



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανίχνευση Ρωγμών με Χρήση Μαγνητοοπτικού Αισθητήρα σε μαγνητικούς Χάλυβες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΧΟΤΖΟΓΛΟΥ

Ακαδημαϊκός Επιβλέπων
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Ερευνητικός Επιβλέπων
Μιχάλης Πίσσας
Δ. Ερευνών ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Αθήνα, Μάρτιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανίχνευση Ρωγμών με Χρήση Μαγνητοοπτικού Αισθητήρα σε μαγνητικούς Χάλυβες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΧΟΤΖΟΓΛΟΥ

Ακαδημαϊκός Επιβλέπων

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Ερευνητικός Επιβλέπων

Μιχάλης Πίσσας
Δ. Ερευνών ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ/ΜΜ/ΕΤΟΣ

Ονοματεπώνυμο μέλους, Ιδιότητα, (Υπογραφή)

Ονοματεπώνυμο μέλους, Ιδιότητα, (Υπογραφή)

Ονοματεπώνυμο μέλους, Ιδιότητα, (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2016

Αυτή η εργασία είναι μέρος του ερευνητικού προγράμματος “ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ, ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΛΗΡΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΕΞ ΕΠΑΦΗΣ ΣΕ ΚΥΛΙΣΗ (RCF) ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ”, το οποίο έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: 11ΣΥΝ_10_1698



ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ



Αλέξανδρος Χοτζόγλου

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Copyright © 2016 Αλέξανδρος Χοτζόγλου, Μιχάλης Πίσσας 2016

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

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 Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η ανίχνευση ρωγμών είναι μία σημαντική διαδικασία για την εξασφάλιση της ασφάλειας των κατασκευών. Μέσω αυτής της διπλωματικής προτείνεται και αναπτύσσεται μία νέα καινοτόμος μη καταστροφική μέθοδος ανίχνευσης επιφανειακών ρωγμών σε μαγνητισμένα αντικείμενα. Επειδή οι ρωγμές σε ένα μέσο αποτελούν φυσικές ασυνέχειες του, είναι προφανές ότι θα υπάρχουν φυσικές ιδιότητες οι οποίες θα μεταβάλλονται και αυτές ασυνεχώς. Στην περίπτωση σιδηρομαγνητικών δοκιμίων η παρουσία ρωγμών προκαλεί απότομη αλλαγή της μαγνητικής επαγωγής (B), με συνέπεια ένας αισθητήρας μαγνητικής επαγωγής να μπορεί να εντοπίσει τη ρωγμή. Η ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά δοκίμια μπορεί να γίνει με χρήση μαγνητικών σωματιδίων και σε μερικές περιπτώσεις δινορευμάτων. Συγκεκριμένα, ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη της μεθοδολογίας και της τεχνικής ανίχνευσης ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά αντικείμενα (δοκίμια) η οποία βασίζεται στο μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση λεπτού υμενίου από γρανάτη με χημικό τύπο $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ με καταγραφή της οπτικής αντίθεσης που προκαλείται από τη διαφορετική στροφή του πολωμένου φωτός που με τη σειρά του, προκαλείται από διαφεύγον μαγνητικό στη γειτονιά μιας ρωγμής. Τέλος έγινε μη καταστρεπτική εφαρμογή της αναπτυχθείσας τεχνικής με άριστα αποτελέσματα στην ανίχνευση/καταγραφή των ρωγμών από κόπωση εξ επαφής σε κύλιση (Rolling contact fatigue) στην κεφαλή σιδηροτροχιών του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ σε δοκιμές πεδίου.

Abstract

Crack detection is an important process that is necessary to assure safety and reliability of constructions. In this diploma thesis, we provide a novel non-destructive test that detects surface cracks in magnetized specimen. Cracks in a medium are physical discontinuities it is obvious that they produce discontinuities in the material properties. In a magnetized ferromagnetic specimen a surface crack produces a sudden change of the magnetic induction, B , near the crack. Consequently, a magnetic sensor can detect easily this change and therefore the location of the crack. Some tests detect surface cracks, in ferromagnetic samples, with magnetic particles and eddy current. The aim of this diploma thesis is the development of methodology and the technique for crack detection in ferromagnetic specimens using the magneto-optical effect. This is achieved using a thin film of garnet with chemical formula $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ by recording the optical contrast caused by the difference in the rotation of polarized light. This difference is caused by stray magnetic field produced in the vicinity of a crack. The methodology has been developed was applied as a non-destructive technique in field at the installations of Athens Metro with excellent results in detecting rolling contact fatigue cracks..

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε κατά το μεγαλύτερο μέρος της στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» υπό την επίβλεψη του Δρ. Μιχάλη Πίσσα, Ερευνητή Α βαθμίδας, τον οποίο και θα ήθελα να ευχαριστήσω, καθώς καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας έβρισκε πάντα τον χρόνο να λύσει κάθε είδους απορία και φυσικά για την συμβολή του στην τελική διαμόρφωση της δομής της εργασίας και τέλος μέσω των εποικοδομητικών συζητήσεων μας να μου δώσει ώθηση που θα με ακολουθεί σε κάθε βήμα της σταδιοδρομίας μου.

Καθοριστική, επίσης, υπήρξε και η συμβολή του Καθηγητή μου Δρ. Ευάγγελου Βασιλείου Χριστοφόρου, επιβλέποντα της διπλωματικής μου, και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας κατά την οποία ήταν πάντα διαθέσιμος και με ενθάρρυνε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Άννα Ζερβάκη και τον Καθηγητή Γ. Χαϊδεμενόπουλος για την ευγενική παραχώρηση των λειασμένων δοκιμίων σιδηροτροχιάς.

Την Ειρήνη Βαρούτη, Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π, για τις χρήσιμες συμβουλές και για την προθυμία της να συνδράμει με οποιοδήποτε τρόπο για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου καθώς και όλους του συναδέλφους στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας για τον γόνιμο χρόνο που περάσαμε μαζί. Τους φίλους μου και ανθρώπους μου (συμφοιτητές και μη) για τις καθημερινές στιγμές τόσων ετών.

Τέλος, την οικογένεια μου, και κυρίως τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια.

.

*Αφιερώνεται στους ώμους
των Γιγάντων*

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
1. ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	23
1.1 Διάδοση κύματος.....	23
1.2 Οπτική ανισοτροπία.....	25
1.3 Φυσική αρχή Μαγνητοοπτικού φαινομένου (Kerr και Faraday).....	31
1.4 Πολωτικό Μικροσκόπιο.....	35
1.4.1 Τα μέρη του μικροσκοπίου Leica DM R	36
2. ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ	38
2.1 Κινητική και δυναμική μετασχηματισμού φάσεων	38
2.2 Ιστορική αναδρομή και μηχανικά – μεταλλουργικά στοιχεία σιδηροτροχιών.....	45
2.3 Μικροδομη και μηχανικές ιδιότητες περλιτικών χαλύβδινων σιδηροτροχιών.....	49
2.4 Πλήρως περλιτικές χαλύβδινες σιδηροτροχιές	51
3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ	55
3.1 Θραυστομηχανική.....	55
3.2 Κόπωση	58
3.3 Ρωγμές λόγω κόπωσης από κύλιση εξ επαφής.....	58
3.3.1 Δημιουργία Επιφανειακής Ρωγμάτωσης	58
3.3.2 Μαγικός Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (Magic Wear Rate) και η λείανση σιδηροτροχιάς	60
3.3.3 Έλεγχος και Αντιμετώπιση των φαινομένων RCF- Συγκεντρωτικά.....	61
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	62
4.1 Υλικά και Δοκίμια με τα Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά.....	62
4.2 Φυσική Αρχή	63
4.3 Μαγνητικές ιδιότητες του Χάλυβα UIC 54 Grade 900	65
4.4 Πειραματική Διάταξη.....	65
4.5 Οπτικομαγνητικός Κρύσταλλος	70
4.6 Εγκάρσια Τομή	72
4.7 Διαμήκης Τομή.....	77
4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων με εφαρμογή μόνιμου μαγνήτη για δημιουργία εντονότερου πεδίου.....	84
4.9 Μετρήσεις Πεδίου	87
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90

Βιβλιογραφία.....91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1.1 Απεικόνιση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου συναρτήσεως του χ για γραμμικά πολωμένο ημιτονοειδές επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. (17)	23
Εικόνα 1.4.1: Φωτογραφία μικροσκοπίου Leica DM R με ενσωματωμένο σύστημα φωτογράφησης.	35
Εικόνα 2.1.1 Περίλιθος σε χάλυβα Fe-0.75C. Οπτικό μικροσκόπιο 500X. (5).....	40
Εικόνα 2.2.1:Εξέλιξη του προφίλ της σιδηροτροχιάς (8)	45
Εικόνα 2.2.2: Τελικό προϊόν έλασης στην βιομηχανία σιδηροτροχιών. (9).....	48
Εικόνα 2.4.1:Μικροδομή περλιτικής χαλύβδινης σιδηροτροχιάς. Η ενδολαμελική απόσταση είναι 0.3 μ m. Χρωματικά ενισχυμένη εικόνα όπου ο σεμεντίτης είναι με ανοιχτό μπλέ και ο φερρίτης με μαύρο. (8).....	51
Εικόνα 4.1.1 (πάνω αριστερά) Γεωμετρικά στοιχεία σιδηροτροχιάς UIC 54 και ονοματολογία των διαφόρων τμημάτων της. (πάνω δεξιά) Δίκτυο σχεδόν παράλληλων ρωγμών, που ξεκινούν από το άνω τμήμα του gage corner και κατευθύνονται προς τον κεντρικό άξονα της σιδηροτροχιάς. Ο σχηματισμός αυτός είναι γνωστός ως Shelling . Με το βέλος υποδεικνύεται η κατεύθυνση κίνησης του συρμού (Direction of Drive, DD). Η φωτογραφία έχει υιοθετηθεί από το Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. (κάτω αριστερά) Σ' αυτό το σχήμα φαίνεται η θέση στη σιδηροτροχιά του δοκιμίου που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις της εγκάρσιας διατομής. (κάτω μέση) Αυτό το σχήμα δείχνει το δοκίμιο για τις μετρήσεις στη διαμήκη διατομή. ((κάτω δεξιά) Φόρτιση σιδηροτροχιάς από τροχό.....	62
Εικόνα 4.2.1:Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας στα διάφορα στάδια κατασκευής του: (από αριστερά στα δεξιά) αρχικό προστατευτικό υπόστρωμα, επικάλυψη με επίστρωση μαγνητοοπτικού υλικού, επικάλυψη με ανακλαστική επιφάνεια.....	64
Εικόνα 4.2.2 Φυσική αρχή της μεθόδου ανίχνευσης ρωγμών από το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο μαγνητισμένου ελάσματος. Στο τελευταίο σχήμα φαίνεται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στην επιφάνεια μαγνητισμένου αντικειμένου το οποίο έχει έξι λοξές ρωγμές όπως αυτό υπολογίστηκε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Εύκολα διακρίνεται το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο στην θέση των ρωγμών	64
Εικόνα 4.4.1 Φωτογραφία του μαγνητοοπτικού αισθητήρα που προσαρμόζεται σαν κεφαλή στο οπτικό μικροσκόπιο Leica DM RXP.....	66
Εικόνα 4.4.2 Φωτογραφία πειραματικής διάταξης με μικροσκόπιο Leica DM RXP και μαγνητοοπτικός αισθητήρα εν ώρα χρήσης του.	67
Εικόνα 4.4.3 Φορητό μικροσκόπιο με ενσωματωμένο μαγνητοοπτικό αισθητήρα. Αριστερά, φωτογραφία με το μικροσκόπιο μαζί με την βάση που κατασκευάστηκε. Δεξιά, κοντινή φωτογραφία του φορητού μικροσκοπίου.	68
Εικόνα 4.4.4: Φωτογραφία θήκης φορητού μαγνητοοπτικού αισθητήρα.....	69
Εικόνα 4.4.5 Διάταξη εντοπισμού ρωγμών RCF σε σιδηροτροχιές της ΣΤΑΣΥ ΑΕ.	69
Εικόνα 4.5.1: Μαγνητικές περιοχές μαγνητοοπτικού κρυστάλλου με αξονική μαγνητική ανισοτροπία (14)	70

Εικόνα 4.5.2: (πάνω σχήμα) Μαγνητικές περιοχές μαγνητοοπτικού κρυστάλλου όπως αυτές φαίνονται σε πολωτικό μικροσκόπιο με γωνία πόλωσης πολωτή προς αναλυτή $\varphi=90$. (κάτω σχήμα) μεγέθυνση της περιοχής που περικλείεται με το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο.....	71
Εικόνα 4.6.1: Λεπτομέρεια από Σχήμα 4.6.1. Ρωγμές 2 και 3.	73
Εικόνα 4.6.2: Ο πολωτής με τον αναλυτή σχηματίζουν γωνία 90° . Αριστερά οπτική φωτογραφία. Δεξιά μαγνητοοπτική αντίθεση ρωγμής.....	73
Εικόνα 4.6.3: Από αριστερά στα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη εικόνα είναι από το οπτικό μικροσκόπιο και παράλληλα ο πολωτής με τον αναλυτή. Ακολουθούν μαγνητικής αντίθεσης φωτογραφίες με γωνία πολωτή προς αναλυτή $\varphi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ κατά σειρά.....	74
Εικόνα 4.6.4: Από αριστερά στα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Κατά σειρά, μαγνητικής αντίθεσης φωτογραφίες με γωνία πολωτή προς αναλυτή $\varphi=50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ$. Κοντά στις 90° παρατηρείται η μέγιστη αντίθεση. Τοπογραφία ρωγμών.....	75
Εικόνα 4.6.5: Φωτογραφία ρωγμών με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα. Γωνία πολωτή προς αναλυτή 85° . ..	76
Εικόνα 4.6.6: Φωτογραφία ρωγμών με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα. Γωνία πολωτή προς αναλυτή 95° ...	76
Εικόνα 4.7.1 Λεπτομέρειες δύο ρωγμών της διαμήκουσ στιλβωμένης επιφάνειας του σχήματος 4.7.2. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 4 mm.	78
Εικόνα 4.7.2: Λεπτομέρειες δύο ρωγμών της διαμήκουσ στιλβωμένης επιφάνειας του σχήματος 4.7.3. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 3 mm.	78
Εικόνα 4.7.3(πάνω) Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου (magneto-optical contrast). Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=95^\circ$ (κάτω) Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου (optical contrast/geometrical contrast)	79
Εικόνα 4.7.4: Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=10, 20, 40, 60$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω αντίστοιχα. ..	80
Εικόνα 4.7.5 Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=80, 81, 82, 83, 84, 85$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω, αντίστοιχα.....	81
Εικόνα 4.7.6: Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=87, 88, 90, 92, 93, 94$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω, αντίστοιχα.....	82
Εικόνα 4.7.7 Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=95, 96, 97, 98, 99, 100, 110, 130$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω αντίστοιχα.	83
Εικόνα 4.8.1: Ρωγμές όπως φαίνονται λεπτομέρειες δύο ρωγμών της εγκάρσιας στιλβωμένης επιφάνειας της σιδηροτροχιάς C. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 3 mm αν και δεν διακρίνεται στην εικόνα.....	84
Εικόνα 4.8.2: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου . Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=90^\circ$. Στο δοκίμιο δεν εφαρμόζεται μαγνήτης.....	85

Εικόνα 4.8.3: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου . Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=90^\circ$. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται μαγνήτης μακριά από το σημείο μέτρησης.	85
Εικόνα 4.8.4: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου . Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=90^\circ$. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται μαγνήτης κοντά στο σημείο μέτρησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8.5.....	86
Εικόνα 4.8.5:Φωτογραφία όπου παρουσιάζεται η ακριβής θέση του μαγνήτη πάνω στο δοκίμιο.....	86
Εικόνα 4.9.1: Κεφαλή σιδηροτροχιάς από την οποία ελήφθησαν οι εικόνες της μαγνητοοπτικής αντίθεσης.	87
Εικόνα 4.9.2: Διαδοχικά στιγμιότυπα τα οποία ελήφθησαν από την κάμερα του φορητού μικροσκοπίου εφοδιασμένο με το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο, σε μία περιοχή κοντά στην γωνία της σιδηροτροχιάς. Οι κεκλιμένες ραβδώσεις αντιστοιχούν σε ρωγμές τύπου RCF. Το βίντεο τραβήχτηκε σε τμήμα της γραμμής του Αττικό μετρό. Η απόσταση των κεκλιμένων ραβδώσεων είναι περίπου 1 mm.	88
Εικόνα 4.9.3: (συνέχεια της προηγούμενης εικόνας) Διαδοχικά στιγμιότυπα τα οποία ελήφθησαν από την κάμερα του φορητού μικροσκοπίου εφοδιασμένο με το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο σε μία περιοχή κοντά στην γωνία της σιδηροτροχιάς. Οι κεκλιμένες ραβδώσεις αντιστοιχούν σε ρωγμές τύπου RCF. Το βίντεο τραβήχτηκε σε τμήμα της γραμμής του Αττικό μετρό.	89

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.1 Γραμμικά πολωμένο φως ως συνδυασμός αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός (2).....	24
Σχήμα 1.2.1 Γραμμικά πολωμένο φως ως συνδυασμός αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός, στην περίπτωση όπου αυτά διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα φάσης στο υλικό αλλά επιδρά ο ίδιος συντελεστής διέγερσης. (2)	25
Σχήμα 1.2.2 Γραμμικά πολωμένο φως ως σύνθεση αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός όπου το κάθε ένα έχει διαφορετικό βαθμό απορρόφησης αλλά ίδια ταχύτητα φάσης. (2)	28
Σχήμα 1.2.3: Γραμμικά πολωμένο φως ως σύνθεση αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός όπου το κάθε ένα έχει διαφορετική ταχύτητα φάσης και διαφορετικό βαθμό απορρόφησης. (2)	30
Σχήμα 1.3.1 Μαγνητοοπτικός αισθητήρας. Η πρόσπτωση γραμμικά πολωμένου φωτός σε μαγνητισμένο μαγνητοοπτικό υλικό προκαλεί ομόρροπη στροφή του επιπέδου πόλωσης του διερχόμενου φωτός από τον πολωτή προς την ανακλαστική επιφάνεια και από την ανακλαστική φως προς τον αναλυτή	31
Σχήμα 1.3.2 Σχηματική παρουσίαση του φυσικού μηχανισμού δημιουργίας μαγνητοοπτικής αντίθεσης όταν τοποθετήσουμε ένα μαγνητοοπτικό κρύσταλλο στην επιφάνεια μαγνητισμένου υλικού με ρωγμές.	32
Σχήμα 1.3.3: Αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και μαγνητικού πεδίου εντός μαγνητοοπτικού κρυστάλλου. Αναπαράσταση στροφής του επιπέδου πόλωσης του φωτός πριν την είσοδο και μετά την έξοδο από τον μαγνητοοπτικό κρύσταλλο. (3).....	34
Σχήμα 1.4.1: Σχηματική αναπαράσταση του μικροσκοπίου Leica DM R (4).....	36
Σχήμα 2.1.1 Απλοποιημένο διάγραμμα Fe - Σεμεντίτη	38
Σχήμα 2.1.2: Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού για χάλυβα 1080 με 0.79%C και 0.76%Mn.(ημιαλογριθμικό διάγραμμα ως προς το χρόνο) (5).....	42
Σχήμα 2.1.3: Καμπύλη ισόθερμου μετασχηματισμού ωστενίτη σε περλίτη. (5)	43
Σχήμα 2.1.4: Συσχετισμός μια ισοθερμοκρασιακής καμπύλης αντίδρασης για (a) περλιτικό σχηματισμό με (b) το διάγραμμα TTT. (πηγή (5))	44
Σχήμα 2.3.1: Σκληρότητα και όριο διαρροής ως συνάρτηση της ενδολαμελικής απόστασης στον περλίτη για πλήρως περλιτική μικροδομή. (11)	50
Σχήμα 2.4.1: Επίδραση της ενδολαμελικής απόστασης στις ιδιότητες χαλύβδινης σιδηροτροχιάς (8)	52
Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα CCT για την επίδραση των κραματικών στοιχείων στην επίτευξη εκλεπτυσμένης περλιτικής μικροδομής. (8)	53
Σχήμα 2.4.3: Διάγραμμα CCT, επίδραση της ταχύτητας απόψυξης στη λεπτότητα της περλιτικής μικροδομής. (8)	53

Σχήμα 2.4.4: Θερμοκρασίες περλιτικού μετασχηματισμού σε υψηλής αντοχής χάλυβες σιδηροτροχιών, σε σχέση με την ταχύτητα απόψυξης και την περιεκτικότητα κραματικών στοιχείων. (8).....	54
Σχήμα 3.1.1: Διάγραμμα ενέργειας προς μήκος ρωγμής (α) για ενέργεια επιφάνειας(S), ενέργεια παραμόρφωσης(U) και συνολική ενέργεια	56
Σχήμα 3.1.2: Ρυθμός μεταβολής ενέργειας προς μήκος ρωγμής	57
Σχήμα 4.4.1 Σχηματική τομή της πειραματικής διάταξης.....	66
Σχήμα 4.6.1: Οπτική φωτογραφία της στιλβωμένης εγκάρσιας τομής του καμπύλου τμήματος του πάνω αριστερού τμήματος της διατομής της σιδηροτροχιάς. Οι μαύρες γραμμές που ξεκινούν από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι ρωγμές RCF.	72
Σχήμα 4.7.1 Στιλβωμένη διαμήκης τομή σιδηροτροχιάς της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. Στη δεξιά φωτογραφία, στην αριστερή ακμή, η οποία ταυτίζεται με την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, φαίνονται κεκλιμένες γραμμές οι οποίες αντιστοιχούν σε ρωγμές RCF. Οι δύο φωτογραφίες έχουν τραβηχτεί με ερασιτεχνική φωτογραφική μηχανή.	77
Εικόνα 4.7.1 Λεπτομέρειες δύο ρωγμών της διαμήκου στιλβωμένης επιφάνειας του σχήματος 4.7.2. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 4 mm.	78
Εικόνα 4.7.2: Λεπτομέρειες δύο ρωγμών της διαμήκου στιλβωμένης επιφάνειας του σχήματος 4.7.3. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 3 mm.	78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.2.1 Παλαιά και νέα ονομασία διατομών σιδηροτροχιών	46
Πίνακας 2.2.2 Χημική σύνθεση τυπικών χαλύβων σιδηροτροχιών (9)	47

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μη καταστροφικός έλεγχος (Non-destructive evaluation) είναι ένας περιγραφικός όρος που χρησιμοποιείται για την εξέταση υλικών και εξαρτημάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να μην καταστρέφει ή αλλάζει την λειτουργικότητά τους. Τέτοιοι μη καταστροφικοί έλεγχοι ΜΚΕ(NDT) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπιστεί η θέση και το μέγεθος επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι παίζουν ένα κρίσιμο ρόλο στην καθημερινή ζωή και είναι απαραίτητοι ώστε η ασφάλεια και η αξιοπιστία των κατασκευών να είναι υψηλή. Τυπικά παραδείγματα που εφαρμόζονται είναι τα αεροπλάνα, διαστημόπλοια, δορυφόροι, κινητήρες, αγωγοί, γέφυρες, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κτίρια, διυλιστήρια, πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικά και τρένα όπου όλα επιθεωρούνται με χρήση ΜΚΕ.

Ειδικότερα για τις κατασκευές που αφορούν στις συγκοινωνίες σιδηροδρόμων έχουν γίνει κατά καιρούς πολλά δυστυχήματα που εκτός από χρηματικό κόστος στοιχίζουν σε ανθρώπινες ζωές που είναι και το σημαντικότερο. Τεχνικές ΜΚΕ μπορούν να εφαρμοστούν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μιας σιδηροδρομικής κατασκευής ώστε να αποφεύγονται τέτοια δυστυχήματα, και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα προς αυτή τη κατεύθυνση.

ΜΚΕ χρησιμοποιούνται κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

- Πρόληψη ατυχημάτων και μείωση κόστους συντήρησης
- Βελτίωση της αξιοπιστίας του προϊόντος
- Ακριβή προσδιορισμό επιτρεπτών ορίων , εντός των οποίων λειτουργούν οι κατασκευές
- Πληροφόρηση ως προς τον βαθμό επισκευής

Η ανίχνευση του διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου (stray magnetic field) ή των μαγνητικών ανωμαλιών που δημιουργούνται όταν σε ένα αντικείμενο υπάρχουν ρωγμές, αποτελεί τη βασική φυσική αρχή για την ανάπτυξη σημαντικού αριθμού μη καταστρεπτικών ελέγχων. (1)

Η ανάλυση των εικόνων/σημάτων που λάβαμε, έδειξαν ότι η τεχνική μπορεί με ακρίβεια και ευκολία να ανιχνεύσει τις ρωγμές (RCF) σε σιδηροτροχιές, και συμπληρωματικά με άλλες τεχνικές να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των τεχνικών της ΣΤΑΣΥ ΑΕ, στην προσπάθεια διασφάλισης της καλής λειτουργίας του ΜΕΤΡΟ, του ΗΣΑΠ και του ΤΡΑΜ, παρέχοντας στο κοινό ασφαλείς μεταφορές.

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η ανάπτυξη της μεθοδολογίας και της τεχνικής ανίχνευσης ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά αντικείμενα (δοκίμια) η οποία βασίζεται στο μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Για την πειραματική διερεύνηση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε λεπτό υμένιο γρανάτη με χημικό τύπο $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ με μεγάλη στροφή Faraday του επίπεδου

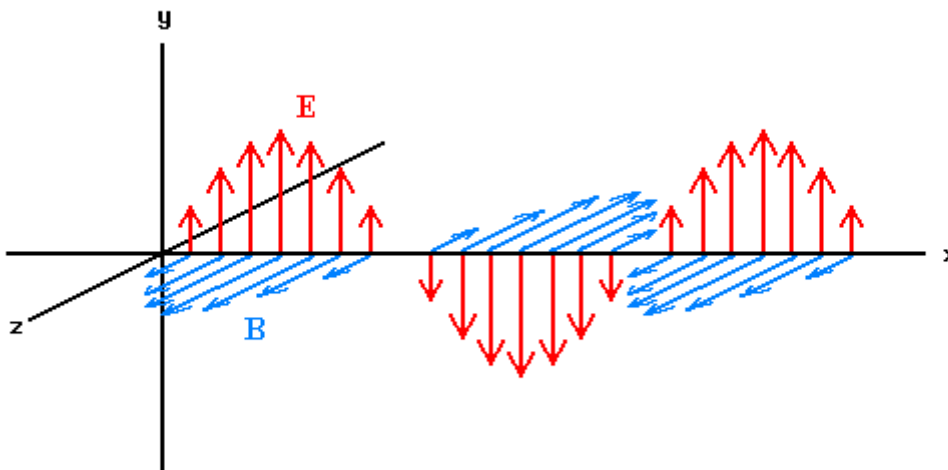
πόλωσης πολωμένου φωτός. Οι ρωγμές ανιχνεύονται με καταγραφή της οπτικής αντίθεσης που προκαλείται από τη διαφορετική στροφή του πολωμένου φωτός που προκαλείται από αλλαγή την φοράς της κάθετης συνιστώσας του διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου στη γειτονία μιας ρωγμής. Οι δοκιμές έγιναν σε λειασμένες τομές κεφαλής σιδηροτροχιάς που περιέχει ρωγμές από κόπωση εξ επαφής σε κύλιση (Rolling contact fatigue). Η τεχνική εφαρμόστηκε σε μη καταστρεπτικές δοκιμές στις σιδηροτροχιές του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας.

1. ΜΑΓΝΗΤΟΟΠΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

1.1 Διάδοση κύματος

Το φως είναι η διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο αποτελείται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Σε απομακρυσμένα από την πηγή σημεία, τα πεδία είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με σταθερή φασική ταχύτητα $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$.

Χάριν απλότητας, εδώ, θεωρείται μόνο το ηλεκτρικό πεδίο. Για κύμα φωτός που διαδίδεται



Εικόνα 1.1.1 Απεικόνιση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του x για γραμμικά πολωμένο ημιτονοειδές επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. (17)

κατά μήκος του καρτεσιανού άξονα x , η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου για κάθε χρονική στιγμή μπορεί να εκφραστεί από τη συνάρτηση:

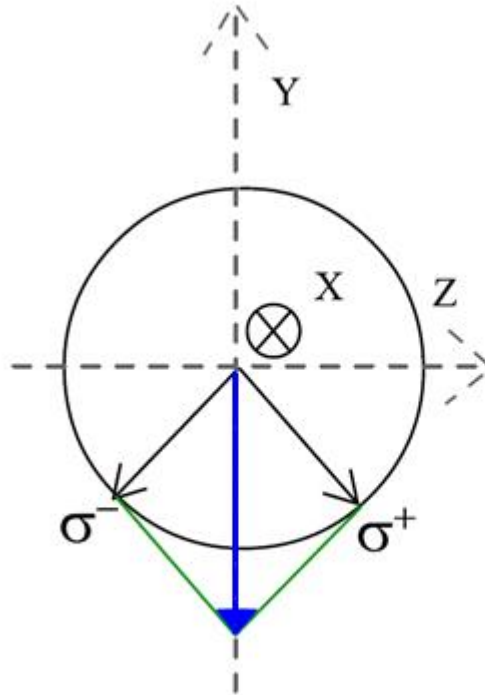
$$E(x, t) = A \cos(kz - \omega t)$$

**Εξίσωση
1.1**

όπου A είναι το πλάτος του κύματος, z είναι η χωρική συντεταγμένη, t είναι ο χρόνος, k ο κυματαριθμός και ω η γωνιακή συχνότητα. Ο κυματαριθμός k ορίζεται ως $k = 2\pi/\lambda$, ο αριθμός των ακτινίων ανά μονάδα απόστασης. Εξασφαλίζει δηλαδή ότι σε καθορισμένο χρόνο η χωρική αναπαράσταση του κύματος θα έχει μια περιοδικότητα ίση με το μήκος κύματος, του

φωτός, λ . Η γωνιακή συχνότητα $\omega=2\pi f = 2\pi/T$ εξασφαλίζει ότι σε κάθε δεδομένη θέση, ο αριθμός των ακτινίων του κύματος ανά μονάδα χρόνου αντιστοιχεί στην περίοδο (T) του κύματος φωτός.

Στο **Σχήμα 1.1.1** φαίνεται ότι το γραμμικά πολωμένο φως (μπλέ βέλος) μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας συνδυασμός αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός (μαύρα βέλη). Όπως μπορείτε να δείτε, τα βέλη έχουν ίσο πλάτος και γωνιακές ταχύτητες.



Σχήμα 1.1.1 Γραμμικά πολωμένο φως ως συνδυασμός αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός (2)

Όταν το φως συναντά ένα υλικό μέσο (διάφορο του κενού), αυτό αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρικά πεδία των ατόμων και των μορίων. Ως αποτέλεσμα, η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μπορεί να περιγραφεί με μία ποσότητα γνωστή ως μιγαδικός δείκτης διάθλασης. Αυτός ο μιγαδικός αριθμός ορίζεται από τη σχέση:

$$N = n - j\kappa$$

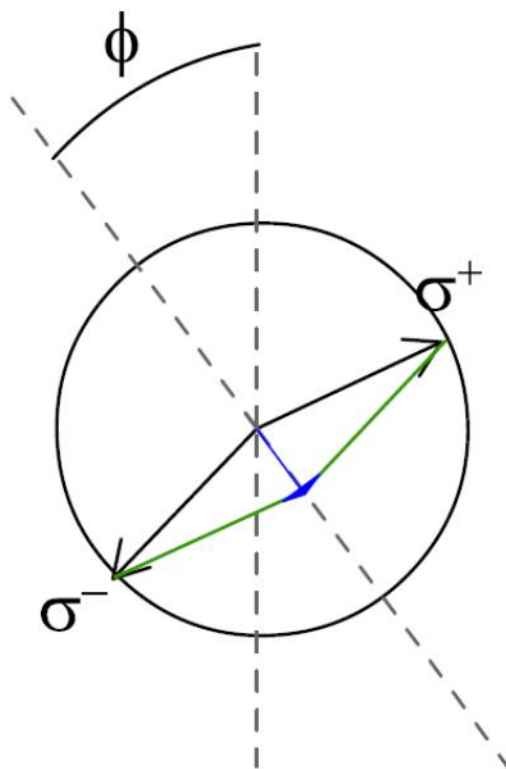
**Εξίσωση
1.2**

Όπου το πραγματικό μέρος n είναι ο δείκτης διάθλασης και το φανταστικό μέρος κ ο συντελεστής απόσβεσης. Από φυσικής πλευράς το φανταστικό μέρος αποδίδει το ρυθμό εξασθένησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και επηρεάζει το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου (συντελεστής A στην εξίσωση (1)). Ο δείκτης διάθλασης δείχνει τη μείωση της ταχύτητας του φωτός στο συγκεκριμένο μέσο σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός στο

κενό. Ανάλογα με το υλικό, το φως μπορεί να αλληλεπιδρά είτε με τον δείκτη (n) είτε με τον (κ) είτε και με τους δυο μαζί.

1.2 Οπτική ανισοτροπία

Όταν σε ένα μέσο το δεξιόστροφο και αριστερόστροφο κυκλικά πολωμένο φως επηρεάζεται διαφορετικά από τον δείκτη διάθλασης αλλά όχι από τον δείκτη απορρόφησης τότε αυτή η διαφορά ονομάζεται κυκλική διπλοθλαστικότητα. Το πραγματικό μέρος του μιγαδικού δείκτη διάθλασης (δηλ. ο δείκτης διάθλασης) ορίζεται ως $n=c/v$ όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και v η ταχύτητα του φωτός στο μέσο. Αν το φως οδεύει σε ένα μέσο, και το δεξιόστροφο και αριστερόστροφο κυκλικά πολωμένο φως διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα φάσης (διαφορετικό- n), τότε καθώς θα εξέρχεται από αυτό το μέσο, τα βέλη σ^+ και σ^- θα έχουν συμπληρώσει διαφορετικό μέρος του κύκλου. Ωστόσο αν δεν υπάρχει διαφορά στην απορρόφηση (ίδιο κ), αμφότερα τα βέλη θα παρουσιάζουν ίδιο πλάτος. Το αποτέλεσμα της πόλωσης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.2.1**, όπου φαίνεται, στον χρόνο $t=0$, το σ^- δεν έχει συμπληρώσει την κυκλική του κίνηση και έχει ως αποτέλεσμα το γραμμικά πολωμένο διάνυσμα (μπλε βέλος) παρουσιάζεται ότι έχει περιστραφεί κατά μια γωνία ϕ .



