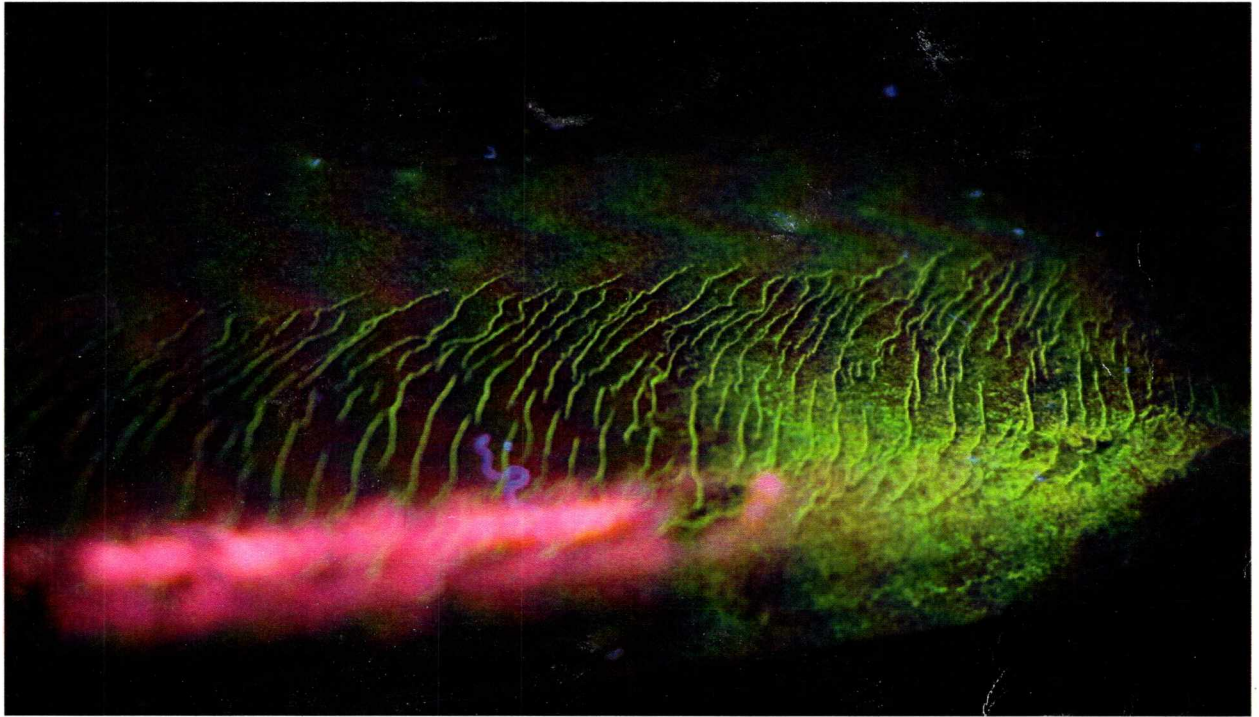


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μεταλλουργική Διερεύνηση Κόπωσης εξ Επαφής σε Κύλιση
(Rolling Contact Fatigue – RCF) σε Σιδηροτροχιές από το
Δίκτυο του Μετρό Αθηνών**

Παναγιώτης Χριστόπουλος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

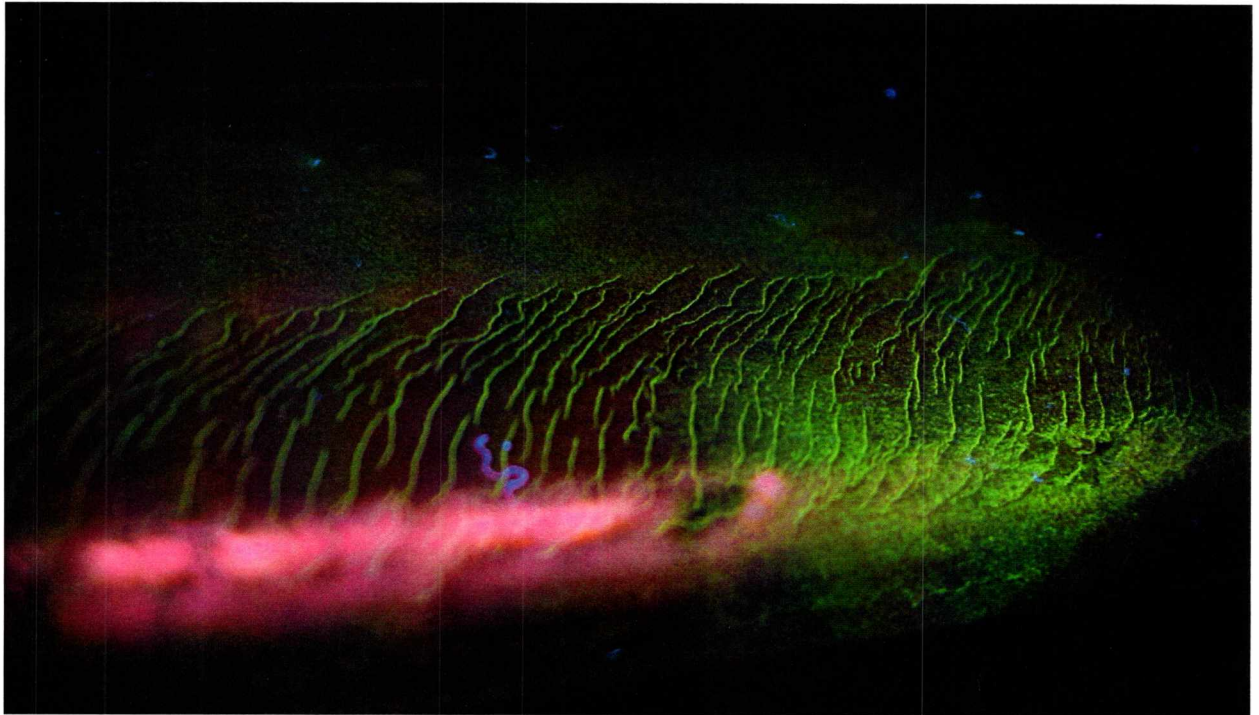
Βόλος, Οκτώβριος 2013



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12116/1
Ημερ. Εισ.: 28-11-2013
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2013
ΧΡΙ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μεταλλουργική Διερεύνηση Κόπωσης εξ Επαφής σε Κύλιση
(Rolling Contact Fatigue – RCF) σε Σιδηροτροχιές από το
Δίκτυο του Μετρό Αθηνών**

Παναγιώτης Χριστόπουλος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Οκτώβριος 2013

© 2013 Παναγιώτης Χριστόπουλος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει
αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη

(Επιβλέπουσα) Διδάσκουσα με Π.Δ. 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αλέξης Κερμανίδης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, Διδάσκουσα με Π.Δ. 407/80 Διδάκτορα κ. Άννα Ζερβάκη, για τη συστηματική και συνεχή βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της δουλειάς μου, αλλά και για τη συνεργασίας μας κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών. Επίσης, είμαι ευγνώμων στον επικεφαλής του Εργαστηρίου Υλικών, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, που μου ανέθεσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία σε αυτήν την πολύ ενδιαφέρουσα επιστημονική περιοχή και ακόμη με ενέπνευσε με τη διδασκαλία του να ασχοληθώ περισσότερο με την Επιστήμη των Υλικών. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη, για τη συμμετοχή του στην Εξεταστική Επιτροπή, αλλά και για τις γνώσεις που απέκτησα από τη διδασκαλία των μαθημάτων του σχετικών με την Επιστήμη των Υλικών. Οφείλω ευχαριστίες στη Διδάσκουσα με Π.Δ. 407/80 Διδάκτορα κ. Ελένη Καμούτση για τη βοήθεια της στη χρήση των συσκευών του εργαστηρίου και του υποστηρικτικού λογισμικού της εργασίας μου, στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Πέτρο Χριστοδούλου για την παροχή υλικού αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε και στο Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε. κ. Δημήτρη Πιτέρη από το Κέντρο Τεχνολογίας και Ποιοτικού Ελέγχου (ΚΕΤΕΠΕ) για την εφαρμογή του μη καταστρεπτικού ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα κ. Παναγιώτα Σαράφογλου και τη γραμματέα του Εργαστηρίου Υλικών κ. Ελεάνα Παππά για την υποστήριξη τους σε διάφορες φάσεις της εργασίας μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια των προπτυχιακών σπουδών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και φίλες για τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε στον ελεύθερό μου χρόνο.

Παναγιώτης Χριστόπουλος

Μεταλλουργική Διερεύνηση Κόπωσης εξ Επαφής σε Κύλιση (Rolling Contact Fatigue – RCF) σε Σιδηροτροχιές από το Δίκτυο του Μετρό Αθηνών

Παναγιώτης Χριστόπουλος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2013

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Άννα Ζερβάκη, Διδάσκουσα με Π.Δ. 407/80

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό να συσχετιστούν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δικτύου των ρωγματώσεων με την υπο-επιφανειακή όδευση τους και τα αποτελέσματά τους να αξιοποιηθούν σε επόμενη φάση σε πρόγραμμα ολικού ελέγχου του RCF (Rolling Contact Fatigue) στις σιδηροτροχιές του Μετρό Αθηνών.

Ο ολικός έλεγχος αφορά τον προσδιορισμό των συνθηκών για τον σχηματισμό και την ανάπτυξη των ρωγμών, την εξέλιξή τους σε καταστάσεις αποφλοιώσης ή ολικής θραύσης της διατομής, ενώ απαιτεί την κατανόηση του φαινομένου και τον προσδιορισμό της επίδρασης των συνθηκών λειτουργίας και της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού. Τα παραπάνω δεδομένα συνδυάστηκαν με την συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους εργαστηριακούς ελέγχους που περιελάμβαναν μη καταστρεπτικό ποιοτικό έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια (οπτικός έλεγχος, μέτρηση μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρωγμών), μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων και διαμήκων τομών (παρατήρηση εξέλιξης ρωγμών και σφαλμάτων RCF, μέτρηση εσωτερικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρωγμών) και μικροσκληρομέτρησεις.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αποτελούν χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια ελέγχου και πρόληψης του φαινομένου RCF στους σιδηροδρόμους και βοηθούν στη βελτιστοποίηση της εφαρμογής των προγραμματισμένων προληπτικών ελέγχων και του προληπτικού τροχίσματος, ως μεθόδου αντιμετώπισης του RCF.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1	Σφάλματα της σιδηροτροχιάς λόγω RCF	5
2.2	Έναρξη ρωγμών λόγω RCF	9
2.3	Μεταβατική ανάπτυξη και εξέλιξη των ρωγμών μέχρι τη θραύση.....	11
2.4	Μέθοδοι αντιμετώπισης του RCF	14
2.4.1	Εισαγωγή	14
2.4.2	Διορθωτικό τρόχισμα	15
2.4.3	Προληπτικό τρόχισμα.....	16
2.5	Ο ρόλος των φορτίων, των παραμορφώσεων και του ορίου shakedown.....	18
2.5.1	Η φόρτιση των σιδηροτροχιών.....	18
2.5.2	Ο ρόλος των παραμενουσών και θερμικών τάσεων.....	19
2.5.3	Όριο shakedown και κατάσταση ratchetting.....	20
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	22
3.1	Χημική ανάλυση και μηχανικές δοκιμές.....	23
3.2	Μη καταστρεπτικός έλεγχος και μέτρηση μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρωγμών	23
3.3	Προετοιμασία δοκιμίων, μεταλλογραφική ανάλυση και μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρωγμών στο εσωτερικό σιδηροτροχιάς	24
3.4	Μικροσκληρομετρήσεις	26
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	27
4.1	Χημική ανάλυση και μηχανικές ιδιότητες.....	27
4.2	Μη καταστρεπτικός έλεγχος και μέτρηση μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών	28
4.2.1	Μήκος ρωγμών	30
4.2.2	Απόσταση μεταξύ ρωγμών	31
4.2.3	Απόσταση του άκρου της ρωγμής από το gauge corner.....	31
4.2.4	Καμπυλότητα των ρωγμών.....	32
4.2.4	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αποφλοιώσης	34
4.3	Μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων και διαμήκων τομών.....	35
4.3.1	Δειγματοληψία εγκάρσιων και διαμήκων τομών	35
4.3.2	Μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων τομών περιοχής C1.....	38
4.3.3	Μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων τομών περιοχής B1.....	41
4.3.4	Μεταλλογραφική ανάλυση διαμήκων τομών περιοχής C1	45
4.3.5	Μεταλλογραφική ανάλυση διαμήκων τομών περιοχής B1	50
4.3.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων των τομών των περιοχών B1 και C1.....	53
4.4	Μικροσκληρομέτρηση εγκάρσιων και διαμήκων τομών	54
4.4.1	Μικροσκληρομέτρηση εγκάρσιων τομών	54
4.4.2	Μικροσκληρομέτρηση διαμήκων τομών.....	57
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	62
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.	64

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1	Κόστος (σε ετήσια βάση) RCF στο δίκτυο της Αττικό Μετρό [πηγή: Τμήμα Συντήρησης Επιδομής Α. Μετρό]	2
Πίνακας 4.1	Χημική ανάλυση (% κ.β.) και μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα των σιδηροτροχιών	27
Πίνακας 4.2	Μέσο μήκος ρωγμών και τυπική απόκλιση στις περιοχές B1 και C1	30
Πίνακας 4.3	Μέση απόσταση μεταξύ ρωγμών και τυπική απόκλιση στις περιοχές B1 και C1	31
Πίνακας 4.4	Μέση απόσταση του άκρου ρωγμής από το gauge corner και η τυπική απόκλιση της στις περιοχές B1 και C1	32
Πίνακας 4.5	Μέση καμπυλότητα ρωγμών και η τυπική απόκλιση τους στην περιοχή B1	33
Πίνακας 4.6	Μέση καμπυλότητα ρωγμών και η τυπική απόκλιση τους στην περιοχή C1	33
Πίνακας 4.7	Μέσα γεωμετρικά μεγέθη και τυπικές αποκλίσεις αποφλοιώσεων στην περιοχή B1	34
Πίνακας 4.8	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.1	39
Πίνακας 4.9	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.2	40
Πίνακας 4.10	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.1	43
Πίνακας 4.11	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.2	45
Πίνακας 4.12	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.3	47
Πίνακας 4.13	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.5	49
Πίνακας 4.14	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.3	51
Πίνακας 4.15	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.4	52
Πίνακας 4.16	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών εγκάρσιων τομών	53
Πίνακας 4.17	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών διαμήκων τομών	53

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Ολική θραύση της σιδηροτροχιάς στο δυστύχημα του Hatfield [5].....	2
Σχήμα 1.2	Εξέλιξη σφαλμάτων σιδηροτροχιάς και αντίστοιχα στάδια ελέγχου [6] .	3
Σχήμα 2.1	Φαινόμενα shelling στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς [9]	7
Σχήμα 2.2	Σχηματική αναπαράσταση έναρξης ρωγμών επιφανειακά (σε τρήματα) και υποεπιφανειακά (στον πυθμένα αποφλοιώσεων) [7]	7
Σχήμα 2.3	Φαινόμενα αποφλοιώσης με έναρξη σε head checks [4]	7
Σχήμα 2.4	Εξέλιξη του φαινομένου των squat [11].....	8
Σχήμα 2.5	Ρωγή σχήματος «νεφρού» [4]	8
Σχήμα 2.6	Στάδια έναρξης και ανάπτυξης των ρωγμών [3]	9
Σχήμα 2.7	Έναρξη ρωγμής κόπωσης σε περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης [14].....	11
Σχήμα 2.8	Μηχανισμοί επίδρασης κατά την εξέλιξη της ρωγμής [4]	13
Σχήμα 2.9	Συσχετισμός βάθους εξέλιξης ρωγμής με το επιφανειακό μήκος ρωγμής [5].....	16
Σχήμα 2.10	Σχηματική αναπαράσταση των επιβαλλόμενων φορτίων [10].....	18
Σχήμα 2.11	Ποιοτικό προφίλ των παραμενουσών παραμορφώσεων πριν και μετά την εισαγωγή των σιδηροτροχιών στο δίκτυο [17].....	19
Σχήμα 2.12	Απόκριση του υλικού σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης [4].	20
Σχήμα 2.13	Επίδραση της τριβής ολίσθησης στην πρώτη πλαστική παραμόρφωση και στο όριο shakedown [9].....	21
Σχήμα 3.1	Τμήμα σιδηροτροχιάς C	22
Σχήμα 3.2	Αντιπροσωπευτική περιοχή από το τμήμα της σιδηροτροχιάς C για τη δημιουργία του δοκιμίου C1	24
Σχήμα 3.3	Συσκευή κοπής εργαστηρίου υλικών	25
Σχήμα 3.4	Συσκευές λείανσης και στίλβωσης του εργαστηρίου υλικών	25
Σχήμα 3.5	Οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο εργαστηρίου υλικών.....	26
Σχήμα 4.1	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του χάλυβα Grade 900A	28
Σχήμα 4.2	Ρωγμές και αποφλοιώσεις στην περιοχή B1 (το βέλος υποδεικνύει τη φορά κίνησης του συρμού).....	28
Σχήμα 4.3	Ρωγμές στην περιοχή C1 (το βέλος υποδεικνύει τη φορά κίνησης του συρμού).....	29
Σχήμα 4.4	Τρόπος μέτρησης μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών α) μήκος ρωγμής, β) απόσταση μεταξύ ρωγμών, γ) απόσταση άκρου ρωγμής από gauge corner, δ) καμπυλότητα ρωγμής, ε) απόσταση μεταξύ αποφλοιώσεων, στ) μήκος και πλάτος αποφλοιώσεων	30
Σχήμα 4.5	Μέτρηση μήκους ρωγμών στην περιοχή B1	31
Σχήμα 4.6	Μέτρηση απόστασης μεταξύ ρωγμών στην περιοχή B1	31
Σχήμα 4.7	Μέτρηση της απόστασης του άκρου της ρωγμής από το gauge corner (περιοχή B1)	32
Σχήμα 4.8	Μέτρηση της καμπυλότητας των ρωγμών στην περιοχή B1.....	34
Σχήμα 4.9	Μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αποφλοιώσεων στην περιοχή B1	34
Σχήμα 4.10	Δειγματοληψία εγκάρσιων και διαμήκων τομών στην περιοχή C1	35
Σχήμα 4.11	Δειγματοληψία εγκάρσιων και διαμήκων τομών στην περιοχή B1	36
Σχήμα 4.12	Διαμήκης τομή τύπου I (αριστερά) και διαμήκης τομή τύπου II (δεξιά).....	37
Σχήμα 4.13	Τρόπος μέτρησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών εγκάρσιων τομών ...	37
Σχήμα 4.14	Τρόπος μέτρησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών διαμήκων τομών.....	38

Σχήμα 4.15	Δοκίμιο C1.1 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Αντιπροσωπευτική ρωγμή δοκιμίου, γ) Έντονα παραμορφωμένοι κόκκοι, δ) Προευτηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων	39
Σχήμα 4.16	Δοκίμιο C1.2 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Αντιπροσωπευτική ρωγμή και διακλάδωση.....	40
Σχήμα 4.17	Δοκίμιο B1.1 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Ρωγμές παράλληλες στην επιφάνεια και αποκόλληση υλικού, γ) Προευτηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων	42
Σχήμα 4.18	Δοκίμιο B1.2 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Προευτηκτοειδής φερρίτης, στα σύνορα των κόκκων, γ) Δίκτυο ρωγμών κοντά στην επιφάνεια, δ) Ρωγμές με διαφορετική συμπεριφορά	44
Σχήμα 4.19	Δοκίμιο C1.3 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Διακλάδωση ρωγμής, γ) Συνένωση ρωγμών.....	46
Σχήμα 4.20	Δοκίμιο C1.5 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Τμηματική διάβρωση, γ) Διακλάδωση ρωγμών, δ) Τρηματική διάβρωση.....	48
Σχήμα 4.21	Δοκίμιο B1.3 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Διακλάδωση ρωγμής	50
Σχήμα 4.22	Δοκίμιο B1.4 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Αντιπροσωπευτική ρωγμή δοκιμίου	51
Σχήμα 4.23	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου C1.1.....	54
Σχήμα 4.24	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου C1.2.....	55
Σχήμα 4.25	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου B1.1.....	55
Σχήμα 4.26	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου B1.2.....	55
Σχήμα 4.27	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας αχρησιμοποίητης σιδηροτροχιάς	56
Σχήμα 4.28	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας διαμήκων δοκιμίων C1.3 και C1.5	57
Σχήμα 4.29	Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας διαμήκων δοκιμίων B1.3 και B1.4	58

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χάλυβες κατασκευής των σιδηροτροχιών παίζουν κύριο ρόλο στην ασφάλεια των σιδηροδρομικών δικτύων παγκοσμίως. Οι κυριότερες λειτουργίες τους είναι να μεταφέρουν τα δυναμικά φορτία των τροχών στο έδαφος και να εξασφαλίζουν την κίνηση του συρμού στη σωστή διεύθυνση, τόσο στα ευθύγραμμα, όσο και στα καμπύλα τμήματα των σιδηροτροχιών [1]. Οι συνθήκες που επικρατούν στη περιοχή της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή φυσική φθορά, το περιβάλλον λειτουργίας μπορεί να προκαλέσει διάβρωση, ενώ οι σιδηροτροχιές μπορεί να αντιμετωπίσουν υψηλά μηχανικά και θερμικά φορτία κατά την εγκατάσταση και τη συντήρησή τους. Κατά τη λειτουργία, οι σιδηροτροχιές υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενα δυναμικά φορτία και για αυτό το λόγο είναι επιρρεπείς στη φυσική φθορά και στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω εσωτερικών σφαλμάτων της σιδηροτροχιάς και λόγω κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση (rolling contact fatigue – RCF). Το φαινόμενο ενεργοποιείται και κατευθύνεται από τις τάσεις επαφής (Hertz) [2].

