το σημείο όπου η γωνία εξέλιξης αλλάζει σε βάθος $230 \mu\text{m}$

Στην περίπτωση της ρωγμής 2 (**Εικόνα 5.2.11**) έχουμε και πάλι «στροφή» της ρωγμής και αλλαγή στην κλίση ανάπτυξης κάτω από την επιφάνεια της ράγας. Αυτή τη φορά η ρωγμή ξεκινάει να αναπτύσσεται με γωνία 36° από την επιφάνεια, αλλά σε βάθος $240 \mu\text{m}$ η γωνία φτάνει τις 13° και η ρωγμή συνεχίζει σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια.

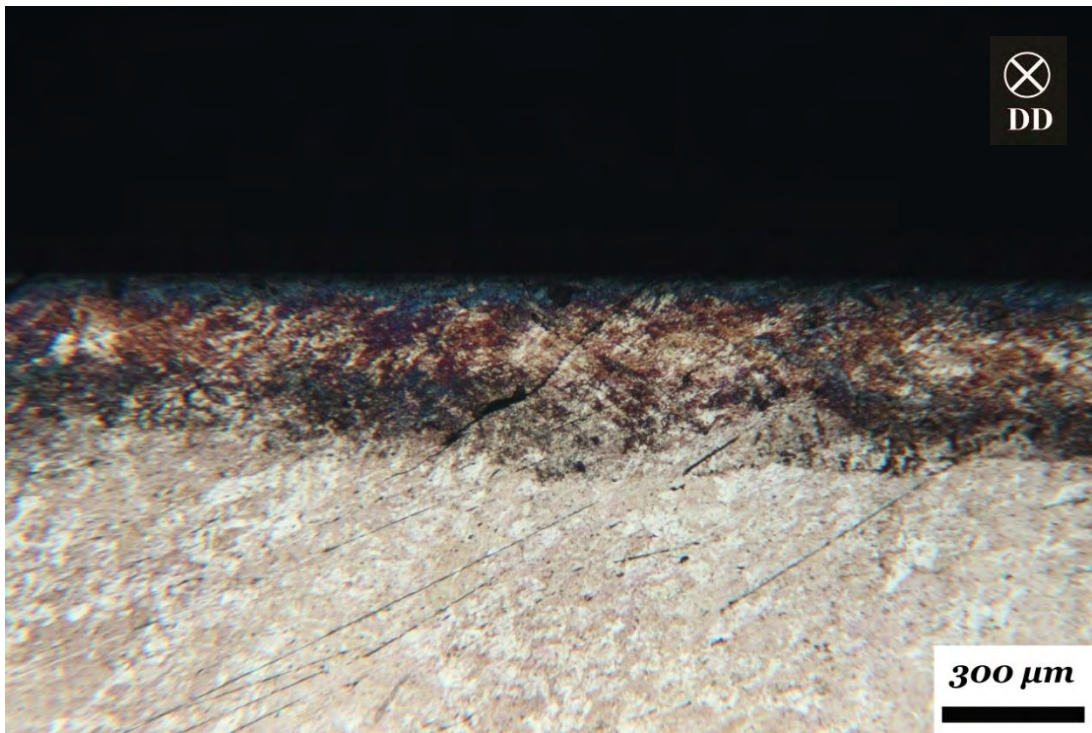


Εικόνα 5.2.11: Η ρωγμή 2 στην εγκάρσια τομή και το σημείο που αυτή αλλάζει κλίση ως προς την επιφάνεια

Ακολουθούν οι φωτογραφίες των ρωγμών 3 και 4, οι οποίες αναπτύσσονται με απότομη κλίση ως προς την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς κοντά στις 35° και σε βάθος πάνω από 500 μm .

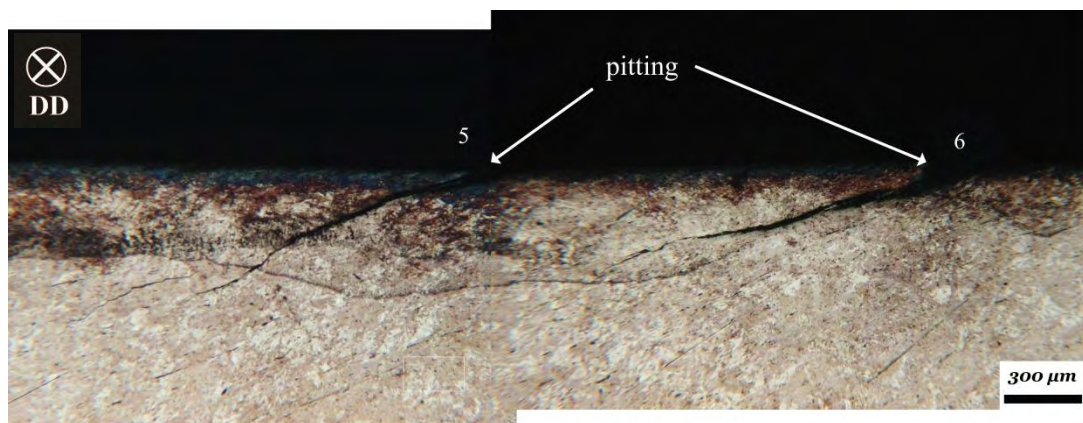


Εικόνα 5.2.12: Η ρωγμή 3 στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου



Εικόνα 5.2.13: Η ρωγμή 4 στην εγκάρσια τομή του δοκιμίου

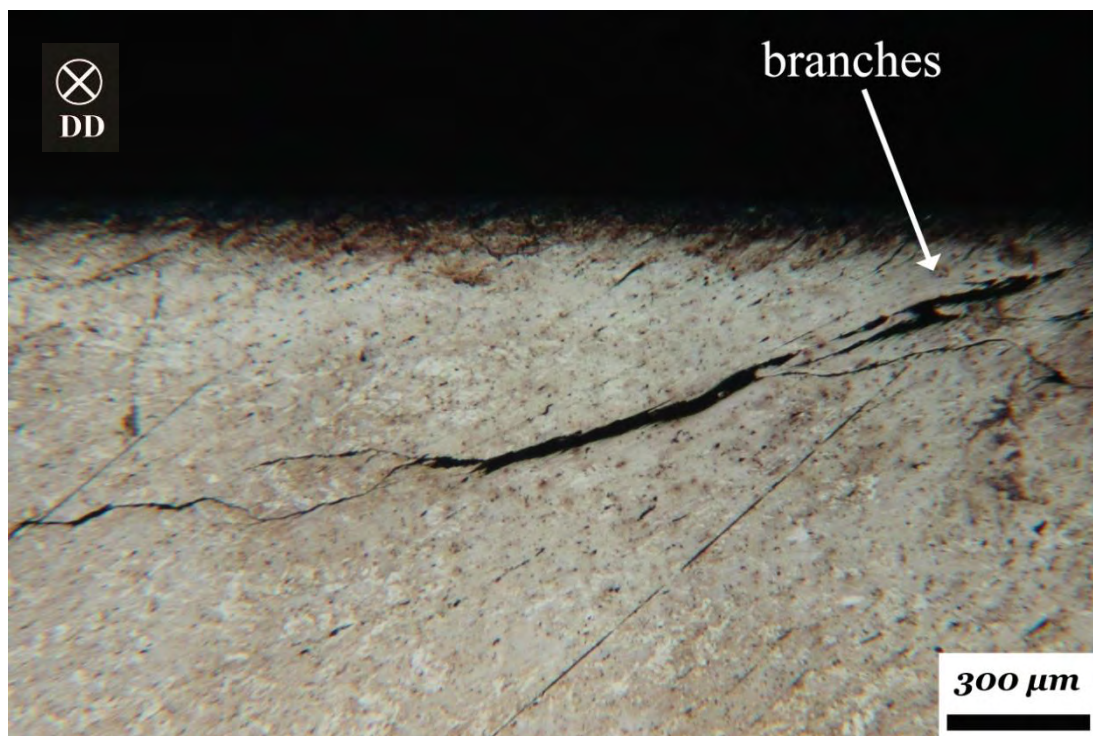
Στην συνέχεια, στην **Εικόνα 5.2.14**, βλέπουμε τις ρωγμές 5 και 6. Οι δύο ρωγμές αυτές φαίνεται επίσης να ξεκινούν από κάποιας μορφής pitting στην επιφάνεια. Στην συνέχεια εξελίσσονται με πολύ μικρή γωνία, σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια σε βάθος 450-500 μm. Έτσι υπάρχει η πιθανότητα στροφής κάποιας από τις ρωγμές προς την επιφάνεια δημιουργώντας αποφλοιώση.



Εικόνα 5.2.14: Οι ρωγμές 5 (αριστερά) και 6 (δεξιά) εξελίσσονται σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια το δοκιμίου

Η ρωγμή 7 είναι η πιο κοντινή στο gauge corner, άρα και στην περιοχή που έχει υποστεί εκτεταμένη αποφλοιώση. Παρατηρώντας την ρωγμή στην εγκάρσια τομή της (**Εικόνα 5.2.15**), βλέπουμε πως δημιουργείται ένα υποεπιφανειακό δίκτυο δευτερευουσών ρωγμών, οι οποίες ξεκινούν από την βασική ρωγμή και αναπτύσσονται με τη μορφή

κλαδιών (branches), με κατεύθυνση προς την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Αυτό το δευτερεύων δίκτυο είναι η αιτία για την επερχόμενη αποφλοιώση που παρατηρείται κοντά στο gauge corner.



Εικόνα 5.2.15: Εγκάρσια τομή της ρωγμής 7 και το υποεπιφανιακό δίκτυο δευτερευουσών ρωγμών

Τέλος παρουσιάζεται και η εγκάρσια τομή της περιοχής του gauge corner όπου έχει δημιουργηθεί η αποφλοιώση. Στην **Εικόνα 5.2.16** είναι εμφανές το πώς δημιουργούνται οι αποφλοιώσεις από τις δευτερεύουσες ρωγμές με κατεύθυνση προς την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, όπως ακριβώς συμβαίνει στην ρωγμή 7. Ακόμη διακρίνεται ένα κομμάτι της επιφάνειας έτοιμο να αποκολληθεί από αυτήν δείγμα της έντασης του φαινομένου στην επιφάνεια του gauge corner.



Εικόνα 5.2.16: Εικόνα της αποφλοίωσης στην περιοχή του gauge corner

5.2.4. Επιφάνεια δοκιμίου B

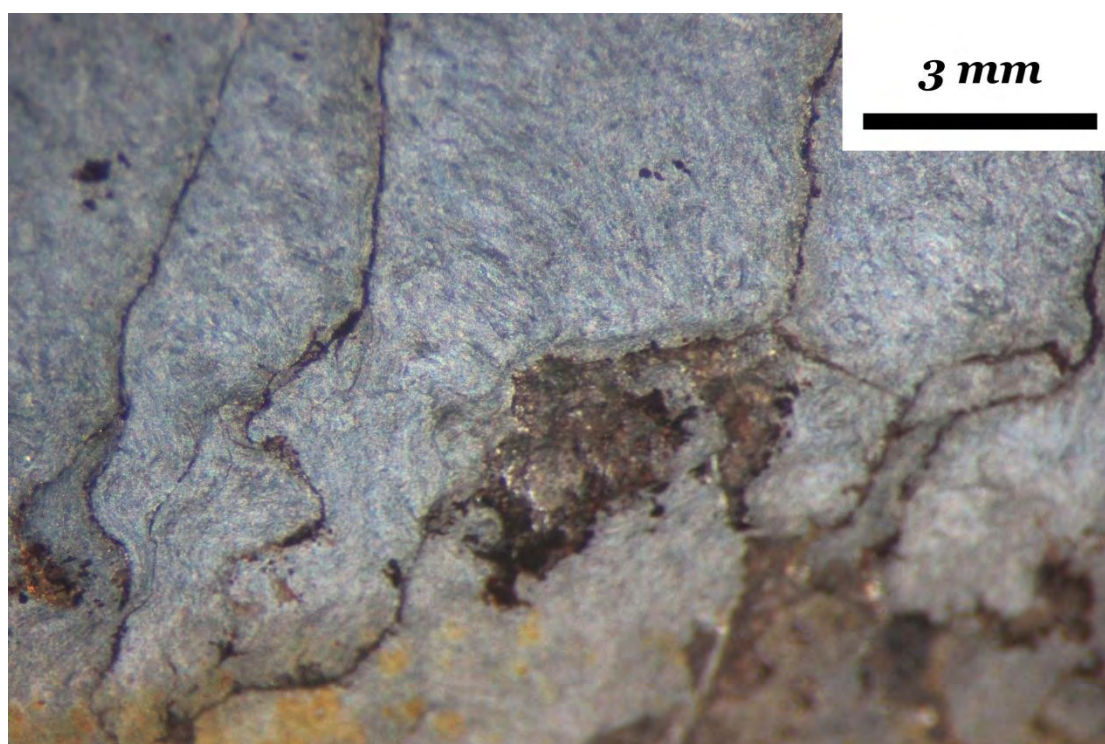
Μεταλλογραφική ανάλυση πραγματοποιήθηκε και στην επιφάνεια του δοκιμίου B, κατά την οποία αποκαλύφθηκε ένα πυκνό δίκτυο παράλληλων μεταξύ τους επιφανειακών ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές ανήκουν στην ομάδα σφαλμάτων τύπου shelling, που καλύφθηκε στην παράγραφο 1.3.