Σχήμα 1.2.1 Γραμμικά πολωμένο φως ως συνδυασμός αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός, στην περίπτωση όπου αυτά διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα φάσης στο υλικό αλλά επιδρά ο ίδιος συντελεστής διέγερσης. (2)

Το φ υπολογίζεται σε η^- και η^+ , δηλαδή τους αντίστοιχους δείκτες διάθλασης των σ^- και σ^+ . Το κυκλικά πολωμένο φως περιγράφεται από δύο γραμμικά πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Έτσι για την αριστερόστροφη και δεξιόστροφη πόλωση ισχύει:

$$\begin{aligned} E_z^- &= A \cos(kx - \omega t) \\ E_y^- &= A \sin(kx - \omega t) \\ E_z^+ &= A \cos(kx - \omega t) \\ E_y^+ &= A \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 1.3}$$

Τα οποία ξαναγράφονται: (με $\eta = c / v = ck / \omega$)

$$\begin{cases} E_z^- = A \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta^- x - ct) \right] \\ E_y^- = -A \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta^- x - ct) \right] \\ E_z^+ = A \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta^+ x - ct) \right] \\ E_y^+ = A \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta^+ x - ct) \right] \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 1.4}$$

Προχωρώντας τις πράξεις:

$$\begin{cases} E_z^- = A \cos \left[\frac{\omega}{c} \left(\frac{\eta^+ + \eta^-}{2} x - ct - \frac{\eta^+ - \eta^-}{2} x \right) \right] \\ E_y^- = -A \sin \left[\frac{\omega}{c} \left(\frac{\eta^+ + \eta^-}{2} x - ct - \frac{\eta^+ - \eta^-}{2} x \right) \right] \\ E_z^+ = A \cos \left[\frac{\omega}{c} \left(\frac{\eta^+ + \eta^-}{2} x - ct + \frac{\eta^+ - \eta^-}{2} x \right) \right] \\ E_y^+ = A \sin \left[\frac{\omega}{c} \left(\frac{\eta^+ + \eta^-}{2} x - ct + \frac{\eta^+ - \eta^-}{2} x \right) \right] \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 1.5}$$

Αν ορίσουμε:

$$\eta = \frac{\eta^+ + \eta^-}{2} \quad \text{Εξίσωση 1.6}$$

Οι εξισώσεις (Εξίσωση 1.5) γίνονται:

$$\begin{cases} E_z^- = A \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta z - ct) - \frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \\ E_y^- = -A \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta z - ct) - \frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \end{cases}$$

**Εξίσωση
1.7**

$$\begin{cases} E_z^+ = A \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta z - ct) - \frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \\ E_y^+ = A \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta z - ct) - \frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \end{cases}$$

Εφαρμόζοντας τον τύπο άθροισης και αφαίρεσης συνημιτόνων και ημιτόνων:

$$\begin{cases} E_z^- = A \left\{ \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \cos \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] + \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \sin \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \right\} \\ E_y^- = -A \left\{ \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \cos \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] - \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \sin \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \right\} \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_z^+ = A \left\{ \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \cos \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] - \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \sin \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \right\} \\ E_y^+ = A \left\{ \sin \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \cos \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] + \cos \left[\frac{\omega}{c} (\eta x - ct) \right] \sin \left[\frac{\omega}{2c} (\eta^+ - \eta^-) x \right] \right\} \end{cases}$$

**E
ξ
ί
σ
ω
σ
η
1
·
8**

Συνδυάζοντας τα στοιχεία z και y αυτών των κυκλικών πολώσεων υπολογίζεται η τελική συνολική γραμμική πόλωση:

$$\begin{cases} E_z = E_z^- + E_z^+ = 2A \cos \left[\frac{\omega}{c} (nx - ct) \right] \cos \left[\frac{\omega}{2c} (n^+ - n^-) x \right] \\ E_y = E_y^- + E_y^+ = 2A \cos \left[\frac{\omega}{c} (nx - ct) \right] \sin \left[\frac{\omega}{2c} (n^+ - n^-) x \right] \end{cases}$$

**Εξίσωση
1.9**

Η Εξίσωση 1.9 αναπαριστά ένα γραμμικά πολωμένο κύμα και έχει γωνία πόλωσης φ ως προς τον z - άξονα:

$$\tan \varphi = \frac{E_z}{E_y} = \tan \left[\frac{\omega}{2c} (n^+ - n^-) x \right]$$

**Εξίσωση
1.10**

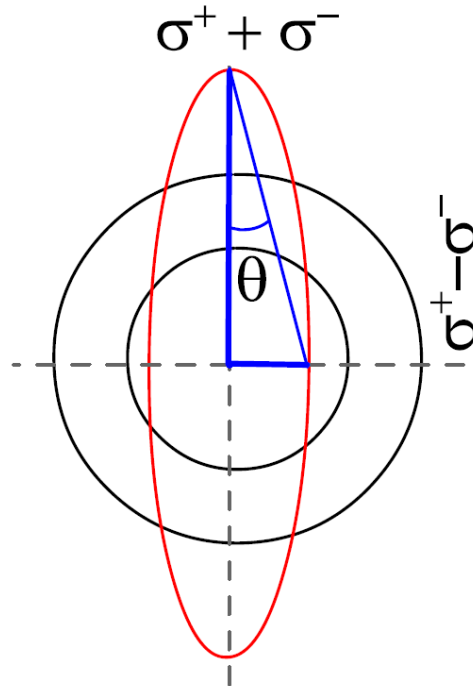
Και στη συνέχεια

$$\varphi = \frac{\omega}{2c} (n^+ - n^-) l$$

**Εξίσωση
1.11**

Όπου l είναι το μήκος του υλικού. Η γωνία είναι σε ακτίνια και θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με 180/π ώστε να μετατραπεί η γωνία σε μοίρες.

Όταν αντίθετα σε ένα μέσο το δεξιόστροφο και αριστερόστροφο κυκλικά πολωμένο φως επηρεάζεται διαφορετικά από τον δείκτη απορρόφησης αλλά όχι από τον δείκτη διάθλασης τότε αυτή η διαφορά ονομάζεται κυκλικός διχρωϊσμός. Σύμφωνα με την θεωρία που διατυπώθηκε, δεν θα υπάρχει καμία στρέψη του γραμμικά πολωμένου διανύσματος (δηλαδή ισχύει $\varphi=0$) αφού $n^+=n^-$. Ωστόσο, αφού το υλικό σκεδάζει και απορροφά διαφορετικά τις δύο πολώσεις (σ^+, σ^-), τα σχετικά πλάτη των διανυσμάτων εξόδου διαφέρουν. Αν υποθέσουμε ότι το σ^- έχει μικρότερο πλάτος και συνεπώς θα καλύψει μικρότερο κύκλο όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2.2**, το εξερχόμενο γραμμικά πολωμένο φως ακολουθεί μια έλλειψη. Αυτό ονομάζεται ελλειπτικότητα και αναπαρίσταται ως θ .



Σχήμα 1.2.2 Γραμμικά πολωμένο φως ως σύνθεση αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός όπου το κάθε ένα έχει διαφορετικό βαθμό απορρόφησης αλλά ίδια ταχύτητα φάσης. (2)

Η ελλειπτικότητα ποσοτικά ορίζεται ως:

$$\tan \theta = \frac{|\sigma^+| - |\sigma^-|}{|\sigma^+| + |\sigma^-|} \quad \text{Εξίσωση 1.12}$$

όπου $|\sigma^+|$ και $|\sigma^-|$ προσδιορίζουν το πλάτος του διανύσματος. Στην πράξη μπορούμε να μετρήσουμε τις εντάσεις του κυκλικά πολωμένου φωτός, I^+ και I^- και εφόσον η ελλειπτικότητα είναι συνήθως πολύ μικρή, μπορεί να υποτεθεί ότι $\tan(\theta) \approx \theta$. Άρα ισχύει ότι:

$$\theta = \frac{\sqrt{I^+} - \sqrt{I^-}}{\sqrt{I^+} + \sqrt{I^-}} \quad \text{Εξίσωση 1.13}$$

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Beer ο οποίος είναι ένας εμπειρικός νόμος που συσχετίζει την απορρόφηση ενός υλικού και την ένταση του διαδιδόμενου φωτός:

$$I = I_0 \exp(-A \ln 10) \quad \text{Εξίσωση 1.14}$$

όπου A είναι το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από την Εξίσωση 1.1. Έτσι η 1.13 γίνεται:

$$\theta = \frac{\left[\exp\left(-\frac{A^+}{2} \ln 10\right) - \exp\left(-\frac{A^-}{2} \ln 10\right) \right] I_0}{\left[\exp\left(-\frac{A^+}{2} \ln 10\right) + \exp\left(-\frac{A^-}{2} \ln 10\right) \right] I_0}$$

$$= \frac{\exp\left(\frac{A^- - A^+}{2} \ln 10\right) - 1}{\exp\left(\frac{A^- - A^+}{2} \ln 10\right) + 1} \quad \text{Εξίσωση 1.15}$$

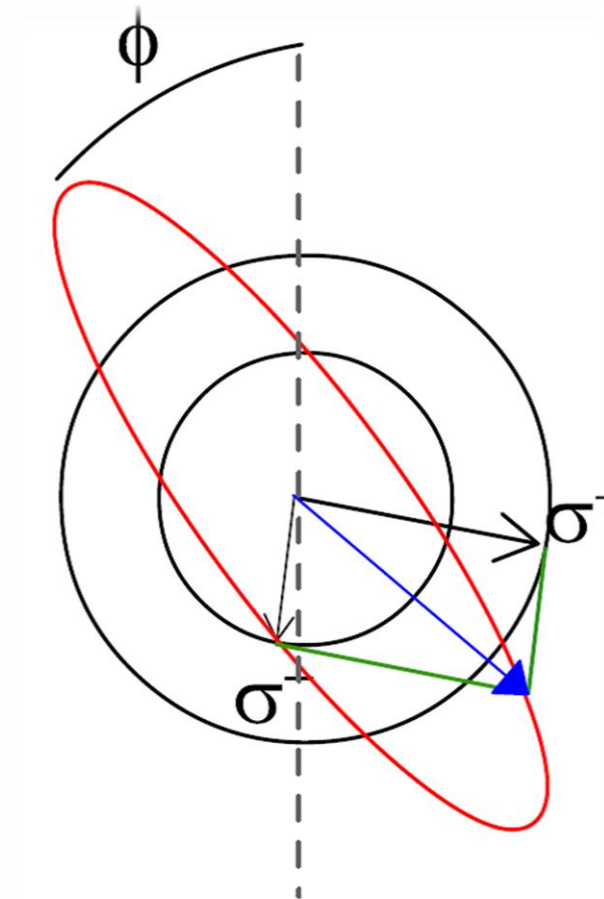
Με ανάπτυγμα κατά σειρά Taylor

$$\frac{\exp(x) - 1}{\exp(x) + 1} \approx \frac{x}{2} \quad \text{Εξίσωση 1.16}$$

Το τελικό αποτέλεσμα σε ακτίνια:

$$\theta = (A^- - A^+) \frac{\ln 10}{4} \quad \text{Εξίσωση 1.17}$$

Τέλος όταν υπάρχει σύνθεση και των δύο προηγούμενων περιπτώσεων, δηλαδή όταν το δεξιόστροφο και αριστερόστροφο κυκλικά πολωμένο φως επηρεάζεται διαφορετικά από το δείκτη διάθλασης και διαφορετικά και από το δείκτη απορρόφησης καθώς διαδίδεται στο μέσο, το αποτέλεσμα θα είναι η σύνθεση των προηγούμενων αποτελεσμάτων. Όπως δείχθηκε, διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες σημαίνει στρέψη της γραμμικής πόλωσης και διαφορετική απορρόφηση σημαίνει ελλειπτικότητα. Συνεπώς, το γραμμικά πολωμένο φως σε αυτή τη περίπτωση θα έχει διαγράψει, εξερχόμενο του μέσου, μια ελλειπτική στρέψη όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2.3**.



Σχήμα 1.2.3: Γραμμικά πολωμένο φως ως σύνθεση αριστερόστροφου (σ^-) και δεξιόστροφου (σ^+) κυκλικά πολωμένου φωτός όπου το κάθε ένα έχει διαφορετική ταχύτητα φάσης και διαφορετικό βαθμό απορρόφησης. (2)

Στην πραγματικότητα δεν απαιτείται να μετρήσουμε ξεχωριστά την ελλειπτικότητα και τη γωνία στροφής καθώς αυτές συνδέονται μέσω των μετασχηματισμών Kronig-Kramer.

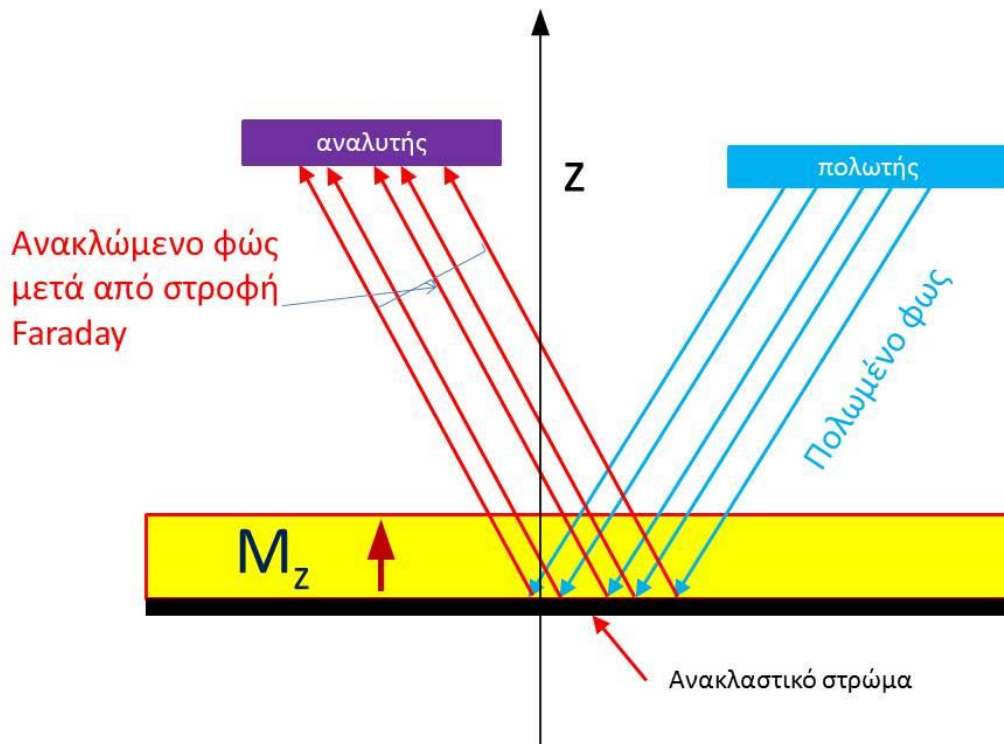
$$\varphi(\lambda) = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\theta(\lambda') \lambda'}{\lambda^2 - \lambda'^2} d\lambda'$$

**Εξίσωση
1.18**

$$\theta(\lambda) = -\frac{2\lambda}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\varphi(\lambda')}{\lambda^2 - \lambda'^2} d\lambda'$$

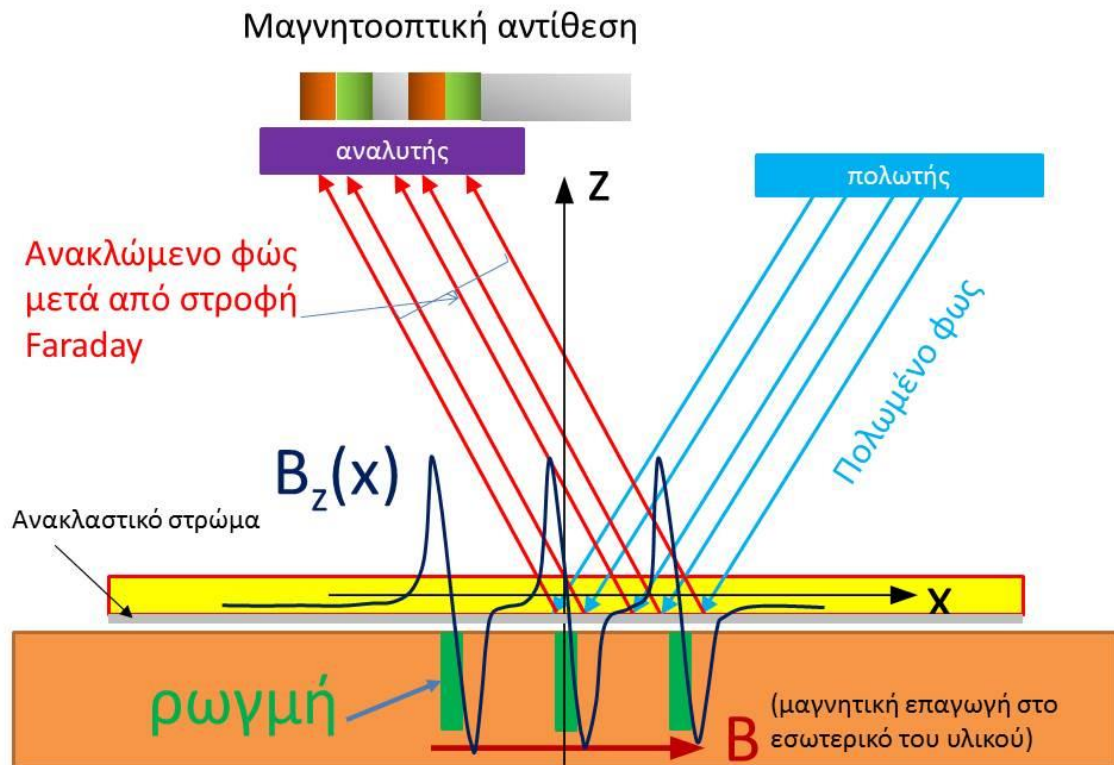
όπου το P δηλώνει την πρωτεύουσα τιμή του ολοκληρώματος κατά Cauchy. Οι μετασχηματισμοί Kronig-Kramers είναι ένα σύνολο γενικών μαθηματικών εξισώσεων που συνδέουν το πραγματικό με το φανταστικό μέρος μιγαδικής επιδεκτικότητας. Εδώ εφαρμόζονται καθώς η γωνία στροφής σχετίζεται με το πραγματικό μέρος του μιγαδικού δείκτη διαθλάσεως και η ελλειπτικότητα με το φανταστικό μέρος.

1.3 Φυσική αρχή Μαγνητοοπτικού φαινομένου (Kerr και Faraday)



Σχήμα 1.3.1 Μαγνητοοπτικός αισθητήρας. Η πρόσπτωση γραμμικά πολωμένου φωτός σε μαγνητισμένο μαγνητοοπτικό υλικό προκαλεί ομόρροπη στροφή του επιπέδου πόλωσης του διερχόμενου φωτός από τον πολωτή προς την ανακλαστική επιφάνεια και από την ανακλαστική φως προς τον αναλυτή

Η φυσική αρχή που διέπει το μαγνητοοπτικό φαινόμενο είναι η εξάρτηση των οπτικών σταθερών από την κατεύθυνση της μαγνήτισης ενός υλικού. Η μαγνήτιση του υλικού προκαλεί δευτερογενή κίνηση των ηλεκτρονίων με ταχύτητα $v = -\mathbf{M} \times \mathbf{E}$ (όπου \mathbf{M} η μαγνήτιση του υλικού και \mathbf{E} το ηλεκτρικό πεδίο του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος) η οποία με τη σειρά της δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα με στραμμένο επίπεδο πόλωσης Ένας μαγνητοοπτικός αισθητήρας μπορεί να προκαλέσει είτε στροφή του επιπέδου πόλωσης του ανακλώμενου φωτός (φαινόμενο Kerr) η του διερχόμενου (φαινόμενο Faraday). Τα δύο φαινόμενα περιγράφονται με το γενικό όρο κυκλικός μαγνητικός διχρωισμός (circular magnetic birefringence) .Το μαγνητοοπτικό υλικό του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ήταν ένα λεπτό υμένιο μεικτού γρανάτη $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Η συγκεκριμένη ένωση είναι ένα σιδηριμαγνητικό υλικό (ferromagnetic garnet) το οποίο στην αμαγνήτιστη κατάσταση εμφανίζει μαγνητικές περιοχές (magnetic domains), με χαρακτηριστικό μέγεθος περιοχής, μερικά μικρά του μέτρου.



Σχήμα 1.3.2 Σχηματική παρουσίαση του φυσικού μηχανισμού δημιουργίας μαγνητοοπτικής αντίθεσης όταν τοποθετήσουμε ένα μαγνητοοπτικό κρύσταλλο στην επιφάνεια μαγνητισμένου υλικού με ρωγμές.

Σε ένα μαγνητοοπτικό υλικό η ηλεκτρική επιτρεπτότητα είναι τανυστικό μέγεθος. Τα στοιχεία του τανυστή της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας εξαρτώνται από την μαγνήτιση $\mathbf{M}=(M_1,M_2,M_3)$ του μαγνητοοπτικού υλικού. Η σχέση του ηλεκτρικού πεδίου, \mathbf{E} με την ηλεκτρική μετατόπιση, \mathbf{D} , σε μαγνητοοπτικά υλικά με κυβική συμμετρία έχει τη μορφή [1-4]

$$\mathbf{D} = \varepsilon(\mathbf{E} + iQ_v \mathbf{M} \times \mathbf{E}) \quad \text{Eξίσωση 1.19}$$

και μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του μαγνητοηλεκτρικού τανυστή ηλεκτρικής επιτρεπτότητας [1-4]

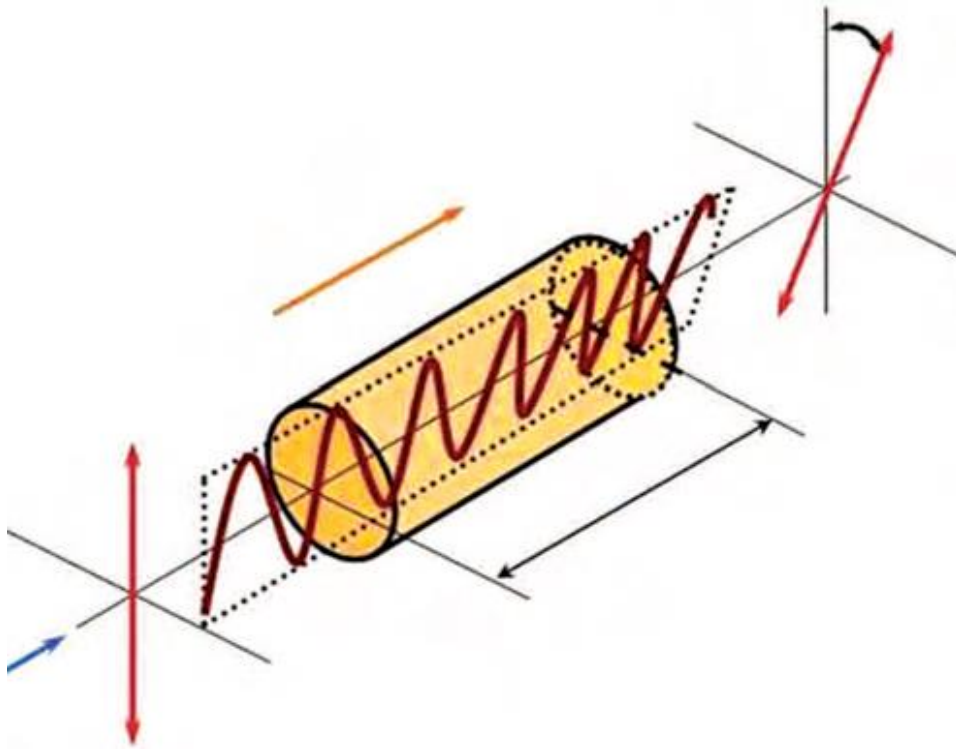
$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon \begin{pmatrix} 1 & -iQ_v M_3 & iQ_v M_2 \\ iQ_v M_3 & 1 & -iQ_v M_1 \\ -iQ_v M_2 & iQ_v M_1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Eξίσωση 1.20}$$

Q_v είναι η σταθερά Voight η οποία μπορεί να περιγράψει τη μαγνητοοπτική στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός (φαινόμενο Faraday (κατά τη διέλευση)) ή φαινόμενο Kerr (κατά την ανάκλαση)). Ένα μέσο για το οποίο ισχύει η σχέση 1.19 ονομάζεται γυροτροπικό

(gyrotropic medium). Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το οπτικό φαινόμενο Faraday/Kerr είναι διαφορετικό από το γυρομαγνητικό φαινόμενο το οποίο οφείλεται στον τανυστικό χαρακτήρα της μαγνητικής διαπερατότητας. Το γυρομαγνητικό φαινόμενο είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο, σε σχέση με το γυροηλεκτρικό φαινόμενο στις οπτικές συχνότητες. Για την περιγραφή του μαγνητοοπτικού φαινομένου το μόνο που χρειαζόμαστε είναι οι εξισώσεις του Maxwell λαμβάνοντας υπόψη ότι η ηλεκτρική επιτρεπτότητα είναι τανυστικό μέγεθος.

Στο **Σχήμα 1.3.1** φαίνεται σχηματικά η λειτουργία ενός μαγνητοοπτικού αισθητήρα. Πολωμένο φως διέρχεται από πολωτή και πολώνεται γραμμικά. Στη συνέχεια το πολωμένο φως διέρχεται από το μαγνητοοπτικό υλικό του οποίου η μαγνήτιση είναι προς τα πάνω. Το επίπεδο πόλωσης του φωτός υφίσταται στροφή ανάλογη με τη μαγνήτιση του υλικού και τη διαδρομή που ακολουθεί εντός του μαγνητοοπτικού υλικού. Αφού το φως ανακλαστεί στην ανακλαστική επιφάνεια και διέλθει ξανά από το μαγνητοοπτικό υλικό, όπου υφίσταται ξανά ομόρροπη στροφή και τελικά καταλήγει στον αναλυτή. Ουσιαστικά το πολωμένο φως υφίσταται στροφή του επιπέδου πόλωσης, ανάλογη της μαγνήτισης και του διπλάσιου πάχους (για κάθετη πρόσπτωση) του μαγνητοοπτικού υλικού.

Στο **Σχήμα 1.3.2** φαίνεται σχηματικά ο τρόπος που δημιουργείται μαγνητοοπτική αντίθεση όταν ένας μαγνητοοπτικός αισθητήρας τοποθετηθεί στην επιφάνεια μαγνητισμένου υλικού το οποίο έχει τρεις ρωγμές. Η καμπύλη με το μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής 0.5-1 mm πάνω από τις ρωγμές. Στην περιοχή των ρωγμών ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας εμφανίζει εναλλασσόμενη μαγνήτιση με αποτέλεσμα το ανακλώμενο φως να έχει εναλλασσόμενη στροφή του επιπέδου πόλωσης. Αυτή η εναλλαγή προκαλεί την μαγνητοοπτική αντίθεση η οποία είναι μία έμμεση αποτύπωση των ρωγμών του μαγνητισμένου αντικειμένου.



Σχήμα 1.3.3: Αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και μαγνητικού πεδίου εντός μαγνητοοπτικού κρυστάλλου. Αναπαράσταση στρόφης του επιπέδου πόλωσης του φωτός πριν την είσοδο και μετά την έξοδο από τον μαγνητοοπτικό κρύσταλλο. (3)

Στο **Σχήμα 1.3.3** αναπαριστάται και η στρέψη του πολωμένου φωτός που παρουσιάστηκε προηγουμένως αλλά αυτή τη φορά χωρίς να είναι προσαρμοσμένος ο κρύσταλλος σε κάποιο αισθητήρα.

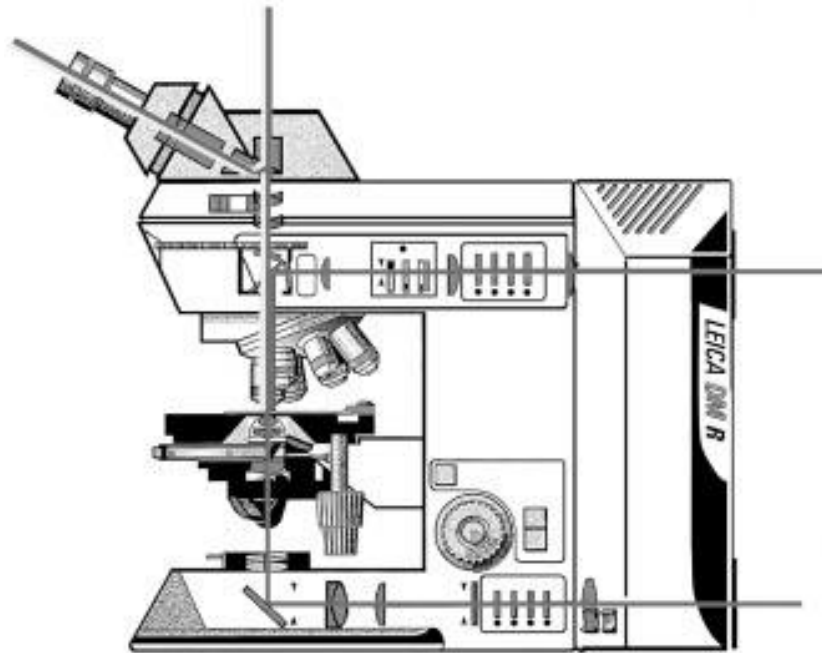
1.4 Πολωτικό Μικροσκόπιο

Το πολωτικό μικροσκόπιο είναι σχεδιασμένο για την ανάλυση και φωτογράφιση δειγμάτων που είναι κυρίως ορατά λόγω της οπτικής ανισοτροπίας που παρουσιάζουν. Για να το επιτύχει αυτό, το μικροσκόπιο πρέπει να είναι εφοδιασμένο με έναν πολωτή και έναν αναλυτή (δεύτερος πολωτής). Ο πολωτής παρεμβάλλεται στην πορεία του μη πολωμένου φωτός προς το δείγμα ώστε να πολωθεί και ο αναλυτής παρεμβάλλεται στην πορεία του φωτός από το δείγμα προς τη θύρα της φωτογραφικής μηχανής. Η αντίθεση των εικόνων προκύπτει από την αλληλεπίδραση του πολωμένου φωτός με ένα διπλοθλαστικό (birefringent) δείγμα για να παραχθούν δύο ξεχωριστές συνιστώσες κύματος που κάθε μία είναι πολωμένη σε επίπεδο κάθετο σε σχέση με την άλλη. Έτσι το πολωμένο φως διέρχεται από την λεπτή τομή ενός διαφανούς ορυκτού και βγαίνει από την άλλη μεριά σαν δύο πολωμένες ακτίνες που κραδαινούνται κάθετα μεταξύ τους. Οι ακτίνες αυτές λέγονται τακτική ακτίνα και έκτακτη ακτίνα, και έχουν διαφορετικές ταχύτητες. Μόνο τα ανισότροπα σώματα έχουν την ιδιότητα να χωρίζουν την ακτίνα σε τακτική και έκτακτη και αυτό γιατί έχουν δύο ή και τρεις δείκτες διάθλασης. Ανισότροπα σώματα είναι όλοι κρύσταλλοι που δεν ανήκουν στο κυβικό αλλά στα άλλα συστήματα κρυστάλλωσης και κάποια υλικά στην φύση που έχουν υποστεί μηχανικές πιέσεις ή άλλες φυσικές αλλαγές. Οφείλουν την ανισοτροπία τους στην διαφορετική περιοδικότητα των μορίων τους για διαφορετικές κατευθύνσεις.



Εικόνα 1.4.1: Φωτογραφία μικροσκοπίου Leica DM R με ενσωματωμένο σύστημα φωτογράφισης.

1.4.1 Τα μέρη του μικροσκοπίου Leica DM R



Σχήμα 1.4.1: Σχηματική αναπαράσταση του μικροσκοπίου Leica DM R (4)

Για την συλλογή των μαγνητοσκοπικών εικόνων χρησιμοποιήσαμε το μικροσκόπιο Leica (μοντέλο DM R) το οποίο θα περιγράψουμε εν συντομία (για την περιγραφή του πολωτικού μικροσκοπίου χρησιμοποιήσαμε υλικό από την ιστοσελίδα του τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ).

- **Πηγή φωτός** Η πηγή φωτός βρίσκεται στο πάνω μέρος του μικροσκοπίου και αποτελείται από μία λάμπα αλογόνου Osram HLX64635 των 12V 100W. Επίσης εδράζεται ένα σύστημα φακών και κατόπτρων, που κατευθύνουν το φως προς το δείγμα. Η ένταση του φωτός ρυθμίζεται με ένα ροοστάτη. Το μικροσκόπιο έχει σύστημα κατόπτρων έτσι ώστε το φως μπορεί να διέλθει από το δείγμα ή να ανακλαστεί από την επιφάνεια του.
- **Πολωτής** Ο πολωτής είναι τοποθετημένος αμέσως μετά τη πηγή φωτός. Αποτελείται από ένα πολωτικό φίλτρο που μετατρέπει το φυσικό φως σε ευθύγραμμο πολωμένο. Στο συγκεκριμένο μικροσκόπιο η διεύθυνση κράδανσης του πολωτή είναι ανατολικά δυτικά.
- **Το διάφραγμα ίριδας ή απλώς διάφραγμα** Βρίσκεται πάνω από τον πολωτή και ρυθμίζει τη διάμετρο της φωτεινής δέσμης, που περνά από το μικροσκόπιο. Κλείνοντας το διάφραγμα μειώνεται η διάμετρος της φωτεινής δέσμης.
- **Τράπεζα μικροσκοπίου** Το δοκίμιο προς παρατήρηση τοποθετείται σε κυκλική στρεφόμενη (γύρο από κατακόρυφο άξονα) τράπεζα.
- **Αντικειμενικοί φακοί** Οι αντικειμενικοί φακοί είναι μεγεθυντικοί φακοί προσαρμοσμένοι σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα ώστε να μπορούμε να τους επιλέξουμε ανάλογα με τη μεγέθυνση που επιθυμούμε. Για τη λήψη των φωτογραφιών από την επιφάνεια του μαγνητοσκοπικού αισθητήρα χρησιμοποιήσαμε τον φακό (5x12).

- **Αναλυτής**: Ο αναλυτής βρίσκεται πάνω από τους αντικειμενικούς φακούς και παρεμβάλλεται στην πορεία του φωτός. Ο αναλυτής είναι όμοιος με τον πολωτή. Το επίπεδο πόλωσής του ως προς αυτό του πολωτή μπορεί να περιστραφεί με κατάλληλο μηχανισμό.
- **Προσοφθάλμιος φακός**: Ο προσοφθάλμιος φακός βρίσκεται στο πάνω μέρος του σωλήνα του μικροσκοπίου και μεγεθύνει το είδωλο που δημιουργείται από τους αντικειμενικούς φακούς. Η μεγέθυνση του προσοφθάλμιου, του μικροσκοπίου που χρησιμοποιήσαμε ήταν, 10x. Η ολική μεγέθυνση του μικροσκοπίου ισούται με το γινόμενο της μεγέθυνσης του αντικειμενικού επί τη μεγέθυνση του προσοφθάλμιου.
- **Μηχανισμός εστίασης**: Η εστίαση πραγματοποιείται ανεβάζοντας ή κατεβάζοντας την τράπεζα με τη βοήθεια ενός ή δύο κοχλιών που βρίσκονται στον κορμό του μικροσκοπίου. Υπάρχει δυνατότητα για δύο εστιάσεις, μία κατά προσέγγιση με μεγάλες μετακινήσεις και μία λεπτομερή με πάρα πολύ μικρές μετακινήσεις.