Τα τελευταία 20 χρόνια οι υψηλές απαιτήσεις κυκλοφορίας στους σιδηρόδρομους οδήγησαν στην αύξηση του φορτίου του άξονα των τροχών, της ταχύτητας και της συχνότητας διέλευσης των συρμών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού σχηματισμού σφαλμάτων που προέρχονται από RCF σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σφάλματα, και κατά συνέπεια την αύξηση του κόστους συντήρησης [3]. Τα νέα αυτά δεδομένα στον τομέα των σιδηροδρόμων επαληθεύτηκαν στο δυστύχημα του Hatfield στην Αγγλία το 2000, όπου τέσσερα άτομα σκοτώθηκαν και άλλα εβδομήντα τραυματίστηκαν, λόγω ολικής θραύσης στην εξωτερική πλευρά καμπύλων τμημάτων της σιδηροτροχιάς που προήλθε από εξέλιξη επιφανειακών ρωγμών, κατά την εγκάρσια διεύθυνση, μέχρι το πέλμα της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 1.1) [4].

Παρόλο που υπάρχει μεγάλη πρόοδος στη μηχανική των σιδηροδρομικών γραμμών, στην τεχνολογία υλικών, στις μεθόδους παραγωγής και στις τεχνολογίες επιθεώρησης των σιδηροτροχιών, τα σφάλματα των σιδηροτροχιών που προκύπτουν από το φαινόμενο του RCF αποτελούν σημαντική απειλή τόσο για την ασφάλεια, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όσο και για το διαρκώς αυξανόμενο κόστος συντήρησης των σιδηροτροχιών. Στον Πίνακα 1.1 δίδεται η εκτίμηση του ετήσιου κόστους του φαινομένου, καθώς και η εκτιμώμενη εξοικονόμηση χρημάτων από την εφαρμογή αξιόπιστου συστήματος ποιοτικού ελέγχου στο δίκτυο της Αττικό Μετρό στην Αθήνα.



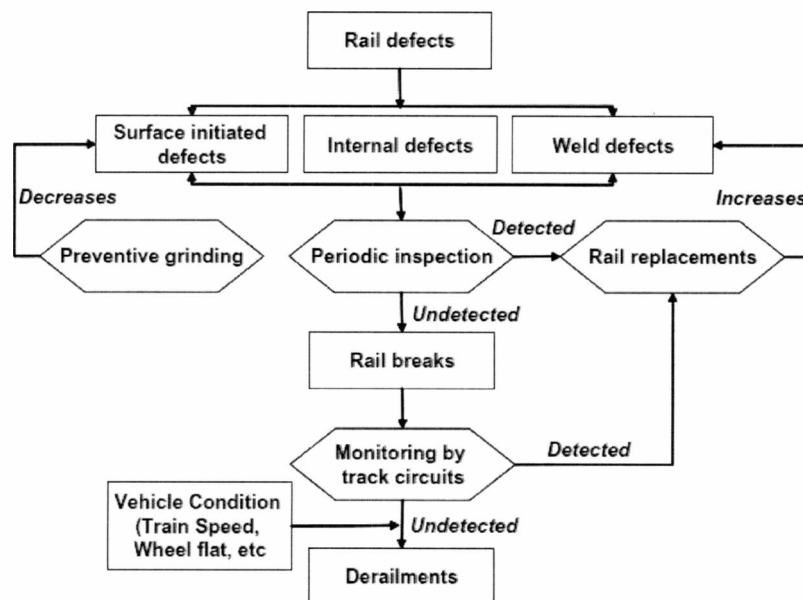
Σχήμα 1.1 Ολική θραύση της σιδηροτροχιάς στο δυστύχημα του Hatfield [5]

Πίνακας 1.1 Κόστος (σε ετήσια βάση) RCF στο δίκτυο της Αττικό Μετρό [πηγή: Τμήμα Συντήρησης Επιδομής Α. Μετρό]

Κόστος συντήρησης χωρίς σύστημα ποιοτικού ελέγχου	€	Μείωση κόστους συντήρησης με σύστημα ποιοτικού ελέγχου	€
Ετήσιο κόστος αντικαταστάσεων τμημάτων σιδηροτροχιών	200.000	Εκτιμώμενη ετήσια μείωση 50%	100.000
Ετήσιο κόστος λόγω παλαιότητας δικτύου	100.000	Ετήσιο όφελος από την επέκταση του δικτύου	50.000
Ετήσιο κόστος προληπτικής συντήρησης	1.100.000	Ετήσιο όφελος από τη μείωση κόστους συντήρησης	900.000
Ετήσιο κόστος επισκευών	50.000	Ετήσιο όφελος από τη μείωση τραυματισμών	30.000
Σύνολο	1.450.000	Ετήσιο όφελος από τη χρήση μεθόδων NDT	1.080.000

Τα σφάλματα που προκύπτουν λόγω RCF μπορούν να χωριστούν σε σφάλματα που ξεκινούν από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και σε σφάλματα που ξεκινούν κάτω από την επιφάνειά της. Οι υποεπιφανειακές ρωγμές προκαλούνται από μεταλλουργικής φύσεως σφάλματα στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς, ενώ οι επιφανειακές ρωγμές προέρχονται από τις υψηλές διατμητικές τάσεις που προκαλούν ολιγοκυκλική κόπωση και εξάντληση της ολκιμότητας του υλικού [6]. Οι μικροσκοπικές ρωγμές ξεκινούν με πολύ μικρή κλίση (περίπου 10°) από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και εξελίσσονται δια μέσου των υψηλά παραμορφωμένων στρωμάτων υλικού μέχρι να φτάσουν σε ένα

βάθος όπου το υλικό παραμένει ισότροπο. Η εξέλιξη των ρωγμών στα πρώτα στάδια υποβοηθείται από το ρευστό που παγιδεύεται μέσα στη ρωγμή με αποτέλεσμα να ασκεί πίεση στα τοιχώματα της ρωγμής και να μειώνει την τριβή μεταξύ των δύο επιφανειών της ρωγμής. Αν δεν ανιχνευτούν οι ρωγμές κατά τον περιοδικό μη καταστρεπτικό ποιοτικό έλεγχο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εξελιχθούν κατά την εγκάρσια διεύθυνση μέχρι το πέλαμα της σιδηροτροχιάς με αποτέλεσμα την ολική θραύση και τον κίνδυνο εκτροχιασμού του συρμού, όπως φαίνεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 1.2. Τα προβλήματα λόγω RCF μπορούν να ελαχιστοποιηθούν κατά μεγάλο βαθμό αν εφαρμοστεί προληπτικό τρόχισμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με το προληπτικό τρόχισμα αφαιρούνται τα στρώματα υλικού τις επιφάνειας που έχουν υποστεί RCF και περιέχουν ρωγμές σε πρώιμο στάδιο, και επίσης αναδιαμορφώνεται το εγκάρσιο προφίλ της σιδηροτροχιάς, έτσι ώστε να μειωθούν οι τάσεις επαφής στην επιφάνειά της [2].



Σχήμα 1.2 Εξέλιξη σφαλμάτων σιδηροτροχιάς και αντίστοιχα στάδια ελέγχου [6]

Σε αυτή την εργασία, δόθηκε βάση στην πλήρη μεταλλουργική διερεύνηση του RCF σε σιδηροτροχίες από το δίκτυο του Μετρό Αθηνών οι οποίες αφαιρέθηκαν από το δίκτυο κατόπιν προβλημάτων RCF που εμφάνισαν, έπειτα από εφαρμογή τροχίσματος για την απομάκρυνση προηγούμενων σφαλμάτων RCF. Πιο συγκεκριμένα:

- προσδιορίστηκε η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα της σιδηροτροχιάς,

- πραγματοποιήθηκε μη καταστρεπτικός έλεγχος (Non-Destructive Testing – NDT) με μαγνητικά σωματίδια και στη συνέχεια μετρήθηκαν τα μακροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών,
- πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική ανάλυση σε εγκάρσια και διαμήκη δοκίμια και στην συνέχεια μετρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς, ενώ τέλος πραγματοποιήθηκαν προφίλ μικροσκληρομετρήσεων σε όλα τα δοκίμια.

Τα αποτελέσματα της εργασίας συσχετίζουν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δικτύου των ρωγματώσεων, με την υπο-επιφανειακή όδευση τους, και μπορούν να αξιοποιηθούν σε πρόγραμμα ολικού ελέγχου του RCF στις σιδηροτροχιές.

Ο ολικός έλεγχος αφορά τον προσδιορισμό των συνθηκών για τον σχηματισμό και την ανάπτυξη των ρωγμών και την εξέλιξή τους σε καταστάσεις αποφλοιώσης ή ολικής θραύσης της διατομής. Ο ολικός έλεγχος απαιτεί την κατανόηση του φαινομένου και τον προσδιορισμό της επίδρασης των συνθηκών λειτουργίας (γεωμετρία συστήματος τροχού-σιδηροτροχιάς, μεταφερόμενο φορτίο, συχνότητα και ταχύτητα διέλευσης, καμπυλότητες τροχιάς, συνθήκες τριβής και λίπανσης, επιφανειακή τραχύτητα κεφαλής, παραμένουσες τάσεις από την κατασκευή της επιδομής) και της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού (όρια πλαστικότητας, εργοσκλήρυνση, όρια shakedown, ratchetting, δυσθραυστότητα, όρια διαρκούς αντοχής στην κόπωση, ταχύτητα ανάπτυξης ρωγμών σε κόπωση). Τα παραπάνω δεδομένα εφόσον συνδυαστούν με τα ευρήματα NDT και εξέλιξης των ρωγμών RCF από μεταλλογραφικές τομές, μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο ελέγχου και πρόληψης του φαινομένου.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Σφάλματα της σιδηροτροχιάς λόγω RCF

Οι αστοχίες των σιδηροτροχιών στις ημέρες μας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες [2] :

- α) Αυτές που δημιουργούνται από σφάλματα που προέρχονται από την παραγωγή των σιδηροτροχιών.
- β) Αυτές που δημιουργούνται από σφάλματα ή φθορές που προέρχονται από τον ακατάλληλο χειρισμό, εγκατάσταση και χρήση των σιδηροτροχιών.
- γ) Αυτές που προέρχονται από την εξάντληση της αντοχής του χάλυβα των σιδηροτροχιών λόγω φθοράς από κόπωση.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση στα σφάλματα που προκαλούνται από RCF και για αυτό το λόγο η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της προς την κατεύθυνση κατανόησης και ελέγχου του φαινομένου. Τα σημαντικότερα σφάλματα της σιδηροτροχιάς από RCF είναι τα παρακάτω [4, 7, 8, 9, 10] .

Shelling: Λεπτές ρωγμές λόγω κόπωσης αναπτύσσονται κάτω από την επιφάνεια του gauge corner και όταν επεκταθούν δημιουργούν ένα δίκτυο ρωγμών που συνεχίζει μέχρι την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς (Σχήμα 2.1). Εκτεταμένο shelling δημιουργεί αποφλοίωση υλικού στην επιφάνεια του gauge corner (spalling). Παρατηρείται συνήθως στην εξωτερική πλευρά καμπύλων τμημάτων της σιδηροτροχιάς.

Spalling (αποφλοίωση): Το πεδίο τάσεων επαφής (τάσεις Hertz) είναι συγκεντρωμένο σε μια μικρή περιοχή κάτω από την επιφάνεια επαφής και προκαλεί πλαστική παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή αυξάνεται συνεχώς με κάθε διέλευση τροχού με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ρωγμής ή οποία στη συνέχεια αναπτύσσεται σε κάθε νέα διέλευση τροχού και τις περισσότερες φορές επιφέρει αποφλοίωση του υλικού (Σχήμα. 2.2) (spalling).

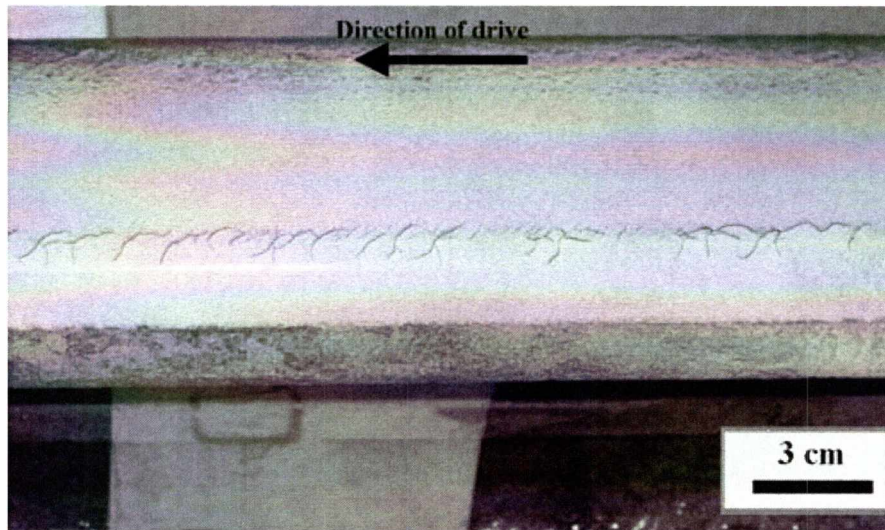
Pitting (τρηματική διάβρωση): Είναι ο σχηματισμός μικροσκοπικών εγχοπών και κοιλοτήτων στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, που δημιουργούνται λόγω του συνδυασμού των φαινομένων RCF και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το βάθος της

τρηματικής διάβρωσης είναι 2-10 φορές μικρότερο από το βάθος της αποφλοίωσης (Σχήμα. 2.2) (spalling).

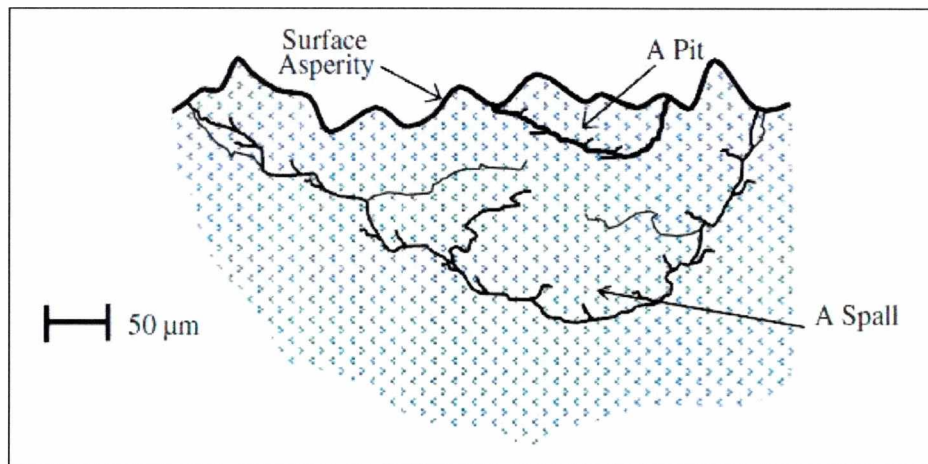
Head Checks: Είναι μια πυκνή ομάδα παράλληλων ρωγμών κατά την εγκάρσια διεύθυνση της σιδηροτροχιάς, που ξεκινούν από το gauge corner και εξελίσσονται υπό γωνία 10-25° προς το εσωτερικό του gauge corner (Σχήμα. 2.3). Η απόσταση μεταξύ των ρωγμών είναι 0,5-7 mm και εμφανίζονται κυρίως στην εξωτερική πλευρά καμπύλων τμημάτων της σιδηροτροχιάς αλλά και σε ευθεία τμήματα, τμήματα διασταυρώσεων και τμήματα αλλαγής της διεύθυνσης τροχιάς (switch or crossing rails). Αυτό το είδος σφάλματος δημιουργείται λόγω των μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων που προκαλούνται από τις δυνάμεις τριβής και τα κάθετα φορτία. Η επικινδυνότητα των head checks συνίσταται στο ότι οι πυκνές ρωγμές μπορεί να οδηγήσουν σε ολική θραύση της σιδηροτροχιάς και εκτροχιασμό του συρμού, όπως συνέβη και στο ατύχημα του Hatfield της Αγγλίας τον Οκτώβριο του 2000.

Squat: Είναι μικρές ρωγμές οι οποίες εμφανίζονται στην επιφάνεια επαφής τροχού-ράγας και δημιουργούν αποφλοίωση του υλικού (Σχήμα. 2.4). Σε αντίθεση με το shelling και τα head checks, τα squats εμφανίζονται σε ευθεία τμήματα σιδηροτροχιών, σε τυχαία και απομονωμένα σημεία. Αυτό το είδος σφάλματος επίσης δημιουργείται λόγω των μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων και αναγνωρίζεται οπτικά ή μακροσκοπικά από την διεύρυνση του ίχνους επαφής τροχού-ράγας, αλλά και από τη μικρή συμπίεση της επιφάνειας, γνωστή και ως «σκούρο σημείο» (“dark spot”).

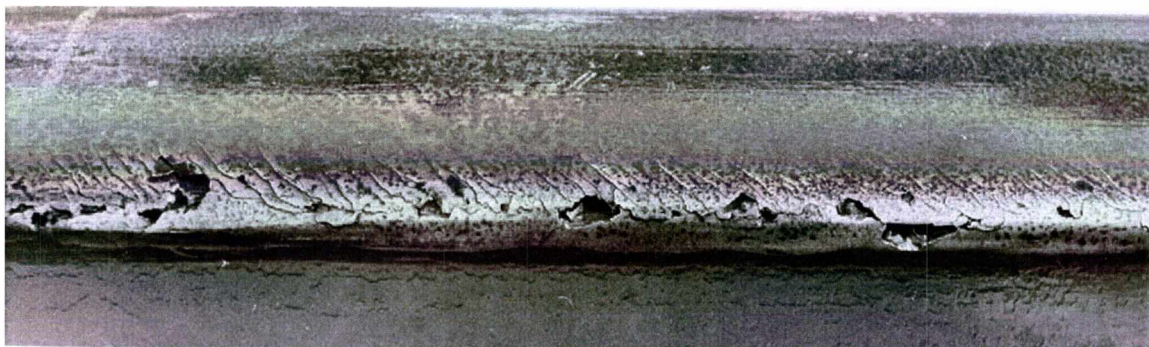
Εγκάρσιες ρωγμές: Σφάλματα όπως shelling, head check και squat μπορούν να εξελιχθούν σε εγκάρσιες ρωγμές και να επιφέρουν ολική θραύση της σιδηροτροχιάς (Σχήμα. 2.5). Συνήθως τα σφάλματα αυτά ξεκινούν κάτω από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και εξελίσσονται σε όλη τη διατομή της. Τυπικό είδος ρωγμής αυτής της κατηγορίας σφαλμάτων είναι η λεγόμενη ρωγμή σχήματος «νεφρού» (“kidney” shaped crack).