Έμφαση δόθηκε στις ρωγμές που ξεκινούν από την επιφάνεια της εγκάρσιας τομής, και μελετήθηκαν προηγουμένως. Οι επτά αυτές ρωγμές αναγνωρίστηκαν κάτω από το στερεοσκόπιο και αριθμήθηκαν, με την ίδια σειρά, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.2.18**. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αυτή τη φορά μόνο το μήκος L και η γωνία θ , μετρήθηκαν και πάλι με την βοήθεια του προγράμματος Image J και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.2.3**.

Οι ρωγμές έχουν μέσο μήκος 6200 μm και μέση γωνία εξέλιξης σε σχέση με την εγκάρσια διεύθυνση 43 $^{\circ}$, ακριβώς όπως περιμέναμε από την θεωρία του shelling. Στην εικόνα διακρίνονται τα pits από τα οποία ξεκινάνε οι ρωγμές 1 και 5, καθώς και μέρος της αποφλοίωσης στην περιοχή του gauge corner. Η αποφλοίωση από την πλευρά της επιφάνειας φαίνεται πιο καθαρά στην **Εικόνα 5.2.17**.

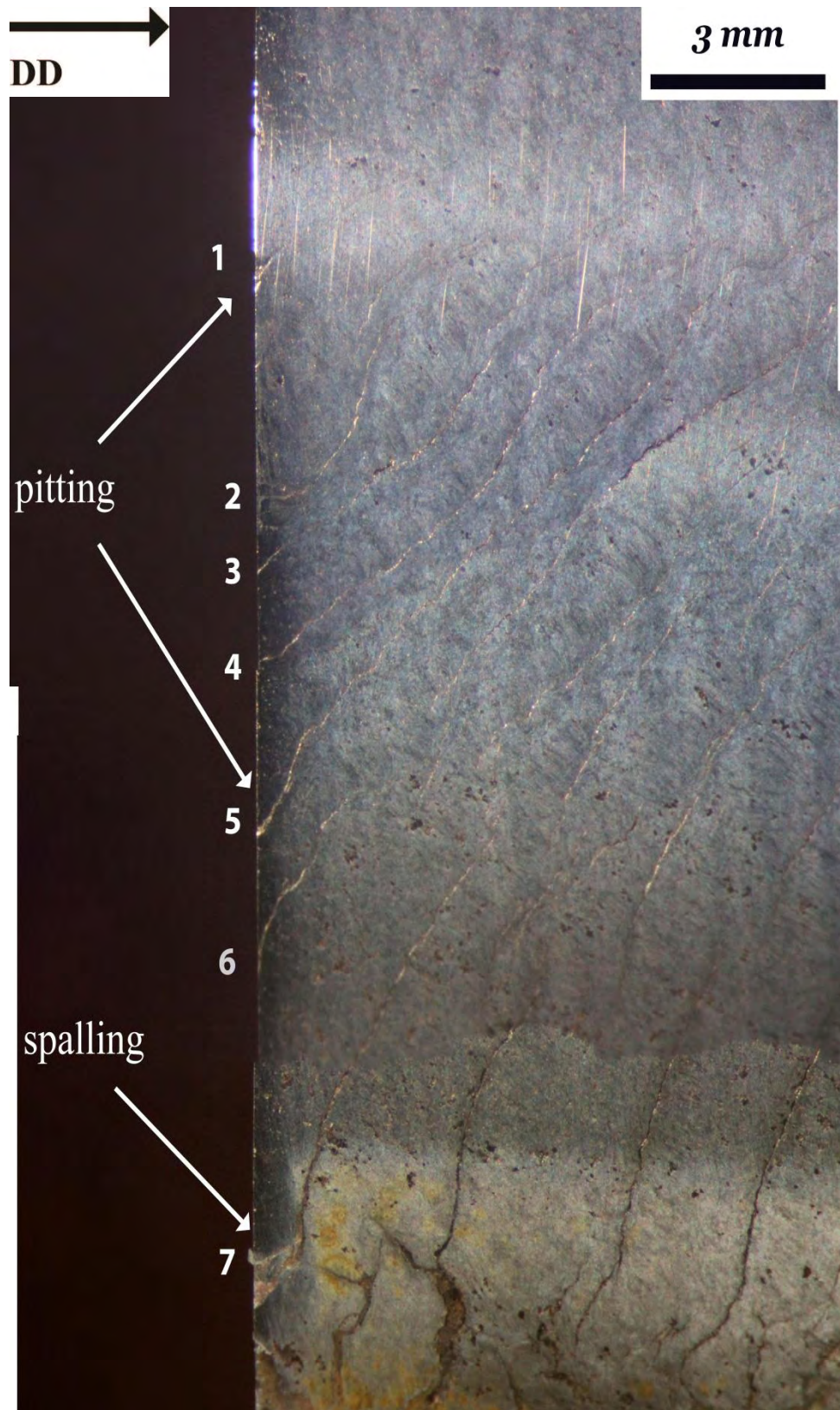
Πίνακας 5.2.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου Β

| α/α Ρωγμής | L [μm] Μήκος | θ [$^\circ$] Γωνία |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 4177 | 45 |
| 2 | 4360 | 65 |
| 3 | 5578 | 50 |
| 4 | 8607 | 48 |
| 5 | 7682 | 38 |
| 6 | 4863 | 19 |
| 7 | 8126 | 41 |
| Μέσος Όρος | 6199 | 43 |
| Τυπική Απόκλιση | 2484 | 11,4 |