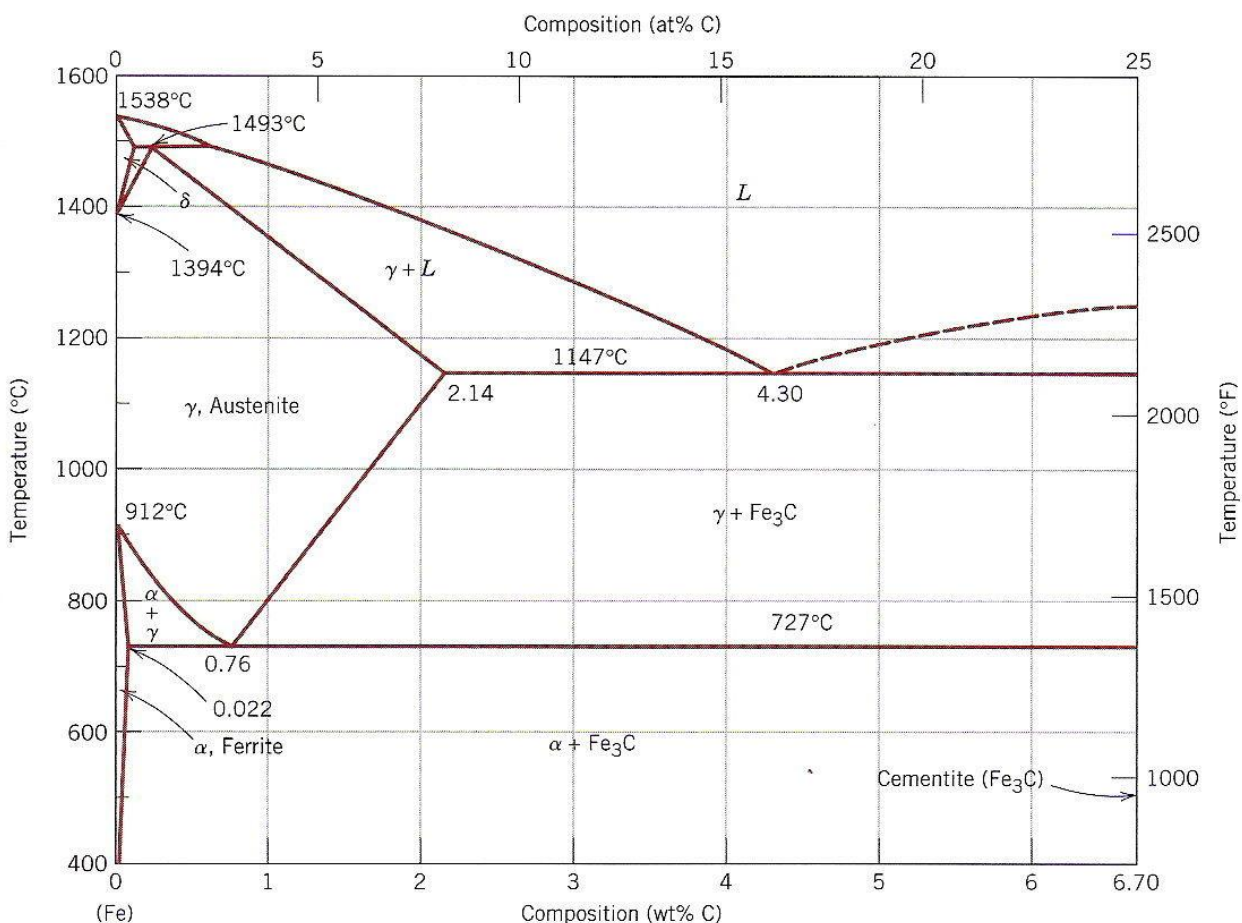
2. ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ

2.1 Κινητική και δυναμική μετασχηματισμού φάσεων

Επειδή το υλικό των σιδηροτροχιών ήταν περλιτικός χάλυβας σε αυτή την παράγραφο θα κάνουμε μία σύντομη περιγραφή του διαγράμματος φάσεων Fe-C και τη μέθοδο παρασκευής περλιτικού χάλυβα.

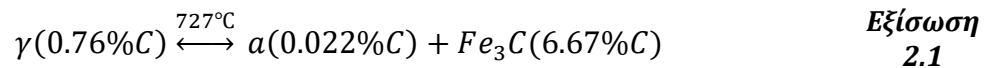
Οι περισσότερες σύγχρονες σιδηροτροχιές κατασκευάζονται από πλήρως περλιτικό χάλυβα. Αρχικά θα παρουσιαστούν οι κύριες γνώσεις που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων.

Ο σίδηρος παρουσιάζει αλλοτροπία. Το διάγραμμα φάσεων σιδήρου - άνθρακα (Fe - C) παρέχει το βασικό πλαίσιο για την κατανόηση των μετασχηματισμών φάσεων των χαλύβων.



Σχήμα 2.1.1 Απλοποιημένο διάγραμμα Fe - Σεμεντίτη

Αριστερά το διάγραμμα αρχίζει από τον καθαρό σίδηρο (0%C), ενώ δεξιά περιορίζεται από περιεκτικότητα σε άνθρακα (6.70%C), που αντιστοιχεί στην χημική σύνθεση του σεμεντίτη. Συγκεκριμένα για τον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό θεωρούμε ότι έχουμε κράμα Fe-0.76C το οποίο θα είναι σε μια κατάσταση με μοναδική φάση, αυτή του ωστενίτη για κάθε θερμοκρασία πάνω από την A1- 727°C. Αν διατηρήσουμε αυτόν το χάλυβα για μεγάλο χρονικό διάστημα οριακά κάτω από την θερμοκρασία A1, ή εάν ψυχθεί αργά πολύ αργά (δηλαδή έχουμε κατάσταση ισορροπίας), τότε το διάγραμμα μας πληροφορεί ότι ο ωστενίτης θα διασπαστεί σε φερρίτη με 0.022%C και σεμεντίτη. Αυτό συμβαίνει διότι πλέον αυτές οι φάσεις θα βρίσκονται σε ισορροπία. Αυτός ο μετασχηματισμός φάσης στον οποίο μια στερεή φάση μετατρέπεται από δύο διαφορετικές στέρεες φάσεις ονομάζεται ευτηκτοειδής μετασχηματισμός και στο σύστημα Fe-C μπορεί να γραφτεί υπό τη μορφή:



Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι οι φάσεις της ευτηκτοειδούς αντίδρασης έχουν συγκεκριμένη σύνθεση και η αντίδραση είναι αντιστρεπτή και σχετίζεται με το αν δίδεται η αφαιρείται θερμότητα. Σε ιδανικές συνθήκες, η ευτηκτοειδής αντίδραση σε χάλυβα είναι ισοθερμοκρασιακή και λαμβάνει χώρα στους 727 °C. Παρόλα αυτά, καταστάσεις ισορροπίας σπάνια επιτυγχάνονται στην πράξη, και η ευτηκτοειδής αντίδραση μπορεί να προκύψει σε ένα εύρος θερμοκρασιών χαμηλότερο της A1.

Η ευτηκτοειδής αντίδραση στους χάλυβες παράγει μια μοναδική μικροδομή που καλείται περλιτική. Μορφολογικά ο περλίτης εμφανίζει στρωματοειδή μικροδομή που σχηματίζεται με επαλληλία πλακιδίων ή λαμέλων φερρίτη και σεμεντίτη, όπου όμως η συνεχής φάση είναι ο φερρίτης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.1.1**.

Περιοχές λαμέλων διαφορετικών κατευθύνσεων και ενδολαμελικής απόστασης είναι αυτά που χαρακτηρίζουν την μικροδομή. Οι διαφορές που αυτές οι αποστάσεις παρουσιάζουν από περιοχή σε περιοχή, εμφανίζονται εν μέρει, λόγω της διαφοράς στις γωνίες που σχηματίζουν οι λαμέλες με το επίπεδο λείανσης, και εν μέρει, στο γεγονός ότι ο περλίτης μπορεί να έχει σχηματιστεί σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Υποθέτοντας ότι όλος ο περλίτης σχηματίστηκε στην ίδια περίπου θερμοκρασία και ως εκ τούτου τα πλακίδια έχουν ιδανικά ίδια απόσταση, αυτές οι αποικίες πλακιδίων που είναι κάθετα στο επίπεδο λείανσης θα δείξουν την πραγματική ενδολαμελική απόσταση των πλακιδίων του φερρίτη και σεμεντίτη. Έτσι η περλιτική δομή είναι περιοδική και χαρακτηρίζεται από το μήκος κύματος 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 γραμμικών αταξιών (dislocations).



Εικόνα 2.1.1 Περλίτης σε χάλυβα Fe-0.75C. Οπτικό μικροσκόπιο 500X. (5)

Τα ποσοστά του σεμεντίτη και φερρίτη σε περλίτη που σχηματίστηκε σε θερμοκρασία 727 °C μπορούν να υπολογιστούν με τον κανόνα του μοχλού. Όπως είναι γνωστό ο κανόνας του μοχλού μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σημείο διφασικής περιοχής ενός διαγράμματος φάσεων για να καθοριστεί το ποσό της κάθε φάσης σε δοσμένη θερμοκρασία στο συγκεκριμένο κράμα. Τα ποσοστά φερρίτη και σεμεντίτη στον περλίτη υπολογίζονται αν εφαρμόσουμε το κανόνα του μοχλού στη θερμοκρασία A1:

$$\text{κβ\% } Fe_3C \text{ στον περλίτη} = \frac{0.76 - 0.022}{6.67 - 0.022} \times 100 = 11\% \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Από την αφαίρεση, το ποσοστό βάρους του φερρίτη στον περλίτη είναι 89%. Έτσι κάθε ωστενίτης που περιέχει 0.76 άνθρακα μετασχηματίζεται σε περλίτη κοντά στην A1, και ο φερρίτης και σεμεντίτης είναι στην καθορισμένη αναλογία που δόθηκε από την εξίσωση 1.3. Οι πυκνότητες του φερρίτη και σεμεντίτη είναι 7.87 και 7.70 g/cm³ αντίστοιχα, και άρα τα ποσοστά τους σε όγκο είναι τα ίδια με τα ποσοστά τους σε βάρος. Έτσι στα κράματα Fe-C τα ποσοστά που υπολογίζει ο κανόνας του μοχλού, αντιπροσωπεύουν και τα ποσοστά που εμφανίζονται στο οπτικό μικροσκόπιο. (5)

Στην βιβλιογραφία έχει δειχτεί ότι όλος ο σεμεντίτης σε μία αποικία συνδέεται, και μια αποικία περλίτη μπορεί να θεωρηθεί ως δύο μονοκρύσταλλοι φερρίτη και σεμεντίτη. Όλες οι φαινομενικά ξεχωριστές λαμέλες έχουν κοινή προέλευση. Ο περλιτικός μετασχηματισμός είναι ένας διαχυτικός μετασχηματισμός, που πραγματοποιείται με το μηχανισμό της πυρήνωσης και ανάπτυξης. Η πυρήνωση του περλίτη είναι ετερογενής και πραγματοποιείται

στα σύνορα των ωστενιτικών κόκκων. Κατά την ανάπτυξη του περλίτη αυξάνεται ο αριθμός των λαμελών. Η αύξηση αυτή πραγματοποιείται είτε με πλευρική πυρήνωση νέων λαμελών είτε με διακλάδωση αυτών που έχουν ήδη σχηματιστεί (6).

Ένας αριθμός παραγόντων επηρεάζουν τον ρυθμό του περλιτικού μετασχηματισμού. Πιθανόν το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι άτομα αντικατάστασης του άνθρακα πρέπει να αναδιαταχθούν ώστε να επιτευχθεί ο μετασχηματισμός του ωστενίτη (0.77%C) σε χαμηλό σε άνθρακα φερρίτη και υψηλό σε άνθρακα σεμεντίτη σύμφωνα με την Εξίσωση 2.1. Η διάχυση του άνθρακα, όπως ορίζεται από τον συντελεστή διάχυσης, είναι εξαρτώμενη της θερμοκρασίας. Μία εξίσωση που έχει αναπτυχθεί (7) ώστε να δείξει την εξάρτηση με την θερμοκρασία της διάχυσης του άνθρακα στον ωστενίτη είναι:

$$D_c^y = 0.12e^{-32,000/RT} \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Όπου D_c^y είναι ο μέσος συντελεστής διάχυσης (cm^2/s) του άνθρακα στον ωστενίτη, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων (1.98 cal/g-mol/k), και T η απόλυτη θερμοκρασία σε μονάδες Kelvin ($^{\circ}\text{C}+273$). Αρχικά αυτή η εξάρτηση της θερμοκρασίας φαίνεται να αντιτίθεται με τα πειραματικά δεδομένα (βλέπουμε Σχήμα 2.1.2: Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού για χάλυβα 1080 με 0.79%C και 0.76%Mn. (ημιαλγοριθμικό διάγραμμα ως προς το χρόνο) όπου ο περλίτης σχηματίζεται ταχύτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τις υψηλές.

Αυτή η φαινομενική ασυμφωνία εξηγείται από την μείωση της ενδολαμελικής απόστασης καθώς η θερμοκρασία του περλιτικού μετασχηματισμού μειώνεται. Επίσης η απόσταση που ο άνθρακας έχει για να διαχυθεί, ώστε να κατανομηθεί μεταξύ του σεμεντίτη και του φερρίτη, μειώνεται. Και παρόλο που η διάχυση γίνεται πιο νωθρή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η ανάπτυξη των περλιτικών αποικιών επιταχύνονται. (5)

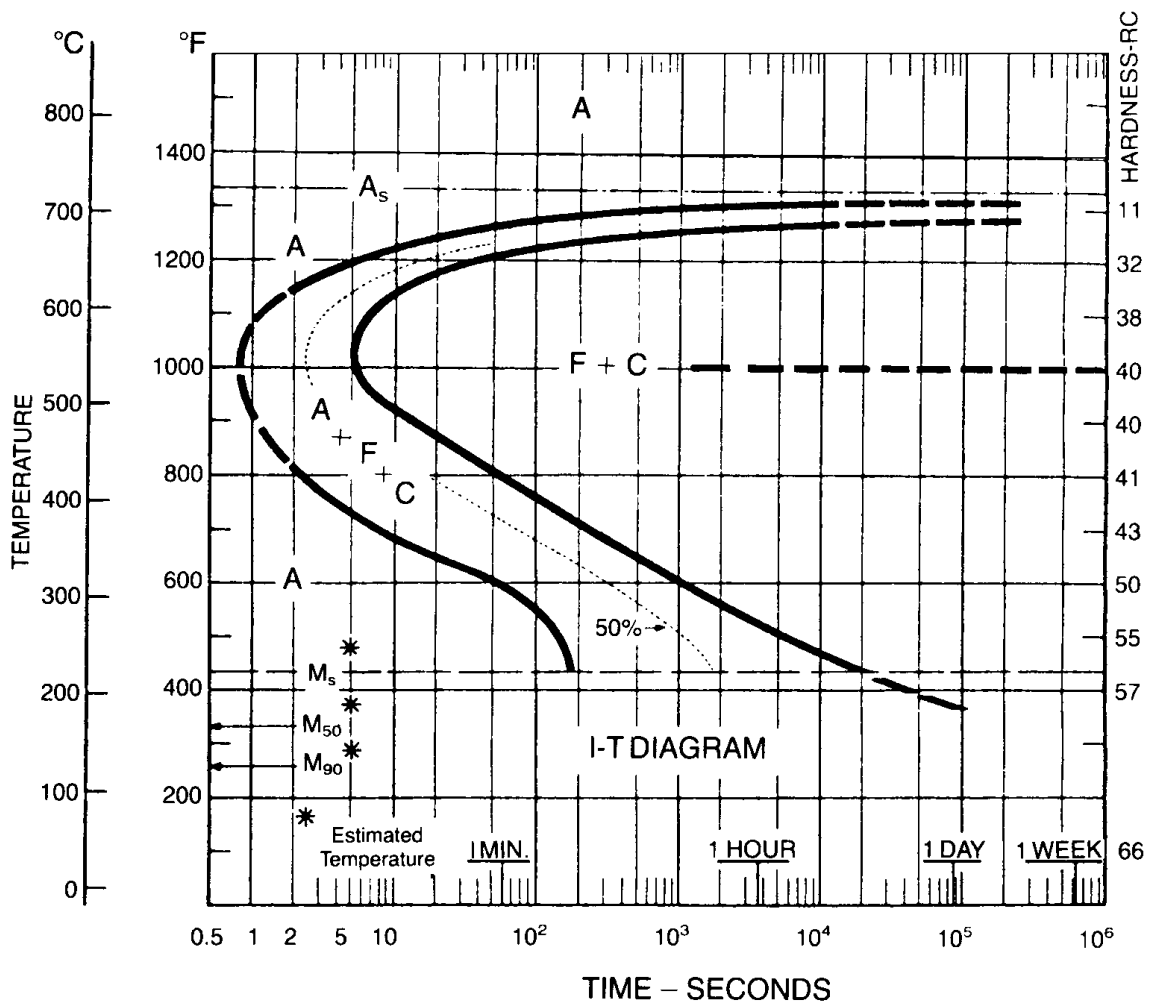
Κάτω από τη θερμοκρασία $T_e=A1$, η ενδολαμελική απόσταση (λεπτότητα) της περλιτικής μικροδομής εξαρτάται από την υπέρψυξη ΔT . Ουσιαστικά, η κινούσα δύναμη ΔG για τον περλιτικό μετασχηματισμό, πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την αύξηση της διεπιφανειακής ενέργειας, που οφείλεται στον σχηματισμό των νέων διεπιφανειών. Έτσι, αν αγνοήσουμε την επίδραση της ενέργειας παραμορφώσεως τότε

$$\Delta G = \frac{\Delta H \times \Delta T}{T_e} = \frac{2\gamma}{\lambda_p} \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

όπου η πρώτη ισότητα είναι μια απλουστευμένη έκφραση της κινούσας δυνάμεως και $2\gamma/\lambda_p$ είναι η διεπιφανειακή ενέργεια ανά μήκος κύματος λ_p . Από την (1.4) προκύπτει ότι

$$\lambda_p = \frac{2\gamma T_e}{\Delta H} \times \frac{1}{\Delta T} \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

Η **Εξίσωση 2.5** ορίζει πως η ενδολαμελική απόσταση (λεπτότητα μικροδομής) είναι αντιστρόφως ανάλογη της υπερψύξεως ΔT . Όταν ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ο περλίτης που σχηματίζεται είναι λεπτόκοκκος (έχει μικρό λ_p) και επομένως παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα. Για παράδειγμα, όταν ο περλίτης σχηματίζεται λίγο κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, π.χ. στους 700°C, έχει $\lambda_p = 10^{-3}$ mm. Αυτό του προσδίδει μία σκληρότητα περίπου 20 RC. Όταν ο περλίτης σχηματίζεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, π.χ. 600°C, έχει $\lambda_p = 10^{-4}$ mm και σκληρότητα 30 RC. Πρέπει βέβαια να σημειώσουμε ότι η δυνατότητα να επιτευχθεί πολύ υψηλός βαθμός λεπτότητας (πολύ μικρό λ_p) περιορίζεται από την διαθέσιμη ελεύθερη ενέργεια (ή ενθαλπία) για τον περλιτικό μετασχηματισμό. (6)



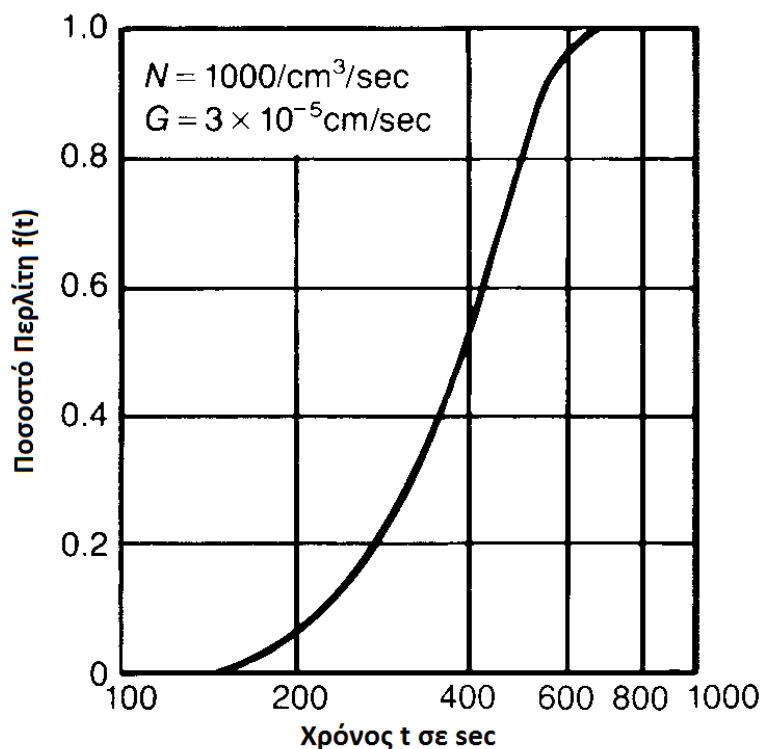
Σχήμα 2.1.2: Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού για χάλυβα 1080 με 0.79%C και 0.76%Mn. (ημιαλογριθμικό διάγραμμα ως προς το χρόνο) (5)

Η ανάπτυξη της περλιτικής δομής ως συνάρτηση του χρόνου σε σταθερή θερμοκρασία, βασίζεται στην πυρήνωση και στον ρυθμό ανάπτυξης των περλιτικών αποικιών. Η συνολική κινητική περιγράφεται από την εξίσωση Johnson-Mehl αν υποθέσουμε ότι οι περλιτικές αποικίες είναι σφαιρικές και τυχαία σχηματίζουν πυρήνα ως συνάρτηση του χρόνου.

$$f(t) = 1 - \exp[-NG^3t^4/3]$$

**Εξίσωση
2.6**

Όπου $f(t)$ είναι το ποσοστό του περλίτη που σχηματίζεται σε κάποια θερμοκρασία t σε δοσμένη θερμοκρασία, N είναι ο ρυθμός πυρήνωσης των αποικιών και G είναι ο ρυθμός με τον οποίο οι αποικίες αναπτύσσονται μέσα στον ωστενίτη. Η εξίσωση των Johnson-Mehl περιγράφει μαθηματικά τον ρυθμό με τον οποίο ο ωστενίτης μετατρέπεται στη περλιτική μικροδομή μέσω της πυρήνωσης και της ανάπτυξης των περλιτικών αποικιών. Σε οποιαδήποτε δοσμένη θερμοκρασία, η σχέση $f(t)$ προς χρόνο δίνει τη γνωστή σιγμοειδή καμπύλη όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.3. Ο αρχικός ρυθμός μετασχηματισμού είναι αρκετά χαμηλός και είναι άμεσα συνδεδεμένος με αυτό που αποκαλείται ως περίοδος επώασης, ο χρόνος όταν ο πρώτος σταθερός πυρήνας αναπτυχθεί.

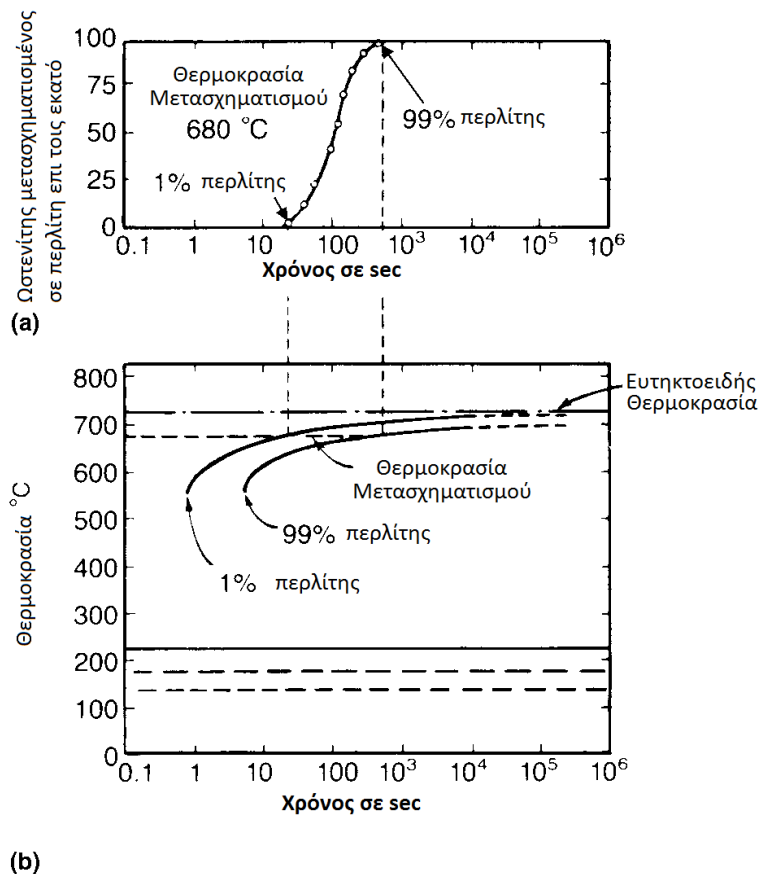


Σχήμα 2.1.3: Καμπύλη ισόθερμου μετασχηματισμού ωστενίτη σε περλίτη. (5)

Καθώς όλο και περισσότεροι πυρήνες αναπτύσσονται και βρίσκονται σε διάφορους βαθμούς ανάπτυξης, ο ρυθμός του μετασχηματισμού αυξάνει. Τελικά, στις αποικίες αρχίζει να επέρχεται κορεσμός καθώς η μικροδομή σταδιακά πλησιάζει στον πλήρη μετασχηματισμό και ο ρυθμός αρχίζει να μειώνεται. Ο συνολικός χρόνος που χρειάζεται για να ξεκινήσει και να ολοκληρωθεί ο περλιτικός μετασχηματισμός σχετίζεται ευθέως με την αρχή και το τέλος των καμπύλων μετασχηματισμού του διαγράμματος ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού που φαίνεται στο σχήμα 1.6. Η ακριβής έναρξη και το τέλος του περλιτικού μετασχηματισμού σε οποιαδήποτε δοσμένη θερμοκρασία εξαρτάται φυσικά από την ευαισθησία και την ακρίβεια της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός, αλλά γενικά η ακρίβεια είναι της τάξης του 1%. Επομένως, η αρχή και το τέλος της καμπύλης του σχήματος 1.6 αντιστοιχεί με το 1% και 99% του μετασχηματισμού.

Το σχήμα της καμπύλης του ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού ευτηκτοειδών χαλύβων (Σχήμα 2.1.2: Διάγραμμα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού για χάλυβα 1080 με 0.79%C και 0.76%Mn.(ημιαλγοριθμικό διάγραμμα ως προς το χρόνο), εξηγείται λοιπόν από την θερμοκρασιακή εξάρτηση των πυρηνώσεων και τον ρυθμό ανάπτυξης των περλιτικών αποικιών.

Ο μηχανισμός σχηματισμού του περλίτη συνεχίζει να συγκεντρώνει θεωρητικό και πειραματικό ενδιαφέρον. Ίσως το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο να αναλυθεί με ποιο τρόπο ο άνθρακας ή και άλλα κραματικά στοιχεία κατανέμονται μεταξύ των πλακιδίων φερρίτη και σεμεντίτη. Προηγουμένως υποτέθηκε ότι η ανάπτυξη μιας περλιτικής αποικίας εξαρτάται από την διάχυση των ατόμων άνθρακα στον ωστενίτη που προηγείται της περλιτικής διεπαφής. Τέτοια διάχυση μέσω μιας κρυσταλλικής φάσης αναφέρεται στην βιβλιογραφία σαν bulk διάχυση ή διάχυση όγκου. Μια άλλη πιθανότητα ωστόσο είναι, ο άνθρακας να διαχέεται δια μήκος της προωθημένης διεπαφής μεταξύ περλίτη και ωστενίτη. Τέτοια διάχυση διεπαφής επιτυγχάνεται ταχύτερα από μια διάχυση όγκου λόγω των πιο ακανόνιστων ή ανοικτών θέσεων των ατόμων στα όρια κόκκων σε σχέση με τις καθορισμένες και πιο κοντινές θέσεις εντός των κόκκων. (5)

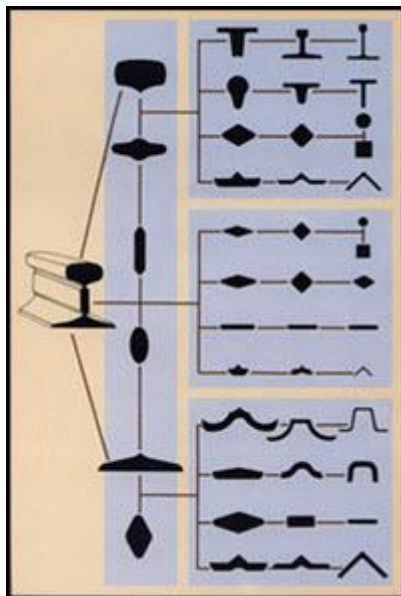


Σχήμα 2.1.4: Συσχετισμός μια ισοθερμοκρασιακής καμπύλης αντίδρασης για (a) περλιτικό σχηματισμό με (b) το διάγραμμα TTT. (πηγή (5))

2.2 Ιστορική αναδρομή και μηχανικά - μεταλλουργικά στοιχεία σιδηροτροχιών

Τα νέα συστήματα σιδηροτροχιών υποβάλλονται σε έντονη καταπόνηση, με γρήγορες αμαξοστοιχίες και αυξημένα αξονικά φορτία. Έτσι οι σιδηροτροχιές απαιτείται να έχουν αυξημένη αντίσταση στη φθορά και να επιτυγχάνουν υψηλά στάνταρ ομαλότητας στην επιφάνεια όπου έρχονται σε επαφή με τον τροχό ώστε να αποφεύγονται τα έντονα ανάγλυφα και οι εσωτερικές ατέλειες, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν εν τέλει και στην θραύση.

Μέχρι την δεκαετία του 1970 τα εμπορικά και επιβατικά τρένα καταλογίζονταν ως απλά μη απαιτητικά προϊόντα και οι προδιαγραφές είχαν αλλάξει ελάχιστα για δεκαετίες. Παρόλα αυτά οι επενδύσεις στις σιδηροτροχιές που προκλήθηκαν λόγω της παρουσίας των υψηλής ταχύτητας τρένων (high-speed train) και των προδιαγραφών για μακρότερης διάρκειας ζωής σιδηροτροχιών ανέδειξαν απαιτήσεις για σιδηροτροχιές υψηλής ποιότητας, μεγαλύτερης αντοχής και ανώτερης γεωμετρικής επιδεκτικότητας ως προς τις τάσεις που αναπτύσσονταν. Σαν επακόλουθο τούτων, έχουν αναπτυχθεί πλήθος καινοτομιών ειδικά τα τελευταία 25 χρόνια όσον αφορά σε μεθόδους κατασκευής, στο βαθμό ελέγχου και στο εύρος προϊόντων (Εικόνα 2.2.1). (8)



Εικόνα 2.2.1:Εξέλιξη του προφίλ της σιδηροτροχιάς (8)

Για την κατασκευή των ραγών των σιδηροδρομικών γραμμών χρησιμοποιείται χάλυβας. Οι χαλύβδινες σιδηροτροχιές αντιστέκονται στην θραύση ακόμα και όταν περάσουν το όριο διαρροής. Επιπλέον, έχουν ικανοποιητική ολκιμότητα και δύναται να γίνει θερμική ενεργοποίηση διεργασιών που να ελέγχονται βιομηχανικά. Οι χάλυβες σιδηροτροχιών καλύπτονται από διεθνείς προδιαγραφές, όπως για παράδειγμα οι προδιαγραφές UIC (UIC = International Union of Railways). Κατά καιρούς, και πριν την ισχύ του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 13674-1 (2011), η ονοματολογία των διατομών των σιδηροτροχιών ήταν ποικίλη. Μετά

την προδιαγραφή των σιδηροτροχιών τύπου Vignole, υπάρχει πλέον μια ευρέως αποδεκτή ονομασία, η αντιστοίχιση της οποίας με παλαιότερες φαίνεται υπό μορφή Πίνακα.