Σχήμα 2.1 Φαινόμενα shelling στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς [9]



Σχήμα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση έναρξης ρωγμών επιφανειακά (σε τρήματα) και υποεπιφανειακά (στον πυθμένα αποφλοιώσεων) [7]



Σχήμα 2.3 Φαινόμενα αποφλοιώσης με έναρξη σε head checks [4]



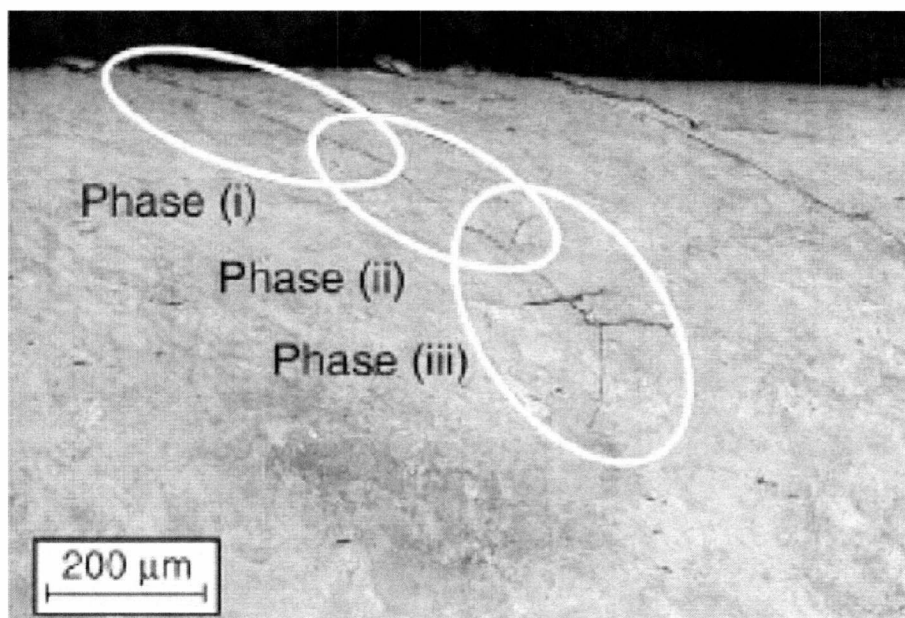
Σχήμα 2.4 Εξέλιξη του φαινομένου των squat [11]



Σχήμα 2.5 Ρωγμή σχήματος «νεφρού» [4]

2.2 Έναρξη ρωγμών λόγω RCF

Η διάρκεια ζωής σε κόπωση διακρίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αναφέρεται στους κύκλους που απαιτούνται για την έναρξη της ρωγμής, ενώ το δεύτερο στάδιο αναφέρεται στους κύκλους που απαιτούνται για την μεταβατική ανάπτυξη και εξέλιξη της ρωγμής μέχρι την αστοχία του υλικού (Σχήμα 2.6). Στις σιδηροδρομικές ράγες η μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο γίνεται όταν το μήκος της ρωγμής φτάσει το κρίσιμο μέγεθος των 0,1-0,5 mm, δηλαδή το μήκος 3-5 κόκκων.



Σχήμα 2.6 Στάδια έναρξης και ανάπτυξης των ρωγμών [3]

Η έναρξη των ρωγμών μπορεί να γίνει είτε στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, είτε κάτω από την επιφάνεια της. Οι επιφανειακές ρωγμές δημιουργούνται λόγω των υψηλών φορτίων της αντίστασης τριβής στις σιδηροτροχιές υψηλής ταχύτητας, ενώ η δημιουργία των υποεπιφανειακών ρωγμών εμφανίζεται κάτω από το gauge corner κυρίως σε γραμμές υψηλού φορτίου και πιο συγκεκριμένα στην εξωτερική πλευρά καμπύλων τμημάτων της σιδηροτροχιάς, σε βάθος 3-15mm και σε απόσταση 6-10mm από το άκρο του gauge corner [10].

Όταν στη διεπιφάνεια σιδηροτροχιάς-τροχού εμφανίζεται κύλιση χωρίς ολίσθηση, η σιδηροτροχιά υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενα υψηλά φορτία τριβής, λόγω της αντίστασης τριβής, του φρεναρίσματος του συρμού, των στροφών που υπάρχουν στο δίκτυο, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παραμορφωθεί πλαστικά η επιφάνεια του υλικού. Εάν η παραμόρφωση συμβεί σε μία κύρια διεύθυνση, θα έχουμε μέγιστη ορθή

τάση, η οποία προκαλεί αποφλοίωση του υλικού στην επιφάνεια. Εάν το άθροισμα της εργοσκήρυσης και των παραμενουσών τάσεων δεν επαρκεί για να προστατέψει το υλικό από περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση, τότε η ρωγμή θα σχηματιστεί μόλις γίνει υπέρβαση του ορίου θραύσης. Το βάθος του σημείου, από όπου θα ξεκινήσει η ρωγμή, καθορίζει και το είδος της. Το παραπάνω όριο θραύσης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο που υπολογίζεται μέσω της δοκιμής εφελκυσμού, καθώς στις σιδηροτροχιές προϋπάρχουν θλιπτικά φορτία από την παραγωγή τους που αλληλοαναιρούν τα επιβαλλόμενα φορτία. Ο συγκεκριμένος τύπος θραύσης αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ratchetting [12].

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της έναρξης των ρωγμών είναι τυχόν σφάλματα του υλικού, η μικροδομή του, τα σύνορα των κόκκων, τα σωματίδια καθίζησης, τα εγκλείσματα, οι ακαθαρσίες στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και γενικότερα ατέλειες της μικροδομής στις οποίες έχουμε συγκέντρωση τάσεων.

Όσον αφορά τη μικροδομή, οι *Franklin et al.* [13] και *Garnham et al.* [14] μελέτησαν την επιρροή του προευτηκτοειδή φερρίτη στα σύνορα περλιτικών κόκκων των σιδηροτροχιών, μέσω πειραμάτων προσομοίωσης της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς (twin disc test machine). Η έναρξη των ρωγμών εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στις πιο έντονα παραμορφωμένες περιοχές προευτηκτοειδή φερρίτη, δηλαδή εκεί όπου η μικροδομή του είναι πολύ λεπτή (Σχήμα 2.7). Ο διαχωρισμός της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης μεταξύ φερρίτη και περλίτη έχει ως αποτέλεσμα ο φερρίτης να εργοσκληραίνει πιο πολύ και η ολκιμότητα του να εξαντλείται πιο γρήγορα από την αντίστοιχη του περλίτη. Τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όσο περισσότερος είναι ο φερρίτης, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης στα σύνορα των κόκκων και τόσο μικρότερος θα είναι ο χρόνος ζωής λόγω RCF. Ακόμη, όταν η ποσότητα του φερρίτη είναι μικρή, τα σύνορα των κόκκων περλίτη με περλίτη παρέχουν ένα είδος προστασίας στις περιοχές του φερρίτη μειώνοντας την πιθανότητα έναρξης της ρωγμής. Σε αυτές τις περιπτώσεις η έναρξη διευκολύνεται από τα εγκλείσματα (σουλφίδια του μαγγανίου). Τέλος, οι μικροσκληρομετρήσεις των δειγμάτων έδειξαν πολύ μεγαλύτερη εργοσκήρυση στις περιοχές του RCF συγκριτικά με την κεφαλή της σιδηροτροχιάς.



Σχήμα 2.7 Έναρξη ρωγμής κόπωσης σε περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης [14]

2.3 Μεταβατική ανάπτυξη και εξέλιξη των ρωγμών μέχρι τη θραύση

Πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και εξέλιξη των ρωγμών μέχρι τη θραύση παίζει το μέγεθος των ρωγμών που έχουν ήδη δημιουργηθεί κατά την έναρξη, τα επιβαλλόμενα φορτία, καθώς και η δυσθραυστότητα του υλικού της σιδηροτροχιάς. Η επιστήμη της Μηχανικής των Θραύσεων διατυπώνει τις συνθήκες για την διάδοση των ρωγμών και βασίζεται στην ανάλυση της εντατικής κατάστασης στην αιχμή της ρωγμής. Η θεμελιώδης ιδέα είναι ότι το τασικό πεδίο περιγράφεται από μία μοναδική παράμετρο K , τον συντελεστή εντάσεως των τάσεων που εξαρτάται τόσο από τα επιβαλλόμενα φορτία, όσο και από το μήκος της ρωγμής. Ο δείκτης του συντελεστή εντάσεως των τάσεων υποδεικνύει τον τύπο φόρτισης της ρωγμής. Ο τύπος I αναφέρεται σε εφελκυστικό άνοιγμα της ρωγμής, ο τύπος II σε συνεπίπεδο διατμητικό και ο τύπος III σε αντιεπίπεδο διατμητικό [15].

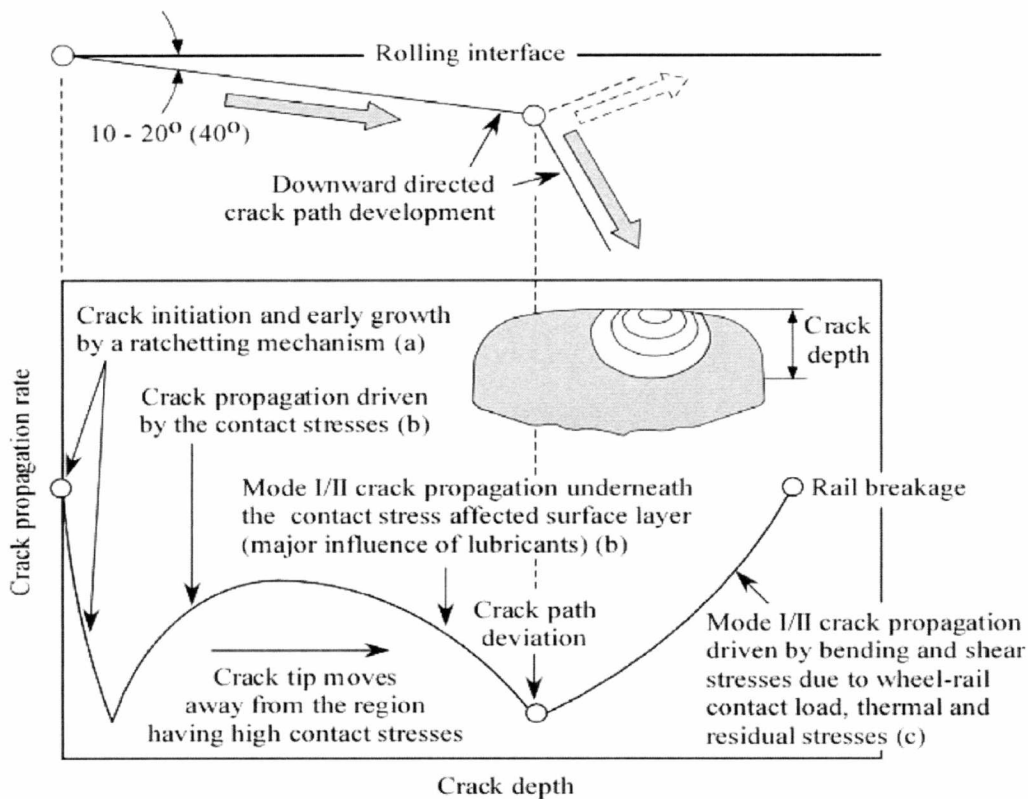
Στη συνέχεια, αναφέρονται τα τρία διαδοχικά στάδια του RCF που εμφανίζονται στις σιδηροτροχιές (Σχήμα 2.8). Στο κάθε στάδιο διαφορετικοί μηχανισμοί επιδρούν στην εξέλιξη της ρωγμής [3, 4, 12].

α) Κατά το πρώιμο στάδιο, οι επιφανειακές ρωγμές ξεκινούν λόγω της κατάστασης ratchetting και ακολουθούν τη διεύθυνση του πλαστικά παραμορφωμένου υλικού. Ο ρυθμός εξέλιξης των μικρών ρωγμών μειώνεται σε αυτό το στάδιο, καθώς επενεργεί σταδιακά ο μηχανισμός «κλεισίματος» της ρωγμής. Επισημαίνεται όμως ότι λόγω της φυσικής φθοράς του υλικού, οι μικρές ρωγμές είναι δυνατό να απομακρυνθούν και με αυτό τον τρόπο να μη συνεχιστεί η εξέλιξη της ρωγμής.

β) Όταν η αιχμή της ρωγμής φτάσει ένα κρίσιμο βάθος, αυτή θα εξελιχθεί κάτω από την επίδραση του μηχανισμού κόπωσης λόγω ανοίγματος (τύπος I) και ολίσθησης (τύπος II) της ρωγμής. Το κρίσιμο βάθος εξαρτάται από το επιβαλλόμενο φορτίο, την ολκιμότητα και το όριο διαρροής του υλικού. Και σε αυτό το στάδιο η ανάπτυξη της ρωγμής επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τις τάσεις που δημιουργούνται στην περιοχή της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Όμως όταν το μήκος της ρωγμής μεγαλώσει ακόμη περισσότερο, η αιχμή της θα απομακρυνθεί από το υψηλό εντατικό πεδίο και ο ρυθμός εξέλιξης της θα μειωθεί, λόγω του παγιδευμένου λιπαντικού ή νερού μέσα στη ρωγμή. Στη συνέχεια, ο κύριος μηχανισμός είναι η μείωση της τριβής μεταξύ των δύο επιφανειών λόγω του υγρού, που έχει ως αποτέλεσμα την εξέλιξη της ρωγμής μέσω των τύπων φόρτισης I και II. Πιθανότατα σε αυτή τη φάση να υποβοηθάει και η εσωτερική πίεση που ασκεί το παγιδευμένο υγρό με το πέρασμα του συρμού. Τα νερά προέρχονται από τα υπόγεια νερά που δεν αντλούνται επαρκώς, από την οροφή της σήραγγας και από τον καθαρισμό του Μετρό.

Κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων σταδίων οι ρωγμές εξελίσσονται σε κεκλιμένη γωνία 10-20° (μερικές φορές μέχρι 40°) ως προς την επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Οι ρωγμές στις οποίες ασκείται φόρτιση τύπου II έχουν την τάση να διακλαδίζονται σε κεκλιμένη γωνία 60-80° ως προς την επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και να κατευθύνονται προς τη διεύθυνση μιας καινούργιας ρωγμής που έχει μόλις δημιουργηθεί. Η καινούργια ρωγμή έχει την τάση να κινηθεί είτε προς τα επάνω, είτε προς τα κάτω. Όταν κινηθεί προς τα πάνω, η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς θα γίνει πιο ανομοιογενής, με αποτέλεσμα την αύξηση των δυνάμεων επαφής, την αύξηση του παραγόμενου θορύβου και την εισαγωγή κραδασμών στη διεπιφάνεια τροχού-σιδηροτροχιάς. Η αύξηση των δυνάμεων επαφής μπορεί να επιφέρει εκτεταμένη αποφλοίωση του υλικού στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς (spalling). Όταν η ρωγμή κινηθεί προς τα κάτω θα προκληθεί ολική θραύση της σιδηροτροχιάς και ως συνέπεια θα αυξήσει τον κίνδυνο εκτροχιασμού του συρμού. Τέλος, επισημαίνεται ότι το γεγονός της έναρξης μιας ρωγμής δεν συνεπάγεται και ανάπτυξη της ρωγμής. Το μήκος της ρωγμής και ο προσανατολισμός της, το μέγεθος των φορτίων επαφής και η εντατική κατάσταση στην αιχμή της ρωγμής είναι παράγοντες που επηρεάζουν το αν η ρωγμή θα συνεχίσει να εξελίσσεται ή θα μείνει στο ίδιο μήκος.

γ) Το τελευταίο στάδιο του RCF αρχίζει αφότου έχει διακλαδιστεί η αρχική ρωγμή. Η ρωγμή συνεχίζει να εξελίσσεται κάτω από μικτό τύπο φόρτισης, αν και η συνιστώσα του τύπου φόρτισης I είναι πιο σημαντική σε σύγκριση με τα δύο πρώτα στάδια. Ο μηχανισμός που επιδρά σε αυτό το στάδιο είναι αποκλειστικά οι διατμητικές και καμπτικές τάσεις από την επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς σε υπέρθεση με τις παραμένουσες και θερμικές τάσεις. Όταν ο συντελεστής έντασης των τάσεων της αιχμής της ρωγμής γίνει ίσος ή υπερβεί τη δυσθραυστότητα του υλικού, τότε η εξέλιξη της ρωγμής προκαλεί ολική θραύση της σιδηροτροχιάς.



Σχήμα 2.8 Μηχανισμοί επίδρασης κατά την εξέλιξη της ρωγμής [4]

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συνεισφορά της λίπανσης σε όλα τα στάδια της κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση που εμφανίζονται στις σιδηροτροχιές. Η έννοια του όρου λίπανση στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει έναν ευρύτερο χαρακτήρα, καθώς αναφέρεται σε οποιοδήποτε ρευστό μπορεί να εισέλθει στη ρωγμή, όπως λάδι, γράσο.

Υποθέτουμε ότι έχουμε συνδυασμένα φορτία επαφής κύλισης-ολίσθησης τα οποία μετατοπίζονται κατά τη διεύθυνση μιας σιδηροτροχιάς που έχει λιπανθεί και παρουσιάζει ρωγμές οι οποίες εξελίσσονται κατά τη φορά κίνησης του συρμού. Όταν το φορτίο επαφής πλησιάσει την αιχμή της ρωγμής, οι επιφάνειες αυτής θα ανοίξουν με αποτέλεσμα να εισέρθει το ρευστό. Εάν όμως οι ρωγμές αναπτύσσονται αντίθετα της

κίνησης του συρμού, τότε το ρευστό αναγκάζεται να εξέρθει από την αιχμή και η ρωγμή να κλείσει. Λόγω της παραπάνω διαδικασίας, τρεις πιθανές επιδράσεις μπορούν να υπάρξουν στην εξέλιξη της ρωγμής: (α) το ρευστό να λιπάνει τις επιφάνειες της ρωγμής χωρίς να ασκήσει εσωτερική πίεση (μείωση τριβών μεταξύ επιφανειών ρωγμής, αύξηση των δυνάμεων που βοηθούν στην εξέλιξη των ρωγμών), (β) το ρευστό αναγκάζεται να εισέρθει στη ρωγμή και να την ανοίξει (εμποδίζει το κλείσιμο των ρωγμών), (γ) το ρευστό παγιδεύεται μέσα στη ρωγμή, λόγω του κλεισίματος των χειλιών της ρωγμής (προστατεύει τις επιφάνειες της ρωγμής από το να κλείσουν, αυξάνει τον συντελεστή εντάσεως των τάσεων του τύπου φόρτισης I).

2.4 Μέθοδοι αντιμετώπισης του RCF

2.4.1 Εισαγωγή

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος αντιμετώπισης του RCF είναι το τρόχισμα των σιδηροτροχιών (grinding), καθώς έχει αποδειχθεί ότι συμβάλει στην συντήρηση των σιδηροτροχιών και στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους μέσα στο δίκτυο [2].

Η διαδικασία του τροχίσματος των σιδηροτροχιών προέκυψε από την ανάγκη απαλοιφής των επιφανειακών αυλακώσεων (corrugation), που αποτελούσαν το πιο ανησυχητικό σφάλμα την περίοδο 1960 έως 1970. Έχοντας λύσει τα προβλήματα των αυλακώσεων, δόθηκε μεγάλη έμφαση σε τεχνικές που θα βελτίωναν το φαινόμενο RCF. Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις σιδηροδρόμων υψηλού φορτίου δόθηκε βάση στο να περιοριστεί η εξέλιξη των ρωγμών και στο να τροποποιηθούν τα προφίλ της σιδηροτροχιάς, έτσι ώστε να υπάρξει ανακατανομή του φορτίου και μείωση των παραμορφώσεων λόγω επαφής. Στις αρχές του 1990, προτάθηκε αλλαγή φιλοσοφίας και σε αντικατάσταση της αφαίρεσης των ορατών ρωγμών με πολλαπλά τροχίσματα, ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα με αφαίρεση μεγάλης ποσότητας υλικού, άρχισε η εφαρμογή τροχισμάτων αφαίρεσης μικρής ποσότητας υλικού, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να συντηρείται το προφίλ της σιδηροτροχιάς και να ελέγχεται καλύτερα το φαινόμενο RCF. Η νέα αυτή φιλοσοφία ονομάζεται προληπτικό τρόχισμα και εφαρμόζεται μέχρι και σήμερα με βελτιστοποιημένο τρόπο [2, 5, 16].

Σύμφωνα με τον Grassie [5] συμπεραίνεται ότι το φαινόμενο RCF μπορεί να αντιμετωπιστεί με δύο τρόπους:

- *Προληπτικά*, δηλαδή οι σιδηροτροχιές να τροχίζονται τακτικά, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι ρωγμές προλαμβάνονται, πριν δημιουργηθούν σφάλματα σημαντικού μεγέθους.
- *Διορθωτικά*, δηλαδή μεμονωμένες ρωγμές ή τμήματα που έχουν υποστεί εκτεταμένο RCF αντιμετωπίζονται πριν δημιουργηθεί κίνδυνος ολικής θραύσης της σιδηροτροχιάς.