Εικόνα 5.2.17: Η αποφλοίωση στην επιφάνεια του gauge corner

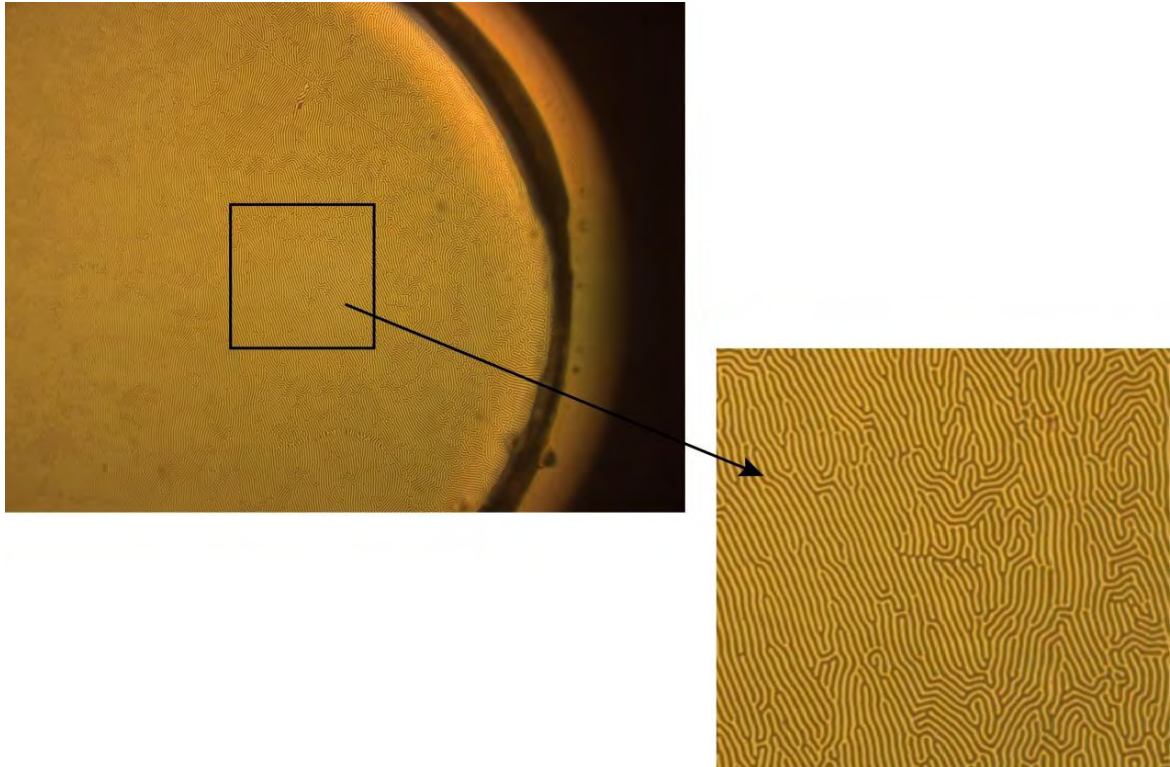
Τα αποτελέσματα της μεταλλογραφικής ανάλυσης μας έδωσαν μία ολοκληρωμένη εικόνα για τις ρωγμές και το δίκτυο το οποίο σχηματίζουν, τόσο επιφανειακά όσο και κάτω από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την μέθοδο ανίχνευσης με την χρήση του μαγνητοοπτικού φαινομένου.



Εικόνα 5.2.18: Η επιφάνεια του δοκιμίου κάτω από το στερεοσκόπιο. Οι ρωγμές 1 έως 7 αντιστοιχούν στις ρωγμές που παρατηρήθηκαν στην εγκάρσια τομή

5.3. Ανίχνευση ρωγμών με την χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα

Αρχικά ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε μία «καθαρή» περιοχή του δοκιμίου B, χωρίς ρωγμές (άρα και χωρίς διαφεύγον μαγνητικό πεδίο), ώστε να προσδιοριστεί η εικόνα του αισθητήρα όταν δεν επηρεάζεται από κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (**Εικόνα 5.3.1**). Μεγεθύνοντας σε μία περιοχή της εικόνας μπορούμε να διακρίνουμε την δομή «λαβύρινθου» που σχηματίζουν οι μικροπεριοχές ομόρροπης μαγνήτισης που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.3.



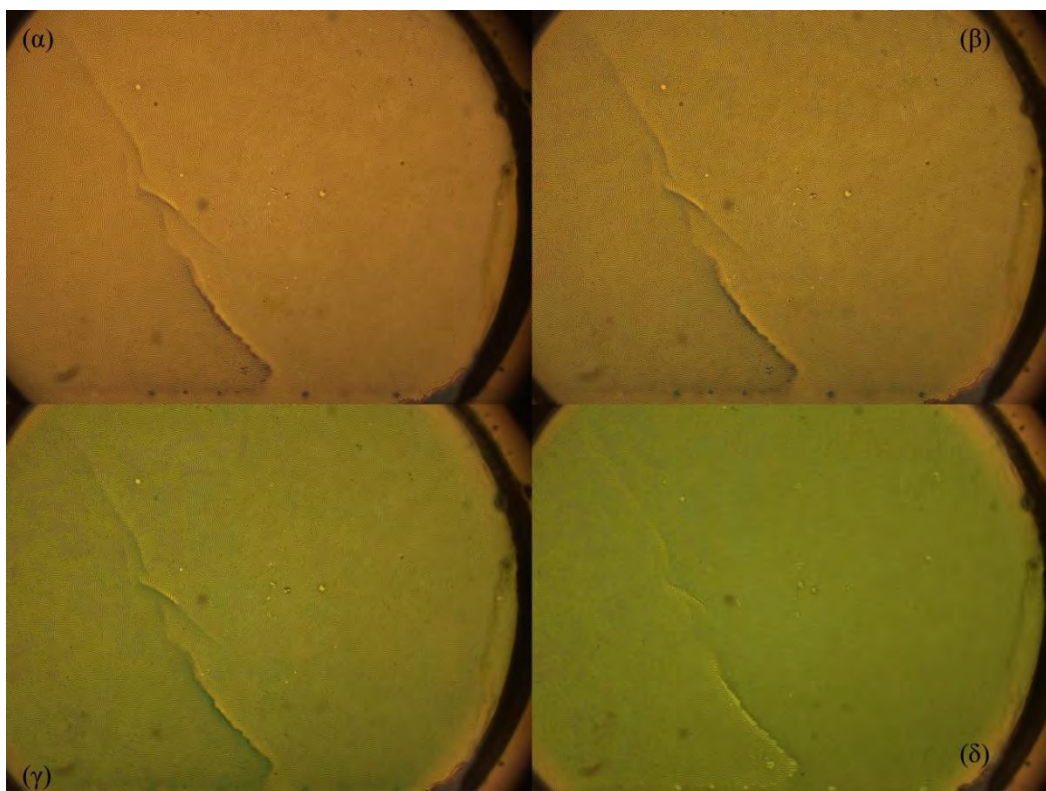
Εικόνα 5.3.1: Εικόνα από τον αισθητήρα κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (αριστερά), και η μεγέθυνση μιας περιοχής ώστε να διακρίνεται η δομή «λαβύρινθου» (δεξιά)

Στη συνέχεια παρατηρήθηκε η μαγνητοοπτική αντίθεση που δημιουργεί μία ρωγμή στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στην **Εικόνα 5.3.2** είναι φανερές οι περιοχές εναλλασσόμενης μαγνήτισης, αλλά και το πώς διατηρείται η συνισταμένη κάθετη μαγνητική επαγωγή μηδέν με την κίνηση των μαγνητικών μικροπεριοχών του αισθητήρα.