Πίνακας 2.2.1 Παλαιά και νέα ονομασία διατομών σιδηροτροχιών

Σιδηροτροχιές τύπου Vignol (ονομασίες)	
ΝΕΑ	ΠΡΩΗΝ
50E4	UIC 50
54E1	UIC 54
60E1	UIC 60

Πριν από 30 και πλέον χρόνια οι τροχιές συνδέονταν μεταξύ τους μηχανικά και για να επιτρέπεται η θερμική διαστολή υπήρχε αρμός μεταξύ των άκρων. Όπως είναι λογικό οι μηχανικοί σύνδεσμοι αύξαναν και το κόστος συντήρησης και την κατανάλωση ενέργειας από τον συρμό, και φυσικά οδηγούσαν και σε δομική εξασθένιση της τροχιάς. Όσο τα μοντέρνα τρένα αύξαναν ταχύτητα τόσο εντονότερα έγιναν τα προβλήματα αυτά. Η βιομηχανία βρήκε την λύση με την ανάπτυξη Συνεχώς Συγκολλημένων Σιδηροτροχιών (ΣΣΣ, CWR – continuous welded rail) δηλαδή σιδηροτροχιές χωρίς αρμό. Πλέον είναι ευρέως διαδεδομένο στην παγκόσμια βιομηχανία σιδηροτροχιών λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων. Το μεγάλο πρόβλημα που εγείρεται είναι ότι λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών αναπτύσσονται μεγάλα θερμικά αξονικά φορτία τα οποία δεν μπορούν πλέον να εκτονωθούν αφού δεν αλλάζει το μήκος της τροχιάς που κατασκευάζονται σε μέρη άνω των 200m. Τα αξονικά (θλιπτικά) αυτά φορτία υπολογίζονται από την σχέση:

$$N_t = EA\alpha T_0$$

**Εξίσωση
2.7**

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young, A το εμβαδόν της διατομής και των δύο τροχιών της γραμμής, α ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής, ίσος για χάλυβα με $\alpha = 1.05 \times 10^{-5} /C^\circ$, και T_0 μια ομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας. (ισχύει για ελαστική απόκριση της δοκού)

Τα κύρια χαρακτηριστικά που είναι αναγκαία να έχει ο χάλυβας είναι,

- I. η αντίσταση στην φθορά
- II. η αντοχή στον εφελκυσμό
- III. η αντοχή σε κόπωση
- IV. και η συγκολλησιμότητα

Η περλιτική μικροδομή συνδυάζει σε μεγάλο βαθμό τις παραπάνω ιδιότητες. Για τον λόγο αυτό οι περλιτικοί χάλυβες χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή σιδηροτροχιών, τόσο

για τους υπέργειους σιδηροδρόμους όσο και για τους υπόγειους σιδηροδρόμους (μετρό). Ο χάλυβας σιδηροτροχιών παράγεται με τη μέθοδο εμφύσησης οξυγόνου σε ειδικό δοχείο τήξεως (μεταλλάκτη) και η χημική σύνθεση, για τρεις τυπικές ποιότητες χάλυβα σιδηροτροχιών δίνονται στο **Πίνακας 2.2.2**

Πίνακας 2.2.2 Χημική σύνθεση τυπικών χαλύβων σιδηροτροχιών (9)

Τύπος Χάλυβα	Αντοχή σε Εφελκυσμό	Χημική Σύνθεση			
		%C	%Si	%Mn	%P %S
900A	900	0,60-0,80	0,10-0,50	0,8-0,13	≤0,04
900B	900	0,55-0,75	0,10-0,50	1,3-1,7	≤0,04
700	700	0,40-0,60	0,05-0,35	0,8-1,25	≤0,05

Συνήθως η βιομηχανία σιδηροτροχιών παράγει το χάλυβα από scrap και από ανακύκλωση παλαιών σιδηροτροχιών με τήξη σε ηλεκτρικούς καμίνους στους 1600°C. Στην συνέχεια προστίθενται άνθρακας, μαγγάνιο και άλλα στοιχεία ανάλογα με τον κατασκευαστή για να αυξηθεί η αντοχή του χάλυβα. Μετά το κράμα ρέει σε έναν κεραμικό αγωγό όπου σφραγίζεται από την ατμόσφαιρα για να μην «μολυνθεί» με οξυγόνο. Κατόπιν ακολουθεί συνεχής εξέλαση και παράγονται μπιγιέτες (bloom) όπου κόβονται συνήθως σε 3,5 m μήκος. Οι μπιγιέτες αναθερμαίνονται στους 1250°C. Μετά ακολουθεί θερμή έλαση (rolling), του τεμαχίου πρώτης έλασης (bloom) τετραγωνικής διατομής με εμβαδόν $A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$ υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ραούλων (τυμπάνων). Αποτέλεσμα της έλασης είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Αυτοί οι ράβδοι ξανακόβονται στο απαραίτητο μήκος. Στο τελικό στάδιο διαμόρφωσης αφού αναθερμανθούν, τα προφίλ των σιδηροτροχιών παρασκευάζονται με έλαση όπως δείχνει η εικόνα 2.2.2. Τέλος ψύχονται στον αέρα ως του 500°C και αποθηκεύονται για να ψυχθούν σε 10 ώρες στην θερμοκρασία των 90°C. Μετά το πέρας των θερμικών κατεργασιών γίνεται εργοσκλήρυνση για αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων της τροχιάς.



Εικόνα 2.2.2: Τελικό προϊόν έλασης στην βιομηχανία σιδηροτροχιών. (9)

2.3 Μικροδομή και μηχανικές ιδιότητες περλιτικών χαλύβδινων σιδηροτροχιών.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται πειράματα που έχουν φανερώσει την εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με την δομή ενός χάλυβα. Συγκεκριμένα ο Gladman με εξίσωση για το όριο διαρροής φερροπερλιτικού χάλυβα δείχνει ότι η ενδολαμελική απόσταση των πλακιδίων φερρίτη και σεμεντίτη στη δομή του περλίτη παίζει όλο και σημαντικότερο ρόλο καθώς το ποσοστό του περλίτη στον χάλυβα μεγαλώνει. (10). Σε μια έρευνα των Hyzak και Bernstein (11) για πλήρως περλιτική μικροδομή σε χάλυβες με περιεκτικότητα 0.81%C, υπολογίστηκε όχι μόνο η επίδραση της ενδολαμελικής απόστασης (έστω λ_p), αλλά και η επίδραση του μεγέθους κόκκων του ωστενίτη (έστω d), και το μέγεθος της περλιτικής αποικίας (έστω P) που έχουν στις μηχανικές ιδιότητες. Το Σχήμα 2.3.1: Σκληρότητα και όριο διαρροής ως συνάρτηση της ενδολαμελικής απόστασης στον περλίτη για πλήρως περλιτική μικροδομή. δείχνει την εξάρτηση της σκληρότητας και του ορίου διαρροής με την ενδολαμελική απόσταση, και με την εξίσωση που ακολουθεί εισαγάγει μαζί με την ενδολαμελική απόσταση, την επίδραση του μεγέθους των κόκκων ωστενίτη και της περλιτικής αποικίας στο όριο διαρροής:

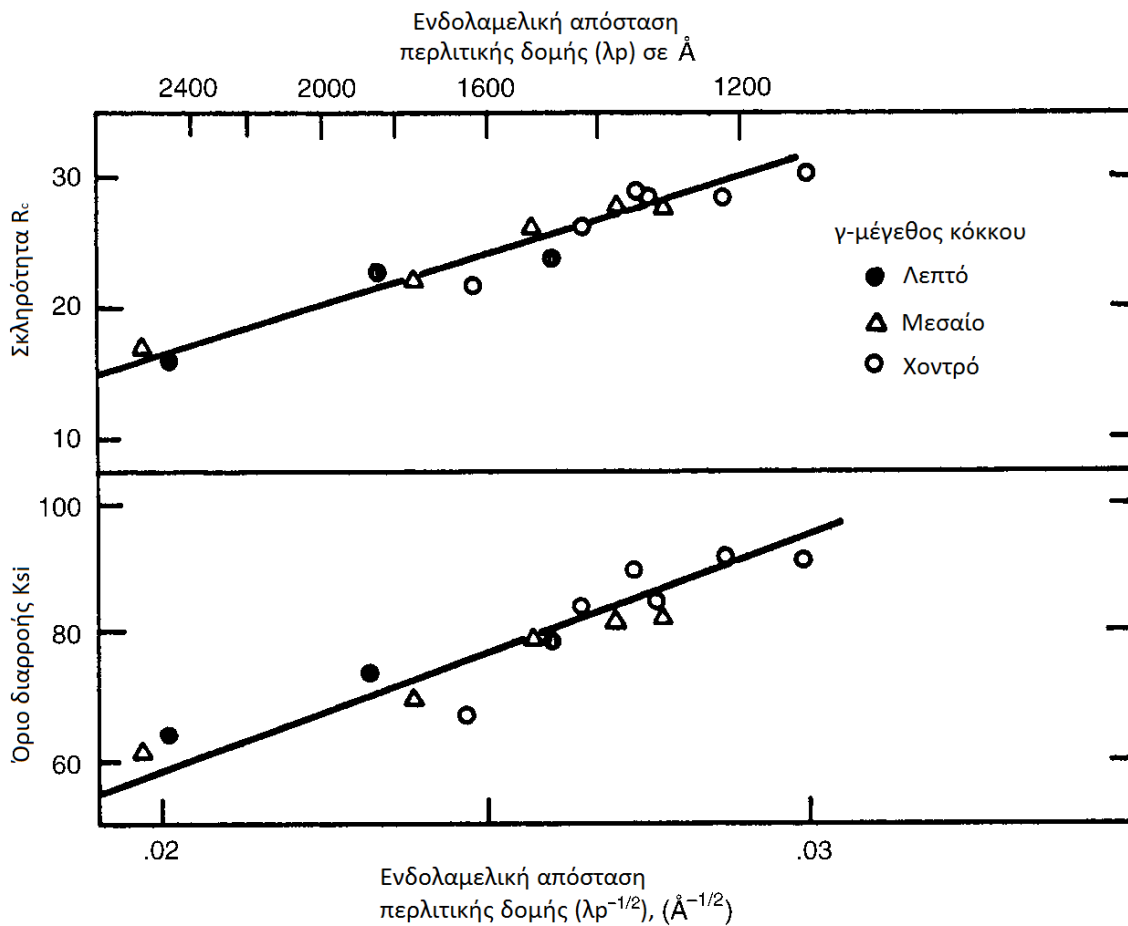
$$\text{Όριο διαρροής (MPa)} = 2,18(\lambda_p^{-1/2}) - 0,40(P^{-1/2}) - 2,88(d^{-1/2}) + 52,3 \quad \text{Εξίσωση 2.8}$$

Όπως φανερώνεται, η ενδολαμελική απόσταση είναι η κύρια μικρογραφική παράμετρος που ελέγχει την δύναμη της περλιτικής μικροδομής.

Η αντίσταση στη σκληρότητα ενός πλήρους περλιτικού χάλυβα κυρίως εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων ωστενίτη και σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (11):

$$\text{Ευτηκτοειδής θερμοκρασία (°C)} = -0,83(P^{-1/2}) - 2,98(d^{-1/2}) + 217,84 \quad \text{Εξίσωση 2.9}$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι η ευτηκτοειδής θερμοκρασία για πλήρως περλιτικό χάλυβα είναι φυσικά πάντα πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου, και ρωγμές κοντά στην θερμοκρασία δωματίου σχηματίζονται στο επίπεδο {100} του φερρίτη στον περλίτη. (11)

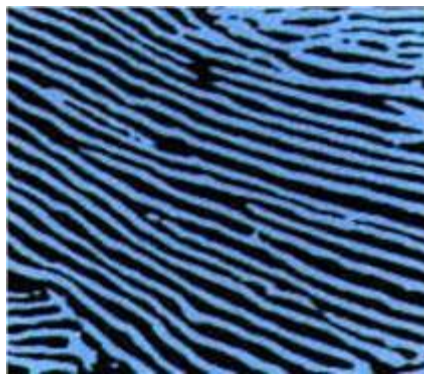


Σχήμα 2.3.1: Σκληρότητα και όριο διαρροής ως συνάρτηση της ενδολαμελικής απόστασης στον περλίτη για πλήρως περλιτική μικροδομή. (11)

Πολλές δημοσιεύσεις από διάφορα επιστημονικά συμπόσια ανέδειξαν τις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις που υπάρχουν για τις χαλύβδινες σιδηροτροχιές και τις διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για να βελτιωθούν οι ιδιότητες αυτών. (5). Οι ράγες υπόκεινται σε πολλές υψηλές κυκλικές φορτίσεις επαφής λόγω του αυξανόμενου βάρους των βαγονιών και των φορτίων. Τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται μέχρι και 100 - 125 τόνων χωρητικότητας αμαξοστοιχίες όπου όλο και αυξάνουν σε μέγεθος, και με όλο και αυξανόμενες ταχύτητες. Αυτές οι αυξημένες απαιτήσεις απαιτούν κατασκευαστικά και μεταλλουργικά νέες προσεγγίσεις που αναιρούν την φθορά καθώς και άλλου είδους αστοχίες και περιορίζουν την ζωή των σιδηροτροχιών. Οι αστοχίες που εμφανίστηκαν νωρίς στις σιδηροτροχιές συνδέθηκαν με εγκλωβισμένο υδρογόνο που παράγει υποεπιφανειακές μικρορωγμές ή αποφλοιώσεις σε πολύ βαριά τμήματα των γραμμών, αλλά αυτή η δυσκολία έχει αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με ελεγχόμενη απόψυξη και υπό κενό αφαίρεση αερίων του υγρού χάλυβα κατά τα πρώτα στάδια της κατεργασίας του.

2.4 Πλήρως περλιτικές χαλύβδινες σιδηροτροχιές

Όπως λοιπόν έχει παρουσιαστεί, ο περλίτης αποτελείται από μια μίξη σχετικώς μαλακής φάσης, τον φερρίτη και ενός σκληρού καρβιδίου, τον σεμεντίτη από σχηματίζουν παράλληλα πλακίδια. Επιτυγχάνεται υψηλή αντίσταση στη φθορά λόγω του σκληρού καρβιδίου και κάποιου βαθμού δυσθραυστότητα ως αποτέλεσμα της ικανότητας του φερρίτη να "ρέει" με ελαστική/πλαστική έννοια. Η Εικόνα 2.4.1 δείχνει την μικροδομή περλιτικής χαλύβδινης σιδηροτροχιάς.



Εικόνα 2.4.1: Μικροδομή περλιτικής χαλύβδινης σιδηροτροχιάς. Η ενδολαμελική απόσταση είναι 0.3μm. Χρωματικά ενισχυμένη εικόνα όπου ο σεμεντίτης είναι με ανοιχτό μπλέ και ο φερρίτης με μαύρο. (8)

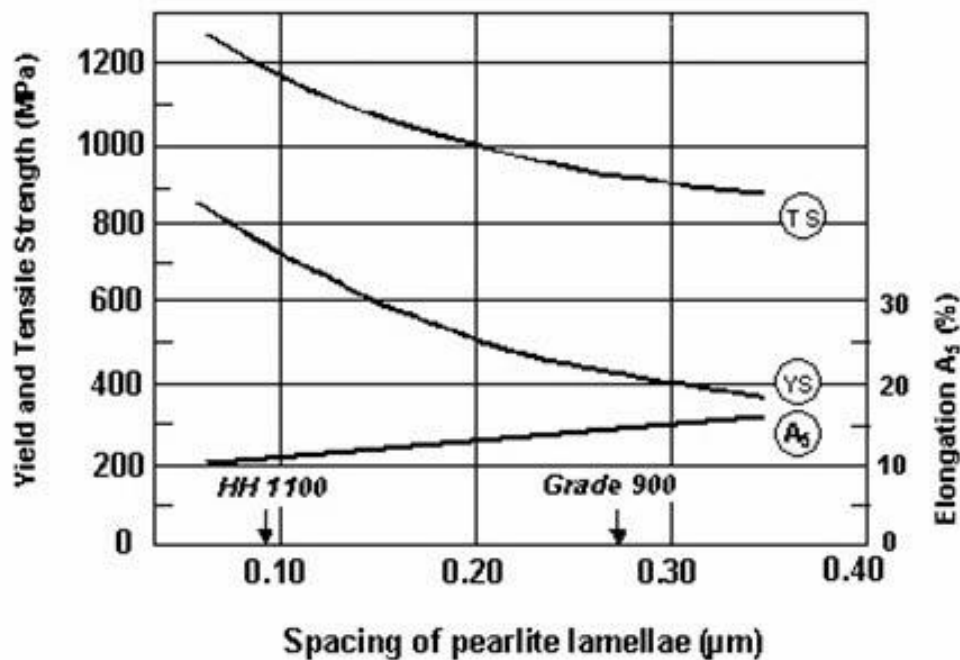
Ενας χάλυβας, που είχε ευρεία εφαρμογή σε συμβατικούς σιδηροδρόμους, είναι κατά UIC-860 ο χάλυβας Grade 700 με 0.4-0.6%C και μέγιστη αντοχή εφελκυσμού 680-730MPa. Ο τύπος σιδηροτροχιάς Grade 700 ήταν ο κυρίαρχος τύπος πριν από 65 χρόνια και μπορεί να θεωρηθεί η αρχή της ανάπτυξης που υπάρχει από τότε και έπειτα. Ο Grade 700, έχει μικροδομή με περίπου 30% φερρίτη και 70% περλίτη στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς όπου είναι και το σημείο που γίνεται η επαφή στην κύλιση των τροχών των συρμών που έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του προφίλ της κεφαλής της σιδηροτροχιάς.

Λόγω της σχετικά αργής απόψυξης των κεφαλών σιδηροτροχιών μετά τις κατεργασίες, η περλιτική δομή ήταν σχετικά χοντρόκοκκη (δηλαδή μεγάλο λ_p). Το πρώτο βήμα για να αυξηθεί η αντοχή των υλικών, και κατά συνέπεια και η αντίσταση στη φθορά, ήταν να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε άνθρακα ώστε να επιτευχθεί 100% περλιτική μικροδομή. Με αυτό ακριβώς τον τρόπο αναπτύχθηκαν οι σιδηροτροχιές τύπου Grade 900.

Ο τύπος Grade 900 με αντίσταση στη φθορά, έχει μια χονδροκόκκη περλιτική μικροδομή με επαρκή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα για γενικές εφαρμογές. Όπως έχει αναφερθεί τεχνικές συγκόλλησης που αναπτύχθηκαν, αντικατέστησαν τους μηχανικούς συνδέσμους και ο τύπος Grade 900 εδραιώθηκε στις σιδηροτροχιές ως ο κύριος στη θέση του Grade 700. Στη σύγχρονη εποχή, ράγες Grade 700 χρησιμοποιούνται μόνο σε γραμμές που ασκούνται χαμηλά αξονικά φορτία όπως για παράδειγμα το Τραμ. Σε μερικές περιπτώσεις όπως σημεία με κλειστές στροφές και βραχώδη περιοχές αλλά κυρίως όταν μεταφέρονται βαριά φορτία όπως μεταλλεύματα, οι επιβαλλόμενες αξονικές δυνάμεις ξεπερνούν τα όρια αντοχής του

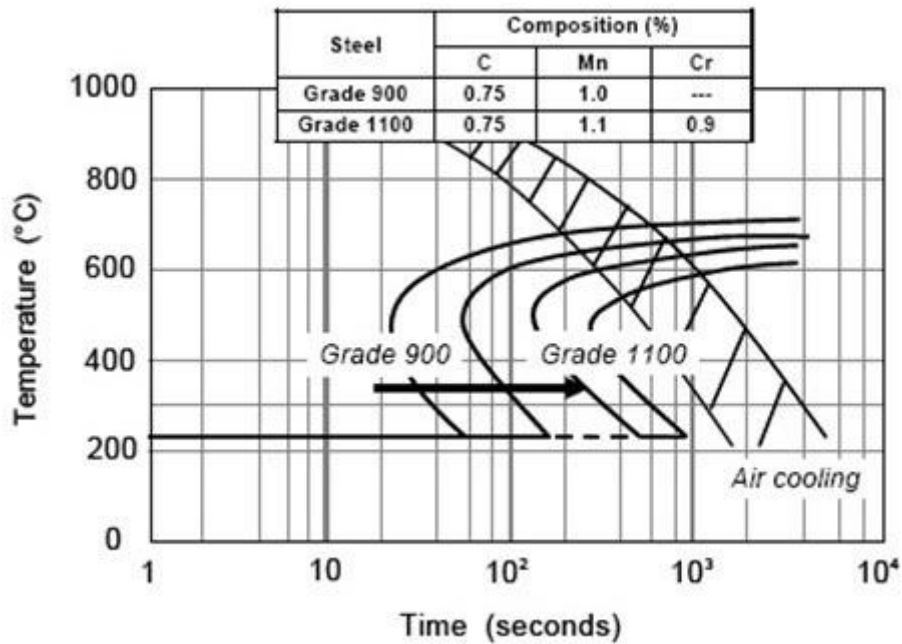
χάλυβα Grade 900. Μια αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό κατά 200 MPa διπλασιάζει την αντίσταση σε φθορά της τροχιάς και κατά συνέπεια την ζωή της.

Η περαιτέρω αύξηση της αντοχής εφελκυσμού των περλιτικών σιδηροτροχιών στα 1100–1200 MPa βασίζεται στην εκλέπτυνση των πλακιδίων του περλίτη. Όπως έχει αναφερθεί και σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.1 οι ιδιότητες του χάλυβα σιδηροτροχιών σχετίζονται άμεσα από την ενδολαμελική απόσταση. Το όριο διαρροής και η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνει καθώς μειώνεται η ενδολαμελική απόσταση ενώ η επιμήκυνση.



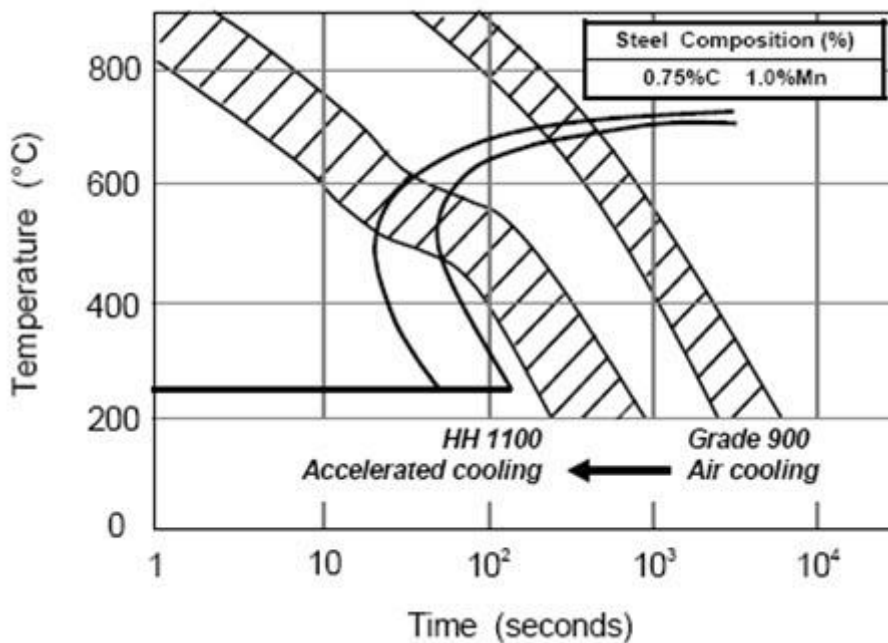
Σχήμα 2.4.1: Επίδραση της ενδολαμελικής απόστασης στις ιδιότητες χαλύβδινης σιδηροτροχιάς (8)

Το διάγραμμα μετασχηματισμού συνεχής απόψυξης (CCT) για χάλυβα Grade 900 δείχνει δύο πιθανούς τρόπους να επιτευχθεί εκλεπτυσμένη περλιτική μικροδομή. Ο πρώτος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα CCT για την επίδραση των κραματικών στοιχείων στην επίτευξη εκλεπτυσμένης περλιτικής μικροδομής, είναι η μετακίνηση προς τα δεξιά της περιοχής του μετασχηματισμού ωστενίτη σε περλίτη. Για παράδειγμα με την προσθήκη χρωμίου και άλλων κραματικών στοιχείων, έτσι ώστε η ψύξη με αέρα της κεφαλής της σιδηροτροχιάς να μετασχηματίσει τον ωστενίτη σε λεπτομερή περλίτη με μικρή ενδολαμελική απόσταση. Αυτός ο τύπος χάλυβα Grade 1100-1200, είναι ψηλής αντοχής και αντίστασης στη φθορά, και η ψύξη του γίνεται στον αέρα μετά την έλαση.



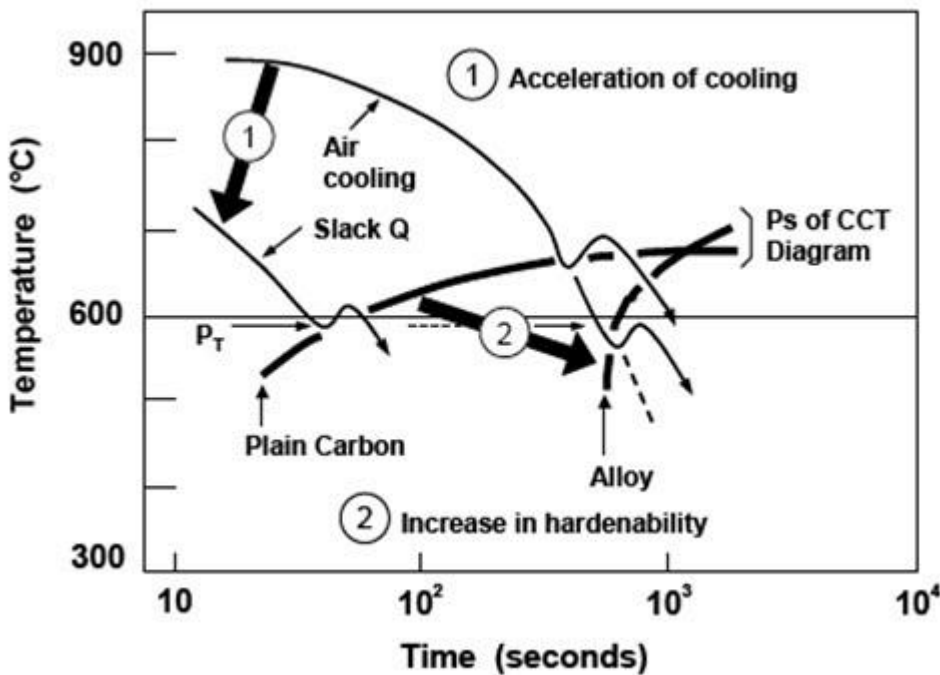
Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα CCT για την επίδραση των κραματικών στοιχείων στην επίτευξη εκλεπτυσμένης περλιτικής μικροδομής. (8)

Ο δεύτερος είναι η επιτάχυνση της απόψυξης της κεφαλής της σιδηροτροχιάς ώστε να μετακινηθεί ο ωστενίτης στην περιοχή μετασχηματισμού σε περλίτη. Όπως φαίνεται δηλαδή στο Σχήμα 2.4.3 να μετακινηθεί ο χάλυβας Grade900 προς τα αριστερά ώστε να επιτευχθεί λεπτότερη μικροδομή πλακιδίων περλίτη, με 1100-1200MPa αντοχή στον εφελκυσμό με την ίδια σύνθεση χάλυβα.



Σχήμα 2.4.3: Διάγραμμα CCT, επίδραση της ταχύτητας απόψυξης στη λεπτότητα της περλιτικής μικροδομής. (8)

Οι διαφορές στην θερμοκρασία περλιτικού μετασχηματισμού με αυτούς τους δύο τρόπους που παρουσιάστηκαν, προκλήθηκαν από τις διαφορές στην ταχύτητα απόψυξης και παρουσιάζονται σχηματικά από το διάγραμμα CCT στο Σχήμα 2.4.4. Για να επιτευχθεί η θερμοκρασία μετασχηματισμού (περίπου 600 °C), απαιτείται "μικρή" βαφή (ταχύτητα απόψυξης 4-6 °C/s) για τον χάλυβα με κύριο κραματικό στοιχείο τον άνθρακα, ενώ για τον χάλυβα με τα πολλά κραματικά στοιχεία αρκεί η ψύξη στον αέρα μετά την θερμή έλαση λόγω της υψηλής σκλήρωσης από τα κραματικά στοιχεία. Αυτοί λοιπόν οι μέθοδοι μπορούν να προσδώσουν στους χάλυβες πάνω από 1100MPa αντοχή στον εφελκυσμό. (8)



Σχήμα 2.4.4: Θερμοκρασίες περλιτικού μετασχηματισμού σε υψηλής αντοχής χάλυβες σιδηροτροχιών, σε σχέση με την ταχύτητα απόψυξης και την περιεκτικότητα κραματικών στοιχείων. (8)

3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

3.1 Θραυστομηχανική

Θραύση ονομάζεται ο διαχωρισμός ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, υπό την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η θραύση επέρχεται σε δύο ξεχωριστά στάδια, την πυρήνωση (initiation) και την διάδοση (propagation) ρωγμών. Η θραύση των υλικών γενικά διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: όλκιμη (ductile) και ψαθυρή (brittle). Στην όλκιμη θραύση αρχικά ένα μεγάλο ποσοστό παραμορφώνεται πλαστικά και στην συνέχεια διαδίδεται η ρωγή, έως την τελική θραύση. Αντίθετα, στην ψαθυρή θραύση έχουμε ταχεία διάδοση των ρωγμών και επέρχεται θραύση χωρίς την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων. Το πώς θα συμπεριφερθεί ένα υλικό είναι εν μέρει μια ιδιότητα του υλικού αλλά η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης σε όλκιμα υλικά αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας, την αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία ασυνεχειών στο υλικό. Η ψαθυρή θραύση, ακριβώς επειδή συμβαίνει ακαριαία και χωρίς προειδοποίηση, είναι συνήθως ιδιαίτερα καταστροφική και ο σχεδιασμός κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της.

Η ύπαρξη μιας γεωμετρικής ασυνέχειας σε ένα υλικό, όπως για παράδειγμα μία τρύπα ή μία εγκοπή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιόμορφης κατανομής της τάσης κοντά στην περιοχή της ασυνέχειας. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει συγκέντρωση τάσεων (stress concentration) κοντά στην ασυνέχεια και η συνολική τάση στα σημεία αυτά είναι πολύ υψηλότερη.

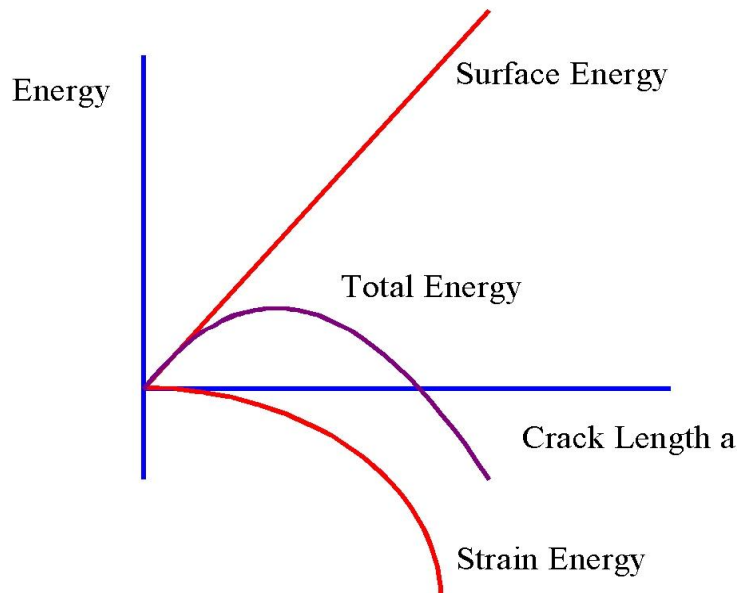
Πρώτος ο A. Griffith το 1920 προσπάθησε να παντρέψει τη πειραματική αντοχή στη θραύση με την αντοχή στην θεωρία. Παρότι σήμερα αναγνωρίζεται ότι η θεωρία Griffith ισχύει απόλυτα μόνο για πολύ ψαθυρά υλικά, όπως για παράδειγμα το γυαλί, οι ιδέες που εισήγαγε η θεωρία αυτή ήταν πολύ διαφωτιστικές και για την θραύση πιο όλκιμων υλικών, όπως είναι τα μέταλλα.

Η εξίσωση του Griffith περιγράφει την σχέση μεταξύ ονομαστικής εφαρμόσιμης τάσης και μήκος ρωγμής τη στιγμή της θραύσης, δηλαδή όταν γίνεται ενεργειακά προτιμητέο να αναπτυχθεί μια ρωγή. Ο Griffith ήταν ενήμερος σχετικά με την ενεργειακή της θραύσης και έτσι συνυπολόγισε ότι οι αλλαγές στην ενέργεια σχετίζονται με την σταδιακή επέκταση των ρωγμών.

Για ένα μηχανικά φορτισμένο εύθραυστο σώμα που υπόκειται σε μια αναπτυσσόμενη ρωγή, οι μόνοι αρωγοί στην αλλαγή της ενέργειας είναι η ενέργεια από τις ελεύθερες επιφάνειες που εμφανίζεται από τις νέες ρωγμές (δύο επιφάνειες για κάθε ρωγή) και η συνολική δυναμική ενέργεια του σώματος.

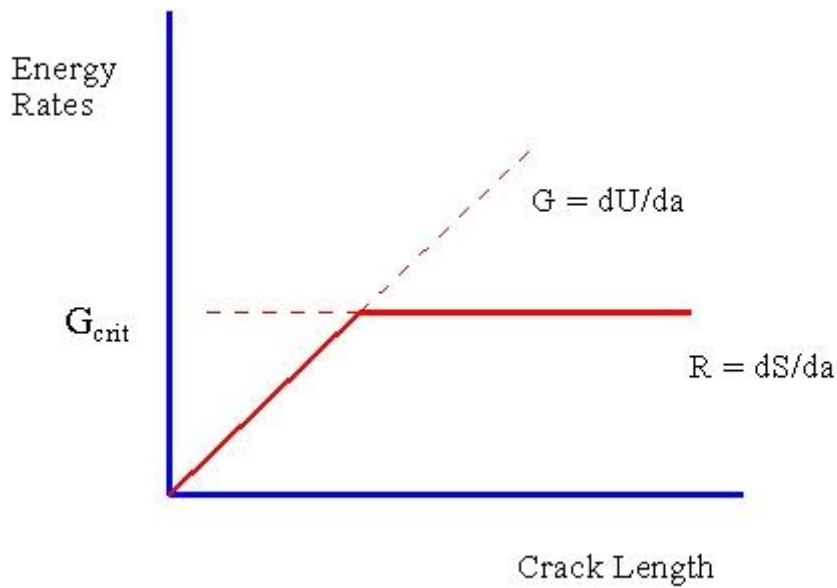
Η ενέργεια επιφάνειας (S) αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απορροφάται κατά την ανάπτυξη μια ρωγμής, ενώ ένα μέρος αποθηκευμένης ενέργειας παραμόρφωσης απελευθερώνεται (U) καθώς η ρωγή προχωράει (λόγω της αποφόρτισης περιοχών

παρακείμενων σε επιφάνειες που εμφανίζονται λόγω της ρωγμάτωσης). Η ενέργεια επιφάνειας (surface energy) είναι μια σταθερή τιμή ανά μονάδα εμβαδού και ως εκ τούτου είναι μια γραμμική συνάρτηση του μήκους ρωγμής, ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια παραμόρφωσης (strain energy) που απελευθερώνεται κατά την ανάπτυξη ρωγμής είναι συνάρτηση του μήκους ρωγμής αλλά παραβολική. Αυτές οι διαφορές παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.1.1**.



Σχήμα 3.1.1: Διάγραμμα ενέργειας προς μήκος ρωγμής (a) για ενέργεια επιφάνειας (S), ενέργεια παραμόρφωσης (U) και συνολική ενέργεια.

Επόμενο στάδιο σύμφωνα με τον Griffith είναι ο συνυπολογισμός του ρυθμού μεταβολής ενέργειας καθώς αναπτύσσεται η ρωγμή, επειδή η κρίσιμη κατάσταση αντιστοιχεί στο υψηλότερο σημείο της καμπύλης της συνολικής ενέργειας, δηλαδή εκεί όπου η παράγωγος μηδενίζεται. $dW/da=0$. Για αυτό το σημείο ονομάζουμε το μήκος ρωγμής $a=a^*$. Για μήκη ρωγμής μεγαλύτερα από αυτό (υπό δοσμένη τάση εφαρμογής), το σώμα θα χαμηλώσει την ενέργεια του, κάτι το οποίο ευνοείται, και αυθόρμητα επέρχεται γρήγορα η θραύση. Επιτυγχάνεται $dW/da=0$ όταν $dS/da=dU/da$. Στο Σχήμα 3.1.2 παρουσιάζονται τα προηγούμενα.