2.4.2 Διορθωτικό τρόχισμα

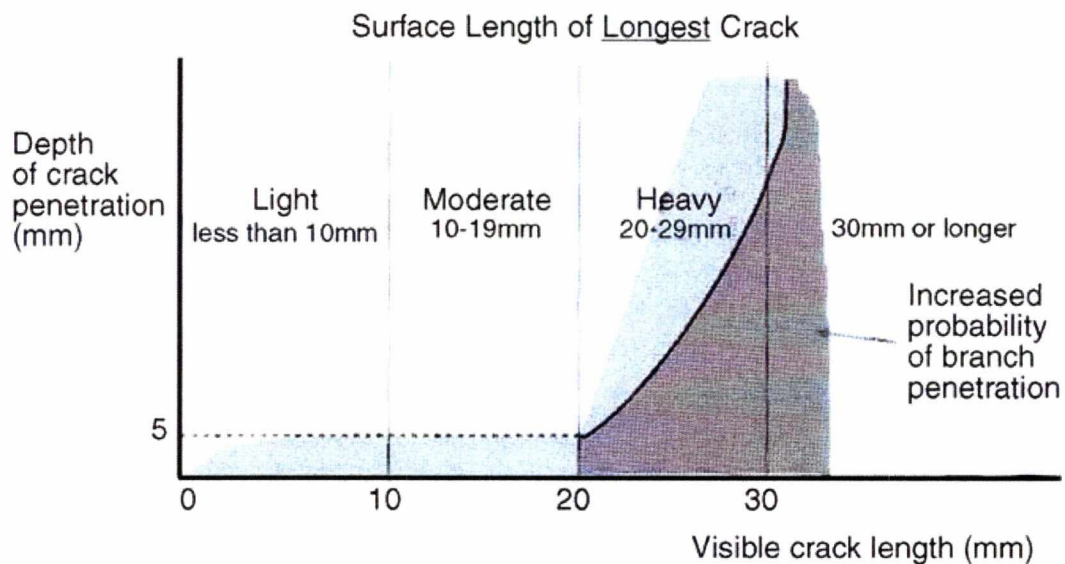
Το διορθωτικό τρόχισμα είναι μια μέθοδος αντιμετώπισης που χρησιμοποιείται σε όλους τους σιδηρόδρομους παγκοσμίως, καθώς είναι η μόνη που είναι εφαρμόσιμη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Πολύ σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή του διορθωτικού ελέγχου έχει η ανίχνευση των ρωγμών μέσω μη καταστρεπτικών ελέγχων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά και επεξήγηση των μη καταστρεπτικών ελέγχων (NDT – NonDestructive Testing) [2, 5, 10].

- **Έλεγχος με υπερήχους** : το προσωπικό συντήρησης ελέγχει οπτικά τις σιδηροτροχιές με τη βοήθεια εξοπλισμού υπερήχων που είναι εγκατεστημένο σε βαγόνι. Αν και η επιθεώρηση μέσω υπερήχων είναι η επικρατέστερη μέθοδος ελέγχου, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, όπως η χρήση ρευστού σύζευξης για να υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ ανιχνευτή-σιδηροτροχιάς και η ανάγκη της μεθόδου να πραγματοποιηθεί μόνο σε περιοδικό έλεγχο, καθώς η ταχύτητα του βαγονιού επιθεώρησης είναι πολύ μικρότερη από αυτή του συρμού.
- **Διεισδυτικά υγρά και μαγνητικά σωματίδια**: χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων στις σιδηροτροχιές. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε μικρού μεγέθους επιφανειακές ασυνέχειες, το κόστος και ο χρόνος που απαιτούνται είναι ελάχιστος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους και ότι οι ενδείξεις του σφάλματος αποτυπώνονται οπτικά πάνω στην υπό εξέταση επιφάνεια.
- **Έλεγχος με δινορεύματα**: είναι μια μέθοδος που ανιχνεύει επιφανειακά και υποεπιφανειακά σφάλματα ρωγμών, αλλά προσδιορίζει και το βάθος τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι το σύστημα ελέγχου των

δινορευμάτων δεν βρίσκεται σε επαφή με τη σιδηροτροχιά και ότι μπορεί να τοποθετηθεί στο συρμό.

- **Ραδιογραφία:** χρησιμοποιείται κυρίως για την εξέταση των αλουμινοθερμικών συγκολλήσεων που εμπεριέχουν διάφορες ατέλειες, μη επίπεδα σφάλματα, αλλά και για την ανίχνευση σφαλμάτων που δεν εντοπίζονται με υπερήχους, λόγω του ακατάλληλου προσανατολισμού τους.

Τέλος, επακόλουθο του ατυχήματος στο Hatfield ήταν η προσπάθεια των ερευνητών στην Αγγλία [5] να κατανοήσουν τη σοβαρότητα του RCF, έτσι ώστε να μπορούν να επέμβουν έγκαιρα. Μελετώντας ένα μεγάλο αριθμό τομών σιδηροτροχιών που εμφάνισαν επιφανειακές ρωγμές, συμπέραναν ότι υπάρχει μεγάλος συσχετισμός μεταξύ τους μήκους των επιφανειακών ρωγμών και του βάθους στο οποίο έχουν εξελιχθεί μέσα στη σιδηροτροχιά. Στη συνέχεια, ταξινόμησαν το RCF σε τέσσερις κατηγορίες: ελαφριά (μέχρι 10 mm μήκος επιφανειακής ρωγμής), μέτρια (10-19 mm), βαριά (20-29 mm) και σοβαρή (30 mm και πάνω). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9, εάν το μήκος της επιφανειακής ρωγμής είναι μεγαλύτερο από 20 mm, τότε είναι πολύ πιθανό η ρωγμή να εξελίσσεται γρήγορα μέσα στη σιδηροτροχιά και να υπάρχει κίνδυνος ολικής θραύσης.



Σχήμα 2.9 Συσχετισμός βάθους εξέλιξης ρωγμής με το επιφανειακό μήκος ρωγμής [5]

2.4.3 Προληπτικό τρόχισμα

Η φιλοσοφία του προληπτικού τρόχισματος είναι να αφαιρεθούν οι ρωγμές πριν προλάβουν να αναπτυχθούν. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με το τρόχισμα ολόκληρης της

ρωγμής, είτε αποφορτίζοντας το επιφανειακό άνοιγμα της ρωγμής, έτσι ώστε να μη συνεχιστεί η εξέλιξή της [5].

Η προληπτική συντήρηση θεωρείται επιτυχημένη όταν έχουν καθοριστεί το προφίλ της τροχιάς, οι ανοχές, τα διαστήματα και το βάθος του τροχίσματος. Στόχος του κάθε τροχίσματος είναι να αποκαταστήσει το επιθυμητό προφίλ σιδηροτροχιάς και να επιτευχθεί το βάθος τροχίσματος που απαιτείται με την ελάχιστη δυνατή προσπάθεια και απώλεια υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό και την εφαρμογή του «βέλτιστου ρυθμού φθοράς», ο οποίος αναφέρεται ως η αθροιστική ποσότητα αφαίρεσης μετάλλου λόγω τροχίσματος και φυσικής φθοράς που απαιτείται για να απαλειφτούν οι προϋπάρχουσες ρωγμές και αυτές που πρόκειται να ξεκινήσουν. Ακόμη, μεγάλη έμφαση πρέπει να δίνεται στην καθιέρωση του σωστού αρχικού προφίλ της σιδηροτροχιάς, το οποίο θα προσφέρει επαρκή ανακούφιση από τις τάσεις στην περιοχή της καμπυλότητας του gauge corner [5, 16].

Στις μέρες μας, η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στην μείωση του κόστους επιθεώρησης και συντήρησης των σιδηροδρόμων. Η κατεύθυνση που δίνεται είναι να χρησιμοποιούνται υλικά με μεγαλύτερη σκληρότητα, μεγαλύτερο όριο διαρροής και μικρότερο συντελεστή τριβής, όπως μπαινιτικοί χάλυβες χωρίς καρβίδια (carbide free bainitic steels), βελτιωμένοι χάλυβες με κατάλληλες επικαλύψεις που έχουν υψηλή αντοχή σε φθορά. Τα πλεονεκτήματα των παραπάνω υλικών είναι ότι διατηρούν το προφίλ της σιδηροτροχιάς σταθερό και εμφανίζουν μικρότερο ρυθμό πλαστικοποίησης και μεγαλύτερο συντελεστή εντάσεως των τάσεων, όταν ρυθμιστούν κατάλληλα ο ρυθμός τροχίσματος και η λίπανση [9, 13, 16].

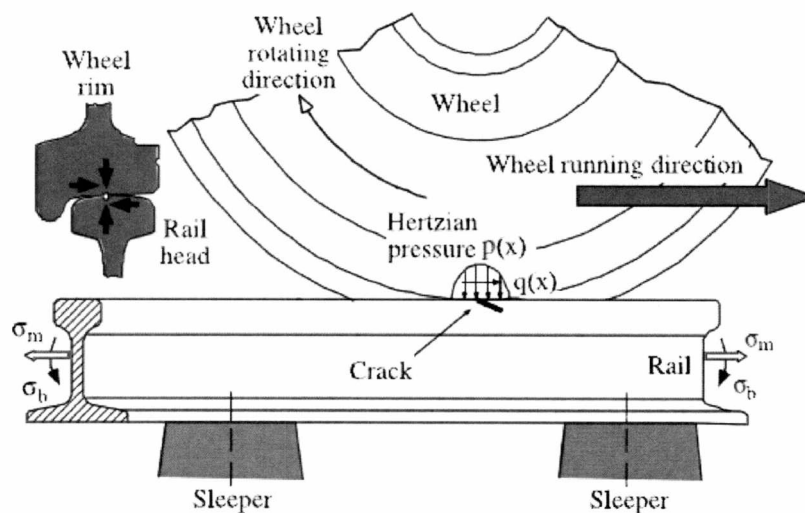
2.5 Ο ρόλος των φορτίων, των παραμορφώσεων και του ορίου *shakedown*

Πρωτεύοντα ρόλο στη δημιουργία, ανάπτυξη και εξέλιξη των ρωγμών μέχρι τη θραύση λόγω της κόπωσης εξ επαφής σε κύλιση, παίζουν τα επιβαλλόμενα φορτία, οι παραμένουσες παραμορφώσεις, οι θερμικές παραμορφώσεις και οι πλαστικές παραμορφώσεις της σιδηροτροχιάς.

2.5.1 Η φόρτιση των σιδηροτροχιών

Το φορτίο που προέρχεται από τον τροχό εφαρμόζεται στην επιφάνεια σιδηροτροχιάς-τροχού ως καμπτική τάση (σ_b), αξονική τάση (σ_m) και τάση Hertzian (p) (Σχήμα 2.10) [10].

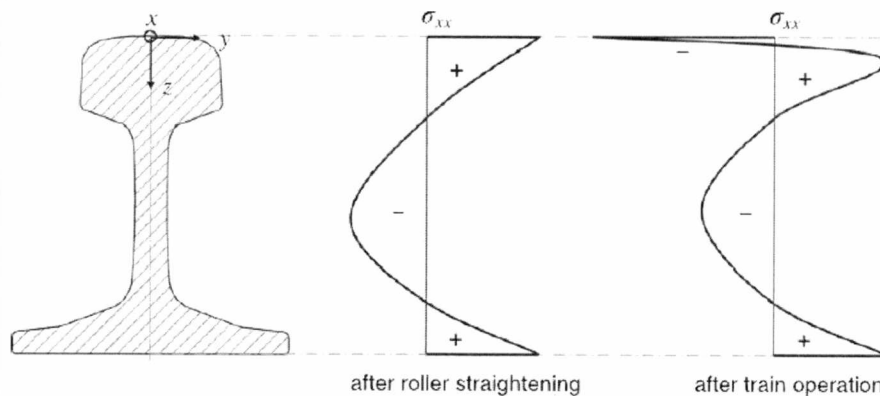
- Οι καμπτικές τάσεις προέρχονται από το στατικό φορτίο του άξονα του τροχού (static axle load) και τη δυναμική μεγέθυνσή του λόγω της κίνησης του συρμού. Συνεισφορά στην καμπτική τάση έχει το βάρος της σιδηροτροχιάς, τα σφάλματα της σιδηροτροχιάς και οι ατέλειες της επιφάνειας του τροχού.
- Οι αξονικές τάσεις προέρχονται από κατασκευαστικές ατέλειες της τροχιάς και από την επιτάχυνση και επιβράδυνση του συρμού.
- Οι τάσεις Hertzian προέρχονται λόγω της επαφής σε κύλιση και παίζουν μεγάλο ρόλο στην αρχή της εξέλιξης των ρωγμών.



Σχήμα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση των επιβαλλόμενων φορτίων [10]

2.5.2 Ο ρόλος των παραμενουσών και θερμικών τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις προέρχονται από τη διαδικασία παραγωγής και πιο συγκεκριμένα από τα έλαστρα ευθυγράμμισης (straightening roller) και τις θερμικές κατεργασίες. Προτού χρησιμοποιηθούν οι σιδηροτροχιές στο δίκτυο εμφανίζουν μέγιστες εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια και στο πέλμα της σιδηροτροχιάς, ενώ στο ενδιάμεσο μέρος επικρατούν θλιπτικές παραμένουσες τάσεις. Κατά τη χρήση των σιδηροτροχιών στο δίκτυο προκαλείται τοπικά πλαστική ροή σε ένα λεπτό στρώμα κάτω από την επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς, με αποτέλεσμα την ανακατανομή των παραμενουσών τάσεων στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.11. Η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων μπορεί να γίνει τόσο με καταστρεπτικές (συμβολομετρία), όσο και με μη καταστρεπτικές μεθόδους (υπέρηχοι, περίθλαση ακτινών X, μαγνητικές τεχνικές).



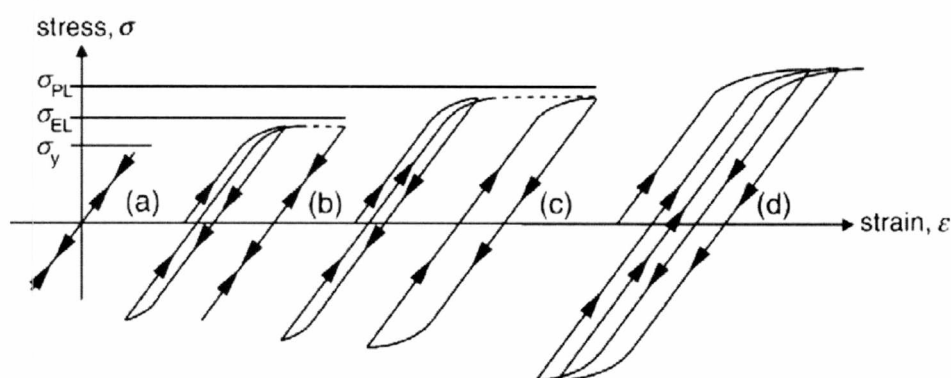
Σχήμα 2.11 Ποιοτικό προφίλ των παραμενουσών παραμορφώσεων πριν και μετά την εισαγωγή των σιδηροτροχιών στο δίκτυο [17]

Οι θερμικές τάσεις προέρχονται λόγω της εναλλαγής του θερμοκρασιακού περιβάλλοντος και λόγω της ολίσθησης των τροχών κατά το φρενάρισμα του συρμού. Οι σιδηροτροχιές δεν είναι δυνατόν να συσταλούν και να διασταλούν κατά την μείωση και αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες και θλιπτικών τάσεων σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμη, έχει παρατηρηθεί ότι πολλές θραύσεις σιδηροτροχιών συμβαίνουν σε θερμοκρασίες κοντά στους 0°C καθώς υψηλές εφελκυστικές θερμικές τάσεις συνδυάζονται με τη χαμηλή δυσθραυστότητα του υλικού, λόγω της μετάβασης του υλικού από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά [2, 10, 12].

2.5.3 Όριο shakedown και κατάσταση ratchetting

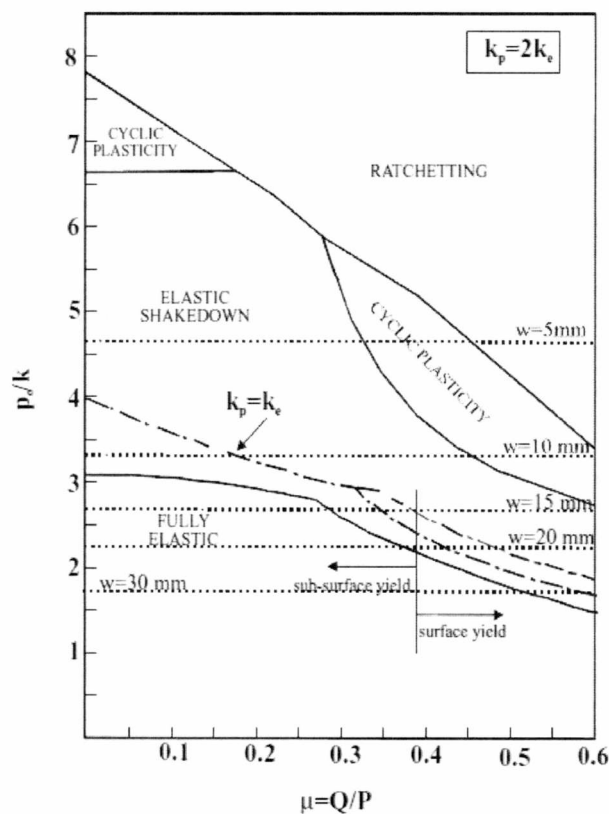
Οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς παράγουν το λεγόμενο εναλλασσόμενο πεδίο τάσεων επαφής. Το πιο ευρέως διαδεδομένο αναλυτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η θεωρία Hertzian, η οποία περιγράφει τις τοπικές παραμορφώσεις με μεγάλη ακρίβεια και παρέχει καλή κατανόηση του γενικότερου φαινομένου επαφής. Απαραίτητες υποθέσεις για την εφαρμογή της θεωρίας Hertzian είναι η ύπαρξη γραμμικώς ελαστικού υλικού, μικρής επιφάνειας επαφής σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαστάσεις της σιδηροτροχιάς και λείες επιφάνειες τόσο μακροσκοπικά, όσο και μικροσκοπικά.

Η απόκριση του υλικού στις επιβαλλόμενες εναλλασσόμενες τάσεις είναι διαφορετική ανάλογα με τη φύση και το μέγεθός τους, όπως απεικονίζει και στο Σχήμα 2.12. Για χαμηλές φορτίσεις η απόκριση του υλικού θα είναι τέλεια ελαστική, χωρίς να έχουμε παραμένουσες μόνιμες παραμορφώσεις στο υλικό μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης. Σε ορισμένα επίπεδα φόρτισης θα υπάρξει μερική πλαστικοποίηση του υλικού. Ωστόσο, μετά το πέρασμα ορισμένων κύκλων φόρτισης οι παραμένουσες τάσεις περιορίζουν το υλικό από περαιτέρω πλαστικοποίηση. Τότε λέμε ότι το υλικό βρίσκεται σε κατάσταση *elastic shakedown* και η παραμόρφωσή του κάτω από την επίδραση των εναλλασσόμενων τάσεων επαφής είναι μόνο ελαστική. Περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης θα προκαλέσει κυκλική πλαστικοποίηση (*cyclic plasticity*) μετά από κάθε κύκλο φόρτισης και το υλικό θα βρίσκεται σε κατάσταση *plastic shakedown*. Σε περίπτωση όμως είτε αύξησης του κάθετου φορτίου επαφής, είτε αύξησης της τριβής ολίσθησης, γίνεται υπέρβαση του ορίου *plastic shakedown* και το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Μάλιστα με κάθε νέα διέλευση τροχού η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται και το υλικό σύντομα οδηγείται στην αστοχία. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται *rachetting*.