Εικόνα 5.3.2: Εικόνα μαγνητοοπτικής αντίθεσης περιοχής της σιδηροτροχιάς με ρωγμή. Φαίνεται το πώς αλλάζει η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο σημείο της ρωγμής.

Για να επιλεγεί η κατάλληλη γωνία που θα ορίζαμε μεταξύ πολωτή και αναλυτή ώστε να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή αντίθεση κοντά στις ρωγμές, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε πάνω σε μία ρωγμή, και τραβήχτηκαν ενδεικτικές φωτογραφίες για γωνίες 75° , 80° , 85° και 90° (**Εικόνα 5.3.3**). Η γωνία που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν τελικά οι 80° , η οποία και επιλέχθηκε για την συνέχεια του πειράματος.

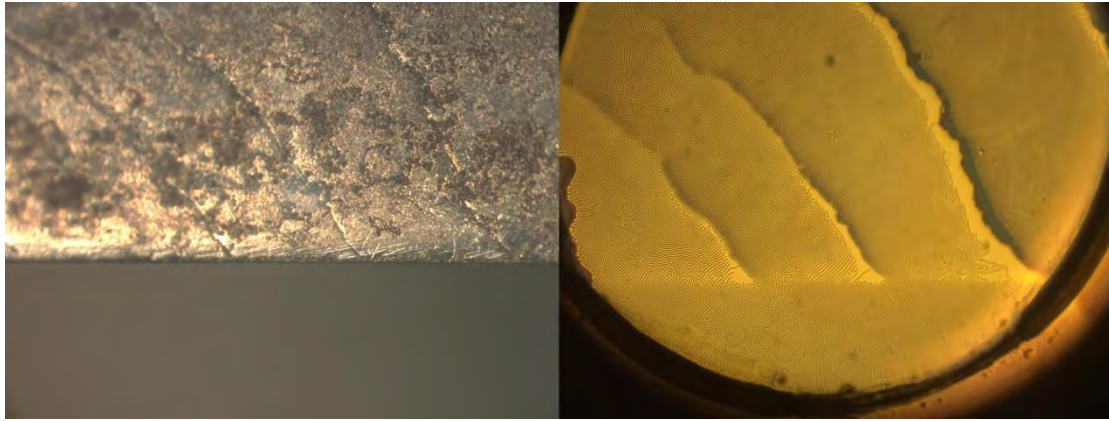


Εικόνα 5.3.3: Μαγνητοοπτική αντίθεση ρωγμής για γωνίες πολωτή προς αναλυτή (α) 75°, (β) 80°, (γ) 85°, (δ) 90°

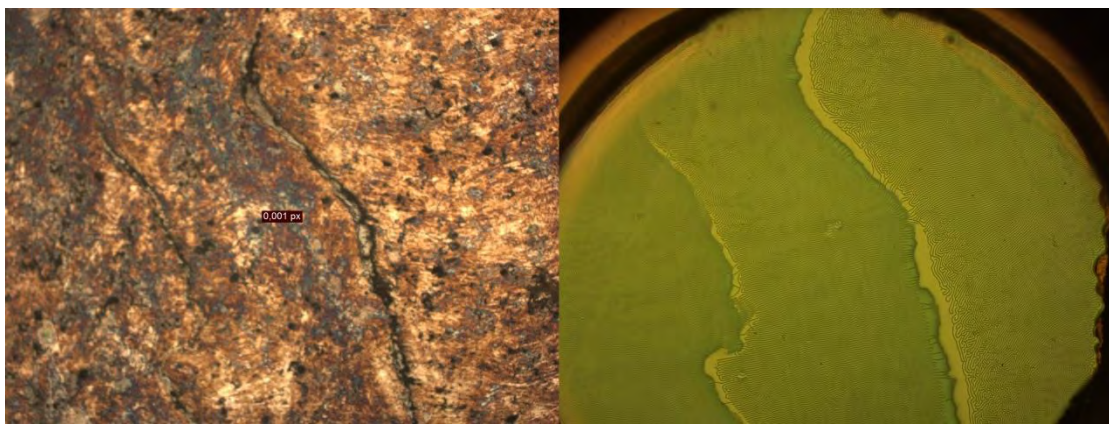
Με την γωνία πολωτή προς αναλυτή ορισμένη στις 80°, έγινε προσπάθεια ανίχνευσης και αποτύπωσης των ρωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις το αποτέλεσμα ήταν άκρως ικανοποιητικό, καθώς η αντίθεση που δημιουργούταν λόγω της ρωγμής στο μαγνητικό πεδίο του αισθητήρα, ήταν αρκετή ώστε να αναγνωρίσουμε το σφάλμα στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Η μαγνητοοπτική αντίθεση που δημιουργήθηκε συμφωνούσε με την αντίστοιχη εικόνα που λήφθηκε από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς να παρεμβάλλεται ο αισθητήρας. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες από τα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.3.4: Ρωγμή στην επιφάνεια του δοκιμίου. Εικόνα από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς την παρεμβολή του αισθητήρα (αριστερά) και με την παρεμβολή (δεξιά)

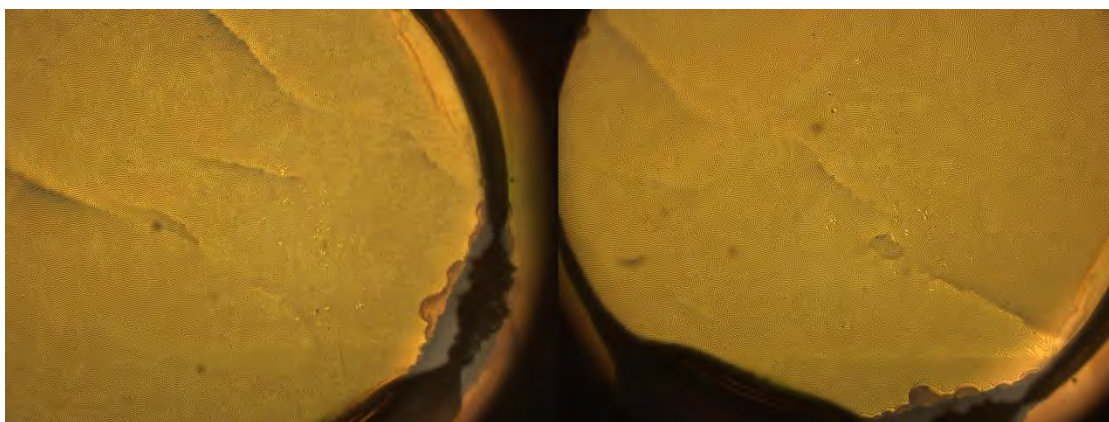


Εικόνα 5.3.5: Σύμπλεγμα τριών διαφορετικών ρωγμών στην επιφάνεια του δοκιμίου. Εικόνα από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς την παρεμβολή του αισθητήρα (αριστερά) και με την παρεμβολή (δεξιά)