Σχήμα 3.1.2: Ρυθμός μεταβολής ενέργειας προς μήκος ρωγμής.

Όπου R είναι η αντίσταση στην περαιτέρω αύξηση της ρωγμής(=dS/da) και G είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης =(dU/da).

Όταν θραύεται το υλικό, το R=G και ορίζεται το G_c ως την κρίσιμη τιμή απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης. Συνεπώς το G_c συμβολίζει την δυσθραυστότητα των υλικών. Η εξίσωση του Griffith για επίπεδες τάσης είναι:

$$\sigma_f = \left[\frac{G_c E'}{\pi a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Όπου σ_f η τάση θραύσης σε Pa, G_c η κρίσιμη τιμή απελευθέρωσης ενέργειας σε N/m, E η πίεση σε N/m² και a το μήκος ρωγμής σε m.

3.2 Κόπωση

Κόπωση γενικά ονομάζουμε την αλλαγή των ιδιοτήτων των υλικών που οφείλονται στην εφαρμογή κυκλικών φορτίσεων.

Η φθορά των σιδηροτροχιών έχει εξεταστεί πειραματικά από διάφορα εργαστήρια και σε διάφορες εγκαταστάσεις. Αυτές που ξεχωρίζουν, είναι οι εγκαταστάσεις FAST (Facility for Accelerated Service Testing) στο Πουέμπλο του Κολοράντο όπου εδράζεται ένας βρόχος γραμμών μήκους 7.7km. Εκεί αμαξοστοιχίες με βάρος 9500 τόνων συμπλήρωναν 120 γύρους καθημερινά ώστε να μπορεί να γίνει ανάλυση της απόδοσης των σιδηροτροχιών σε πραγματικές συνθήκες. (12). Σε μελέτη που έγινε στις εγκαταστάσεις FAST, η φθορά βρέθηκε να είναι μια διαδικασία **τριών σταδίων**:

- Το πρώτο στάδιο χαρακτηρίζεται από τις αρκετές πλαστικές παραμορφώσεις ενός λεπτού στρώματος της σιδηροτροχιάς, της τάξης του 0,1mm σε βάθος, ως αποτέλεσμα των επαναλαμβανόμενων θλιπτικών και διατμητικών φορτίσεων που προκύπτει από την αμαξοστοιχία που περνάει. Δυο διαφορετικοί χάλυβες δοκιμάστηκαν και το βάθος της παραμόρφωσης ήταν μικρότερο στον σκληρότερο χάλυβα.
- Στο δεύτερο στάδιο αναπτύσσονται υποεπιφανειακές ρωγμές στο εξαιρετικά παραμορφωμένο στρώμα, κυρίως στα σημεία επαφής των παραμορφωμένων στρωμάτων με τη μη παραμορφωμένη δομή.
- Τέλος, το τρίτο στάδιο φθοράς αφορά την διάδοση των ρωγμών, που έχουν αναπτυχθεί στο 2^ο στάδιο, ως την επιφάνεια και την αποφλοιώση μικρών κομματιών.

Αυτή η ακολουθία παραμόρφωσης και αποφλοιώσης επαναλήφθηκε πολλές φορές για να δημιουργηθεί μια αξιοσημείωτη φθορά των σιδηροτροχιών.

3.3 Ρωγμές λόγω κόπωσης από κύλιση εξ επαφής

RCF είναι μια οικογένεια καταστρεπτικών φαινομένων που εμφανίζονται στην επιφάνεια ή εσωτερικά των σιδηροτροχιών λόγω της υψηλής κόπωσης του χάλυβα των σιδηροτροχιών. Αυτή η ζημιά μπορεί να εμφανιστεί πρώτα στην επιφάνεια (επιφανειακή ρωγμάτωση, αποφλοιώση, κηλίδες) ή υποεπιφανειακά (βαθιά εσωτερική παραμόρφωση). Σε κάθε περίπτωση αυτά τα φαινόμενα είναι αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενων φορτίσεων του επιφανειακού ή υποεπιφανειακού υλικού από τους εκατοντάδες, χιλιάδες ή εκατομμύρια κύκλους επαφής επαφής τροχού- σιδηροτροχιάς. (13)

Στο δίκτυο της Αττικό Μετρό τα καταστρεπτικά φαινόμενα RCF εμφανίζονται μόνο επιφανειακά, σύμφωνα με τον Τεχνικό Επιβλέποντα Συντήρησης.

3.3.1 Δημιουργία Επιφανειακής Ρωγμάτωσης

Κατά μέσο όρο γίνονται 1.723.000 επαφές τροχού-τροχιάς ετησίως (24,5MGT). Ενώ οι περισσότερες από αυτές γίνονται χωρίς να προκαλούνται ζημιές, ένα μέρος προκαλεί πλαστική παραμόρφωση στον χάλυβα στην κατεύθυνση της κίνησης.

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι RCF δεν μπορούν να αξιολογηθούν βάσει της κανονικής τάσης επαφής εφόσον η αλληλεξάρτηση της πρόσφυσης και αντοχής υλικού στη διάτμηση είναι πολύ έντονη. Για να προσδιοριστεί η επίδοση του τροχού/τροχιάς συνυπολογίζοντας την κόπωση εξ επαφής απαιτείται να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες τρεις παράμετροι.

A. Πίεση εξ επαφής τροχού/σιδηροτροχιάς.

Η φυσιολογική πίεση εξ επαφής είναι μια συνάρτηση τεσσάρων κυρίων παραγόντων: διάμετρος τροχού, φορτίο τροχού (συμπεριλαμβανομένων και των πιθανών δυναμικών φορτίων), το εγκάρσιο προφίλ της σιδηροτροχιάς και το εγκάρσιο προφίλ του τροχού. Σύμφωνα με τις εξισώσεις ελαστικής επαφής του Hertz , διπλασιάζοντας το φορτίο του τροχού η πίεση επαφής αυξάνεται κατά 27%, τριπλασιάζοντας το φορτίο, η πίεση αυξάνεται κατά 44%. Στη περίπτωση όπου όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμένουν ως έχουν, η επίδραση της διαμέτρου του τροχού περιορίζεται παρόμοια στο 1/3 της δύναμης της συνάρτησης. Τέλος το προφίλ τροχού και σιδηροτροχιάς επηρεάζουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την πίεση επαφής. Εάν σε ένα από τα δύο υπάρχουν ανεπιθύμητες αποκλίσεις από το σχέδιο (π.χ. που παρέχει ο προμηθευτής), όπως πάσα από την λείανση που δεν συνδέονται σωστά, στρέψη σιδηροτροχιάς κ.α. τότε η πίεση επαφής μπορεί να μεταβληθεί κατά 300% ή και παραπάνω σε πραγματικές συνθήκες.

Στη πράξη υπάρχουν πολλές συνθήκες που επηρεάζουν τη θέση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς και κατ'επέκταση την πίεση επαφής όπως το εύρος τροχιάς, ατέλειες στο προφίλ των συγκολλήσεων, υπερβολική ή ελλιπή επίκλιση, σφάλματα γεωμετρίας κ.α. (13)

Το μέγιστο φορτίο τροχού στο δίκτυο της Αττικό Μετρό Α.Ε είναι 7 T. Η διάμετρος τροχού είναι 860mm η μέγιστη και 780mm ελάχιστη. Στους Τροχούς εφαρμόζεται προφίλ ORE S 1002 και στην σιδηροτροχιά τυπικό UIC 54.

B. Τριβή τροχού/τροχιάς

Η τριβή μεταξύ τροχού/τροχιάς αναπτύσσεται λόγω μικρού σχετικά γλιστρήματος στη επιφάνεια όπου έρχονται σε επαφή. Το επίπεδο της μετατόπισης (παραμόρφωση) εξαρτάται από την καμπυλότητα και την πρόσφυση. Αυτές οι δυνάμεις παραμόρφωσης, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις δυνάμεις συνάφειας που υπάρχουν- κάθετη δύναμη στον τροχό επί τον συντελεστή τριβής. Ο έλεγχος της τριβής είναι λοιπόν μια διαδικασία ελέγχου των ιδιοτήτων της επιφάνειας διεπαφής και ελαχιστοποίησης της παραμόρφωσης.

Με λιπαντικό μειώνεται αισθητά η στιγμιαία δύναμη τριβής. Αυτό είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στο σημείο του Gauge corner για να ελεγχθεί η φθορά αλλά στην επιφάνεια κύλισης απαιτείται ένας συντελεστής τριβής μεγαλύτερος του 0.3 για την πέδηση και την έλξη. Η επιφανειακή τριβή εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως **καμπυλότητα, ανάρτηση φορτίου, συντελεστής τριβής και έλλειψη επίκλισης.**

C. Μεταλλουργία σιδηροτροχιάς

Η επίδραση της σύστασης της σιδηροτροχιάς στις ρωγμές RCF είναι σύνθετη. Από εργαστηριακές μελέτες προκύπτουν δύο γενικά συμπεράσματα. Πρώτον, για δεδομένο βαθμό

σκληρότητας οι περλιτικοί χάλυβες έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε RCF από άλλες δομές όπως ο μπαινίτης και ο μαρτενσίτης. Δεύτερον, για οποιαδήποτε μικροδομή χάλυβα, η αντίσταση στο φαινόμενο RCF αυξάνεται με την αύξηση της σκληρότητας.

Από μελέτες στην Μ. Βρετανία έχει φανεί ότι οι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι πιο επιρρεπείς στον σχηματισμό RCF. Αυτό οφείλεται στο ότι υπήρχε μεγάλη καταπόνηση χωρίς να υπάρχει φθορά ή απορροή μετάλλου, ώστε να σχηματιστεί ένα προφίλ πιο ανθεκτικό στην καταπόνηση. Επίσης εάν η σιδηροτροχιά προλειανθεί σε ένα προφίλ χαμηλότερου βαθμού καταπόνησης, τότε οι σκληροί χάλυβες γίνονται πολύ πιο ανθεκτικοί στα φαινόμενα RCF από άλλους πιο μαλακούς.

Σημαίνοντα ρόλο παίζει η εξέλιξη της επιφανειακής ρωγμάτωσης όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενη ενότητα. Ο ρυθμός εξέλιξης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και ένας από αυτούς είναι η παρουσία νερού και γράσου στην επιφάνεια διεπαφής. Το νερό και το γράσο έχουν σημαντικό ρόλο στον ρυθμό και το βάθος της εξάπλωσης. Εάν γράσο ή άλλα παχύρρευστα λιπαντικά εισχωρήσουν σε ρωγμή, η μείωση της τριβής στο σημείο έναρξης της ρωγμής συνεισφέρει στον μετριασμό της εξάπλωσής της. Αντίθετα το νερό με το νερό με το χαμηλό ιξώδες του εισχωρεί μέσα στην ρωγμή. Στη συνέχεια με την επαφή τροχού/σιδηροτροχιά το σημείο σφραγίζεται και τέλος το νερό πιέζεται υδραυλικά στην άκρη της ρωγμής και ενισχύει την εξάπλωσή της.

Όταν η ρωγμάτωση φτάσει σε βάθος μεγαλύτερο από 8-15mm είναι εκτός του πεδίου επιρροής της καταπόνησης από την έλαση. Πέρα από αυτό το βάθος μπορεί να συνεχιστεί να εξελίσσεται λόγω των θερμικών καταπονήσεων όπως εφελκυστηκές δυνάμεις λόγω ψύχους.

3.3.2 Μαγικός Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (Magic Wear Rate) και η λείανση σιδηροτροχιάς

Το κλειδί για την κατανόηση του οφέλους οποιασδήποτε στρατηγικής ελέγχου των φαινομένων RCF είναι να εκτιμηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της αρχικής εμφάνισης και εξέλιξης της ρωγμής.

- A. Για να προκύψει ρωγμάτωση σε μια αρχικά καθαρή επιφάνεια, χρειάζεται καθορισμένους κύκλους φορτίου, δεν είναι άμεση. Μελέτες πάνω στο αντικείμενο δείχνουν ότι χρειάζεται φορτίο 3-6 MGT. Μεταλλουργικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι στην αρχική τους μορφή οι ρωγματώσεις έχουν μήκους κλάσματος του χιλιοστού και εξελίσσονται σε γωνία 5εως 15 μοιρών σε σχέση με την επιφάνεια.
- B. Αυτές οι επιφανειακές μικρορωγμές αρχικά εξαπλώνονται αργά, μετά γρήγορα και μετά πάλι αργά. Εξελίσσονται γρήγορα στο μεσαίο μήκος περίπου 5-10mm και σε βάθος περίπου 1-3mm. Σε μεγαλύτερα μήκη και βάθη η εξάπλωση προχωρά με σχετικά αργό ρυθμό.

Αμφότερες η αρχική εμφάνιση και η εξέλιξη της ρωγμάτωσης επηρεάζονται από τον ρυθμό φθοράς του υλικού της επιφάνειας- όπου περιλαμβάνεται φθορά λόγω διεπαφής

τροχού/σιδηροτροχιάς, διάβρωση, τροχίσματα και συντηρήσεις όπως η λείανση και το πλάνισμα (grinding – milling). Η συνεχής και συστηματική αφαίρεση μιας μικρής ποσότητας υλικού, αποκόπτει τις υπάρχουσες ρηγματώσεις και ταυτόχρονα εξαλείφει την αρχική εμφάνιση επιφανειακών ρηγματώσεων. Η ιδανική κατάσταση είναι συνεχώς να αφαιρείται ακριβώς η απαιτούμενη ποσότητα υλικού ώστε να ελεγχθεί η αρχική εμφάνιση και η εξέλιξη των ρηγματώσεων όσο ο ρυθμός είναι ακόμα αργός. Αυτός ο ρυθμός αφαίρεσης μετάλλου ονομάζεται Magic Wear Rate (MWR).

Ο MWR εξαρτάται από τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε σιδηροτροχιάς και περιλαμβάνει παραμέτρους που συνδέονται με την πίεση επαφής, την τριβή, τη σύσταση της σιδηροτροχιάς και το περιβάλλον της σιδηροτροχιάς (όπως λίπανση, υγρασία κ.α.).

Ο MWR είναι λοιπόν ο μικρότερος ρυθμός αφαίρεσης υλικού που κρατά την σιδηροτροχιά ασφαλή από το φαινόμενο RCF και της εξασφαλίζει την μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής. Τέλος, παρέχει την βάση για την στρατηγική λείανσης. (13)

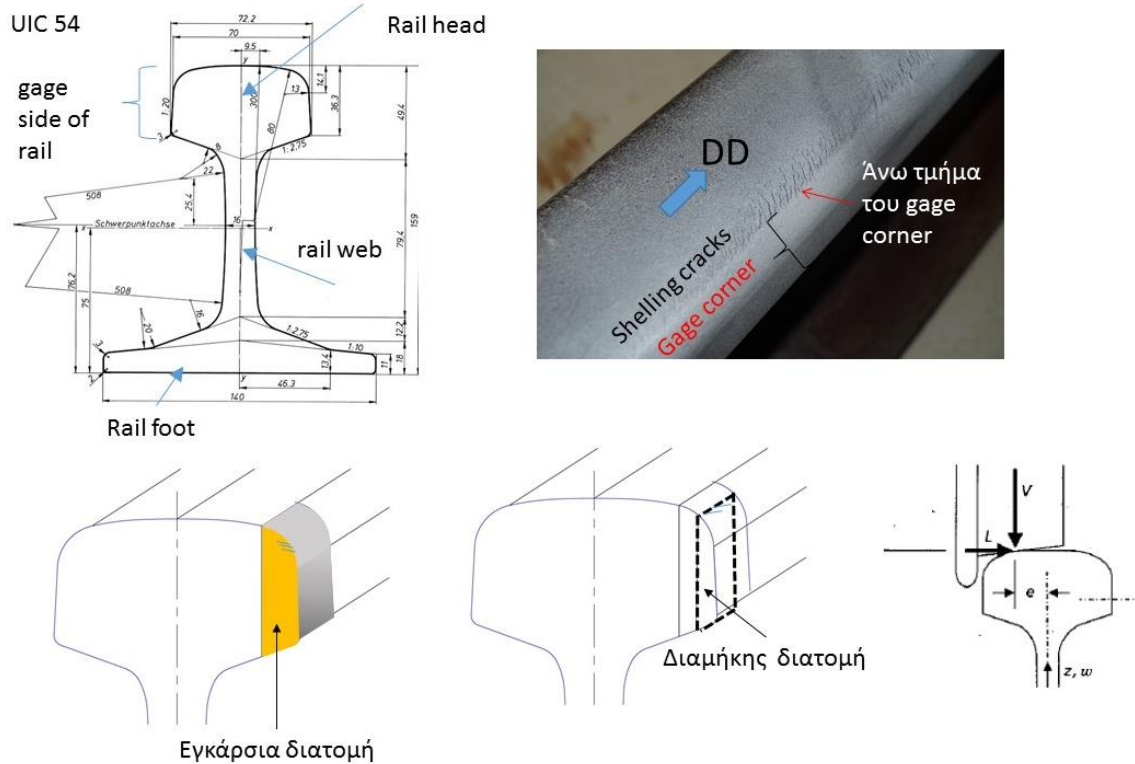
3.3.3 Έλεγχος και Αντιμετώπιση των φαινομένων RCF- Συγκεντρωτικά

Υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός πρακτικών στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων που συνδέονται με τα φαινόμενα RCF και αυτοί είναι:

- Λείανση σιδηροτροχιών: Το πιο ισχυρό εργαλείο για την αφαίρεση του RCF.
- Βελτίωση των προφίλ τροχού/σιδηροτροχιάς.
- Εγκατάσταση σιδηροτροχιών σκληρότερου και πιο καθαρού χάλυβα.
- Διαχείριση τριβής: Ρύθμιση του συντελεστή τριβής στην κεφαλή σιδηροτροχιάς, μεταξύ 0.3-0.35. Αποφυγή της υπερβολικής λίπανσης.
- Ρύθμιση του εύρους: Να αποφεύγεται το στενό εύρος και σε καμπύλες η διαπλάτυνση να μην ξεπερνά τα 12mm
- Έλεγχος με συσκευές ανίχνευσης ρηγματώσεων και διαχείριση των δεδομένων ως μέρος του σχεδιασμού λείανσης.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Υλικά και Δοκίμια με τα Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά.



Εικόνα 4.1.1 (πάνω αριστερά) Γεωμετρικά στοιχεία σιδηροτροχιάς UIC 54 και ονοματολογία των διαφόρων τμημάτων της. (πάνω δεξιά) Δίκτυο σχεδόν παράλληλων ρωγμών, που ξεκινούν από το άνω τμήμα του gage corner και κατευθύνονται προς τον κεντρικό άξονα της σιδηροτροχιάς. Ο σχηματισμός αυτός είναι γνωστός ως Shelling. Με το βέλος υποδεικνύεται η κατεύθυνση κίνησης του συρμού (Direction of Drive, DD). Η φωτογραφία έχει νιοθετηθεί από το Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας. (κάτω αριστερά) Σ' αυτό το σχήμα φαίνεται η θέση στη σιδηροτροχιά του δοκιμίου που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις της εγκάρσιας διατομής. (κάτω μέση) Αυτό το σχήμα δείχνει το δοκίμιο για τις μετρήσεις στη διαμήκη διατομή. ((κάτω δεξιά) Φόρτιση σιδηροτροχιάς από τροχή

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική ήταν τμήματα σιδηροτροχιάς μήκους 1 m, τα οποία μας τα παρέιχε η ΣΤΑ.ΣΥ. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η ονομασία των διαφόρων μερών της σιδηροτροχιάς παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.1.1 (πάνω αριστερά). Στο δίκτυο του Αττικό Μετρό χρησιμοποιούνται δύο τύποι σιδηροτροχιάς. (πληροφορίες ελήφθησαν από την Υπηρεσία Συντήρησης Σιδηροδρομικής Επιδιομής)

- **UIC 54 Grade 900:** Είναι περλιτικός χάλυβας με πιθανότητα παρουσίας φερρίτη και σκληρότητα 260HBW
- **UIC 54HSH:** Είναι καθαρός περλιτικός χάλυβας (Fine perlitic) και σκληρότητας 350 HT HBW

Από την ΣΤΑ.ΣΥ δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί η θέση των τμημάτων αυτών στο δίκτυο του ΜΕΤΡΟ. Τα τμήματα αυτά ανήκουν σε μεταβατικά σημεία, πριν από στροφές, και αφορούν την εξωτερική σιδηροτροχιά του ζεύγους (high-rail).

Οι μετρήσεις έγιναν σε διαμήκη και εγκάρσια τομή σιδηροτροχιάς της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ η οποία εμφάνιζε ρωγμές RCF. Η θέση των δοκιμών στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς φαίνεται στην εικόνα 4.1.1. Η επιφάνεια της διαμήκους και της εγκάρσιας τομής της σιδηροτροχιάς είχε λειανθεί με την τυπική διαδικασία παρασκευής δοκιμών για παρατήρηση της μικροδομής σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Οι λειασμένες επιφάνειες έγιναν στο εργαστήριο μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

4.2 Φυσική Αρχή

Η μελέτη μας έγινε με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα της εταιρίας MATESY. Ο αισθητήρας αποτελείται από υψηλής ποιότητας λεπτό υμένιο του μεικτού γρανάτη $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$. Ο λόγος που το υμένιο του γρανάτη πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας είναι ότι αν υπάρχουν ατέλειες, αυτές θα εμποδίζουν την κίνηση των μαγνητικών περιοχών του αισθητήρα με συνέπεια την αλλοίωση των μαγνητοοπτικών εικόνων. Η επιφάνεια του αισθητήρα που έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο είναι καλυμμένη με ένα στρώμα πολυμερούς για προστασία. Μεταξύ του μαγνητοοπτικού υμενίου και του προστατευτικού λεπτού υμενίου υπάρχει ένα στρώμα για να ανακλά το φως. **(Εικόνα 4.4.1)**. Οι επιστρώσεις από τις οποίες αποτελείται ο αισθητήρας είναι:

- **Προστατευτική επιφάνεια:** πάχος 0.5 μm
- **Στρώμα μαγνητοοπτικού:** πάχος 2 μm
- **Ανακλαστικό στρώμα:** πάχος 1 μm

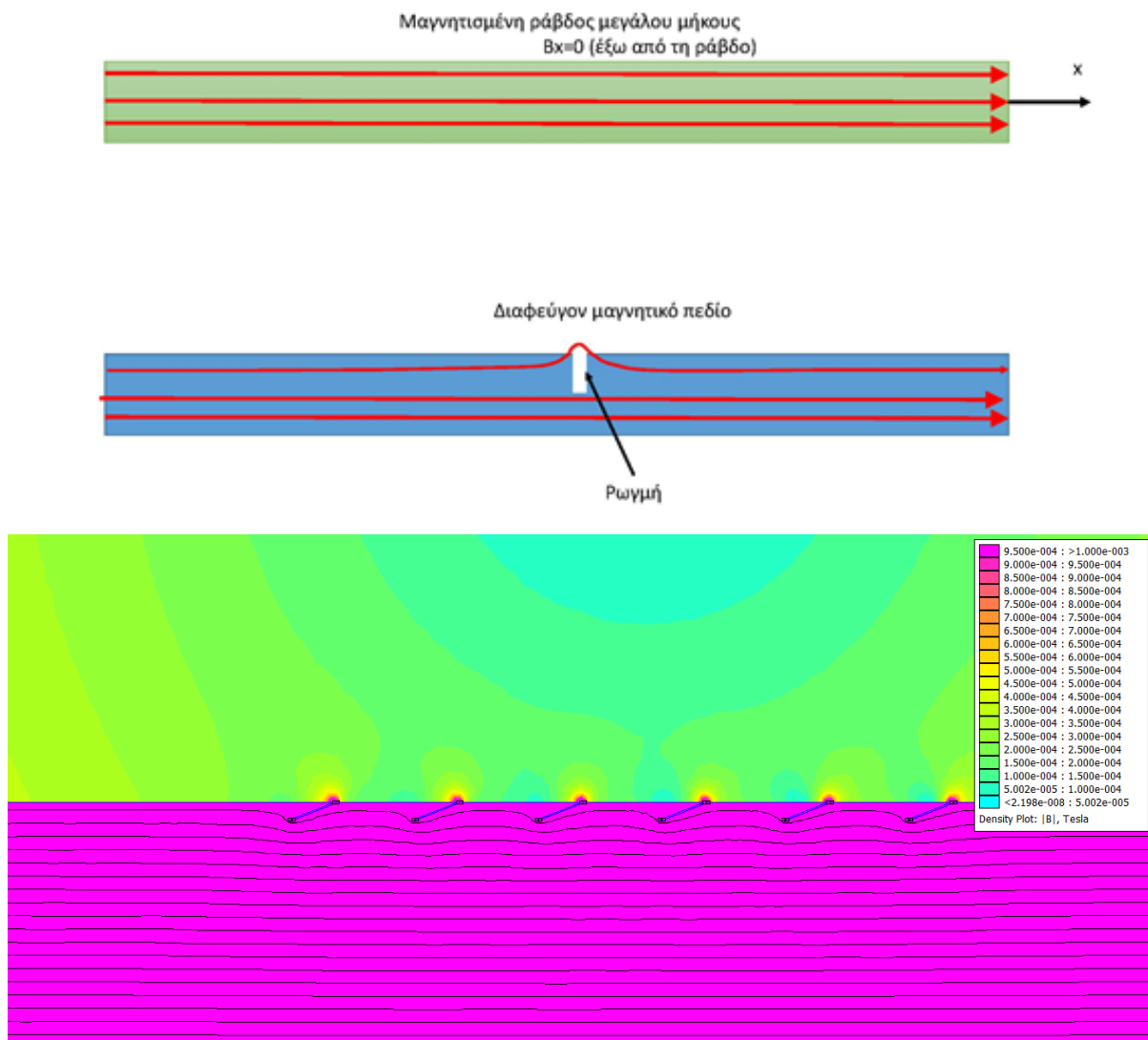
Ο αισθητήρας αν και σιδηριμαγνητικό υλικό απουσία μαγνητικού πεδίου είναι μακροσκοπικά αμαγνήτιστος. Στην μακροσκοπικά αμαγνήτιστη κατάσταση αποτελείται από μαγνητικές περιοχές των οποίων η μαγνήτιση είναι κάθετη στην επιφάνεια του υμενίου με εναλλασσόμενη φορά. Οι περιοχές με ομόρροπη μαγνήτιση σχηματίζουν δομή λαβυρίνθου. Παρακάτω θα έχουμε την ευκαιρία να παρουσιάσουμε τη συγκεκριμένη μορφή των μαγνητικών περιοχών σε διασταυρωμένο πολωτή και αναλυτή σε περιοχές που η κάθετη συνιστώσα της εξωτερικά εφαρμοζόμενης μαγνητικής επαγωγής είναι μηδενική. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο αισθητήρας που χρησιμοποιήσαμε προκαλεί στροφή του επίπεδου πόλωσης γραμμικά πολωμένου φωτός ανάλογη με το πάχος του αισθητήρα αλλά και με τη φορά και το μέτρο της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής που ασκείται στην επιφάνεια του.

Η ηλεκτρομαγνητική αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η μέθοδος ανίχνευσης που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική βασίζεται σε αυτά που έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 1.3. Αυτή έγκειται στο γεγονός ότι αν υπάρχουν ασυνέχειες στην επιφάνεια ενός ελάσματος μεγάλου μήκους, το οποίο είναι σιδηρομαγνητικό και έχει μαγνητιστεί, (δηλαδή το ανάλογο μιας μαγνητισμένης σιδηροτροχιάς με ρωγμές) τότε η μαγνητική επαγωγή στην εξωτερική επιφάνεια του ελάσματος λαμβάνει τιμές διαφορετικές σε σύγκριση με ένα

συνεχές έλασμα (διαφεύγον μαγνητικό πεδίο/stray magnetic field)(**Εικόνα 4.2.2**). Άρα αν μετρήσουμε τη μαγνητική επαγωγή στην επιφάνεια του αντικειμένου, τότε από τη μορφή της επιφάνειας $B_x(x,y,z_0)$ για σταθερό z_0 , μπορούμε να ανιχνεύσουμε ασυνέχειες (ρωγμές) στην επιφάνεια του.



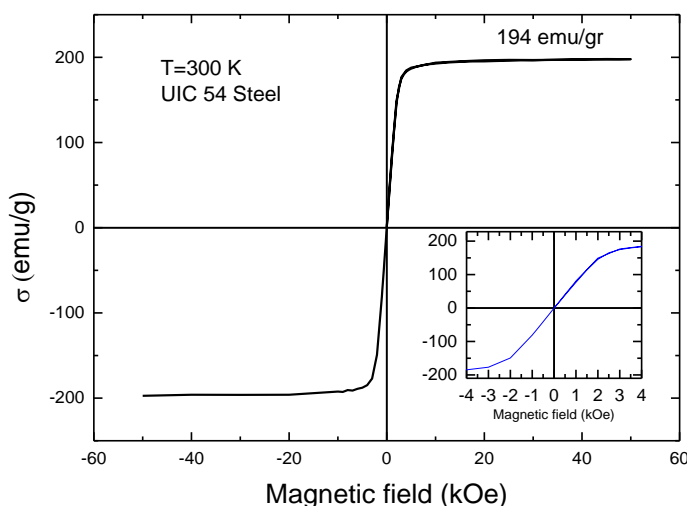
Εικόνα 4.2.1: Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας στα διάφορα στάδια κατασκευής του: (από αριστερά στα δεξιά) αρχικό προστατευτικό υπόστρωμα, επικάλυψη με επίστρωση μαγνητοοπτικού υλικού, επικάλυψη με ανακλαστική επιφάνεια.



Εικόνα 4.2.2 Φυσική αρχή της μεθόδου ανίχνευσης ρωγμών από το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο μαγνητισμένου ελάσματος. Στο τελευταίο σχήμα φαίνεται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στην επιφάνεια μαγνητισμένου αντικειμένου το οποίο έχει έξι λοξές ρωγμές όπως αυτό υπολογίστηκε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Εύκολα διακρίνεται το διαφεύγον μαγνητικό πεδίο στην θέση των ρωγμών

4.3 Μαγνητικές ιδιότητες του Χάλυβα UIC 54 Grade 900

Στην εικόνα 4.3.1 φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής ροπής (ανά γραμμάριο) συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, δοκιμίου που λάβαμε από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς. Η μέτρηση έγινε σε σταθερή θερμοκρασία ($T=300\text{ K}$) με το μαγνητόμετρο SQUID του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Η καμπύλη μαγνήτισης είναι χαρακτηριστική «μαλακού» σιδηρομαγνητικού υλικού. Οι καμπύλες αύξησης και μείωσης του μαγνητικού πεδίου πρακτικά ταυτίζονται γεγονός που σημαίνει ότι έχουμε να κάνουμε με ένα σιδηρομαγνητικό υλικό με πολύ μικρό συνεκτικό πεδίο. Η μαγνήτιση κόρου είναι 194 emu/g . Αυτή η τιμή είναι μικρότερη από τη μαγνήτιση κόρου του καθαρού σιδήρου (220 emu/g). Η μικρότερη τιμή εμφανίζεται λόγω των κραματικών στοιχείων που περιέχει ο συγκεκριμένος χάλυβας.

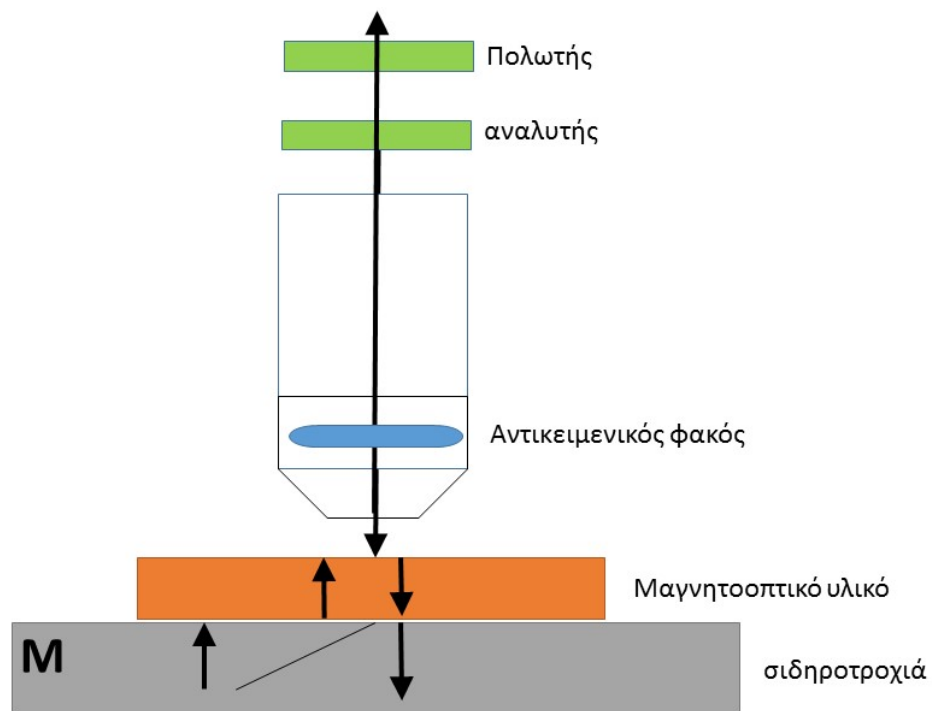


Εικόνα 4.3.1 Μεταβολή της μαγνητικής ροπής ανά γραμμάριο συναρτήσει του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δοκιμίου που αποκόψαμε από την σιδηροτροχιά.

4.4 Πειραματική Διάταξη

Οι μετρήσεις έγιναν με τρία είδη αισθητήρων οι οποίοι είναι χρήσιμοι για την εργαστηριακή αξιολόγηση ρωγμών RCF αλλά και την ανίχνευσή τους σε μετρήσεις πεδίου. Συγκεκριμένα με τη χρήση ενός φακού μικροσκοπίου εξοπλισμένος με μαγνητοοπτικό πολυεπίπεδο κρύσταλλο για μετρήσεις εργαστηρίου και δύο φορητές συσκευές για ανίχνευση και αξιολόγηση ρωγμών RCF σε μετρήσεις πεδίου από την εταιρία MATESY.