Σχήμα 2.12 Απόκριση του υλικού σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης [4]

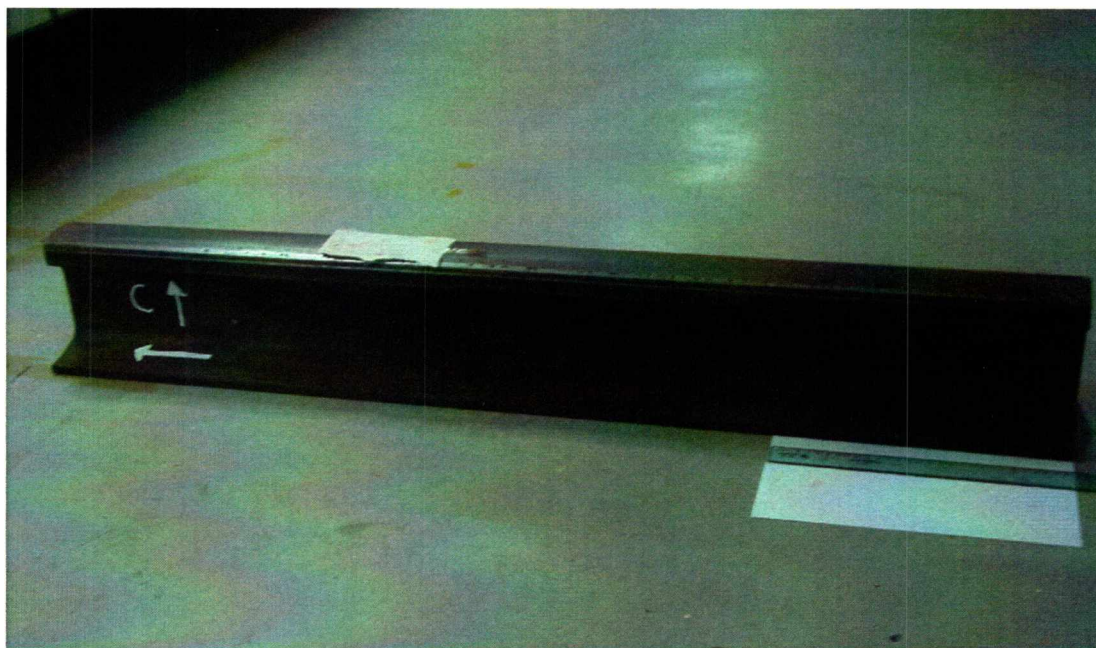
Τέλος, ο σχεδιασμός «χαρτών *shakedown*» (*shakedown maps*) προέρχεται από την επίλυση αναλυτικών εξισώσεων και είναι χρήσιμος για την εξαγωγή μίας πρώτης εκτίμησης για τις επιπτώσεις του RCF κάτω από συγκεκριμένη τάση και γεωμετρία επαφής. Πιο ακριβή αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν μετά από ανάλυση του φαινομένου RCF με πεπερασμένα στοιχεία. Στο Σχήμα 2.13, απεικονίζεται στον παράλληλο άξονα ο συντελεστής τριβής, στον κάθετο άξονα η κατάσταση φόρτισης και εντός του σχήματος οι παράλληλες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε διαφορετικό μήκος επαφής μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς. Για μικρές τιμές του συντελεστή τριβής και για μεσαίας δυναμικότητας καταστάσεις φόρτισης το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Με περαιτέρω αύξηση είτε του συντελεστή τριβής, είτε της δυναμικότητας της κατάστασης φόρτισης το υλικό θα υπερβεί την κατάσταση *elastic shakedown* και θα κινείται προς την κατάσταση *plastic shakedown* και *ratchetting*. Επίσης, η μείωση του μήκους επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς οδηγεί το υλικό ευκολότερα προς τις καταστάσεις *plastic shakedown* και *ratchetting* [4, 9].



Σχήμα 2.13 Επίδραση της τριβής ολίσθησης στην πρώτη πλαστική παραμόρφωση και στο όριο *shakedown* [9]

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την εξέταση πέντε τμημάτων σιδηροτροχιάς μήκους 1,5 μέτρου το κάθε ένα από το Μετρό της Αθήνας. Τα τμήματα αυτά στάλθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Θεσσαλίας το Φεβρουάριο του 2013 από την εταιρεία Αττικό Μετρό Α.Ε. με σκοπό την μελέτη των ρωγμών που δημιουργήθηκαν από κόπωση εξ επαφής σε κύλιση. Τα τμήματα των σιδηροτροχιών Α, Β, C προέρχονται από μεταβατικά σημεία πριν την καμπύλη της σιδηροτροχιάς, έχουν υποστεί μία φορά τρόχισμα και μετά το τρόχισμα χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο για 1,5-2 χρόνια. Το τμήμα D βγήκε από το δίκτυο πριν από το τρόχισμα και ενδεχομένως είναι κάποιο ρετάλι από τμήμα που αφαιρέθηκε λόγω κάποιας ρηγματώσης, χωρίς όμως να εμφανίζει κάποιο σφάλμα λειτουργίας. Το τμήμα O-REF είναι αχρησιμοποίητο, προοριζόταν για διασταύρωση και αποτελεί υλικό αναφοράς. Τέλος, στα περισσότερα τμήματα σιδηροτροχιάς είναι γνωστή η διεύθυνση κύλισης του συρμού και η πλευρά του gauge corner, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Τμήμα σιδηροτροχιάς C

3.1 Χημική ανάλυση και μηχανικές δοκιμές

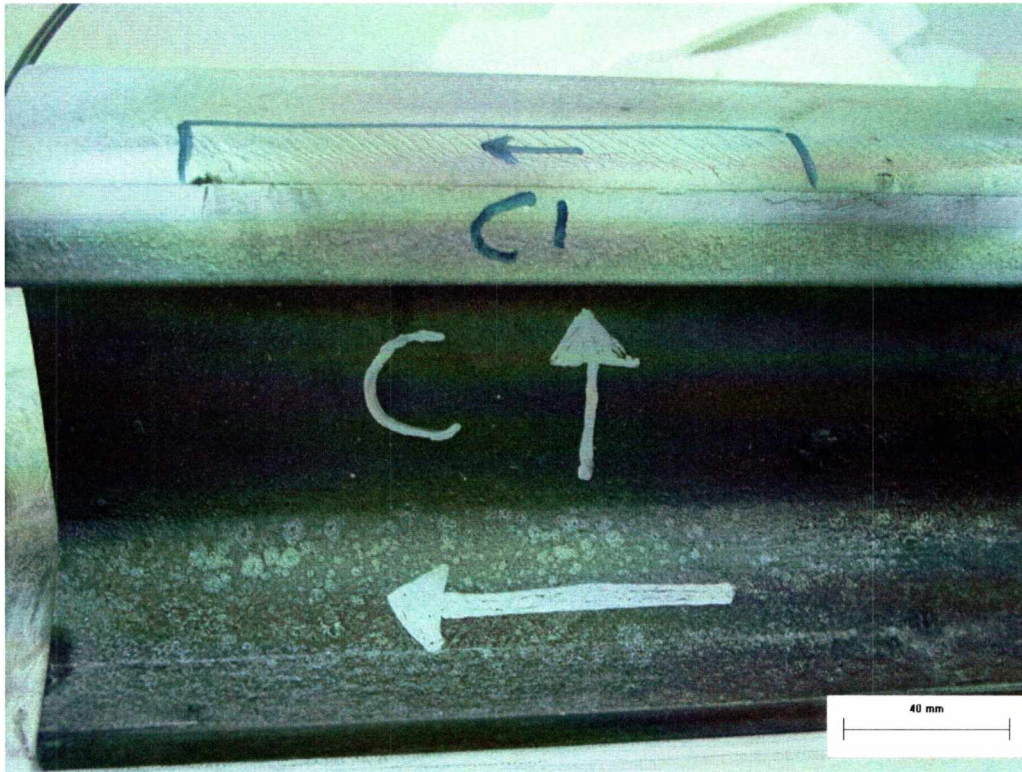
Χημική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τα τμήματα των σιδηροτροχιών B και O-REF με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας εκπομπής και δοκιμή εφελκυσμού για το τμήμα της σιδηροτροχιάς O-REF, σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 10002-1. Η κατασκευή των δοκιμίων καθώς και ο προσδιορισμός της θέσης της σιδηροτροχιάς από την οποία εξήχθησαν τα δοκίμια έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή UIC 860 O.

3.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος και μέτρηση μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρωγμών

Για τον ακριβή εντοπισμό και την αναγνώριση των επιφανειακών σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε σε κάθε τμήμα σιδηροτροχιάς μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων από εξωτερικό συνεργείο.

Αρχικά, αφαιρέθηκε η σκουριά με λειαντικό χαρτί 80 grit και έγινε η εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων. Στη συνέχεια, επιλέχτηκαν δύο αντιπροσωπευτικές περιοχές μήκους 15 εκατοστών από την πλευρά του gauge corner από κάθε τμήμα σιδηροτροχιάς, έτσι ώστε το υλικό της σιδηροτροχιάς να έχει διαχειρίσιμο μέγεθος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Τα δοκίμια αφού κόπηκαν στο μηχανουργείο, στάλθηκαν ξανά για μη καταστρεπτικό έλεγχο με τη μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν έχουν ρηγματώσεις στη διαμήκη επιφάνεια του δοκιμίου.

Τα μακροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς μετρήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας Image-Pro Plus. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των φωτογραφιών που τραβήχτηκαν μετά την εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων μετρήθηκαν η απόσταση της αρχής της ρωγμής από το gauge corner, η καμπυλότητα των ρωγμών, το μήκος τόξου των ρωγμών, η απόσταση μεταξύ των ρωγμών, η συχνότητα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αποφλοιώσεως.



Σχήμα 3.2 Αντιπροσωπευτική περιοχή από το τμήμα της σιδηροτροχιάς C για τη δημιουργία του δοκιμίου C1

3.3 Προετοιμασία δοκιμίων, μεταλλογραφική ανάλυση και μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών ρωγμών στο εσωτερικό σιδηροτροχιάς

Εγκάρσιες και διαμήκεις τομές πραγματοποιήθηκαν σε αντιπροσωπευτικές περιοχές των τμημάτων των σιδηροτροχιών που επιλέχθηκαν κατά τον μη καταστρεπτικό έλεγχο. Η προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων περιελάμβανε κοπή με κοπτικό εργαλείο Struers-Unitom 2, εγκιβωτισμό των δοκιμίων σε ταχείας στερεοποίησης ρητίνη Acryfix, λείανση στη συσκευή Struers-Knuth-Rotor-3, στίλβωση στη συσκευή Struers DAP-V και χημική προσβολή με αντιδραστήριο Nital 2% (98 mL αιθυλική αλκοόλη, 2 mL HNO₃) για 7 δευτερόλεπτα. Τα δοκίμια λειάνθηκαν διαδοχικά σε λειαντικούς δίσκους των 80, 180, 320, 500, 800 και 1000 grit και στίλβώθηκαν με αιώρημα διαμαντόπαστας 3 μm. Η παρατήρηση και η φωτογράφιση των ρωγμών και της μικροδομής έγινε σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz “Aristomet” σε μεγεθύνσεις x50 – x1000. Τέλος, μετρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών στις εγκάρσιες και διαμήκεις τομές. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των φωτογραφιών που τραβήχτηκαν κατά τη μεταλλογραφική ανάλυση μετρήθηκαν το μήκος των ρωγμών, το βάθος των ρωγμών από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και η

αρχική κλίση της ρωγμής. Φωτογραφίες του κοπτικού εργαλείου, των συσκευών λείανσης, στίλβωσης και του οπτικού μικροσκοπίου παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3 Συσκευή κοπής εργαστηρίου υλικών



Σχήμα 3.4 Συσκευές λείανσης και στίλβωσης του εργαστηρίου υλικών



Σχήμα 3.5 Οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο εργαστηρίου υλικών

3.4 Μικροσκληρομετρήσεις

Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων πραγματοποιήθηκε στις εγκάρσιες και διαμήκεις τομές των δειγμάτων με σκοπό τον έλεγχο της μεταβολής της σκληρότητας από την επιφάνεια κοντά στο gauge corner προς το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς. Χρησιμοποιήθηκε μικροσκληρόμετρο WOLLPERT 402MVD, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με φορτίο 300 γραμμαρίων και τα αποτελέσματα ελήφθησαν σε κλίμακα σκληρότητας Vickers.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση και συζήτηση όλων των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών ελέγχων, καθώς και σύγκριση με τα αποτελέσματα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση του δευτέρου κεφαλαίου.

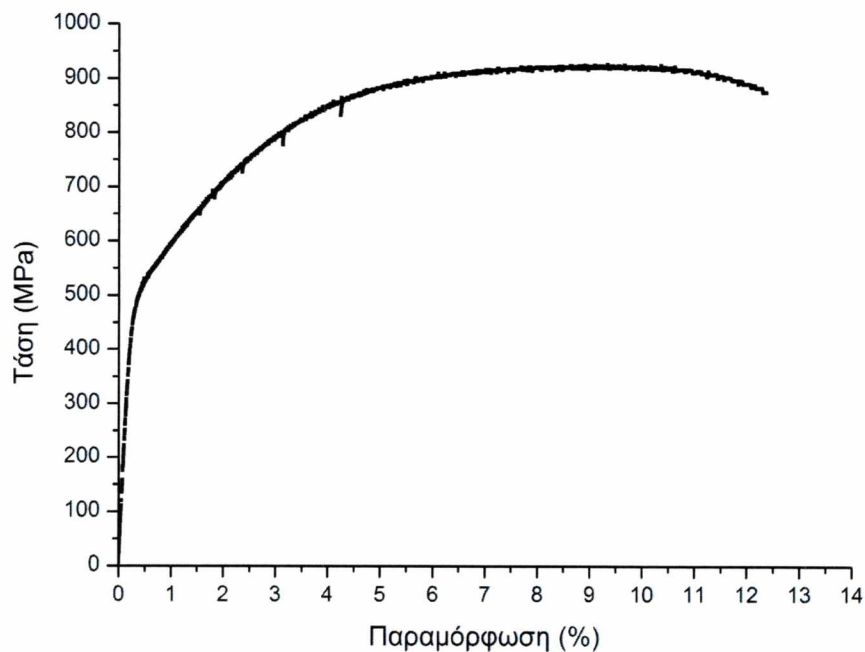
Στην εργασία αυτή μελετήθηκε αντιπροσωπευτικό τμήμα των σιδηροτροχιών B και C, και όχι το σύνολο των σιδηροτροχιών. Τα τμήματα αυτά ονομάστηκαν B1 και C1 αντίστοιχα.

4.1 Χημική ανάλυση και μηχανικές ιδιότητες

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης και της δοκιμής εφελκυσμού παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.1. Η χημική σύσταση των τμημάτων των σιδηροτροχιών B και O-REF είναι σε συμφωνία με το χάλυβα Grade 900A της προδιαγραφής UIC860. Επίσης, και οι μηχανικές ιδιότητες της σιδηροτροχιάς O-REF είναι σε συμφωνία με την προδιαγραφή για το χάλυβα Grade 900A. Η μικροδομή του χάλυβα είναι περλιτική. Η σημαντική εργοσκλήρυνση που έχει υποστεί το υλικό είναι εμφανής στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 4.1) και αποτελεί τυπική συμπεριφορά περλιτικού χάλυβα. Τα πλεονεκτήματα του επιλεγμένου χάλυβα για την κατασκευή της σιδηροτροχιάς είναι η ολκιμότητά του, λόγω της περλιτικής μικροδομής, και η αυξημένη αντοχή του, λόγω του μεγάλου ποσοστού άνθρακα που εμπεριέχει.

Πίνακας 4.1 Χημική ανάλυση (% κ.β.) και μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα των σιδηροτροχιών

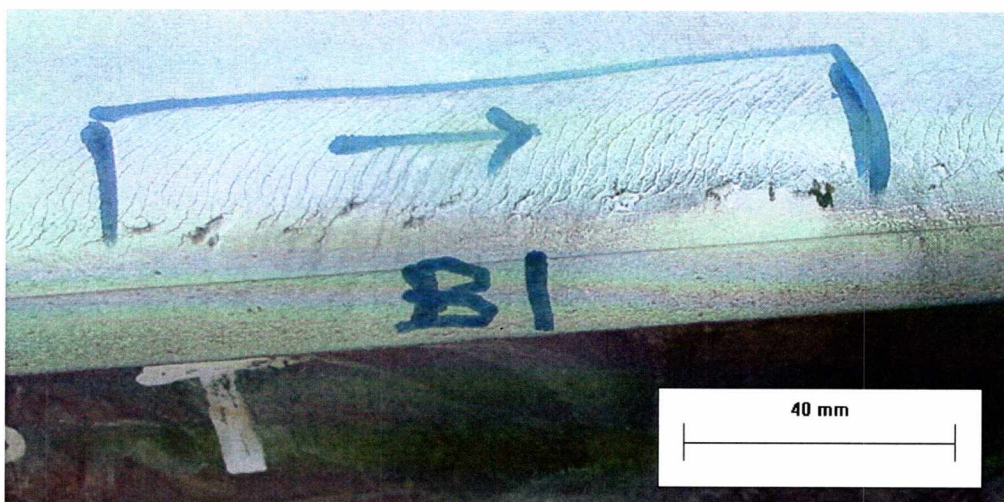
Τμήμα Σιδηροτροχιάς	Χημική Σύσταση							Μηχανικές Ιδιότητες		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	Elongation (%)
B	0.68	0.35	1.11	0.01	0.02	0.02	0.02	-	-	-
O-REF	0.68	0.26	1.11	0.02	0.01	0.03	0.02	533	924	12
Grade 900A (UIC 860 O)	0,60- 0,80	0,1- 0,5	0,8- 1,3	0,04 max	0,04 max	-	-	-	880- 1030	≥10



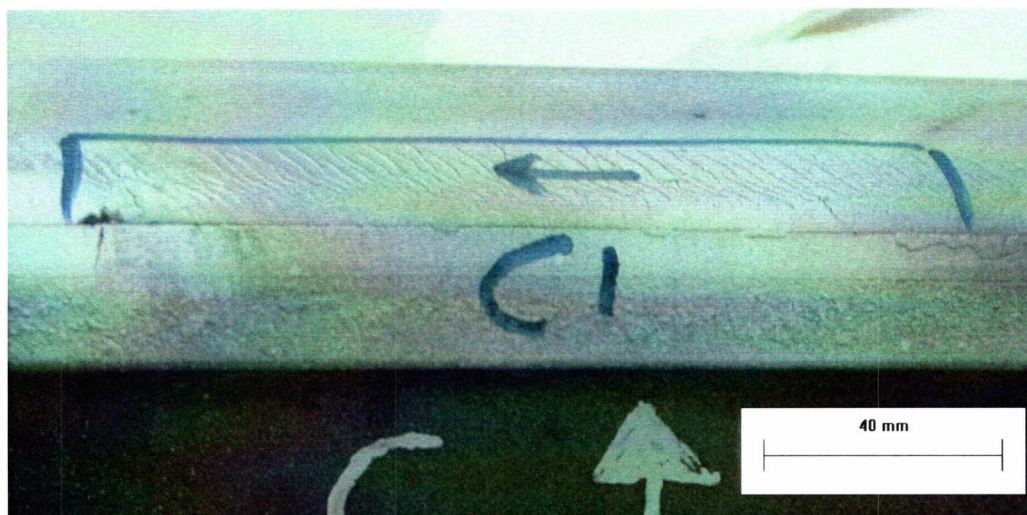
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του χάλυβα Grade 900A

4.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος και μέτρηση μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Ο οπτικός έλεγχος μετά την εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων δείχνει την ύπαρξη μεγάλου μήκους πυκνών ρωγμών με μορφή shelling και αποφλοιώσεων στην περιοχή B1 και ύπαρξη μεγάλου μήκους πυκνών ρωγμών με μορφή shelling, χωρίς όμως αποφλοιώσεις στην περιοχή C1. Οι ρηγματώσεις εντοπίζονται στην περιοχή του gauge corner και αναπτύσσονται προς την αντίθετη κατεύθυνση από τη φορά κύλισης και στις δύο περιπτώσεις, όπως απεικονίζονται και στα Σχήματα 4.2 και 4.3.