Εικόνα 5.3.6: Ρωγμές στην επιφάνεια του δοκιμίου. Εικόνα από το πολωτικό μικροσκόπιο χωρίς την παρεμβολή του αισθητήρα (αριστερά) και η μαγνητοοπτική αντίθεση με την γωνία πολωτή προς αναλυτή στις 90° (δεξιά)

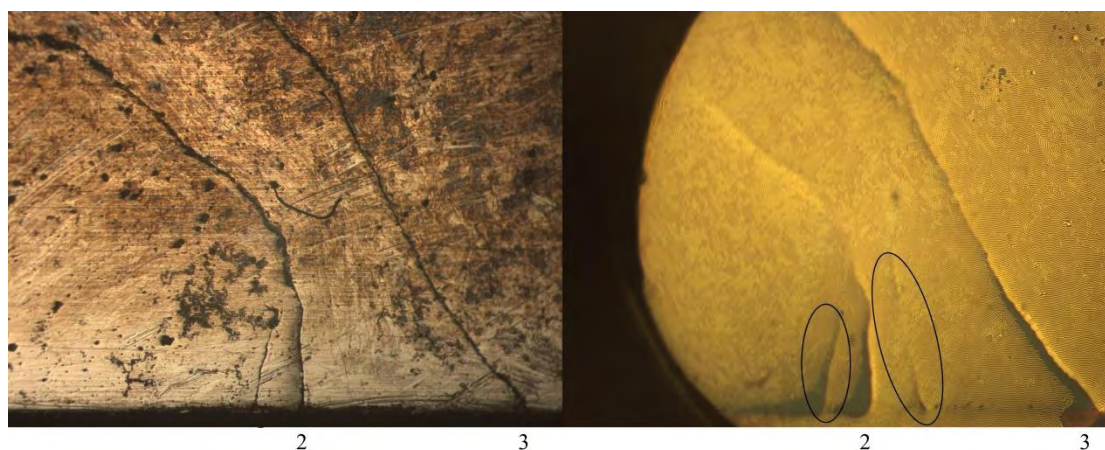
Υπήρξαν και περιπτώσεις, όπως οι ρωγμές 5 και 6, όπου η αντίθεση δεν ήταν αρκετά εμφανής. Οι ρωγμές φαίνονται (**Εικόνα 5.3.7**) να εμφανίζονται ανεπαίσθητα στην επιφάνεια του αισθητήρα, σε αντίθεση με αυτές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 5.3.7: Οι ρωγμές 5 (αριστερά) και 6 (δεξιά) όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην επιφάνεια του αισθητήρα. Η μαγνητοοπτική αντίθεση παρουσιάζεται ασθενής

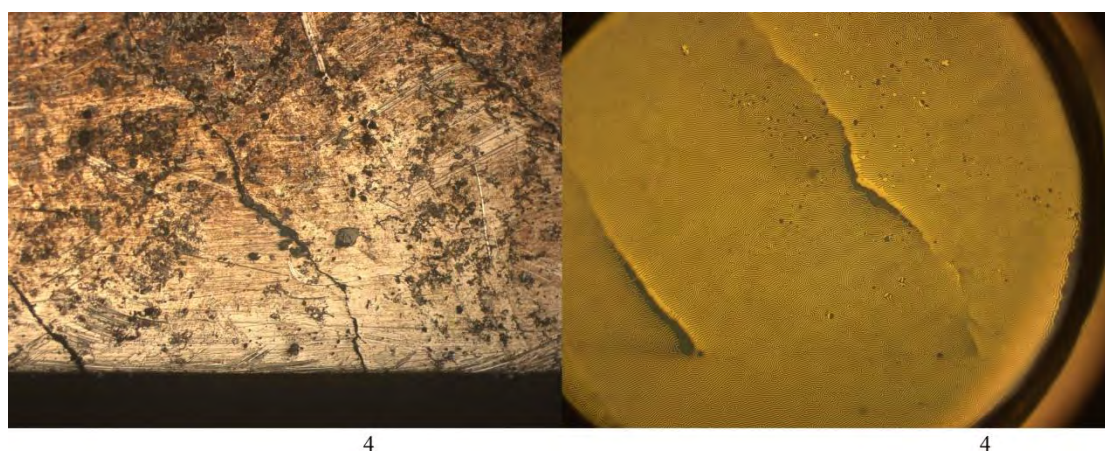
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποτύπωση της μαγνητοοπτικής αντίθεσης των ρωγμών που μελετήθηκαν κατά την μεταλλογραφική ανάλυση, και των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι γνωστά, ώστε να βγει ένα πρώτο συμπέρασμα για τις δυνατότητες της μεθόδου.

Οι ρωγμές που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μαγνητοοπτική αντίθεση φαίνεται να είναι οι ρωγμές 2, 3 και 4. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της μεταλλογραφικής ανάλυσης, παρατηρούμε ότι το γεωμετρικό χαρακτηριστικό που χαρακτηρίζει τις ρωγμές αυτές είναι η μεγάλη γωνία εξέλιξης, περίπου στις 35° . Από την άλλη, οι ρωγμές που εμφάνισαν ασθενή μαγνητοοπτική αντίθεση, όπως οι ρωγμές 5 και 6, εξελίσσονται με γωνία κάτω από τις 20° σε σχέση με την επιφάνεια. Μία συσχέτιση μεταξύ της γωνίας εξέλιξης της ρωγμής και της έντασης εμφάνισης του φαινομένου δείχνει να υπάρχει.