- I. **Αισθητήρας που τοποθετείται σαν πρόσθετο (κεφαλή) σε οπτικό μικροσκόπιο για δείγματα εργαστηρίου.**

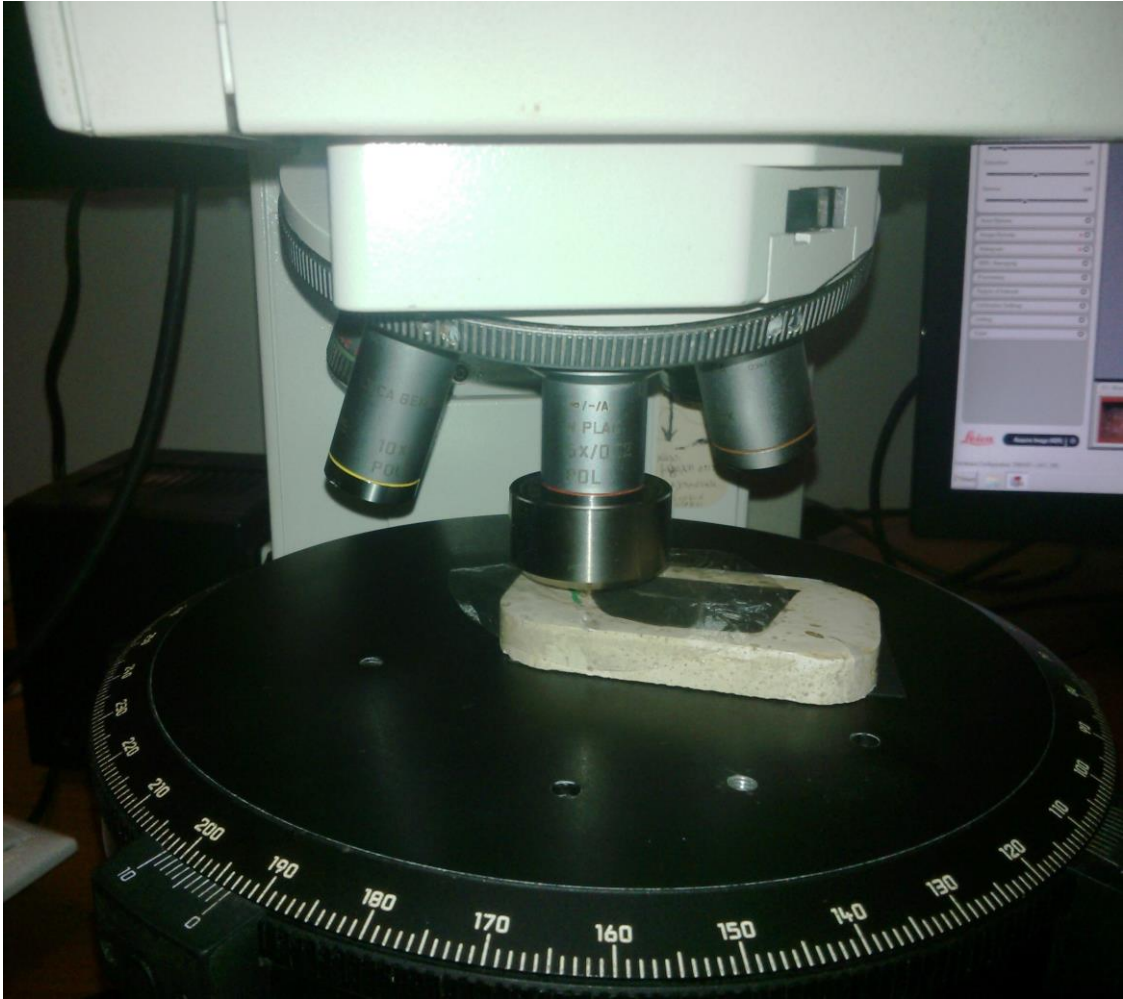


Σχήμα 4.4.1 Σχηματική τομή της πειραματικής διάταξης

Στο **Σχήμα 4.4.1** παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης και στην **Εικόνα 4.4.2** φαίνεται η διάταξη όπως χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο με το μικροσκόπιο Leica DM RXP.



Εικόνα 4.4.1 Φωτογραφία του μαγνητοοπτικού αισθητήρα που προσαρμόζεται σαν κεφαλή στο οπτικό μικροσκόπιο Leica DM RXP.



Εικόνα 4.4.2 Φωτογραφία πειραματικής διάταξης με μικροσκόπιο Leica DM RXP και μαγνητοοπτικός αισθητήρα εν ώρα χρήσης του.

II. Φορητό μικροσκόπιο για μετρήσεις πεδίου.

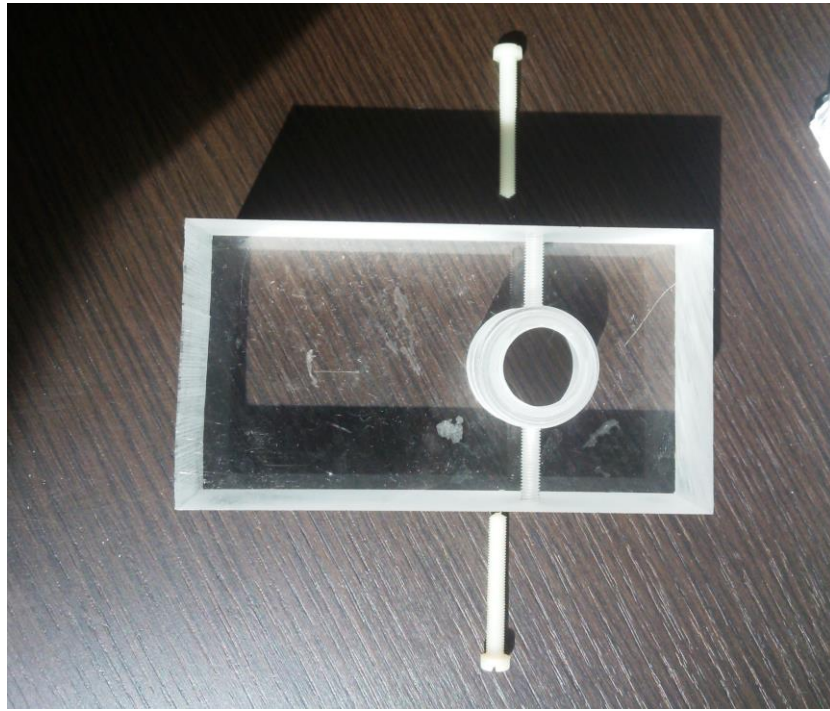
Οι διατάξεις που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις πεδίου προέκυψαν μετά από λεπτομερή και συστηματική έρευνα στο εργαστήριο. Για την εκτέλεση των δοκιμών πεδίου χρησιμοποιήθηκε ένα φορητό μικροσκόπιο τύπου Dino-Lite MagEye το οποίο καταγράφει βίντεο και εικόνες και μία φορητή διάταξη εφοδιασμένη με μαγνητοοπτικό αισθητήρα, πηγή φωτός, πολωτή και αναλυτή. Αυτές οι διατάξεις είναι κατάλληλες για δοκιμές πεδίου.



Εικόνα 4.4.3 Φορητό μικροσκόπιο με ενσωματωμένο μαγνητοοπτικό αισθητήρα. Αριστερά, φωτογραφία με το μικροσκόπιο μαζί με την βάση που κατασκευάστηκε. Δεξιά, κοντινή φωτογραφία του φορητού μικροσκοπίου.

Για τη χρήση του φορητού μικροσκοπίου κατασκευάστηκε προστατευτική θήκη από plexiglass ώστε ο κρύσταλλος στην κεφαλή του φορητού μικροσκοπίου να εφάπτεται ακριβώς με την προς εξέταση επιφάνεια. Στις έδρες της θήκης προσαρμόζονται βίδες για σταθεροποίηση του Dino-lite μικροσκοπίου όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.4.4**.

Ο εντοπισμός γίνεται με καταγραφή βίντεο στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς από εικόνα φορητού πολωτικού μικροσκοπίου. Το φως ανακλάται σε ανακλαστική επιφάνεια αφού διέλθει μέσα από το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο. Κατά την διέλευση του πολωμένου φωτός δύο φορές από το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο υφίσταται αθροιστική στροφή δύο φορές ανάλογη με την κάθετη συνιστώσα (στην επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου) της μαγνητικής επαγωγής. Για να ενισχυθεί το μαγνητοοπτικό σήμα μαγνητίζουμε την σιδηροτροχιά με κλειστό μαγνητικό κύκλωμα. (**Εικόνα 4.4.5**)



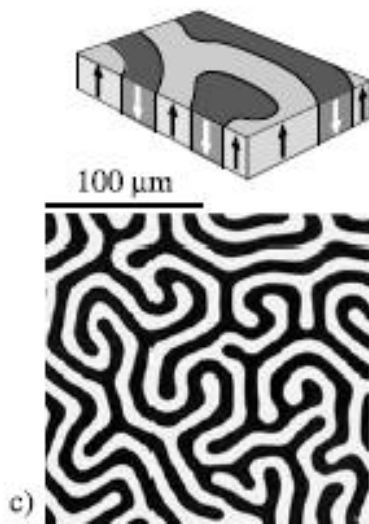
Εικόνα 4.4.4: Φωτογραφία θήκης φορητού μαγνητοοπτικού αισθητήρα.



Εικόνα 4.4.5 Διάταξη εντοπισμού ρωγμών RCF σε σιδηροτροχιές της ΣΤΑΣΥ ΑΕ.

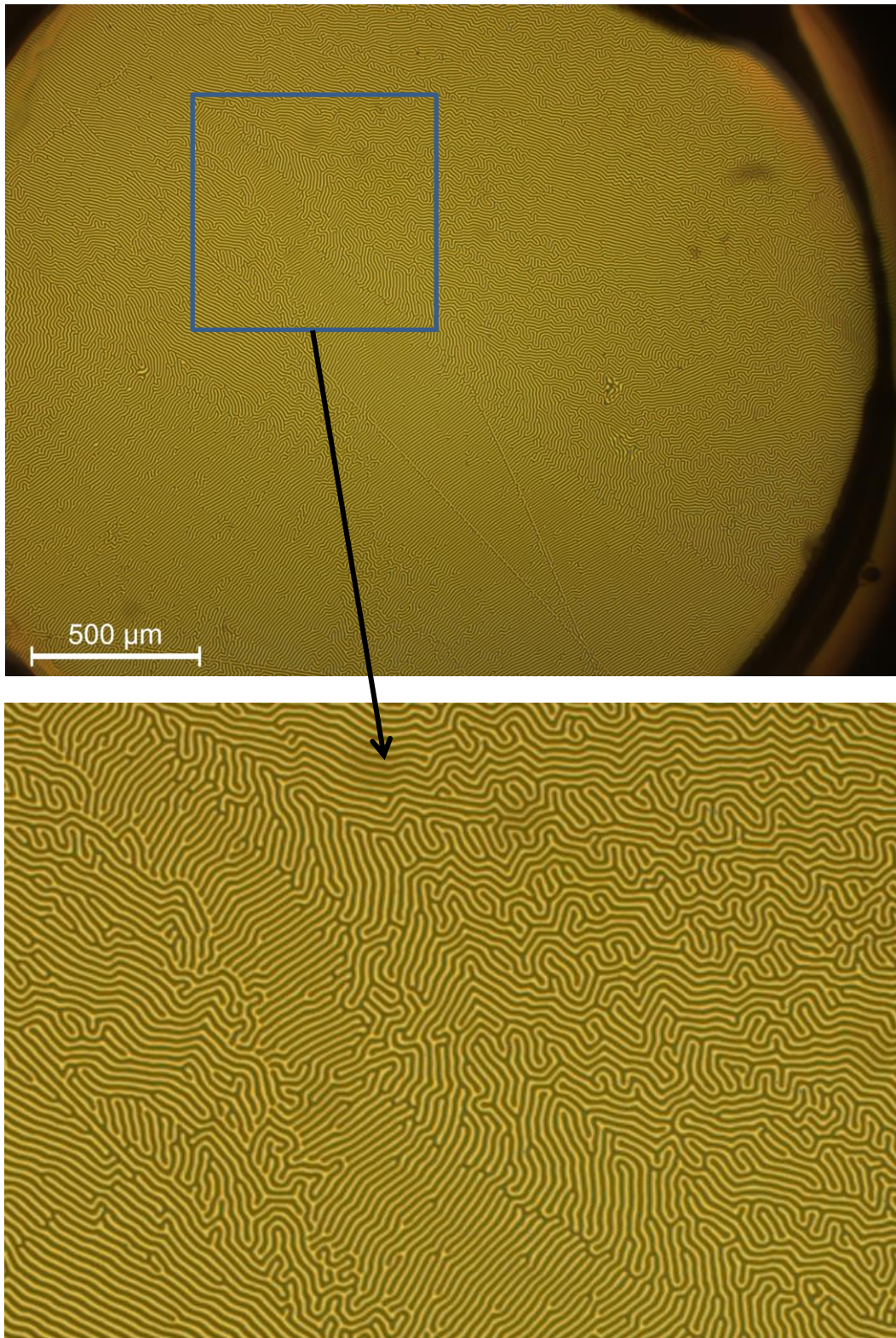
4.5 Οπτικομαγνητικός Κρύσταλλος

Πριν αναλύσουμε την συμπεριφορά του μαγνητοοπτικού αισθητήρα όταν εφάπτεται της σιδηροτροχιάς θα πρέπει να γίνει μια ποιοτική ανάλυση των εργαστηριακών μετρήσεων βάσει της θεωρίας που έχει αναπτυχθεί. Όταν ο μαγνητοοπτικός κρύσταλλος παρατηρηθεί σε πολωτικό μικροσκόπιο με σχεδόν κάθετα τα επίπεδα πόλωσης του πολωτή και του αναλυτή θα παρατηρήσουμε μία εικόνα αποτελούμενη από λωρίδες με σχήμα λαβυρίνθου (δες **Εικόνα 4.5.1**)



Εικόνα 4.5.1: Μαγνητικές περιοχές μαγνητοοπτικού κρυστάλλου με αξονική μαγνητική ανισοτροπία (14)

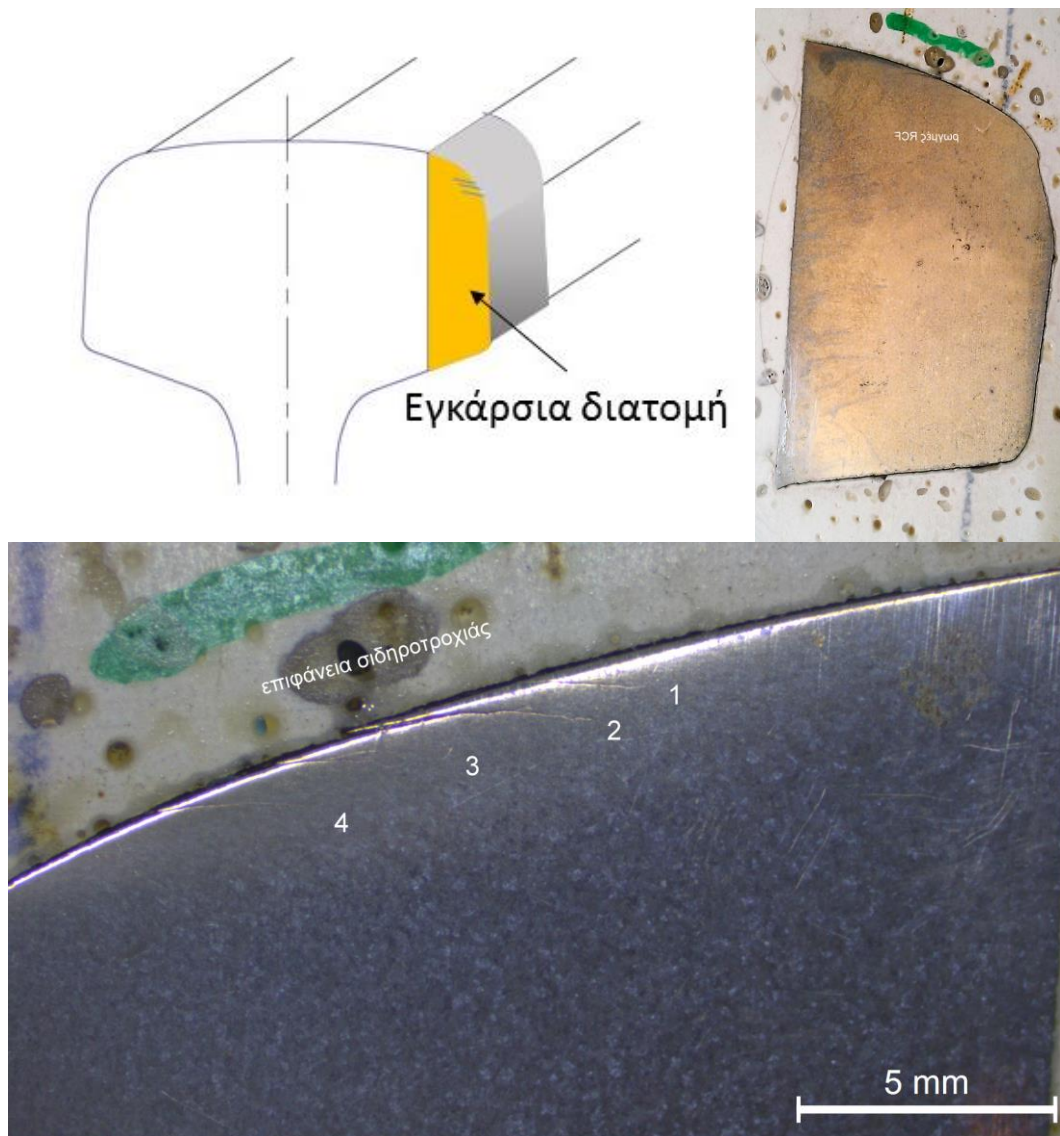
Στην **Εικόνα 4.5.2** φαίνεται μία αντιπροσωπευτική εικόνα που λάβαμε από το πολωτικό μικροσκόπιο με διασταυρωμένο πολωτή και αναλυτή για μηδενική εξωτερική μαγνητική επαγωγή. Σ' αυτή την εικόνα φαίνονται οι μαγνητικές περιοχές του αισθητήρα οι οποίες εμφανίζουν χαρακτηριστική λαβυρινθώδη δομή. Η μέγιστη αντίθεση παρατηρείται όταν η γωνία πόλωσης αναλυτή και πολωτή είναι 90° . Μαύρες είναι οι περιοχές όπου η μαγνήτιση έχει κατεύθυνση προς το βάθος της εικόνας, όπως την βλέπουμε, και με λευκό (στην προκειμένη περίπτωση ανοιχτό πορτοκαλί) οι περιοχές με κατεύθυνση μαγνήτισης προς τα μάτια μας, όπως παρατηρούμε την εικόνα.



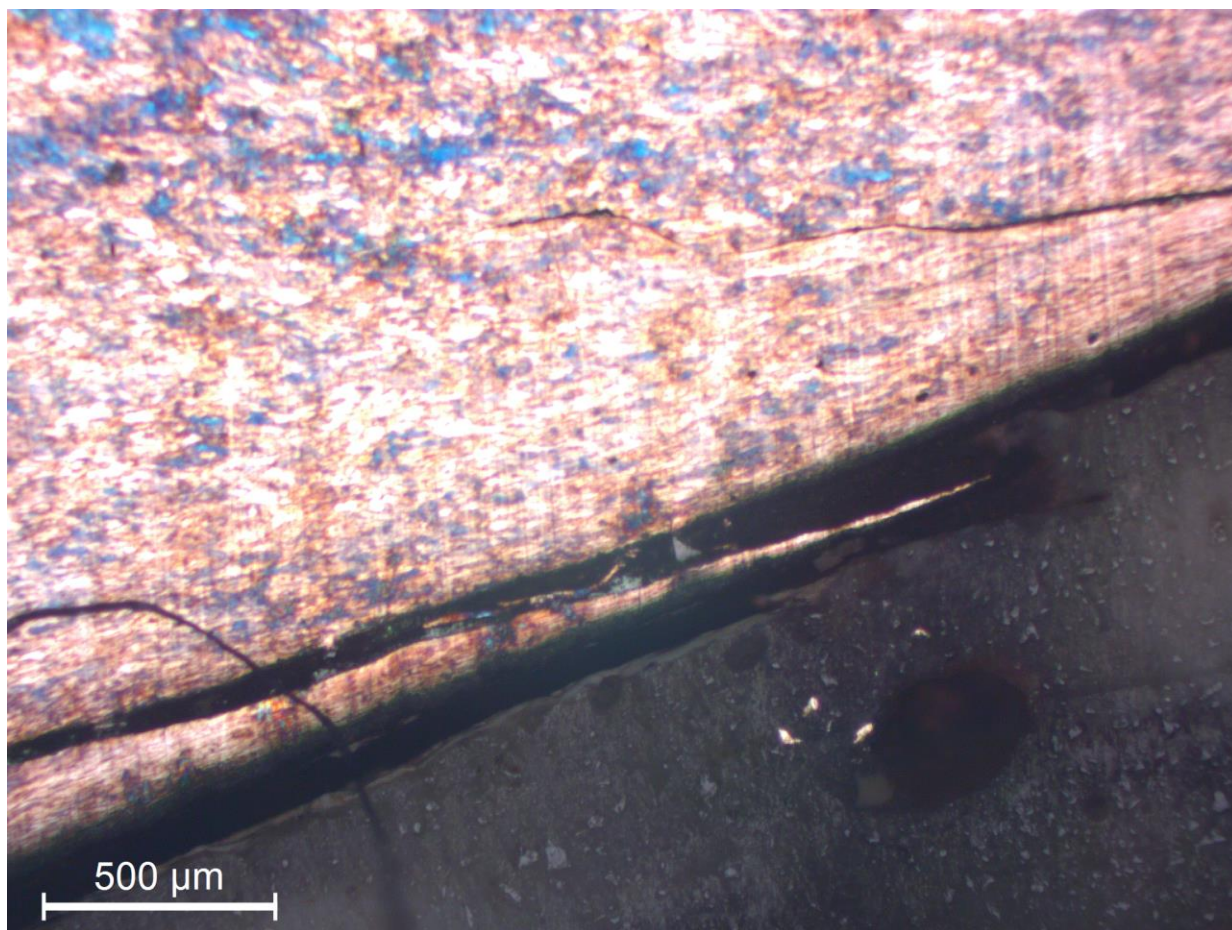
Εικόνα 4.5.2: (πάνω σχήμα) Μαγνητικές περιοχές μαγνητοοπτικού κρυστάλλου όπως αυτές φαίνονται σε πολωτικό μικροσκόπιο με γωνία πόλωσης πολωτή προς αναλυτή $\varphi = 90^\circ$. (κάτω σχήμα) μεγέθυνση της περιοχής που περικλείεται με το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο.

4.6 Εγκάρσια Τομή

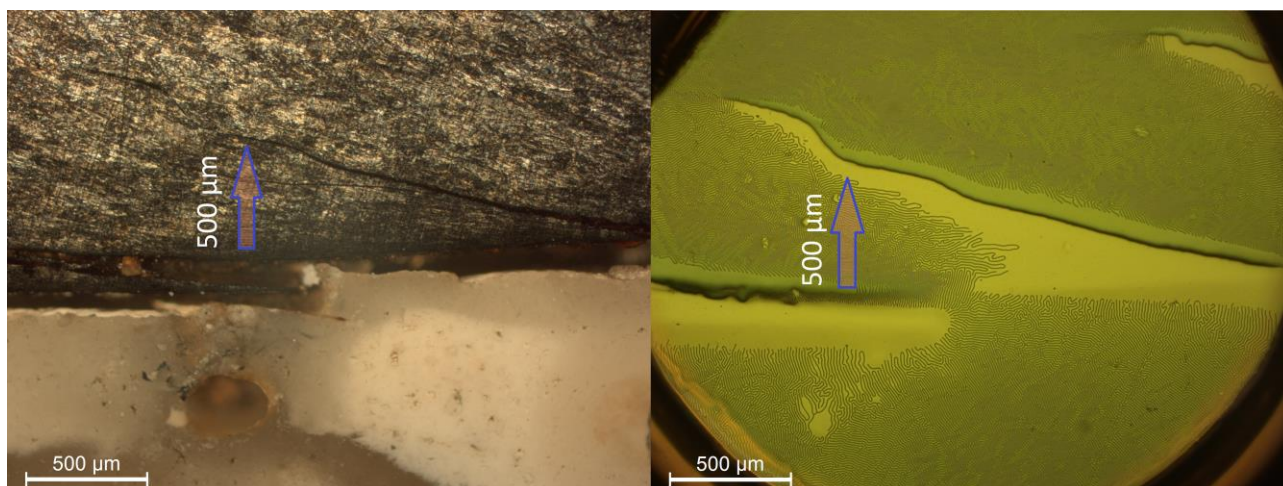
Εδώ παρουσιάζονται οι εικόνες που λάβαμε στο πολωτικό μικροσκόπιο λόγω της μαγνητικής αντίθεσης (magnetic contrast) από στιλβωμένη επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής σιδηροτροχιάς. Οι μαύρες γραμμές που ξεκινούν από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι ρωγμές RCF. Η μέση απόσταση των ρωγμών είναι περίπου 1 mm, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται από 2-3 mm



Σχήμα 4.6.1: Οπτική φωτογραφία της στιλβωμένης εγκάρσιας τομής του καμπύλου τμήματος του πάνω αριστερού τμήματος της διατομής της σιδηροτροχιάς. Οι μαύρες γραμμές που ξεκινούν από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι ρωγμές RCF.

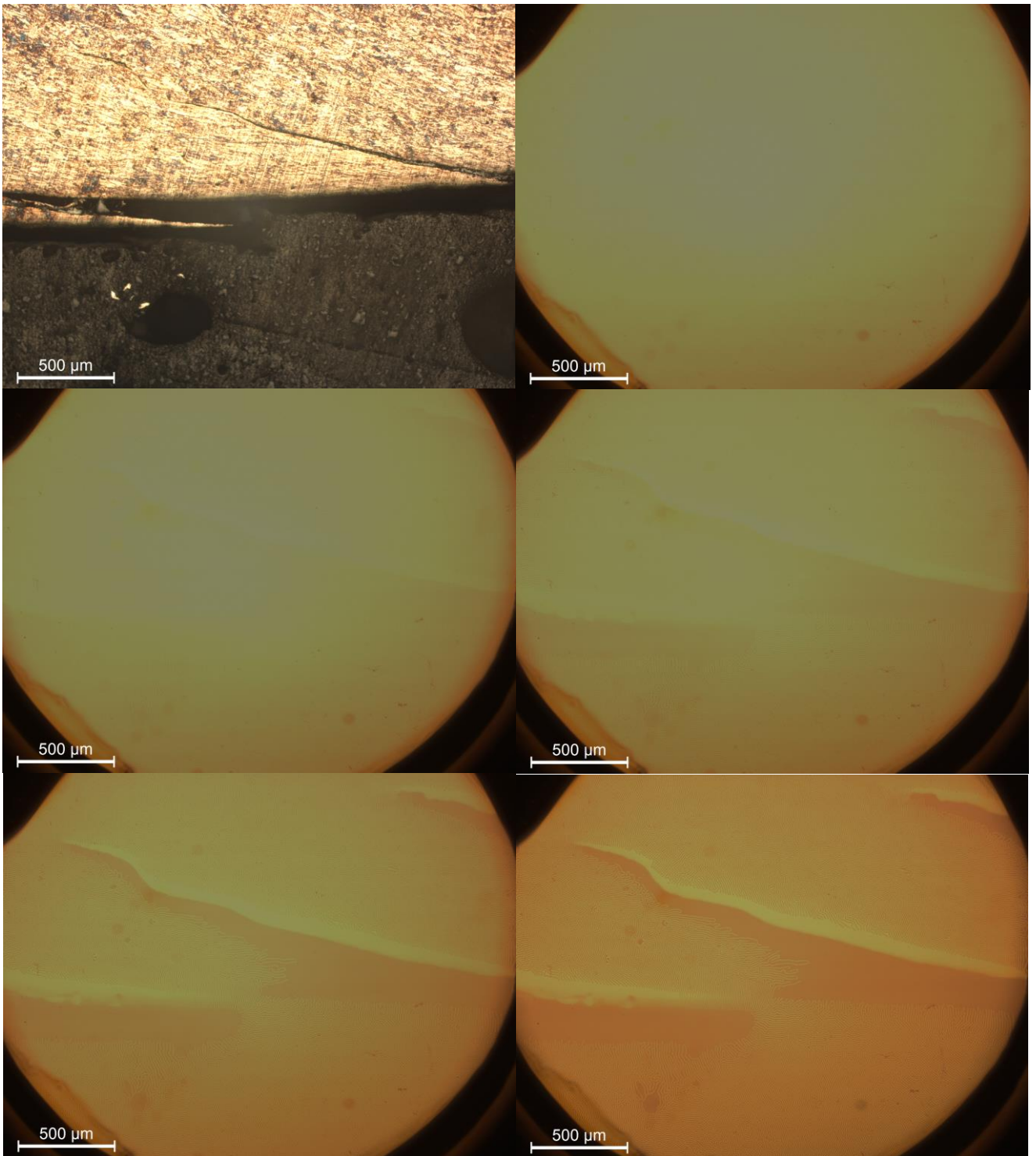


Εικόνα 4.6.1: Λεπτομέρεια από Σχήμα 4.6.1. Ρωγμές 2 και 3.

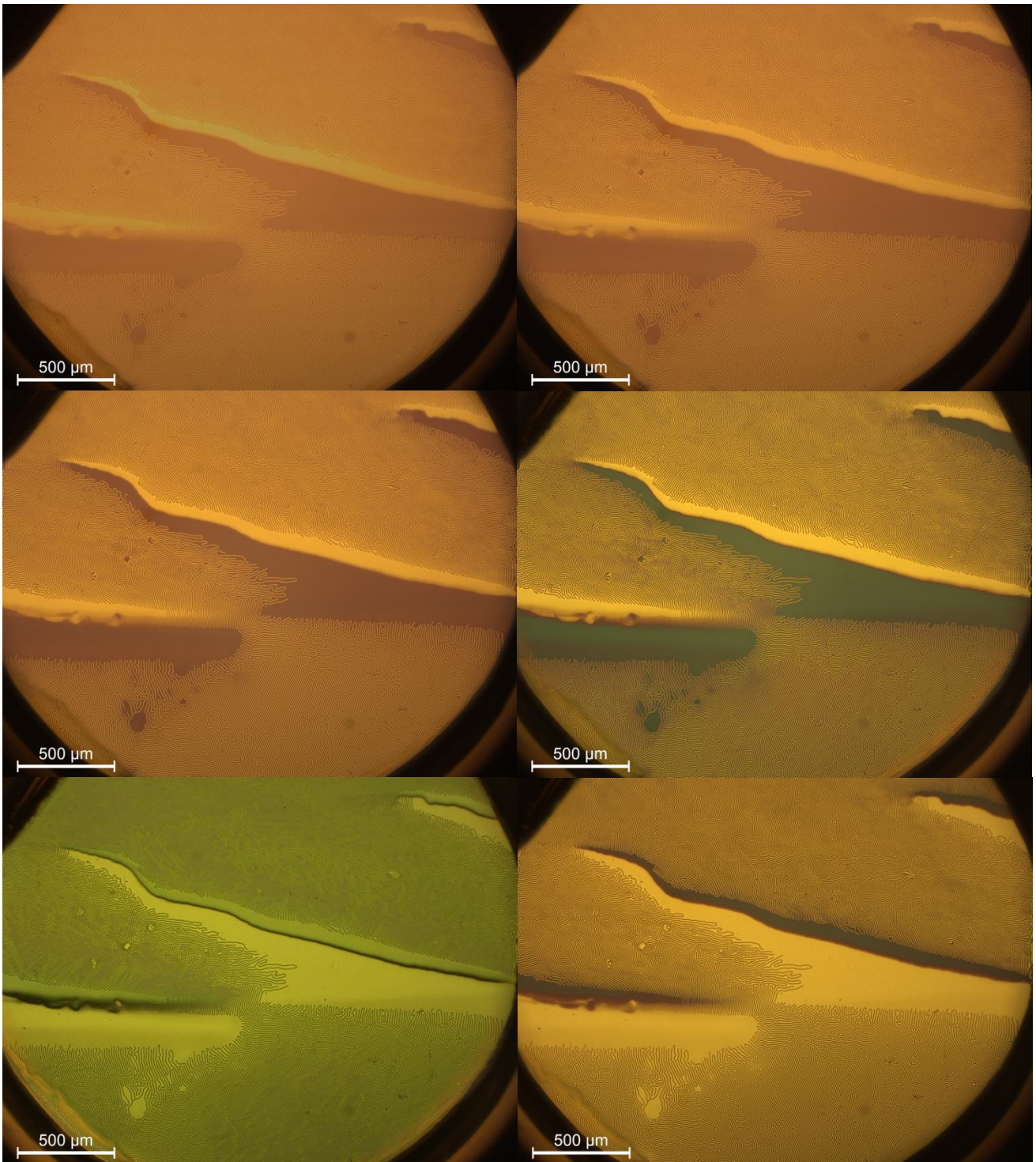


Εικόνα 4.6.2: Ο πολωτής με τον αναλυτή σχηματίζουν γωνία 90° . Αριστερά οπτική φωτογραφία. Δεξιά μαγνητοοπτική αντίθεση ρωγμής.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες από το μαγνητοοπτικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται η εξέλιξη της μαγνητικής αντίθεσης σε σχέση με τη γωνία αναλυτή και πολωτή. (Εικόνα 4.6.3, Εικόνα 4.6.4)

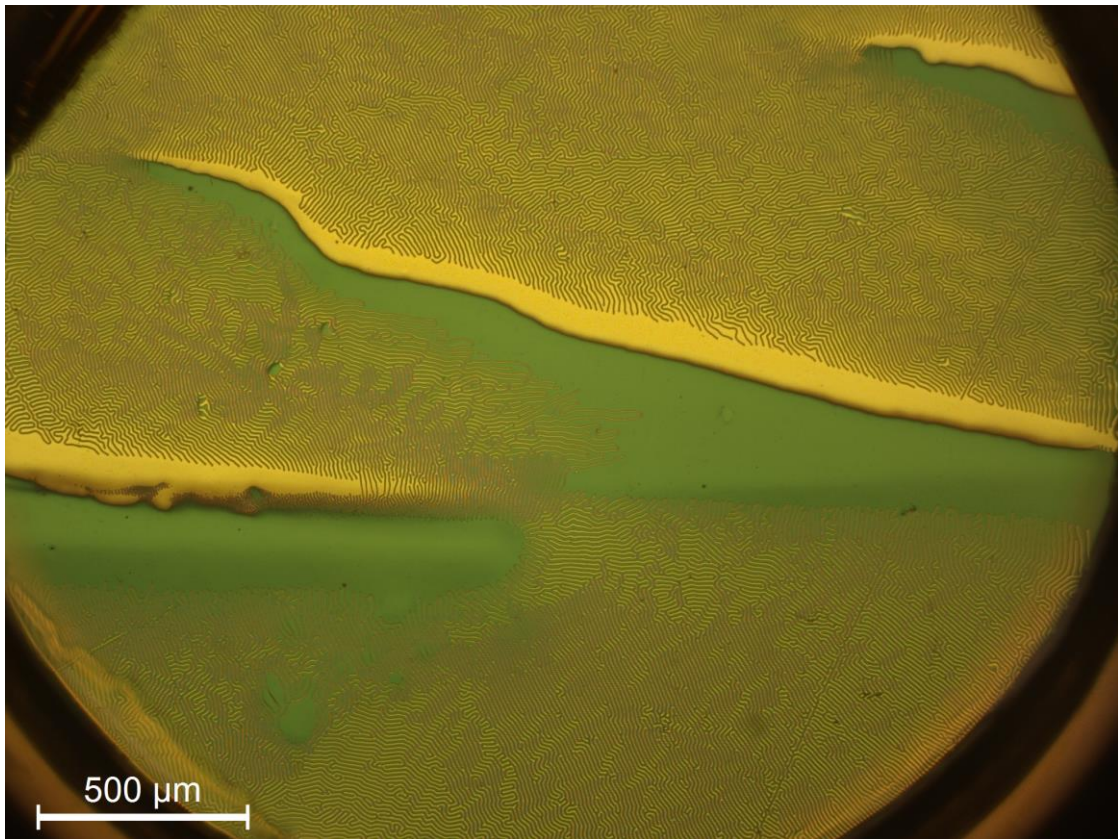


Εικόνα 4.6.3: Από αριστερά στα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη εικόνα είναι από το οπτικό μικροσκόπιο και παράλληλα ο πολωτής με τον αναλυτή. Ακολουθούν μαγνητικής αντίθεσης φωτογραφίες με γωνία πολωτή προς αναλυτή $\varphi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ κατά σειρά.