Σχήμα 4.2 Ρωγμές και αποφλοιώσεις στην περιοχή B1 (το βέλος υποδεικνύει τη φορά κίνησης του συρμού)

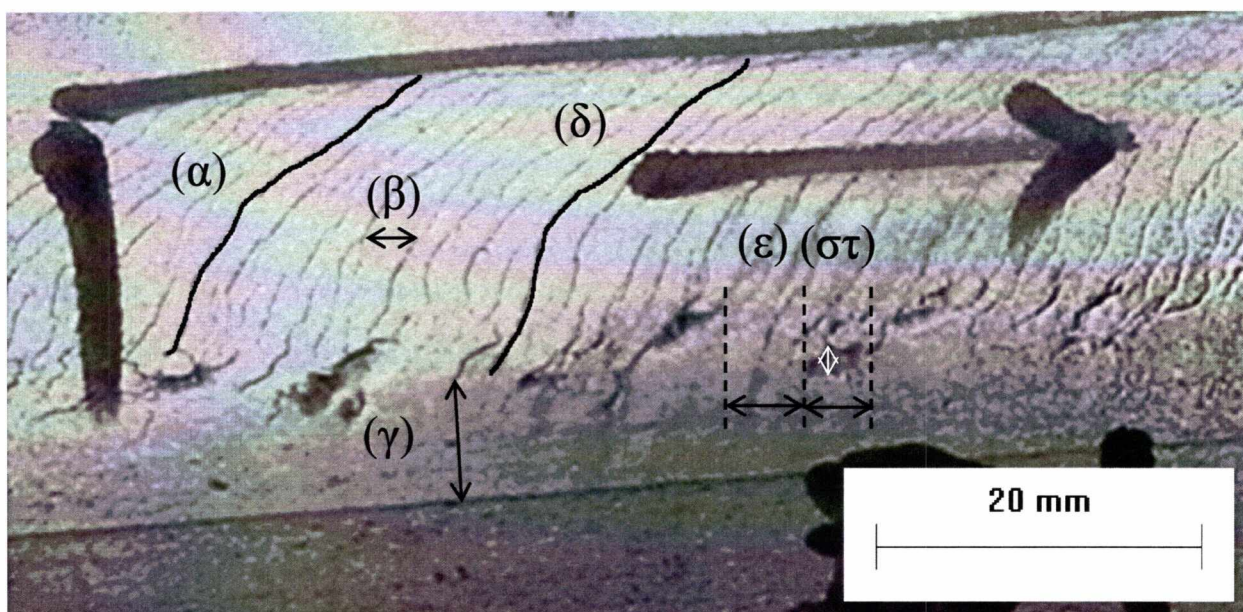


Σχήμα 4.3 Ρωγμές στην περιοχή C1 (το βέλος υποδεικνύει τη φορά κίνησης του συρμού)

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια πιο λεπτομερής ανάλυση των μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρωγμών με τη βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας Image-Pro Plus. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των φωτογραφιών που τραβήχτηκαν μετά την εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων μετρήθηκαν:

1. το μήκος των ρωγμών
2. η απόσταση μεταξύ των ρωγμών
3. η απόσταση του άκρου της ρωγμής από το gauge corner
4. η καμπυλότητα των ρωγμών
5. τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αποφλοιώσης

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α και ο τρόπος μέτρησης τους παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Τρόπος μέτρησης μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών α) μήκος ρωγμής, β) απόσταση μεταξύ ρωγμών, γ) απόσταση άκρου ρωγμής από gauge corner, δ) καμπυλότητα ρωγμής, ε) απόσταση μεταξύ αποφλοιώσεων, στ) μήκος και πλάτος αποφλοιώσεων

4.2.1 Μήκος ρωγμών

Τα αποτελέσματα του μέσου μήκους τόξου των ρωγμών και της τυπικής απόκλισής τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Μέσο μήκος ρωγμών και τυπική απόκλιση στις περιοχές B1 και C1

	Περιοχή Σιδηροτροχιάς	
	B1	C1
Μέσο Μήκος (mm)	18,69	11,63
Τυπική Απόκλιση (mm)	7,95	3,74

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις είναι φανερό ότι το μέσο μήκος τόξου των ρωγμών στην περιοχή B1 είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτό της περιοχής C1. Ο τρόπος μέτρησης του μήκους των ρωγμών απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Μέτρηση μήκους ρωγμών στην περιοχή B1

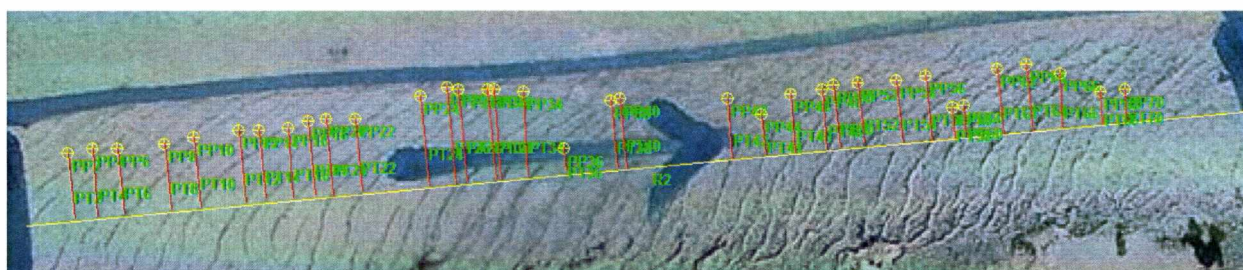
4.2.2 Απόσταση μεταξύ ρωγμών

Τα αποτελέσματα της μέσης απόστασης μεταξύ των ρωγμών και της τυπικής απόκλισής τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 Μέση απόσταση μεταξύ ρωγμών και τυπική απόκλιση στις περιοχές B1 και C1

	Περιοχή Σιδηροτροχιάς	
	B1	C1
Μέση Απόσταση Ρωγμών (mm)	1,41	1,45
Τυπική Απόκλιση (mm)	0,82	0,61

Η μέση απόσταση μεταξύ των ρωγμών παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά και στις δύο αντιπροσωπευτικές περιοχές που μελετήθηκαν. Ο τρόπος μέτρησης της απόστασης μεταξύ των ρωγμών απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 Μέτρηση απόστασης μεταξύ ρωγμών στην περιοχή B1

4.2.3 Απόσταση του άκρου της ρωγμής από το gauge corner

Τα αποτελέσματα της μέσης απόστασης του άκρου της ρωγμής από το gauge corner και της τυπικής απόκλισής της παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4 Μέση απόσταση του άκρου ρωγμής από το gauge corner και η τυπική απόκλισή της στις περιοχές B1 και C1

	Περιοχή Σιδηροτροχιάς	
	B1	C1
Μέση Απόσταση από Gauge Corner (mm)	8,64	5,26
Τυπική Απόκλιση (mm)	2,06	1,31

Τα τμήματα των σιδηροτροχιών B και C έχουν υποστεί διαφορετικού βάθους τρόχισμα και για αυτό το λόγο είναι δύσκολο να γίνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μέσης απόστασης του άκρου της ρωγμής από το gauge corner. Ο τρόπος μέτρησης της απόστασης του άκρου της ρωγμής από το gauge corner απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Μέτρηση της απόστασης του άκρου της ρωγμής από το gauge corner (περιοχή B1)

4.2.4 Καμπυλότητα των ρωγμών

Η καμπυλότητα των ρωγμών ορίστηκε με τον προσδιορισμό τριών σημείων πάνω στη ρωγμή, δηλαδή της αρχής, της μέσης και του τέλους της ρωγμής. Τις περισσότερες φορές παρατηρήθηκαν ρωγμές με καμπυλότητα σιγμοειδούς μορφής, δηλαδή το είδος της καμπυλότητας μιας ρωγμής παρουσίαζε εναλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή B1 το 72,72% (24) των ρωγμών παρουσίασε σιγμοειδούς μορφής καμπυλότητα, το 18,18% (6) κοίλη καμπυλότητα και το 9,09% (3) κυρτή καμπυλότητα, ενώ στην περιοχή C1 το 90,91% (44) παρουσίασε σιγμοειδούς μορφής καμπυλότητα, το 6,81% (3) κυρτή καμπυλότητα και το 2,27% (1) κοίλη καμπυλότητα. Τα αποτελέσματα της μέσης καμπυλότητας των ρωγμών και της τυπικής απόκλισής τους παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6, για τις περιοχές B1 και C1 αντίστοιχα.

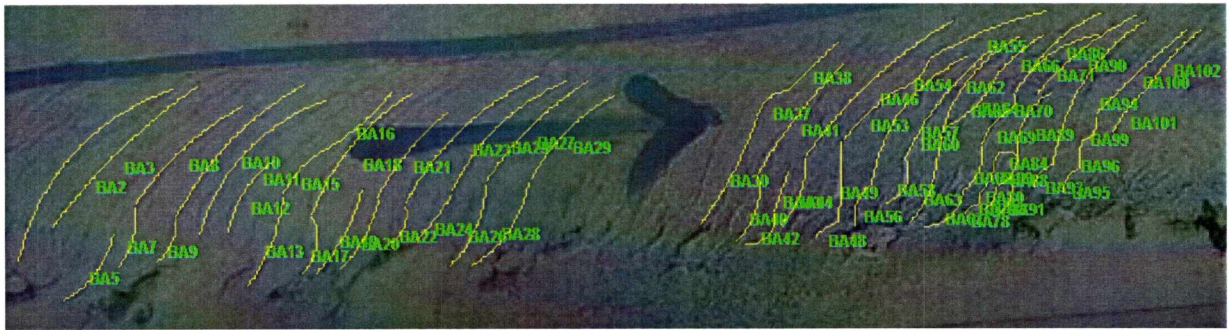
Πίνακας 4.5 Μέση καμπυλότητα ρωγμών και η τυπική απόκλισή τους στην περιοχή B1

	Περιοχή B1			
	Κυρτή	Κοίλη	Σιγμοειδής	
			Κυρτή	Κοίλη
Μέση Καμπυλότητα (mm^{-1})	9,42	22,60	9,83	20,42
Τυπική Απόκλιση (mm)	5,23	14,09	12,58	17,89

Πίνακας 4.6 Μέση καμπυλότητα ρωγμών και η τυπική απόκλισή τους στην περιοχή C1

	Περιοχή C1			
	Κυρτή	Κοίλη	Σιγμοειδής	
			Κυρτή	Κοίλη
Μέση Καμπυλότητα (mm^{-1})	19,40	12,04	9,51	9,55
Τυπική Απόκλιση (mm)	14,09	0	13,69	12,11

Η καμπυλότητα των κοίλων και των κυρτών περιοχών συμπίπτει με την καμπυλότητα σιγμοειδούς μορφής στην περιοχή B1, ενώ στην περιοχή C1 δεν φαίνεται να ακολουθεί όμοια συμπεριφορά. Επίσης, στην περιοχή B1 οι ρωγμές που παρουσιάζουν σιγμοειδούς μορφής καμπυλότητα ξεκινούν συνήθως ως κυρτές με μικρή καμπυλότητα και όσο πλησιάζουν στο gauge corner μετατρέπονται σε κοίλες μεγάλης καμπυλότητας. Αντίθετα, στην περιοχή C1 οι ρωγμές ξεκινούν συνήθως ως κοίλες με μικρή καμπυλότητα και όσο πλησιάζουν το gauge corner μετατρέπονται σε κυρτές διατηρώντας την τιμή της καμπυλότητάς τους. Ακόμη, η καμπυλότητα των ρωγμών είναι το μόνο γεωμετρικό χαρακτηριστικό που παρουσιάζει μεγάλη τυπική απόκλιση, καθώς επηρεάζεται από το γεγονός ότι η κατεύθυνση εξέλιξης της ρωγμής παρουσιάζει μεγάλη τυχαιότητα και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία, το συντελεστή τριβής και τις ατέλειες του υλικού. Τέλος, ο τρόπος μέτρησης της καμπυλότητας των ρωγμών απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 Μέτρηση της καμπυλότητας των ρωγμών στην περιοχή B1

4.2.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αποφλοιώσεως

Αποφλοιώση παρουσιάζει μόνο η περιοχή B1. Τα αποτελέσματα της μέσης απόστασης μεταξύ των αποφλοιώσεων, του μέσου μήκους αποφλοιώσεων, του μέσου πλάτους αποφλοιώσεων και των τυπικών τους αποκλίσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7 Μέσα γεωμετρικά μεγέθη και τυπικές αποκλίσεις αποφλοιώσεων στην περιοχή B1

	Απόσταση μεταξύ τους (mm)	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)
Μέσο Μέγεθος (mm)	2,26	2,78	3,89
Τυπική Απόκλιση (mm)	1,60	0,46	0,82

Η περιοχή C1 παρουσιάζει μικρότερου μήκους ρωγμές, χωρίς αποφλοιώση σε σύγκριση με την περιοχή B1 που παρουσιάζει μεγαλύτερου μήκους ρωγμές, με αποφλοιώσεις. Πιθανότατα η περιοχή C1 βρίσκεται σε ένα πρώιμο στάδιο εξέλιξης των ρωγμών που μετά το πέρασμα κάποιων κύκλων φόρτισης θα παρουσιάσει αποφλοιώσεις και θα προσεγγίσει τη συμπεριφορά που εμφανίζει η περιοχή B1. Ο τρόπος μέτρησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αποφλοιώσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.



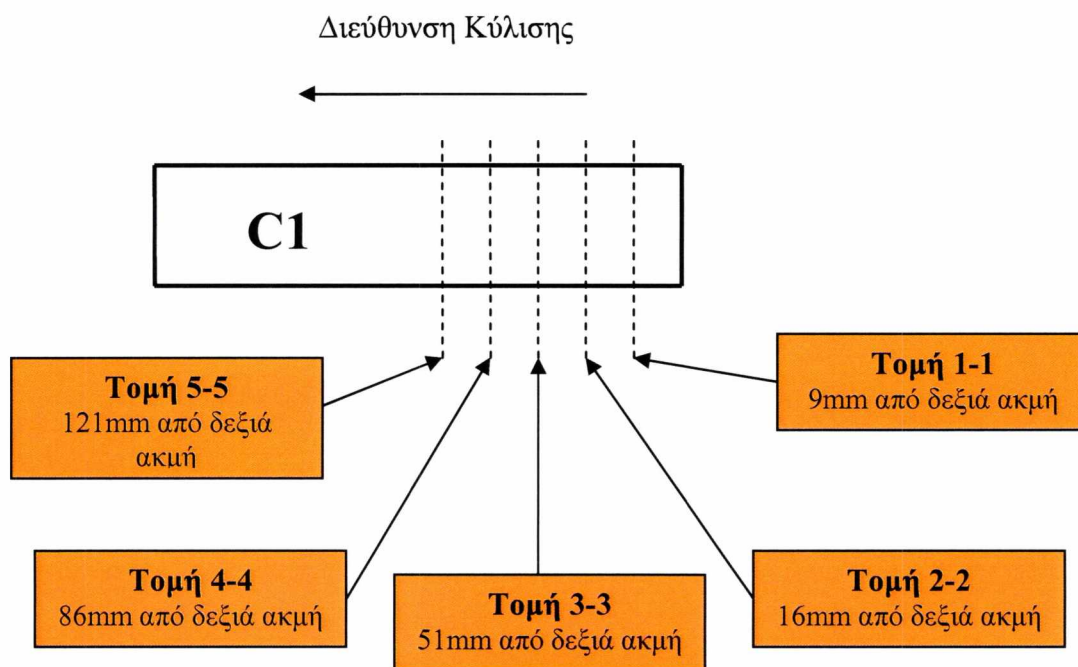
Σχήμα 4.9 Μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αποφλοιώσεων στην περιοχή B1

4.3 Μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων και διαμήκων τομών

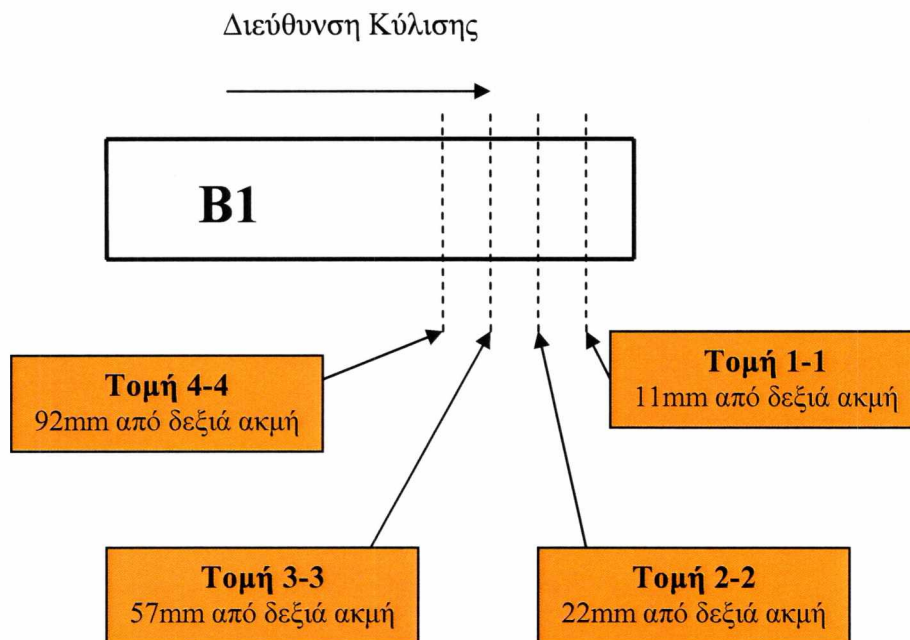
Εγκάρσιες και διαμήκεις τομές πραγματοποιήθηκαν στις περιοχές B1 και C1 με σκοπό να προσδιοριστούν οι περιοχές από όπου οι ρωγμές ξεκινούν και να γίνει κατανοητή η εξέλιξη του υποεπιφανειακού δικτύου ρωγμών, μέσω μεταλλογραφικής ανάλυσης.

4.3.1 Δειγματοληψία εγκάρσιων και διαμήκων τομών

Οι τομές στις περιοχές C1 και B1 έγιναν δια μέσου των αποφλοιώσεων και των πυκνών ρηγματώσεων (shelling), έτσι ώστε η μεταλλογραφική ανάλυση να αντιπροσωπεύει την υπάρχουσα κατάσταση των σιδηροτροχιών. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα Σχήματα 4.10 και 4.11 για τις περιοχές C1 και B1 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.10 Δειγματοληψία εγκάρσιων και διαμήκων τομών στην περιοχή C1



Σχήμα 4.11 Δειγματοληψία εγκάρσιων και διαμήκων τομών στην περιοχή B1

Τα δοκίμια της περιοχής C1 που εξετάστηκαν μεταλλογραφικά είναι τα εξής:

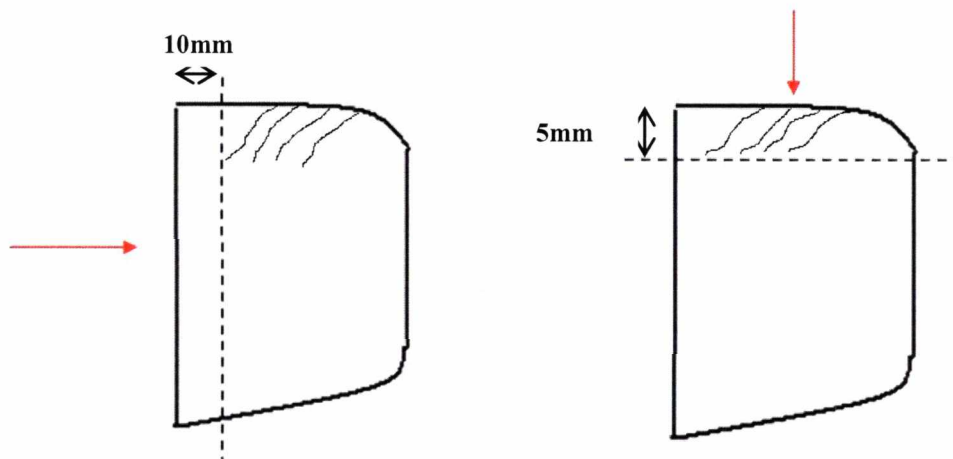
1. C1.1→εγκάρσια τομή (Τομή 1-1)
2. C1.2→εγκάρσια τομή (Τομή 2-2)
3. C1.3→διαμήκης τομή τύπου I (Τομή 3-3)
4. C1.4→διαμήκης τομή τύπου II (Τομή 4-4)
5. C1.5→διαμήκης τομή τύπου I (Τομή 5-5)

Τα δοκίμια της περιοχής B1 που εξετάστηκαν μεταλλογραφικά είναι τα εξής:

1. B1.1→εγκάρσια τομή (Τομή 1-1)
2. B1.2→εγκάρσια τομή (Τομή 2-2)
3. B1.3→διαμήκης τομή τύπου I (Τομή 3-3)
4. B1.4→διαμήκης τομή τύπου I (Τομή 4-4)

Για τα δοκίμια των διαμήκων τομών χρειάστηκε να γίνει και δεύτερη κοπή των παραπάνω εγκάρσιων δοκιμίων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Για λόγους πληρότητας εξετάστηκαν δύο διαμήκεις διευθύνσεις, τύπου I και τύπου II, οι οποίες παρουσιάζονται

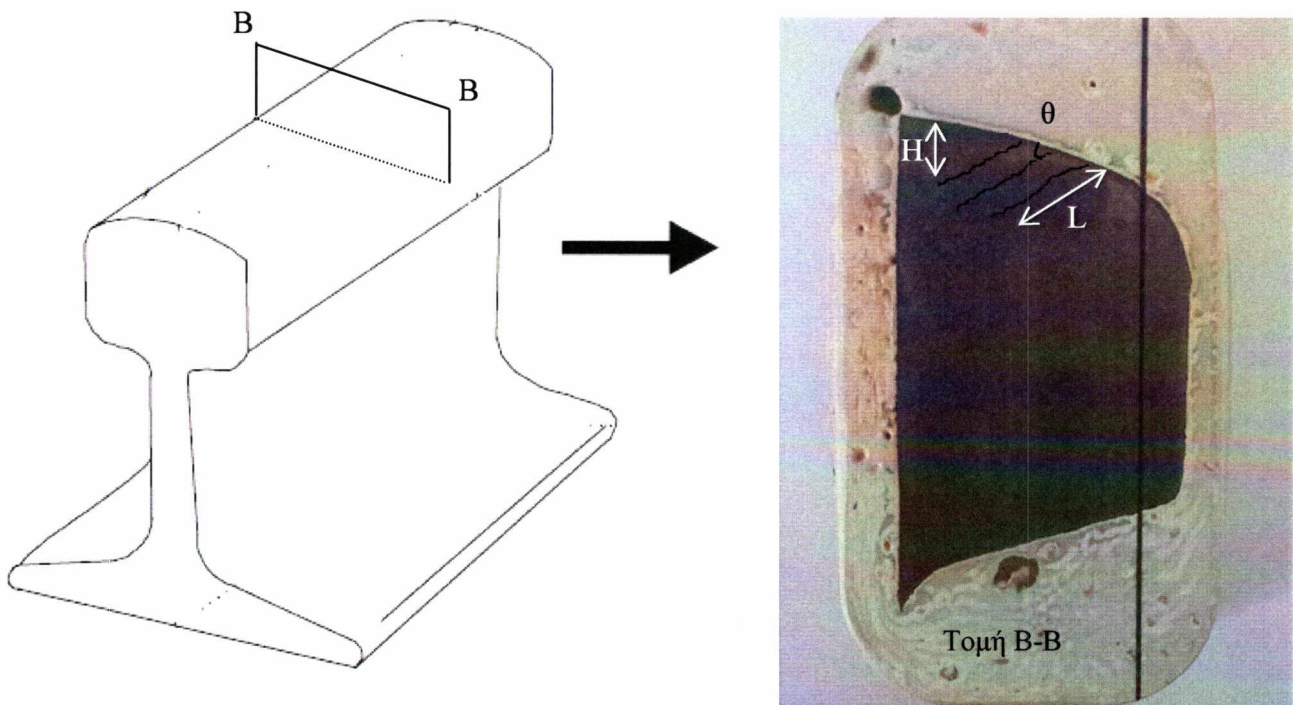
στο σχήμα 4.12. Το κόκκινο βέλος υποδεικνύει την επιφάνεια η οποία μελετήθηκε κατά τη μεταλλογραφική ανάλυση.