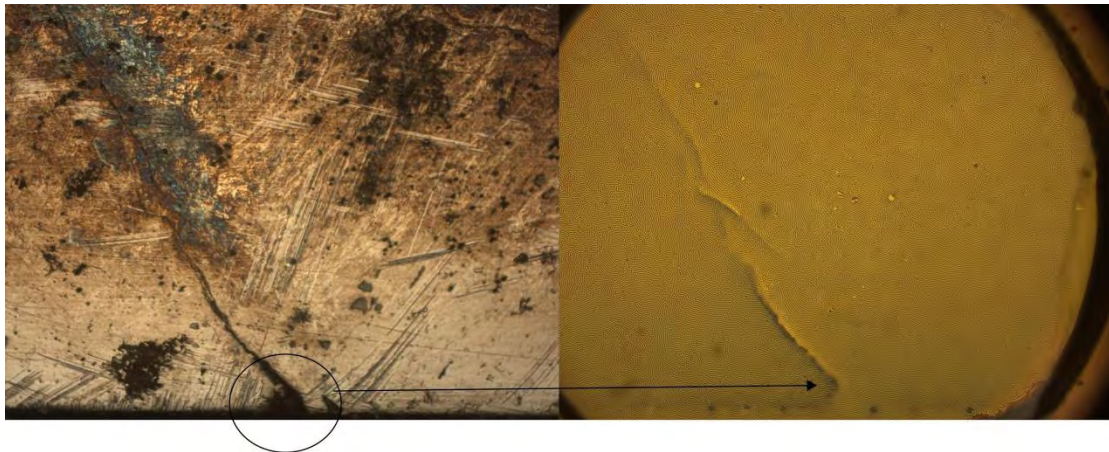
Εικόνα 5.3.8: Οι ρωγμές 2 και 3 χωρίς την παρεμβολή αισθητήρα (αριστερά) και μετά την παρεμβολή του αισθητήρα (δεξιά). Σε κύκλο οι δύο μικρές ρωγμές που παρατηρήθηκαν στην εικόνα μαγνητοοπτικής αντίθεσης

Ακόμα, η αποτύπωση των ρωγμών 2 και 3 με τον μαγνητοοπτικό αισθητήρα αποκάλυψε και κάποια επιπλέον σφάλματα μικρής έκτασης, τα οποία δεν ανιχνεύτηκαν κατά την μεταλλογραφική ανάλυση της εγκάρσιας τομής. Τα σφάλματα αυτά φαίνονται σε κύκλο στην **Εικόνα 5.3.8**, και δείχνουν να είναι κάποιες μικρές και αρκετά στενές ρωγμές στην επιφάνεια του δοκιμίου.



Εικόνα 5.3.9: Η ρωγμή 4 (αριστερά) και η μαγνητοοπτική αντίθεση αυτής (δεξιά)

Ο αισθητήρας παρουσίασε μία αδυναμία στην ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων με μεγαλύτερο πλάτος άλλα και μικρότερο βάθος από αυτό των ρωγμών όπως τις μικροσκοπικές κοιλότητες που προκύπτουν από το φαινόμενο pitting. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μαγνητοοπτική αντίθεση της ρωγμής 1 που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.3.10**. Η ρωγμή 1 στην οπτική εικόνα που τραβήχτηκε από το πολωτικό μικροσκόπιο, φαίνεται να ξεκινάει από μία τέτοια κοιλότητα, όπως αναφέρθηκε και κατά την μεταλλογραφική ανάλυση, όμως κάτι τέτοιο δεν είναι ξεκάθαρο στην εικόνα της μαγνητοοπτικής αντίθεσης.



Εικόνα 5.3.10: Η ρωγμή 1 (αριστερά) και η μαγνητοοπτική αντίθεση με την παρεμβολή του αισθητήρα (δεξιά). Σε κύκλο το σημείο από το οποίο ξεκινάει η ρωγμή

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καθώς η εμφάνιση και ανάπτυξη των σφαλμάτων λόγω κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση αποκτούν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη αστοχιών στα σιδηροδρομικά δίκτυα, η κατανόηση της έναρξης και εξέλιξης του φαινομένου, αλλά και ο προσδιορισμός τους κάτω από την επιφάνεια είναι ύψιστης σημασίας. Παρόλο που οι περισσότερες ρωγμές εμφανίζονται στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, η πορεία τους και η τρισδιάστατη γεωμετρία τους κάτω από την επιφάνεια του υλικού, είναι που καθορίζει τον βαθμό επικινδυνότητάς τους.

Σκοπός της εργασίας ήταν να προσδιοριστεί η γεωμετρία των σφαλμάτων κάτω από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και να διερευνηθεί το κατά πόσο η μη καταστρεπτική μέθοδος που βασίζεται στο μαγνητοοπτικό φαινόμενο, θα έδινε αντίστοιχα αποτελέσματα.

Η μεταλλογραφική ανάλυση έγινε σε δύο διαφορετικά δοκίμια μιας σιδηροτροχιάς του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. Η παρατήρηση της περιοχής γύρω από την ρωγμή, βοήθησε στην κατανόηση των μηχανισμών έναρξης και εξέλιξης των ρωγμών. Βρέθηκε ότι σημαντική πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται στην περιοχή γύρω από την επιφάνεια της ρωγμής, αλλά δεν την ακολουθεί σε όλο της το μήκος όσο αυτή αναπτύσσεται. Η εγκάρσια τομή των ρωγμών κοντά στην περιοχή του gauge corner, έδειξε πως αυτές διακλαδίζονται σε ένα δευτερεύων δίκτυο υποεπιφανειακών ρωγμών με την μορφή κλαδιών (branches). Αυτές οι ρωγμές είναι η αιτία εμφάνισης της εκτεταμένης αποφλοίωσης στην περιοχή αυτή.

Τα αποτελέσματα όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών, συμφωνούν ανάμεσα στα δύο δοκίμια. Έτσι καθίσταται δυνατή η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή ενός γενικού συμπεράσματος για αυτά. Πιο συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις στην εγκάρσια τομή των δύο δοκιμίων συμπεραίνουμε ότι οι ρωγμές ξεκινούν από την επιφάνεια και κατευθύνονται προς το εσωτερικό της ράγας με μέση γωνία 22° , και το μήκος τους κυμαίνεται στα 1000-1400 μm . Το μέσο βάθος στο οποίο φτάνουν οι ρωγμές είναι 500 μm , ενώ η πιο βαθιά από αυτές μετρήθηκε στα 997 μm . Κάποιες από τις ρωγμές που μελετήθηκαν, φάνηκαν σε βάθος κοντά στα 200 μm να στρίβουν και να αλλάζουν την γωνία με την οποία εξελίσσονται. Κάποιες κατευθύνθηκαν παράλληλα με την επιφάνεια, ενώ υπήρξαν και αυτές οι οποίες στράφηκαν με γωνία κοντά στις 40° προς την βάση της ράγας, γεγονός που τις καθιστά επικίνδυνες να προκαλέσουν την ολική θραύση της σιδηροτροχιάς. Είναι η πρώτη φορά που παρατηρείται αυτή η συμπεριφορά, και θα έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί σε σχέση με τους υπολογισμούς από την ομάδα του κυρίου Γιαννακόπουλου από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας [27].