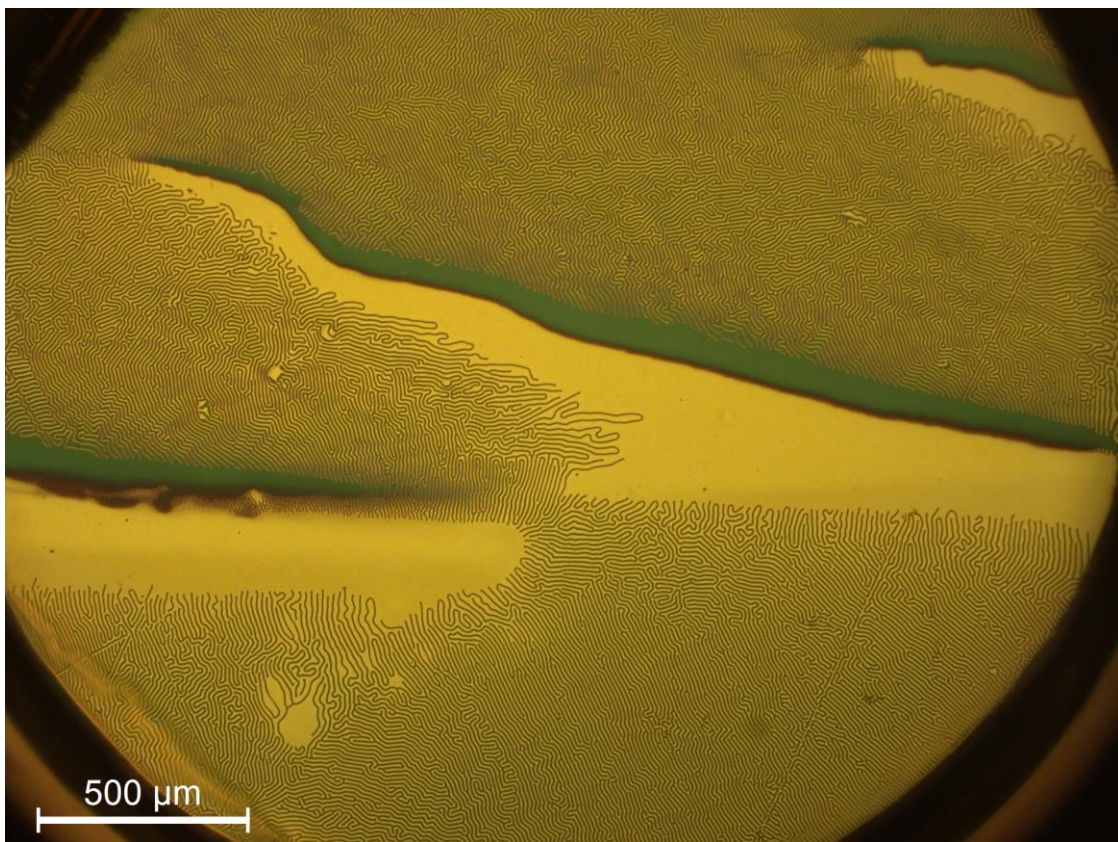


Εικόνα 4.6.4: Από αριστερά στα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Κατά σειρά, μαγνητικής αντίθεσης φωτογραφίες με γωνία πολωτή προς αναλυτή $\varphi=50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ$. Κοντά στις 90° παρατηρείται η μέγιστη αντίθεση. Τοπογραφία ρωγμών

Εφόσον κοντά στις 90° παρατηρείται η μέγιστη αντίθεση ακολουθούν φωτογραφίες που πάρθηκαν στις 85° και 95° .



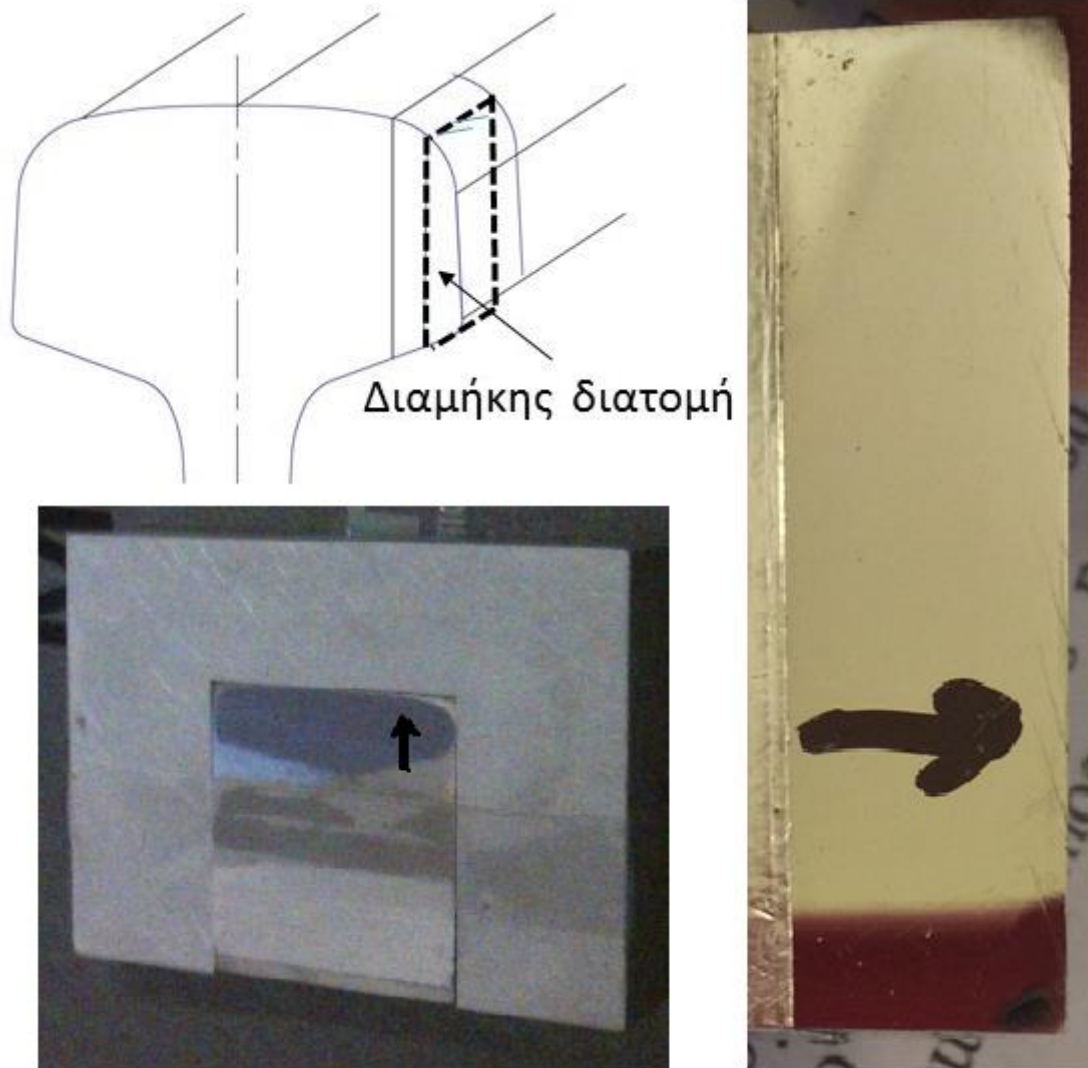
Εικόνα 4.6.5: Φωτογραφία ρωγμών με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα. Γωνία πολωτή προς αναλυτή 85°



Εικόνα 4.6.6: Φωτογραφία ρωγμών με χρήση μαγνητοοπτικού αισθητήρα. Γωνία πολωτή προς αναλυτή 95°

Η διαφορά στο χρώμα των εικόνων οφείλεται στην στρέψη του φωτός αφού το φως που στέλνεται μέσω του μικροσκοπίου δεν είναι μονοχρωματικό όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

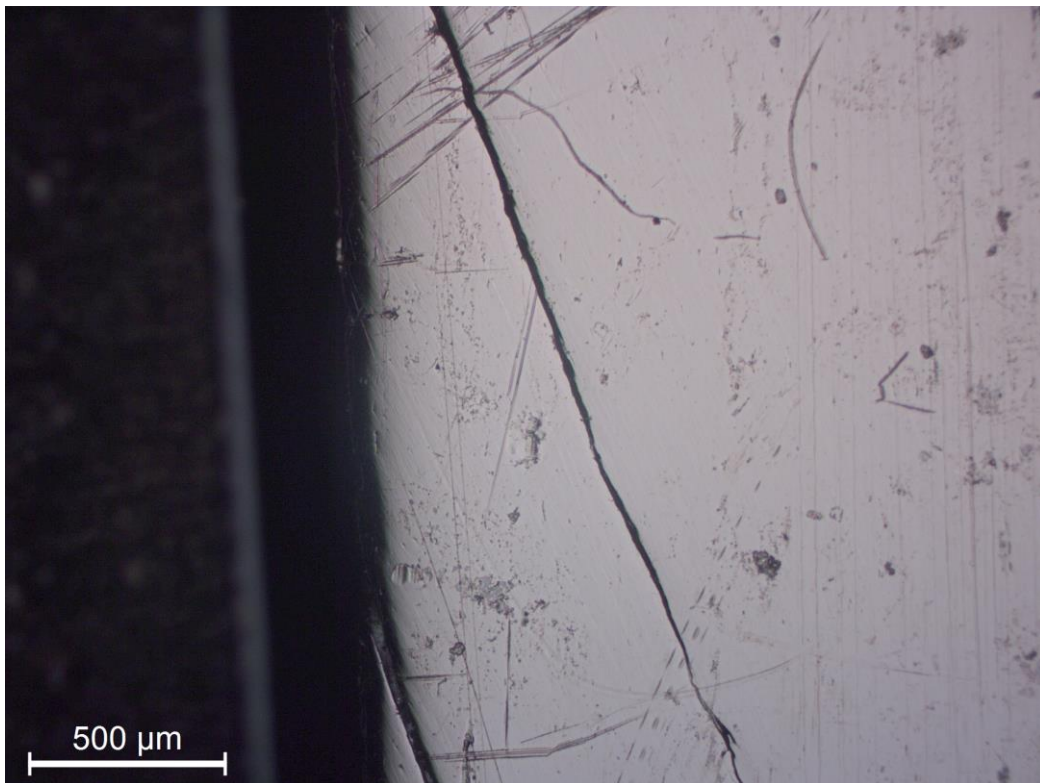
4.7 Διαμήκης Τομή



Σχήμα 4.7.1 Στιλβωμένη διαμήκης τομή σιδηροτροχιάς της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ. Στη δεξιά φωτογραφία, στην αριστερή ακμή, η οποία ταυτίζεται με την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, φαίνονται κεκλιμένες γραμμές οι οποίες αντιστοιχούν σε ρωγμές RCF. Οι δύο φωτογραφίες έχουν τραβηχτεί με ερασιτεχνική φωτογραφική μηχανή.

Εδώ θα παρουσιαστούν εικόνες από πολωτικό μικροσκόπιο από την επιφάνεια μίας διαμήκου στυλβωμένης επιφάνειας από τη διαμήκη τομή σιδηροτροχιάς και στην συνέχεια εικόνες μέσω του μαγνητοοπτικού αισθητήρα των ίδιων ρωγμών. Στο **Σχήμα 4.7.1** στην δεξιά ακμή, φαίνονται μαύρες κεκλιμένες γραμμές οι οποίες αντιστοιχούν σε τομή των ρωγμών RCF (στραμμένο το μαύρο βέλος). Η δεξιά ακμή αντιστοιχεί στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Όπως έχει αποκαλύψει η μελέτη αυτού του δοκιμίου από το Πανεπιστήμιο

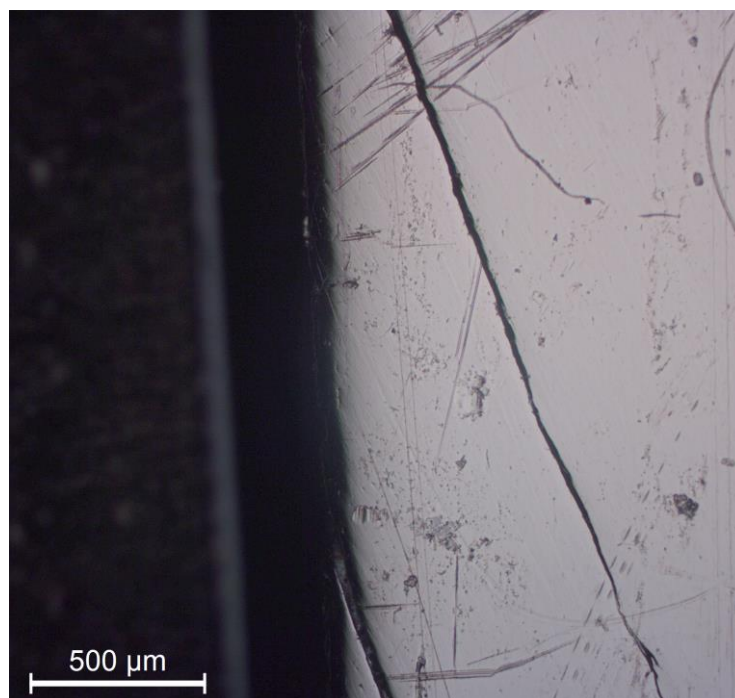
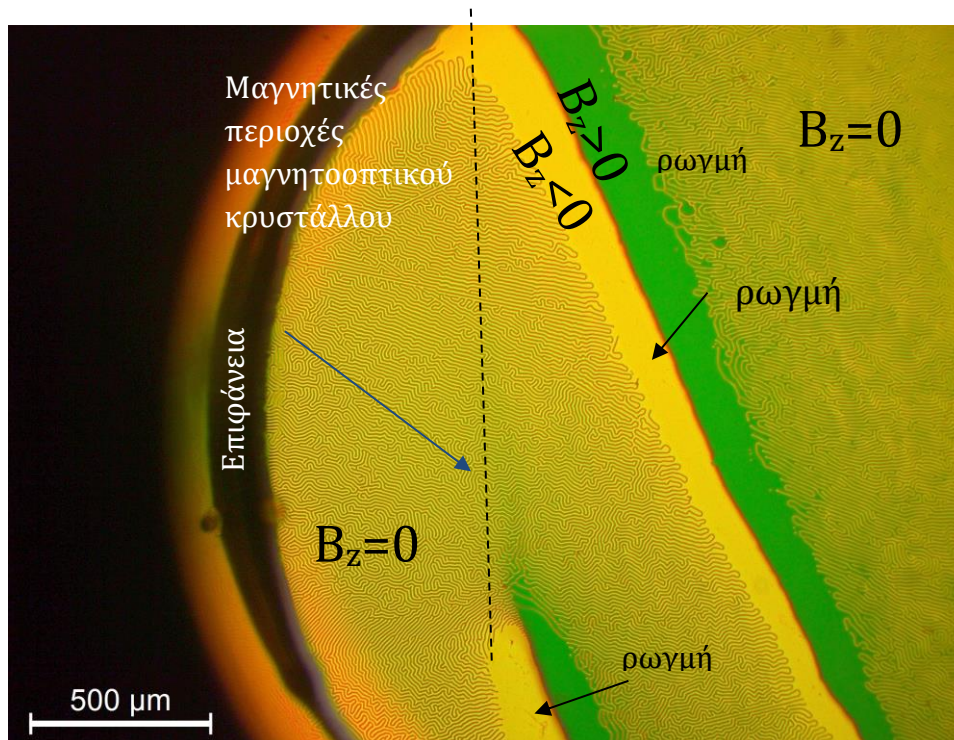
της Θεσσαλίας η γωνία αυτών σε σχέση με την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 30°. Η κατεύθυνση κύλισης του τροχού είναι από κάτω προς τα πάνω.



Εικόνα 4.7.1 Λεπτομέρειες δύο ρωγμών της διαμήκουσ στιλβωμένης επιφάνειας του σχήματος 4.7.2. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 4 mm.

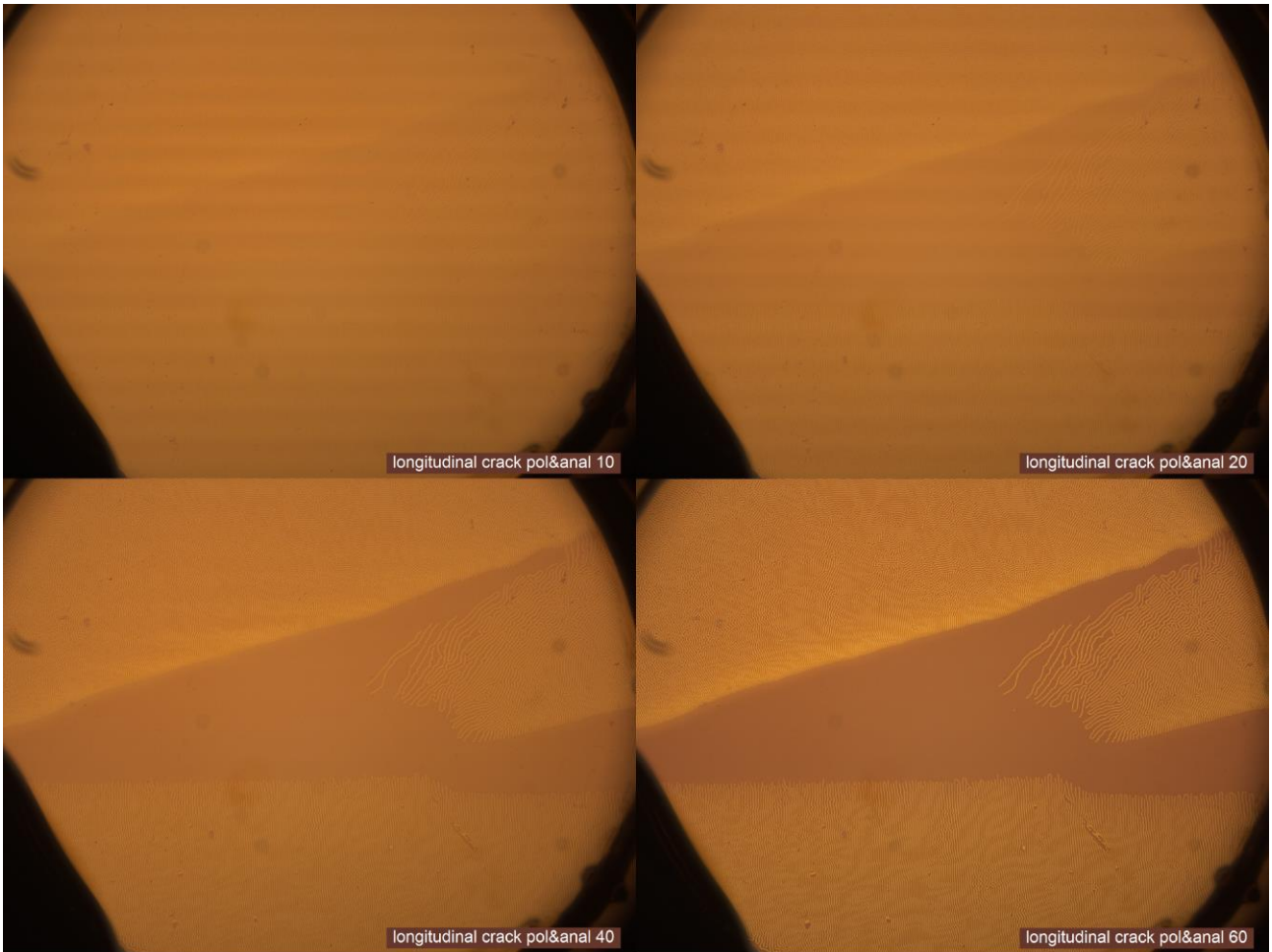


Εικόνα 4.7.2: Λεπτομέρειες δύο ρωγμών της διαμήκουσ στιλβωμένης επιφάνειας του σχήματος 4.7.3. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 3 mm.



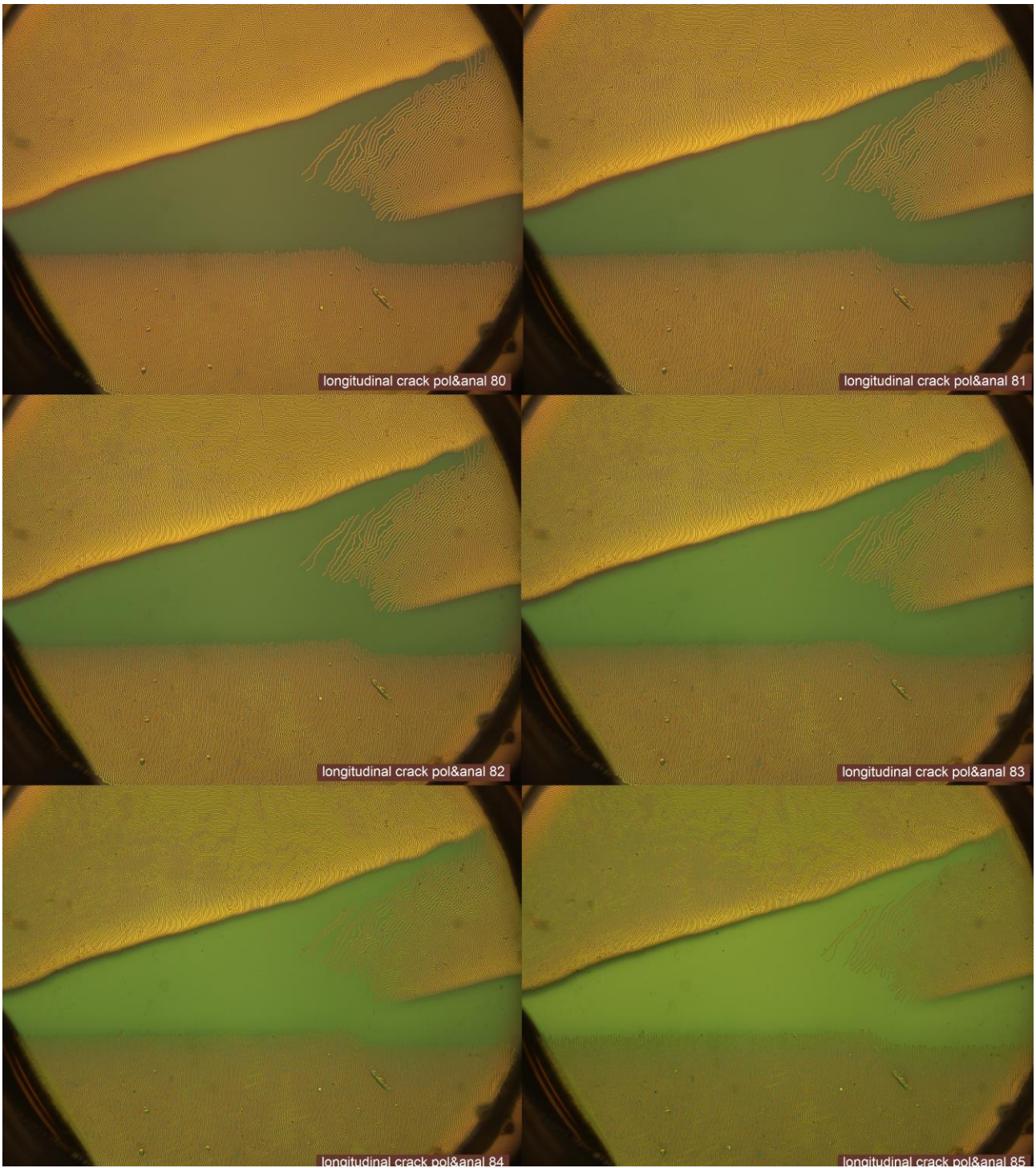
Εικόνα 4.7.3(πάνω) Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου (magneto-optical contrast). Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=95^\circ$ (κάτω) Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου (optical contrast/geometrical contrast)

Στη συνέχεια ακολουθούν εικόνες όπου παρεμβάλλεται ο μαγνητοοπτικός κρύσταλλος μεταξύ στίλβωμένης επιφάνειας και κεφαλής μικροσκοπίου. Η τοπογραφία της περιοχής είναι αυτή που εμφανίζεται στην **Εικόνα 4.7.2** και συνεπώς εμφανίζονται οι ίδιες ρωγμές.



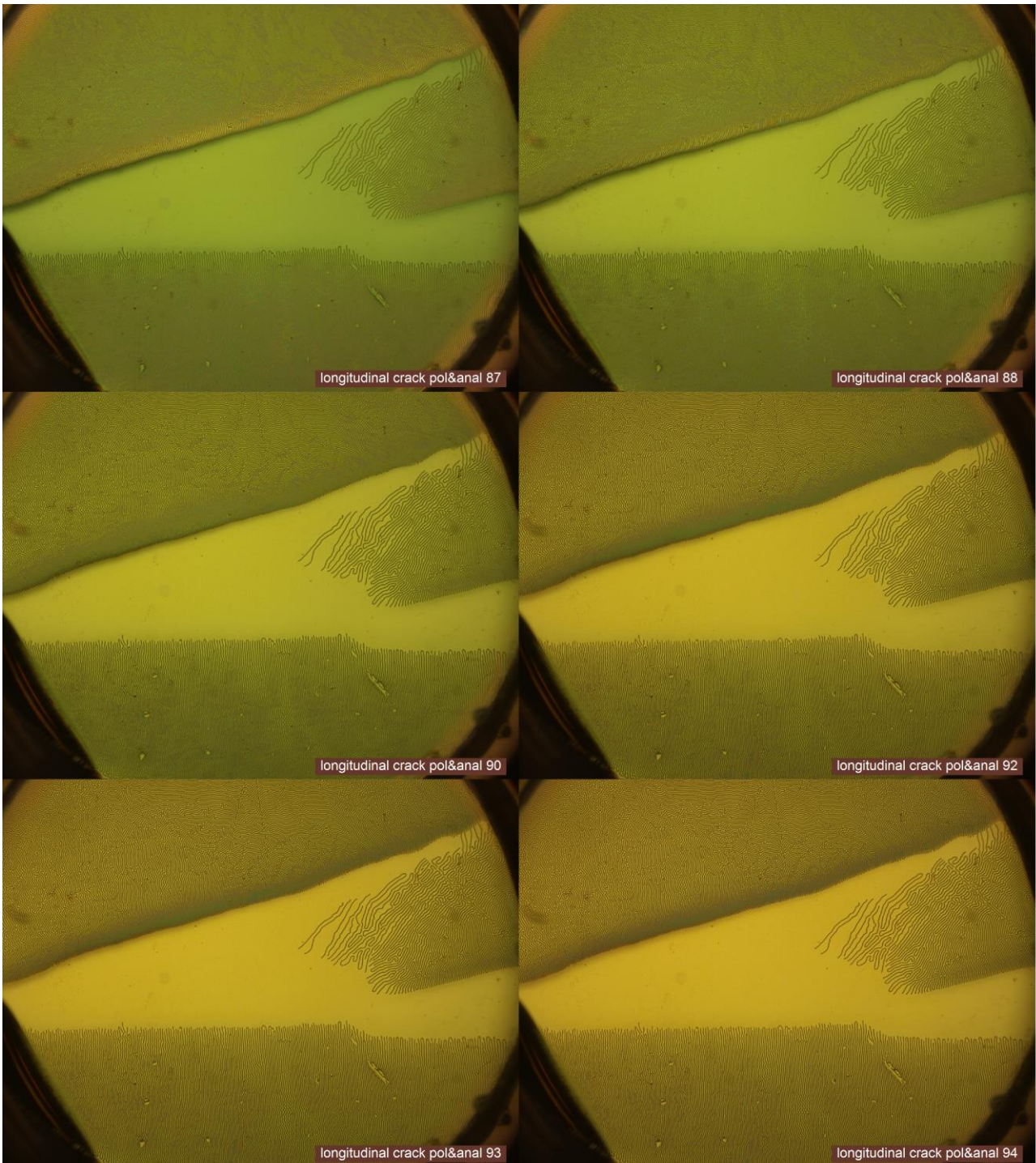
Εικόνα 4.7.4: Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=10,20,40,60$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω αντίστοιχα.

Όπως παρατηρείται στις εικόνες όπου η γωνία πόλωσης αναλυτή και πολωτή είναι κοντά στις 0° , δεν εμφανίζεται μεγάλη αντίθεση κοντά στις ρωγμές. Στη συνέχεια ακολουθούν εικόνες όπου αυξάνεται η γωνία και ακολούθως και η αντίθεση κοντά στις ρωγμές.

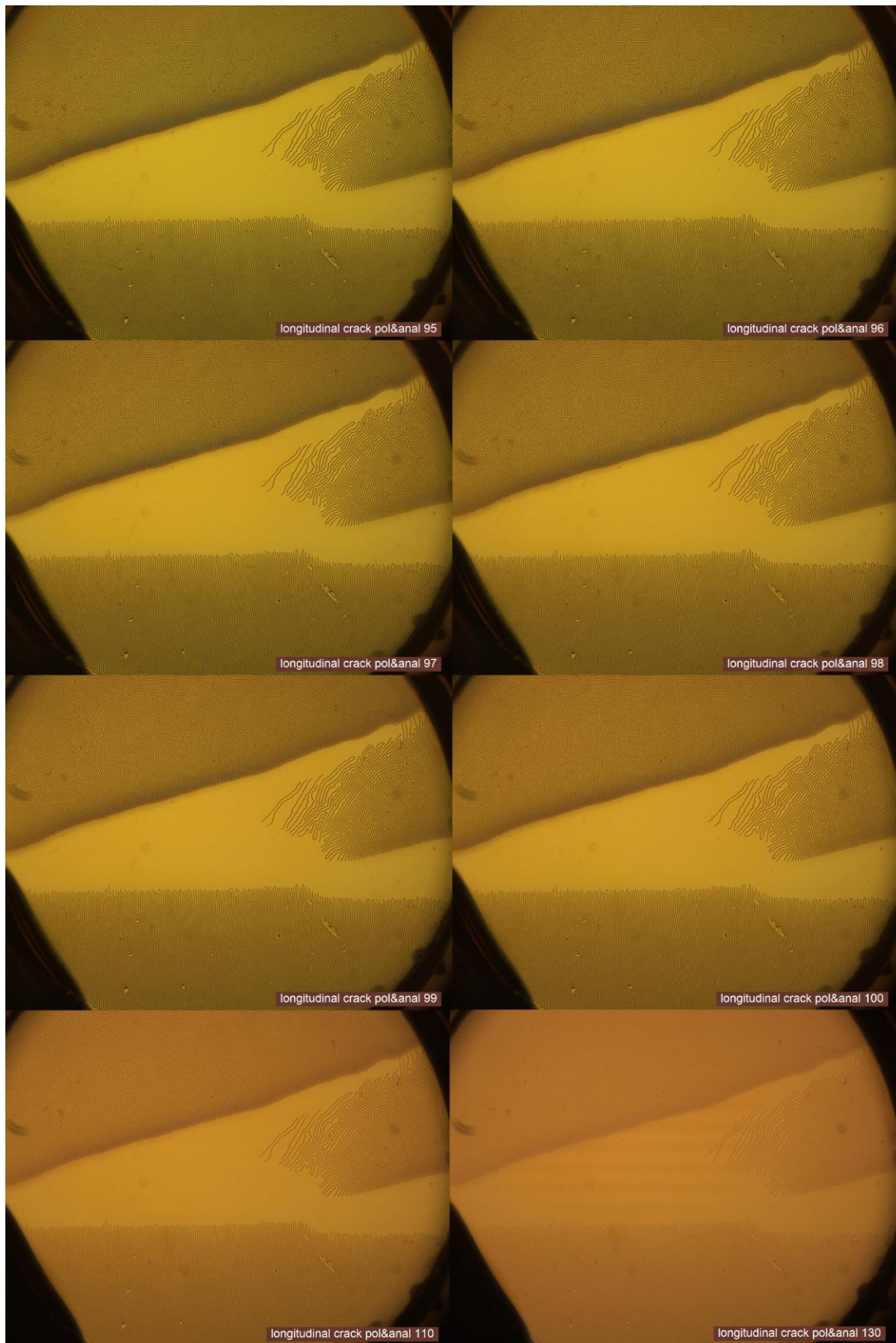


Εικόνα 4.7.5 Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=80,81,82,83,84,85$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω, αντίστοιχα.

Όπως παρατηρείται στις εικόνες όπου η γωνία πόλωσης αναλυτή και πολωτή είναι κοντά στις 90° , εμφανίζεται η μεγαλύτερη αντίθεση κοντά στις ρωγμές. Στη συνέχεια ακολουθούν εικόνες όπου αυξάνεται η γωνία και ακολούθως και η αντίθεση κοντά στις ρωγμές μέχρι τις 90° και έπειτα απομακρυνόμενοι αρχίζει να μειώνεται πάλι η αντίθεση.