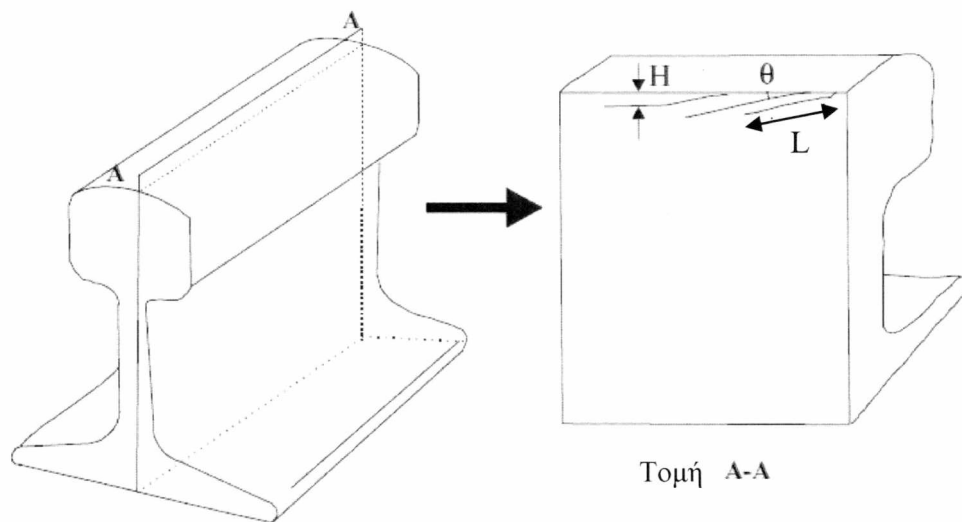
Σχήμα 4.12 Διαμήκης τομή τύπου I (αριστερά) και διαμήκης τομή τύπου II (δεξιά)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών που μετρήθηκαν στις εγκάρσιες και διαμήκεις τομές είναι τα εξής (Σχήματα 4.13 και 4.14):

1. το μήκος των ρωγμών L
2. το βάθος των ρωγμών από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς H
3. η αρχική κλίση των ρωγμών θ



Σχήμα 4.13 Τρόπος μέτρησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών εγκάρσιων τομών

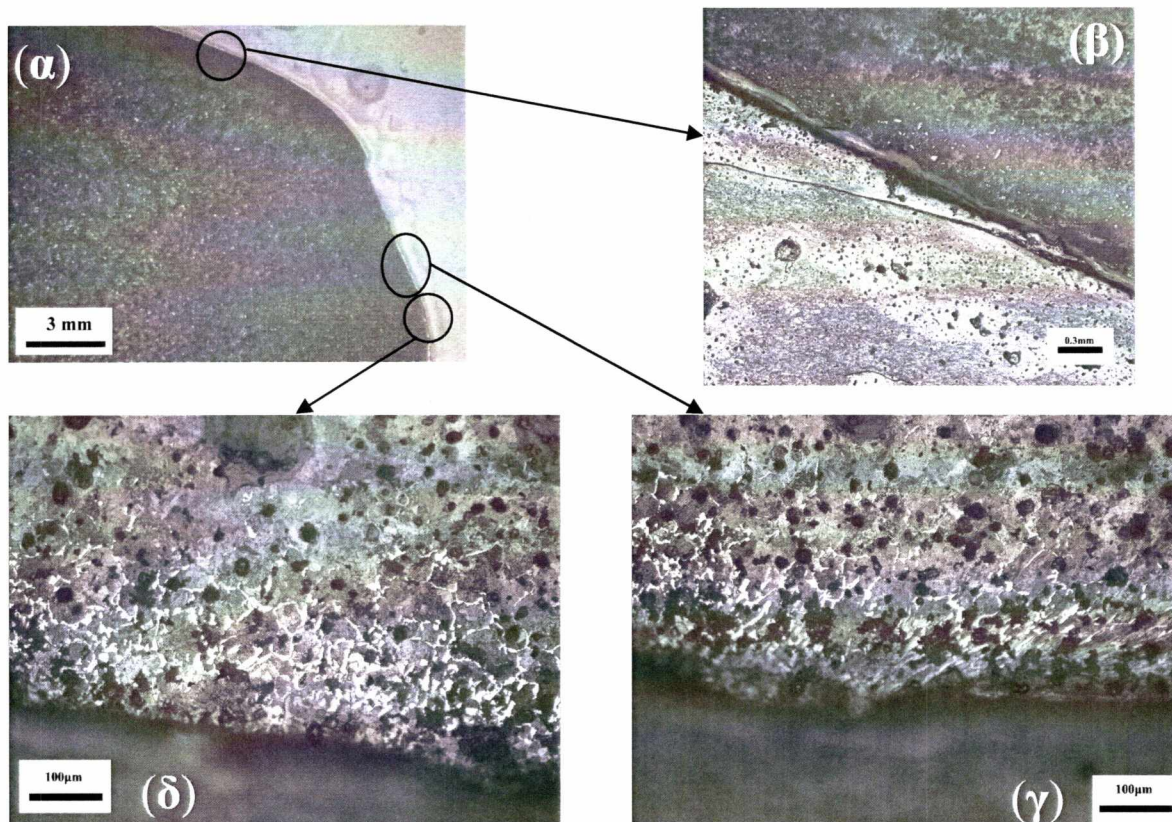


Σχήμα 4.14 Τρόπος μέτρησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών διαμήκων τομών

4.3.2 Μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων τομών περιοχής C1

Η μεταλλογραφική ανάλυση των εγκάρσιων δοκιμίων της περιοχής C1 ανέδειξε την ύπαρξη ρωγμών, κόκκων με πλαστική παραμόρφωση και προευτηκτοειδή φερρίτη στα σύνορα των κόκκων.

Πιο συγκεκριμένα, στο δοκίμιο C1.1 εμφανίζονται 6 ρωγμές μέσου μήκους 3,24 mm στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,61mm και αρχικής μέσης κλίσης $13,5^\circ$. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.15 απεικονίζονται χαρακτηριστικές περιοχές του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



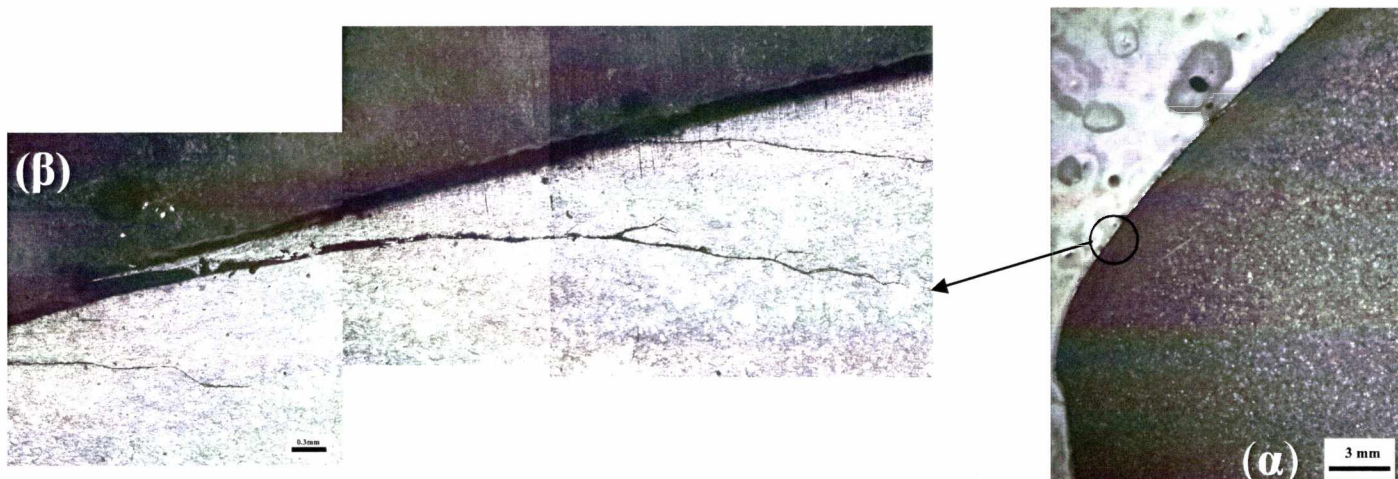
Σχήμα 4.15 Δοκίμιο C1.1 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Αντιπροσωπευτική ρωγμή δοκιμίου, γ) Έντονα παραμορφωμένοι κόκκοι, δ) Προευτηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων

Ο προευτηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων δημιουργείται κατά τη διαδικασία παραγωγής των σιδηροτροχιών με εξέλαση και δικαιολογείται καθώς έχουμε υποευτηκτοειδή χάλυβα με ποσοστό άνθρακα κάτω από 0,8%. Οι παραμορφωμένοι κόκκοι δημιουργούνται λόγω των υψηλών πλαστικών παραμορφώσεων που δέχεται η σιδηροτροχιά κατά τη διαδικασία παραγωγής με εξέλαση.

Πίνακας 4.8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.1

α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	1,95	0,78	17
2	4,77	-	14
3	3,98	-	22
4	4,71	-	10
5	1,14	0,22	9
6	2,87	0,82	9
Μέσος Όρος	3,24	0,61	13,5
Τυπική Απόκλιση	1,37	0,27	4,79

Στο δοκίμιο C1.2 εμφανίζονται 5 ρωγμές μέσου μήκους 3,92 mm, στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 1,33mm και αρχικής μέσης κλίσης 10°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται μία χαρακτηριστική ρωγμή του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



Σχήμα 4.16 Δοκίμιο C1.2 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Αντιπροσωπευτική ρωγμή και διακλάδωση

Η ρωγμή του παραπάνω σχήματος φαίνεται να έχει ανοιγμένα χείλη κοντά στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς πιθανότατα λόγω της πίεσης που ασκεί το λιπαντικό στις επιφάνειες της ρωγμής. Κατά την εξέλιξή της η ρωγμή διακλαδίζεται και οι νέες ρωγμές κινούνται προς την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος για ανάπτυξη δικτύου επιφανειακών και υποεπιφανειακών ρωγμών (shelling) και δημιουργία εκτεταμένης αποφλοίωσης.

Πίνακας 4.9 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.2

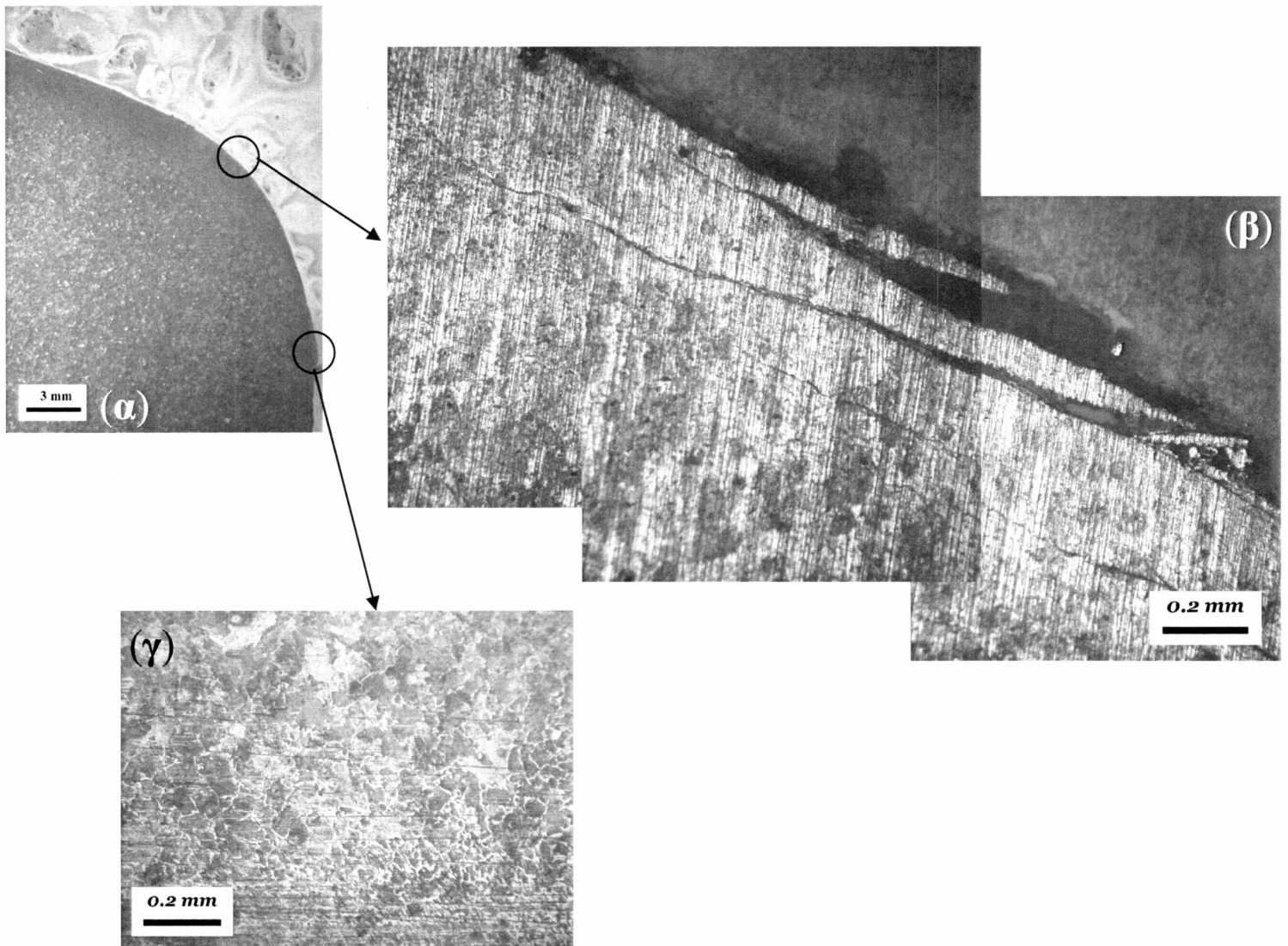
α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	2,05	-	-
2	4,16	1,41	10
3	3,21	1,24	11
4	6,79	1,67	6
5	3,39	1,01	13
Μέσος Όρος	3,92	1,33	10
Τυπική Απόκλιση	1,59	0,24	2,55

Συγκρίνοντας τα δύο εγκάρσια δοκίμια της περιοχής C1 παρατηρείται μικρή διαφορά στο μέσο μήκος ρωγμής, μεγάλη διαφορά στο μέσο βάθος ρωγμής, ενώ η συμπεριφορά της αρχικής μέσης κλίσης της ρωγμής φαίνεται να είναι ίδια και στα δύο δοκίμια. Στο δοκίμιο C1.1 δεν ήταν δυνατή η μέτρηση του βάθους στις μεγάλες μήκους ρωγμές και για αυτό το λόγο παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση στο μέσο βάθος ρωγμής των δύο δοκιμίων. Γενικότερα, το μικρό πλήθος των ρωγμών που εμφανίζονται στα δύο δοκίμια δεν βοηθάει στην ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων.

4.3.3 Μεταλλογραφική ανάλυση εγκάρσιων τομών περιοχής B1

Η μεταλλογραφική ανάλυση των εγκάρσιων δοκιμίων της περιοχής B1 ανέδειξε την ύπαρξη ρωγμών, αποφλοιώσεων και προευκτοειδή φερρίτη στα σύνορα των κόκκων.

Στο δοκίμιο B1.1 εμφανίζονται 12 ρωγμές μέσου μήκους 1,91mm, στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,60mm και αρχικής μέσης κλίσης 9,67°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.17 απεικονίζονται χαρακτηριστικές περιοχές του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



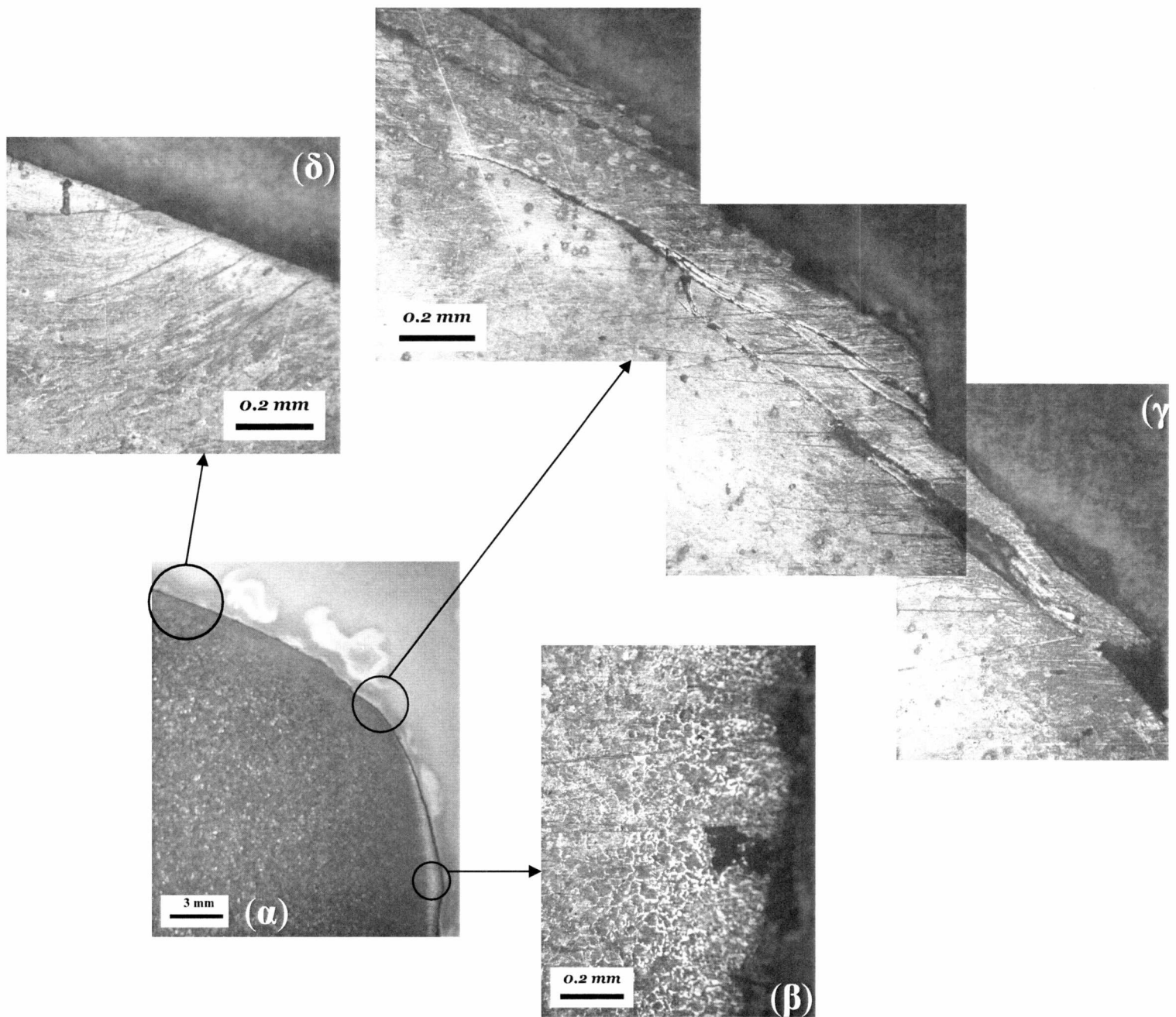
Σχήμα 4.17 Δοκίμιο B1.1 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Ρωγμές παράλληλες στην επιφάνεια και αποκόλληση υλικού, γ) Προευτηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων

Οι δύο ρωγμές του παραπάνω σχήματος ξεκινούν με πολύ μικρή κλίση από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και εξελίσσονται σχεδόν παράλληλα με αυτή. Τα χείλη της ρωγμής είναι ανοιγμένα και τείνει να αποκολληθεί μέρος του υλικού στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς με αποτέλεσμα τη δημιουργία επερχόμενων αποφλοιώσεων. Επίσης, προευτηκτοειδής φερρίτης δημιουργείται στα σύνορα των κόκκων κατά τη διαδικασία παραγωγής των σιδηροτροχιών με εξέλαση και δικαιολογείται καθώς έχουμε υποευτηκτοειδή χάλυβα.