Επιφανειακά τα δοκίμια παρουσίασαν ένα δίκτυο πυκνών και παράλληλων μεταξύ τους ρωγμών, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία σφαλμάτων του shelling. Από τις σταδιακές τομές που έγιναν στην επιφάνεια φάνηκε πως καθώς το βάθος αυξάνεται το αποτύπωμα των ρωγμών μικραίνει. Οι περισσότερες από αυτές τις ρωγμές διαδίδονται μέχρι τα 600 μm σε βάθος, ενώ στα 1400 μm βάθος από την επιφάνεια είχαν εκλείψει όλες. Μορφολογικά οι ρωγμές έδειξαν περίπλοκη μορφή στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς με διακλαδώσεις και ενώσεις σε μεγαλύτερα βάθη. Έντονο

παρουσιάστηκε στην επιφάνεια το φαινόμενο της αποφλοιώσης, και ιδιαίτερα στην περιοχή του gauge corner, φαινόμενο που αποτέλεσε και σημείο έναρξης αρκετών από τις ρωγμές.

Η μέθοδος ανίχνευσης των ρωγμών με την χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα που εφαρμόστηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου B, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τον μη καταστρεπτικό έλεγχο. Η μαγνητοοπτική αντίθεση αντιστοιχεί πλήρως με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών στην επιφάνεια, μένει όμως να προσδιοριστεί και η υποεπιφανειακή τους εξέλιξη. Η ένταση της αντίθεσης που δημιουργήσαν οι ρωγμές φάνηκε να σχετίζεται με την γωνία ανάπτυξης της ρωγμής ως προς την επιφάνεια, και πιο συγκεκριμένα στις μεγαλύτερες γωνίες το φαινόμενο παρουσιάστηκε πιο έντονο. Η μέθοδος παρουσίασε μια αδυναμία στην ανίχνευση σφαλμάτων μεγαλύτερης έκτασης όπως οι αποφλοιώσεις ή κάποια pitting στην επιφάνεια. Συνολικά, κατάφερε να ανιχνεύσει τις ίδιες ρωγμές με αυτές που εντοπίστηκαν στην επιφάνεια και κατά την μεταλλογραφική ανάλυση.

Τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν για τον συσχετισμό της μαγνητοοπτικής αντίθεσης με τα υποεπιφανειακά χαρακτηριστικά του δικτύου των ρωγματώσεων. Έτσι η μέθοδος που αναπτύχθηκε, παρότι βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, με περαιτέρω έρευνα είναι ικανή σε συνδυασμό με άλλες μετρήσεις (προφίλ, κόπωση, φθορά της σιδηροτροχιάς) να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα μη καταστρεπτικού ελέγχου του φαινομένου RCF.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Grassie S.L. (2011), Squats and squat-type defects in rails: the understanding to date, *Journal of Rail Rapid Transit*, **226**, 235-242.
2. Ekberg A., Åkesson B. and Kabo E. (2014), Wheel/rail rolling contact fatigue – Probe, predict, prevent, *Wear*, **314**, 2-12.
3. Tournay H.M. and Mulder J.M. (1996), The transition from the wear to the stress regime, *Wear*, **191**, 107-112.
4. Johnson K.L. (1985), *Contacts Mechanics* Cambridge University, Press
5. Magel E. (2011), *Rolling Contact Fatigue - a comprehensive review*, U.S. Department of Transportation.
6. Haidemenopoulos G.N., Sarafoglou P.I., Christopoulos P. and Zervaki A.D. (2016), Rolling contact fatigue cracking in rails subjected to in-service loading, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **39**, 1161-1172.
7. Χριστόπουλος Π. (2013), Μεταλλουργική Διερεύνηση Κόπωσης εξ Επαφής σε Κύλιση (Rolling Contact Fatigue-RCF) σε Σιδηροτροχιές από το Δίκτυο του Μετρό Αθηνών, Διπλωματική εργασία.
8. Haidemenopoulos G.N., Zervaki A.D., Terezakis P., Tzanis J., Gianakopoulos A.E. and Kotouzas M.K. (2006), Investigation of rolling contact fatigue cracks in a grade 900A rail steel of a metro track, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* , **29**, 887-900..
9. Hyun-Kyu J., Dong-Hyung L. and Dae-Sang K. (2015), Calculation of minimum crack size for growth under rolling contact between wheel and rail, *Wear*, **344-345**, 46-57.
10. Zerbst U., Lunden R., Edel K.O. and Smith R.A. (2009), Introduction to the damage tolerance behavior of railway rails – a review, *Engineering Fracture Mechanics*, **76**, 2563-2601.
11. Fujie X., Colin C. and Peter W. (2008), The dynamic wheel-rail contact stresses for wagon on various tracks, *Wear*, **265**, 1549-1555.
12. Profilidis V.A. (2000), *Railway Engineering*, Ashgate Publishing.
13. Beheshti A., and Khonsari M.M. (2011), On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect, *Tribology International*, **44**, 1620-1628.
14. Brouzoulis J., and Ekh M. (2012), Crack propagation in rails under rolling contact fatigue loading conditions based on material forces, *International Journal of Fatigue*, **45**, 98-105.
15. Zerbst. U., Mädler K. and Hintze H. (2005), Fracture mechanics in railway applications – an overview, *Engineering Fracture Mechanics*, **72**, 163-194.
16. Martin P., Werner D., Weiping Y., Wilhelm K. and Stephan S. (2014), Multi-scale finite element modeling to describe rolling contact fatigue in a wheel-rail test rig, *Tribology International*, **80**, 147-155.
17. Sroba P., Magel E. and Prah F. (2003), Getting the most from rail grinding, *Railway Truck and Structures*, **99**, 30-33.
18. Kalousek J. and Magel E. (1997), Achieving a balance: The “magic” wear rate, *Railway Truck and Structures*, **65**, 50-52.
19. Reddy V., Chattopadhyay G., Larsson-Kraik P.-O. and Hargreaves D.J. (2007), Modelling and analysis of rail maintenance cost, *International Journal of Production Economics*, **105**, 475-482.

20. Griffiths J.D. (1997), Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική τόμος Β, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
21. Young D.H. (1994), Πανεπιστημιακή Φυσική τόμος Β, Εκδόσεις Παπαζήσης.
22. Pissas M., Antonakaki V., Kaliakatsou-Papakosta I. and Manios E. (2015), Surface cracks detection in ferromagnetic specimens using GMR sensors.
23. Bhadeshia H.K.D.H (2002), Steels for Rails, Novel, Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition).
24. Girsch G. and Heyder R., Advanced pearlitic and bainitic high strength rails promise to improve rolling contact fatigue resistance.
25. Franklin F.J., Garnham J.E., Fletcehr J.E., Davis C.L. and Kapoor A. (2008), Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation, *Wear*, **265**, 1332-1341.
26. Garnham J.E., and Davis C.L. (2008), The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation, *Wear*, **265**, 1363-1372.
27. Giannakopoulos A.E. and Baxevanakis K.P. (2014), Computational Investigation of RCF.