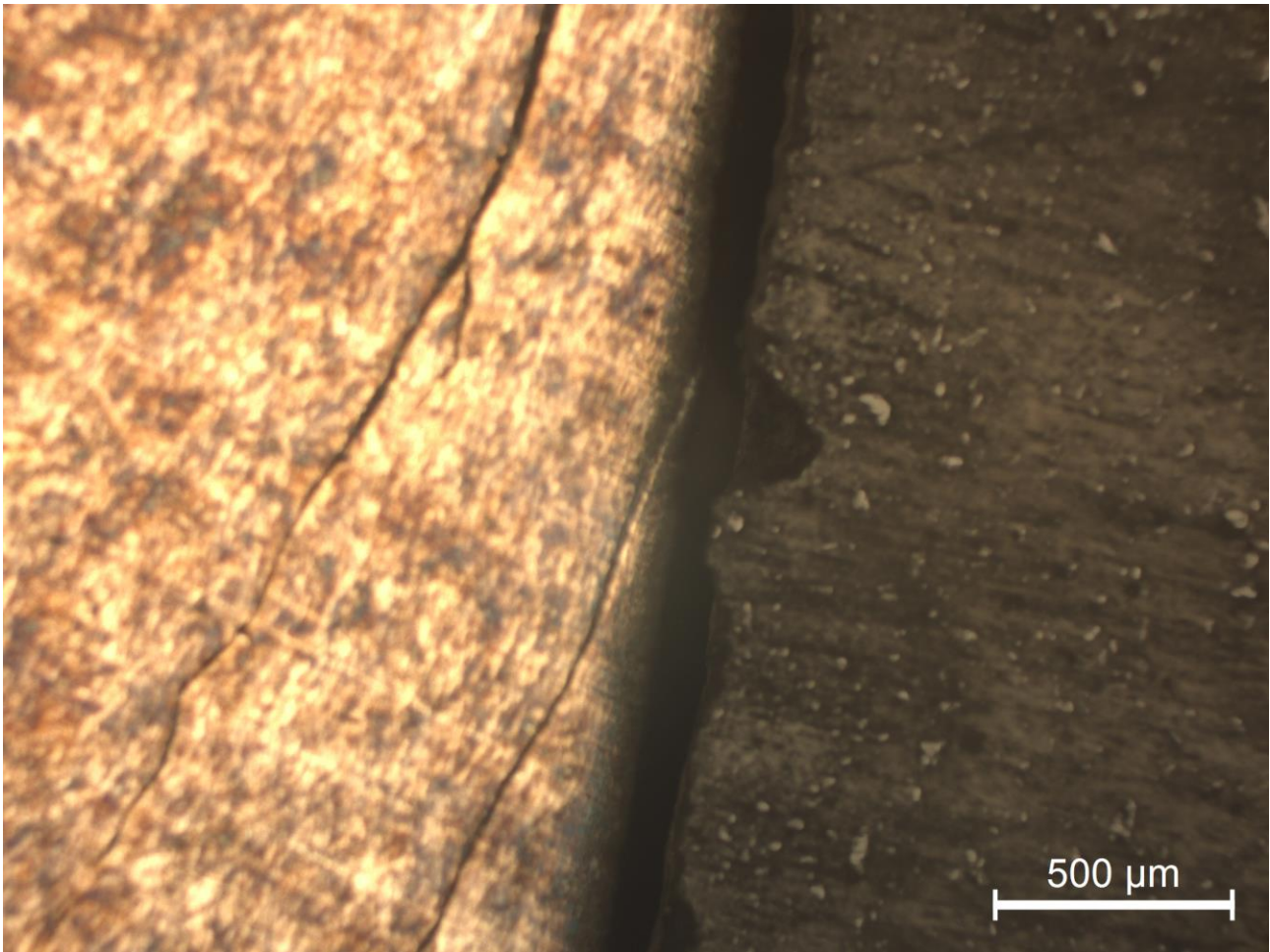
Εικόνα 4.7.6: Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=87,88,90,92,93,94$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.7.7 Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού. Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=95,96,97,98,99,100,110,130$ από πάνω αριστερά προς τα δεξιά κάτω αντίστοιχα.

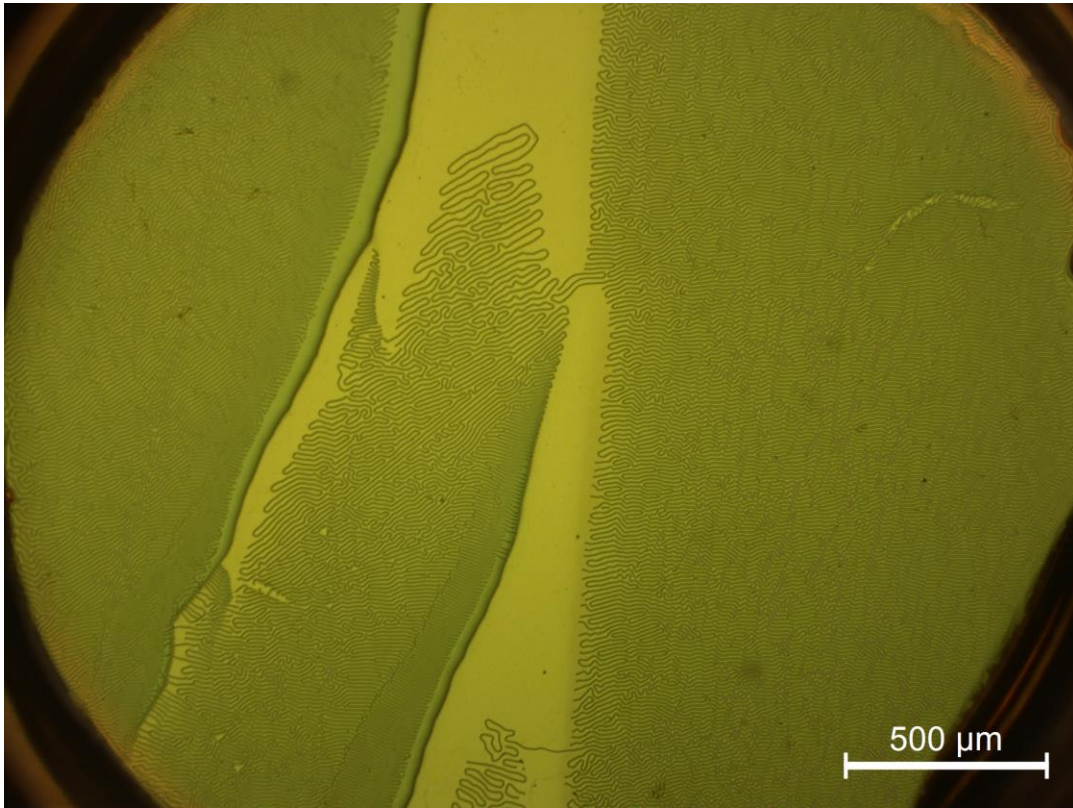
4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων με εφαρμογή μόνιμου μαγνήτη για δημιουργία εντονότερου πεδίου.

Στις εικόνες (Εικόνα 4.8.1Εικόνα 4.8.2Εικόνα 4.8.3Εικόνα 4.8.4Εικόνα 4.8.5) παρουσιάζεται δοκίμιο εγκάρσιας τομής το οποίο αρχικά παρατηρείται με το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο, όντας το δοκίμιο από πριν μαγνητισμένο και ακολούθως με την εφαρμογή του μόνιμου μαγνήτη επάνω στο δοκίμιο.

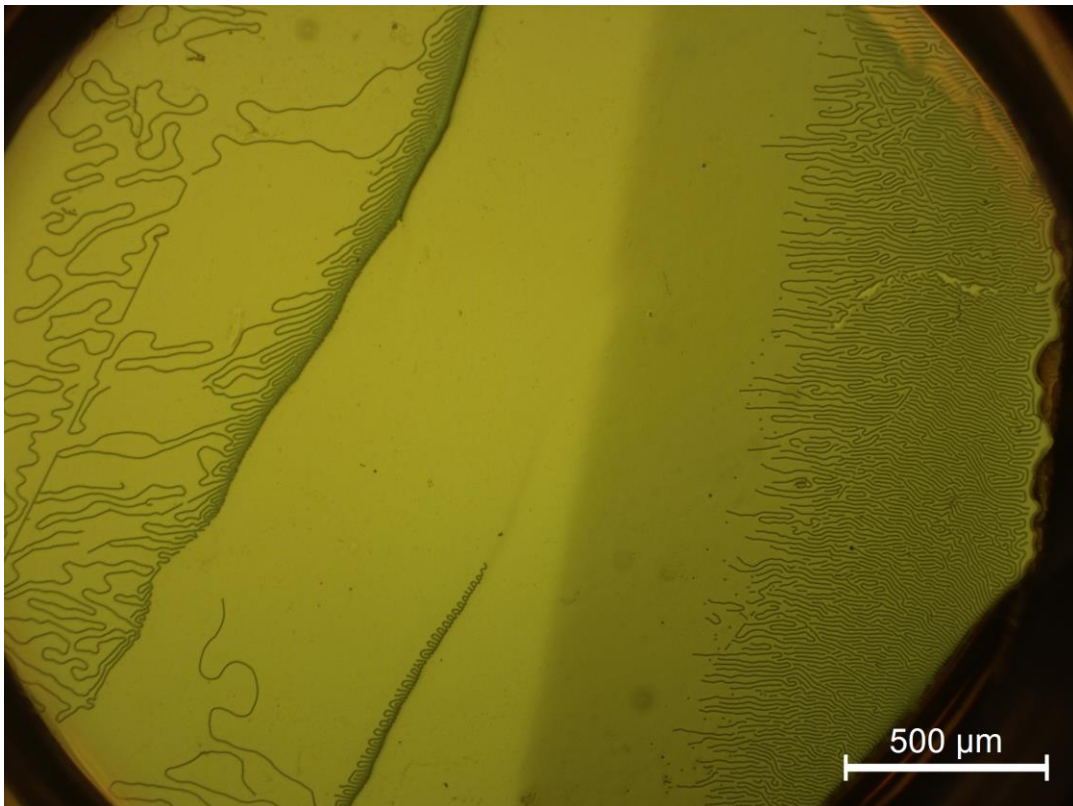


Εικόνα 4.8.1: Ρωγμές όπως φαίνονται λεπτομέρειες δύο ρωγμών της εγκάρσιας στιλβωμένης επιφάνειας της σιδηροτροχιάς C. Η απόσταση των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς είναι περίπου 3 mm αν και δεν διακρίνεται στην εικόνα.

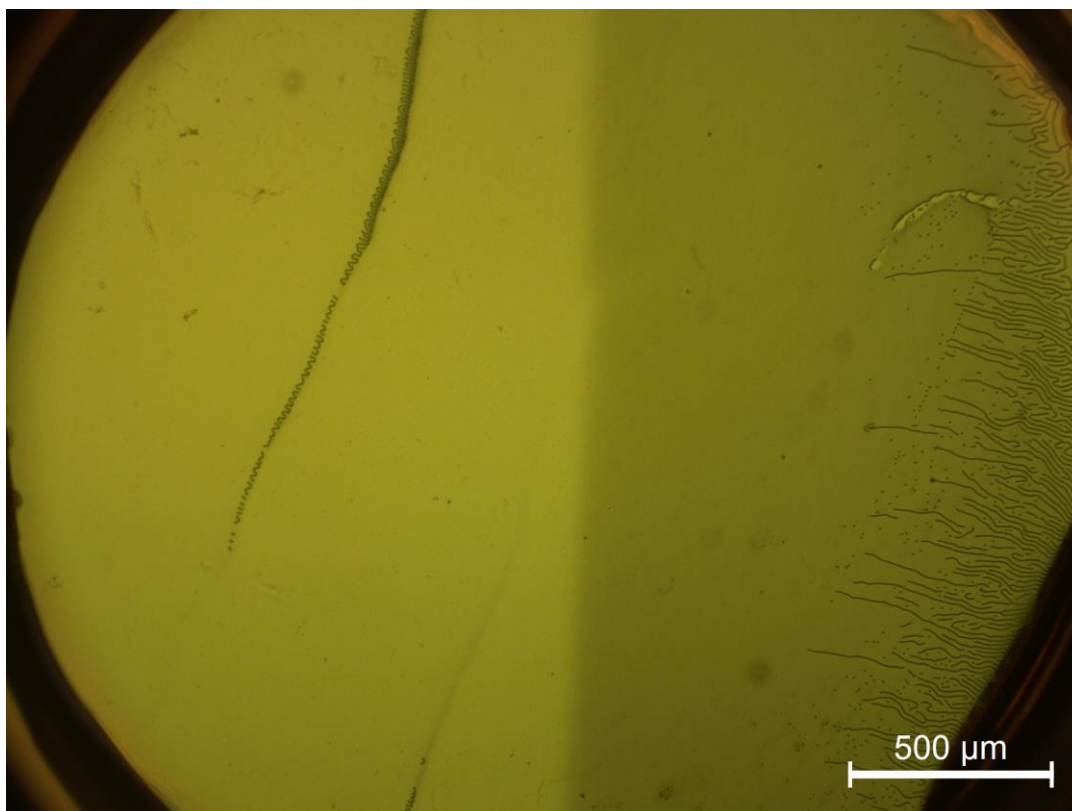
Η παρουσία του μόνιμου μαγνήτη μεταβάλλει την μαγνήτιση του δοκιμίου με συνέπεια την αλλαγή της τοπικής κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής, στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η συγκεκριμένες μετρήσεις αποδεικνύουν με σαφήνεια μαγνητική καταγωγή της οπτικής αντίθεσης. Επιπρόσθετα μας αποκαλύπτουν ότι με κατάλληλη εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μπορούμε να βελτιώσουμε την αντίθεση αλλά και να εξάγουμε πληροφορίες που σχετίζονται με μαγνητικές ατέλειες του χάλυβα. Σημειώνουμε ότι οι μαγνητικές ατέλειες μπορεί να συνδέονται με μηχανικές και μεταλλουργικές ατέλειες.



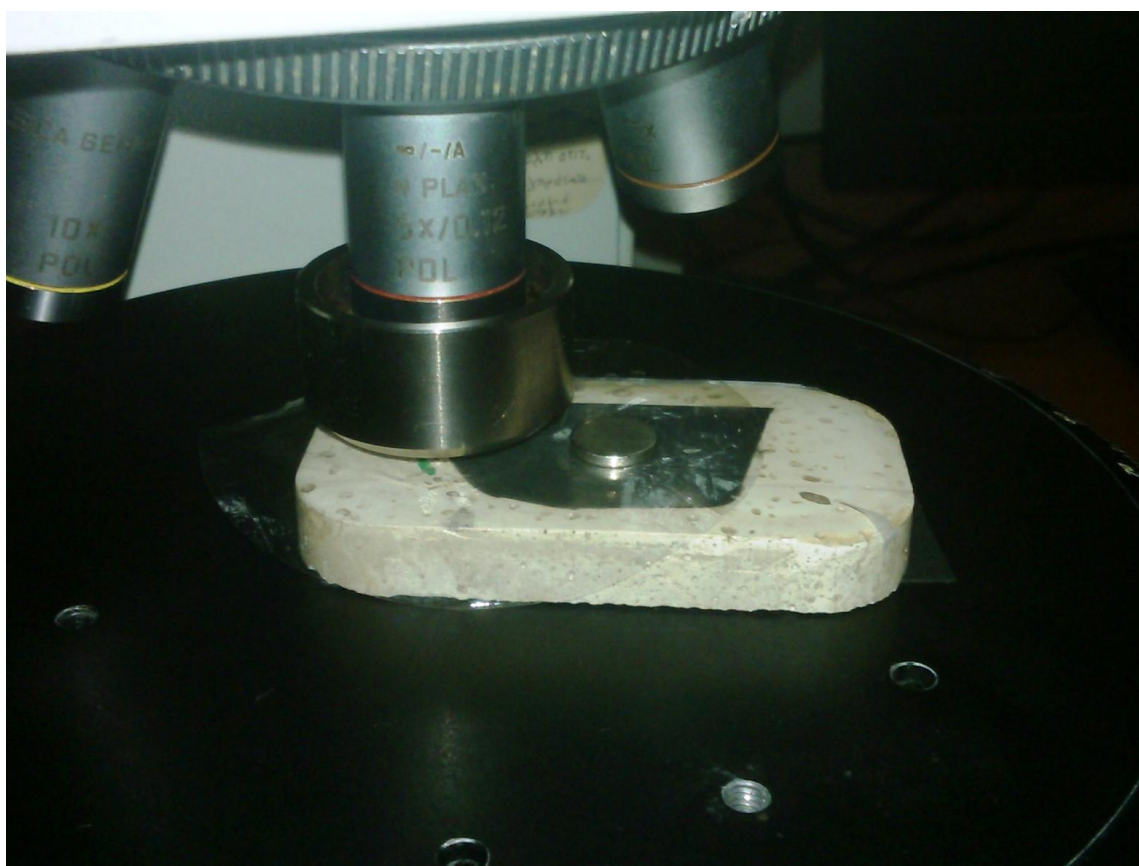
Εικόνα 4.8.2: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου . Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=90^\circ$. Στο δοκίμιο δεν εφαρμόζεται μαγνήτης.



Εικόνα 4.8.3: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου . Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=90^\circ$. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται μαγνήτης μακριά από το σημείο μέτρησης.



Εικόνα 4.8.4: Εικόνα πολωτικού μικροσκοπίου από την επιφάνεια του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου . Η γωνία του επιπέδου πόλωσης αναλυτή και πολωτή ήταν $\varphi=90^\circ$. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται μαγνήτης κοντά στο σημείο μέτρησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8.5

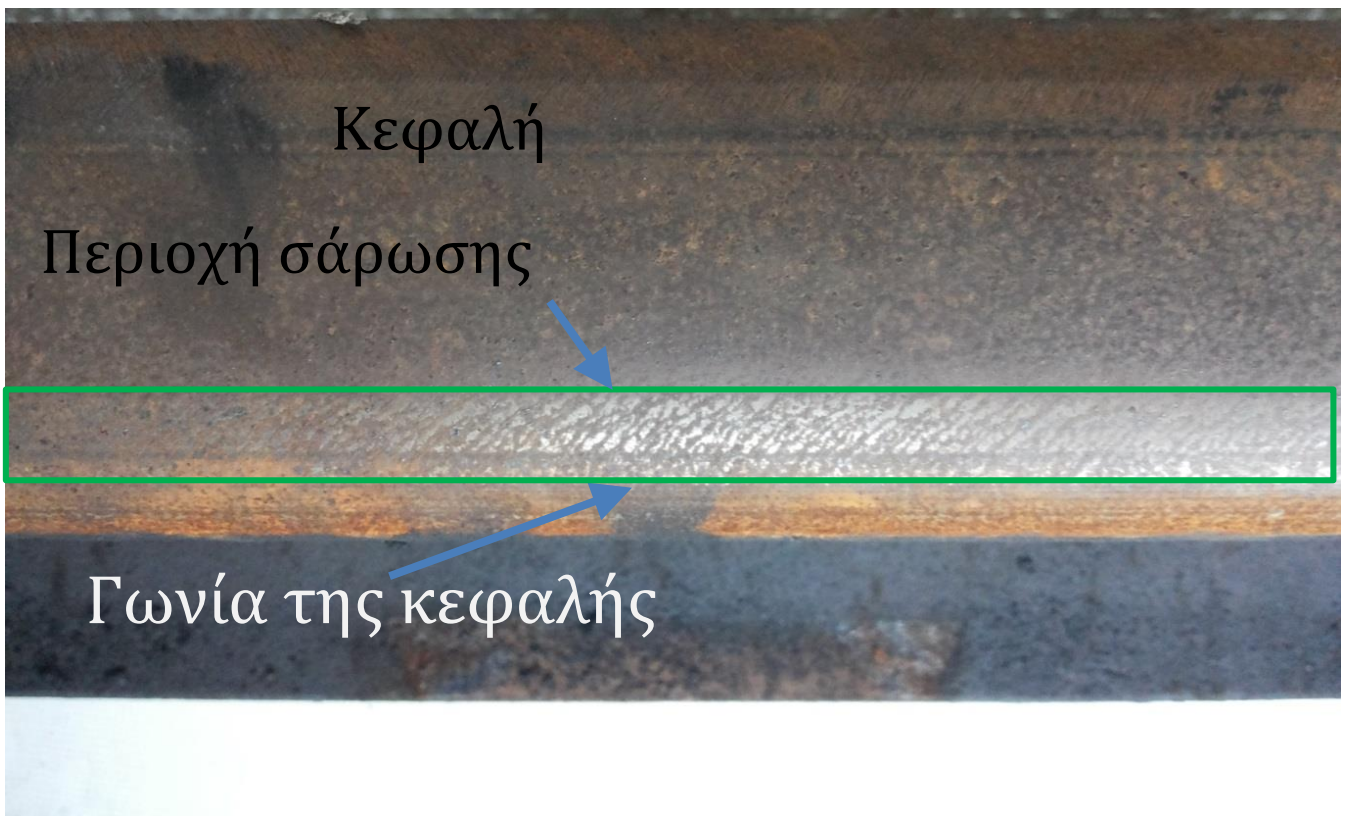


Εικόνα 4.8.5: Φωτογραφία όπου παρουσιάζεται η ακριβής θέση του μαγνήτη πάνω στο δοκίμιο.

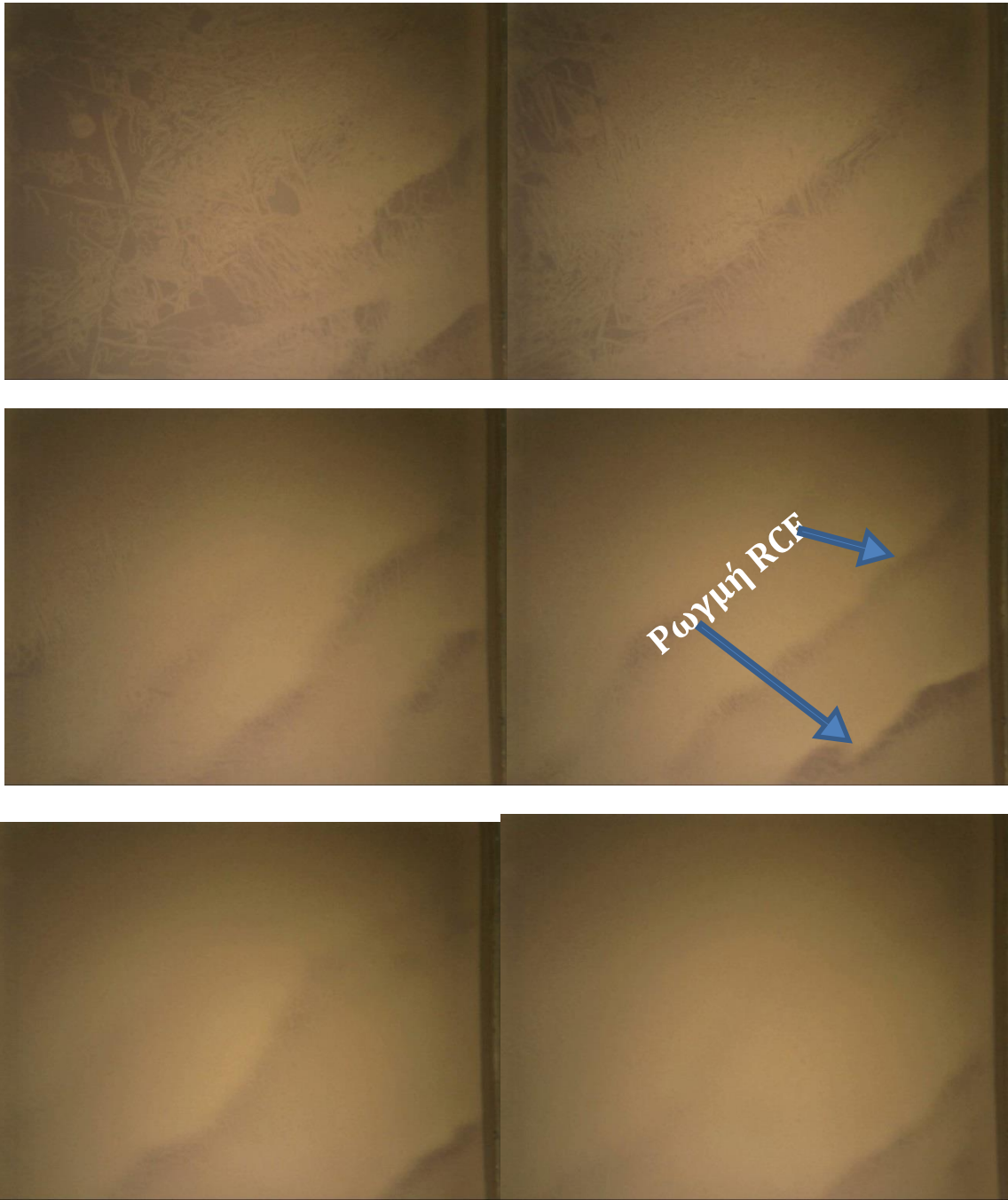
4.9 Μετρήσεις Πεδίου

Μετά την επιτυχή ανίχνευση ρωγμών σε εργαστηριακές μετρήσεις λειασμένων τομών από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς επιχειρήσαμε να ελέγξουμε τη συγκεκριμένη τεχνική σε μετρήσεις πεδίου στις εγκαταστάσεις του ΜΕΤΡΟ.

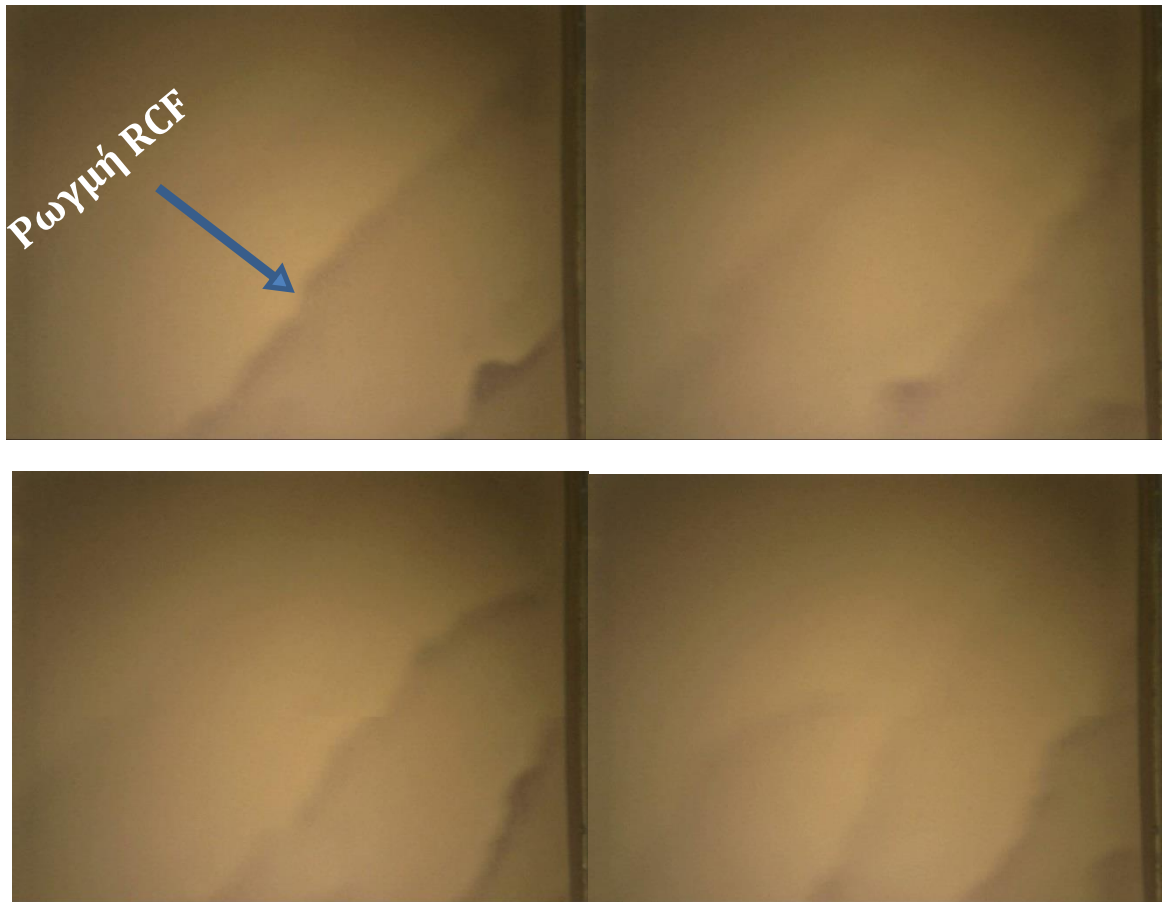
Στις εικόνες 5.7.1-5.7.3 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές μετρήσεις που έγιναν με το μικροσκόπιο Dino-Lite MagEye στις σιδηροτροχιές της ΣΤΑΣΥ ΑΕ /με σκοπό την ανίχνευση ρωγμών τύπου RCF. Η διάταξη είναι αυτή που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 4.4.3.



Εικόνα 4.9.1: Κεφαλή σιδηροτροχιάς από την οποία ελήφθησαν οι εικόνες της μαγνητοοπτικής αντίθεσης.



Εικόνα 4.9.2: Διαδοχικά στιγμιότυπα τα οποία ελήφθησαν από την κάμερα του φορητού μικροσκοπίου εφοδιασμένο με το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο, σε μία περιοχή κοντά στην γωνία της σιδηροτροχιάς. Οι κεκλιμένες ραβδώσεις αντιστοιχούν σε ρωγμές τύπου RCF. Το βίντεο τραβήχτηκε σε τμήμα της γραμμής του Αττικό μετρό. Η απόσταση των κεκλιμένων ραβδώσεων είναι περίπου 1 mm.



Εικόνα 4.9.3: (συνέχεια της προηγούμενης εικόνας) Διαδοχικά στιγμιότυπα τα οποία ελήφθησαν από την κάμερα του φορητού μικροσκοπίου εφοδιασμένο με το μαγνητοοπτικό κρύσταλλο σε μία περιοχή κοντά στην γωνία της σιδηροτροχιάς. Οι κεκλιμένες ραβδώσεις αντιστοιχούν σε ρωγμές τύπου RCF. Το βίντεο τραβήχτηκε σε τμήμα της γραμμής του Αττικό μετρό.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανίχνευση ρωγμών είναι μία σημαντική διαδικασία για την βελτίωση της ασφάλειας των κατασκευών. Όπως διαπιστώσαμε από τις μετρήσεις και την ανάλυση των εικόνων μαγνητοοπτικής αντίθεσης που λάβαμε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μαγνητοοπτική μέθοδος θα μπορούσε να αποτελέσει μία αξιόπιστη τεχνική μη καταστροφικού εντοπισμού ρωγμών τύπου RCF σε σιδηροτροχιές. Στην παρούσα διπλωματική αναπτύχθηκε η μεθοδολογία ανίχνευσης ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά αντικείμενα (δοκίμια) χρησιμοποιώντας το μαγνητοοπτικό φαινόμενο. Με χρήση λεπτού υμενίου από γρανάτη με χημικό τύπο $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ καταγράψαμε την οπτική αντίθεση που προκαλείται από τη διαφορετική στροφή του πολωμένου φωτός ως αποτέλεσμα του διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου στη γειτονιά μιας ρωγμής.

Η τεχνική μας εφαρμόστηκε στην ανίχνευση/καταγραφή των ρωγμών από κόπωση εξ επαφής σε κύλιση (Rolling contact fatigue) στην κεφαλή σιδηροτροχιών του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, με άριστα αποτελέσματα.

Οι μετρήσεις μας έδειξαν ότι η μαγνητοοπτική αντίθεση αντιστοιχεί πλήρως με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών. Η ένταση της αντίθεσης στα όρια των ρωγμών επηρεάζεται από το πόσο έντονο είναι το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή της ρωγμής. Αυτό αναδεικνύει την ποσοτική ανάλυση που μπορεί μελλοντικά να πραγματοποιηθεί μέσω του μαγνητοοπτικού κρυστάλλου.

Επίσης χρησιμοποιώντας φορητό πολωτικό μικροσκόπιο διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη τεχνική είναι μία αποτελεσματική μη καταστροφική τεχνική ανίχνευσης επιφανειακών ρωγμών σε δοκιμές πεδίου με όμως μικρότερη δυνατότητα ανάλυσης από την τεχνική ανάλυσης του εργαστηρίου.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε με περαιτέρω έρευνα είναι ικανό να ποσοτικοποιήσει το φαινόμενο RCF και μαζί με άλλες μετρήσεις (προφίλ, κόπωση της σιδηροτροχιάς κ.α.), να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης κινδύνου και σχεδιασμού συντήρησης. Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορεί να ταχτοποιήσει και να αναγνωρίσει τα τμήματα τροχιάς με τον υψηλότερο κίνδυνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **MacMaster, E. b. R. C.** *Nondestructive Testing Handbook*, vol. II. New York : The Ronald Press Company, 1959.
2. **Valev, V. K.** *Electromagnetic Waves*.
3. *Magneto-Optical Sensors Accurately Analyze Magnetic Field Distribution of Magnetic Materials*. **Koschny, Marco και Lindner, Morris**. FEBRUARY 2012, ADVANCED MATERIALS & PROCESSES.
4. **Leica**. *Leica DMR Instructions*. Wetzlar (Germany) : Leica Microsystems Wetzlar GmbH, 1999.
5. **Krauss, George**. *STEELS: Processing, Structure, and Performance*. Ohio : ASM International, 2005.
6. **Ν.Χαϊδεμενόπουλος, Γρηγόρης**. *Φυσική μεταλλουργία*. s.l. : Τζιόλα, 2007.
7. **C, Wells και R, F, MEhl**. Rate of Diffusion of Carbon on Austenite in Plain Carbon, in Nickel and in Manganese Steels. s.l. : Trans. AIME, 1940, σ. 279.
8. **Key to Metals AG**. *Key to Metals AG. Total Materia Web site*. [Ηλεκτρονικό] March 2009. www.totalmateria.com.
9. **Tata Steel**. *Rail technical guide*. London : Tata Steel, 2014.
10. **Gladman, T, McIvor, I.D και Pickering, F.B**. Some Aspects of the Structure-Property Relationships in High-Carbon Ferrite-Pearlite Steels. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1972, σσ. 916–930.
11. **Hyzak, J.M και Bernstein, I.M**. The role of Microstructure on the Strenght and Toughness of Fully Pearlitic Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A* . August 1976.
12. **Steele, R.K**. *A Perspective Review of Rail Behavior at the Facility*. U.S.Department of Transportation. Washington, D.C : Federal Railroad Administration,, 1981.
13. **Magel, Eric, και συν., και συν.** *Control of Rolling Contact Fatigue of Rails*. Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council Canada. Calgary, Alberta, Canada : National Research Council Canada.
14. **Alex Hubert and Rudolf Schafer**. *Magnetic domains: The analysis of magnetic microstructures*. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2009.
15. **Παπαδημητρίου, Γ.Δ.** *Γενική Μεταλλογνωσία* . Αθήνα : s.n., 1993.
16. **MacMaster, Edited by R. C.** *Nondestructive Testing Handbook*. New York : The Ronald Press Company, 1959. Τόμ. II.

17. **O. Orringer, Y. H. Tang, J.E. Gordon, D. Y. Jeong, J. M. Morris, A. B. Perlman** . *Crack Propagation Life of Detail Fractures in Rails*. s.l. : USA Department of Transportation, Federal Railroad Administration, (DOT/FRA/ORD-88/13, 1988).

18. **lumerical**. FDTD Solutions Numerical Methods.