Πίνακας 4.10 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.1

α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση ($^{\circ}$)
1	2,94	0,54	6
2	3,51	0,46	0
3	1,35	0,1	4
4	3,46	0,93	12
5	1,78	0,83	24
6	0,83	0,12	8
7	2,35	1	11
8	1,7	0,71	3
9	1,83	0,91	6
10	0,61	0,3	6
11	1,22	0,79	19
12	1,28	0,47	17
Μέσος Όρος	1,91	0,60	9,67
Τυπική Απόκλιση	0,93	0,30	6,87

Στο δοκίμιο B1.2 εμφανίζονται 11 ρωγμές μέσου μήκους 1,58mm, στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,50mm και αρχικής μέσης κλίσης 15,64°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.18 απεικονίζονται χαρακτηριστικές περιοχές του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



Σχήμα 4.18 Δοκίμιο B1.2 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Προευτηκτοειδής φερρίτης, στα σύνορα των κόκκων, γ) Δίκτυο ρωγμών κοντά στην επιφάνεια, δ) Ρωγμές με διαφορετική συμπεριφορά

Οι δύο ρωγμές της εικόνας γ του παραπάνω σχήματος ξεκινούν παράλληλα με την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και καθώς εξελίσσονται συνενώνονται δημιουργώντας ένα δίκτυο υποεπιφανειακών ρωγμών, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη αποφλοΐωση στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Ακόμη, στην εικόνα δ εμφανίζονται δύο διαδοχικές ρωγμές με διαφορετική συμπεριφορά από ότι οι υπόλοιπες ρωγμές του δοκιμίου B1.2 στο επάνω μέρος της σιδηροτροχιάς. Πιο συγκεκριμένα, οι

ρωγμές αυτές παρουσιάζουν αρκετά μικρότερο μήκος και πολύ μεγαλύτερη αρχική κλίση από ότι οι υπόλοιπες ρωγμές του δοκιμίου. Επίσης, προευντηκτοειδής φερρίτης δημιουργείται στα σύνορα των κόκκων κατά τη διαδικασία παραγωγής των σιδηροτροχιών με εξέλαση και δικαιολογείται καθώς έχουμε υποευντηκτοειδή χάλυβα.

Πίνακας 4.11 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.2

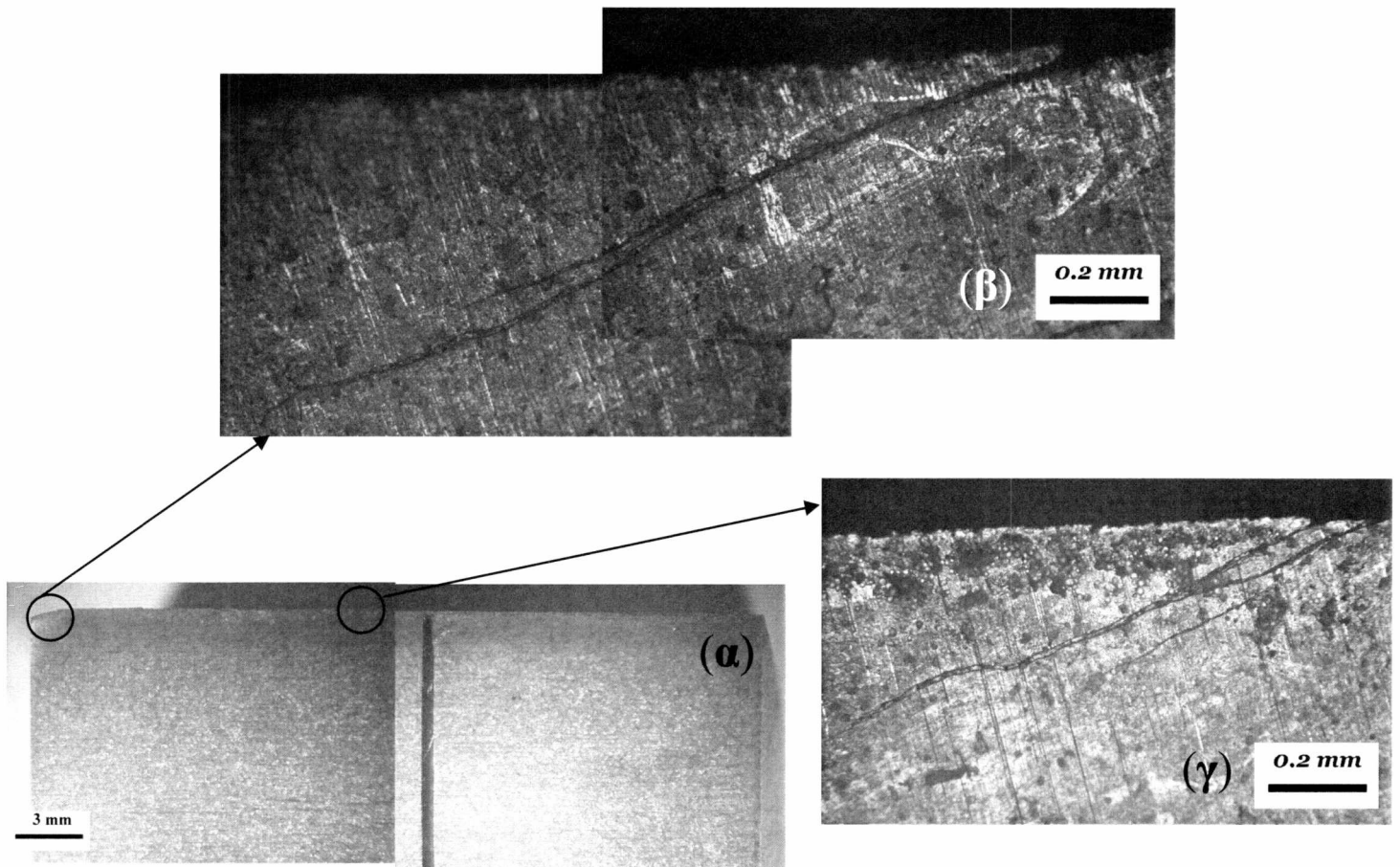
α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	2,77	0,29	0
2	2,22	0,5	0
3	2,26	0,32	7
4	2,34	0,71	12
5	0,74	0,44	13
6	1,07	0,57	10
7	2,08	0,81	13
8	1,86	0,42	6
9	0,93	0,7	15
10	0,39	0,3	47
11	0,76	0,49	49
Μέσος Όρος	1,58	0,50	15,64
Τυπική Απόκλιση	0,78	0,17	15,99

Συγκρίνοντας τα δύο εγκάρσια δοκίμια της περιοχής B1 παρατηρείται όμοια συμπεριφορά τόσο στο μέσο μήκος ρωγμής όσο και στο μέσο βάθος ρωγμής, ενώ η αρχική κλίση της ρωγμής παρουσιάζει διαφορά στα δύο δοκίμια, καθώς όπως προαναφέρθηκε δύο ρωγμές του δοκιμίου B1.2 έχουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά και επηρεάζουν σημαντικά το μέσο όρο.

4.3.4 Μεταλλογραφική ανάλυση διαμήκων τομών περιοχής C1

Η μεταλλογραφική ανάλυση των διαμήκων δοκιμίων της περιοχής C1 ανέδειξε την ύπαρξη ρωγμών, τρημάτων, διακλαδώσεων και συνενώσεων των ρωγμών στα δοκίμια διαμήκων τομών τύπου I, ενώ στο δοκίμιο C1.4 με διαμήκη τομή τύπου II δεν βρέθηκαν ευρήματα και έτσι δεν εξετάστηκαν περαιτέρω τα δοκίμια αυτού του τύπου τόσο στην περιοχή C1 όσο και στην περιοχή B1.

Πιο συγκεκριμένα, στο δοκίμιο C1.3 εμφανίζονται 11 ρωγμές μέσου μήκους 2,98 mm στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,43mm και αρχικής μέσης κλίσης 15,82°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.19 απεικονίζονται χαρακτηριστικές περιοχές του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



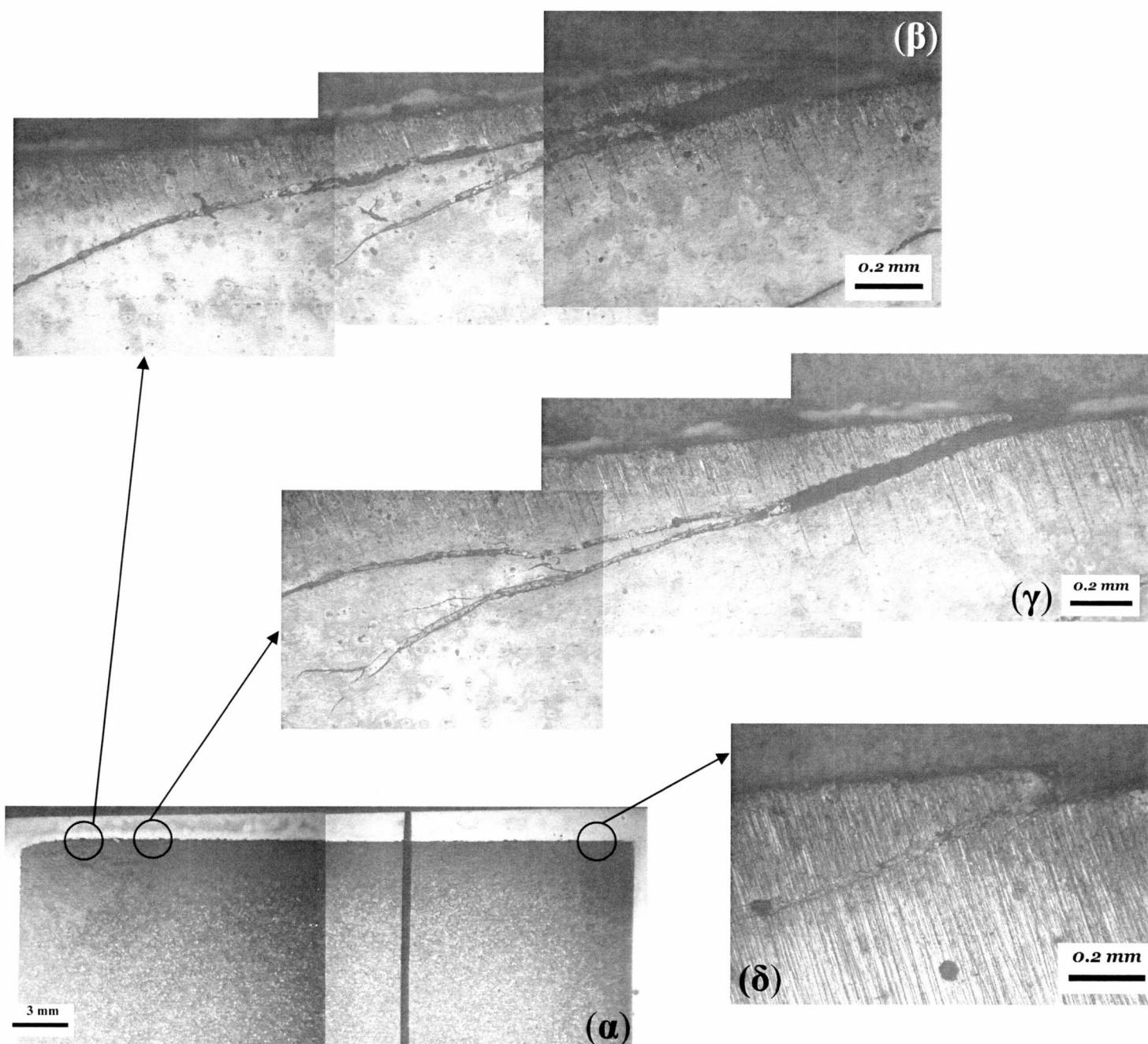
Σχήμα 4.19 Δοκίμιο C1.3 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Διακλάδωση ρωγμής, γ) Συνένωση ρωγμών

Στην εικόνα β του παραπάνω σχήματος παρουσιάζεται μία ρωγμή που διακλαδίζεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος για ανάπτυξη δικτύου επιφανειακών και υποεπιφανειακών ρωγμών (shelling) και δημιουργία εκτεταμένης αποφλοίωσης. Στην εικόνα γ παρουσιάζονται δύο ρωγμές που συνενώνονται δημιουργώντας ένα δίκτυο υποεπιφανειακών ρωγμών, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη αποφλοίωση στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς.

Πίνακας 4.12 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.3

α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	1,84	0,63	13
2	3,94	-	8
3	4,07	-	10
4	3,95	-	21
5	1,12	0,42	21
6	0,45	0,16	20
7	4,07	-	17
8	4,05	-	18
9	3,70	-	12
10	4,18	-	13
11	1,45	0,49	21
Μέσος Όρος	2,98	0,43	15.82
Τυπική Απόκλιση	1,38	0,17	4.57

Στο δοκίμιο C1.5 εμφανίζονται 17 ρωγμές μέσου μήκους 3,04mm, στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,28mm και αρχικής μέσης κλίσης 11,35°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.20 απεικονίζονται χαρακτηριστικές περιοχές του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



Σχήμα 4.20 Δοκίμιο C1.5 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Τμηματική διάβρωση, γ) Διακλάδωση ρωγμών, δ) Τρηματική διάβρωση

Στην εικόνα β του παραπάνω σχήματος παρουσιάζονται δύο ρωγμές οι οποίες ξεκινούν από τη βάση του τρήματος και στη συνέχεια αναπτύσσονται μέσα στο υλικό, ενώ στην εικόνα γ παρουσιάζεται μία ρωγή που ξεκινά με ανοιγμένα χείλη από την επιφάνεια και διακλαδίζεται σε μικρό βάθος από αυτή. Στην εικόνα δ επίσης παρουσιάζεται η έναρξη και εξέλιξη μίας ρωγμή λόγω τρηματικής διάβρωσης.

Πίνακας 4.13 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου C1.5

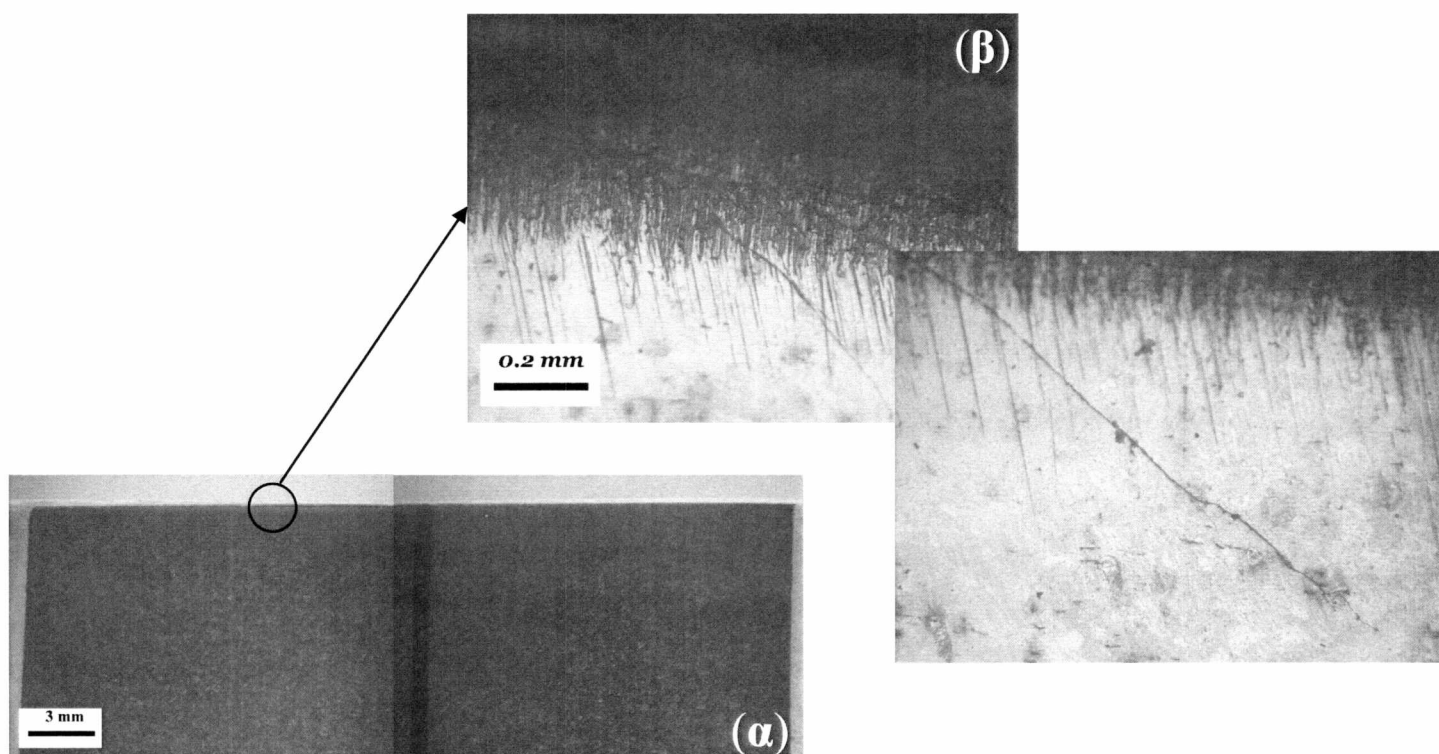
α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	4,76	-	8
2	2,03	0,49	10
3	4,92	-	14
4	2,92	-	14
5	4,42	-	7
6	4,48	-	10
7	0,48	0,14	15
8	3,81	-	6
9	3,59	-	6
10	0,97	0,16	8
11	3,61	-	7
12	3,84	-	19
13	4,39	-	11
14	2,40	-	17
15	0,58	0,21	15
16	1,19	0,41	19
17	3,36	-	7
Μέσος Όρος	3,04	0,28	11,35
Τυπική Απόκλιση	1,46	0,14	4,41

Συγκρίνοντας τα δύο διαμήκη δοκίμια της περιοχής C1 παρατηρείται όμοια συμπεριφορά στο μέσο μήκος ρωγμής, μικρή διαφορά στην αρχική κλίση της ρωγμής και μεγαλύτερη διαφορά στο μέσο βάθος ρωγμής. Η μέτρηση του βάθους δεν ήταν δυνατή στις μεγάλου μήκους ρωγμές των δύο δοκιμίων και για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα στη συγκεκριμένη μέτρηση δεν είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά. Τέλος, το πλήθος των ρωγμών είναι ικανοποιητικό για την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων των διαμήκων τομών της περιοχής C1, σε αντίθεση με το μικρό πλήθος ρωγμών στις εγκάρσιες τομές της ίδιας περιοχής.

4.3.5 Μεταλλογραφική ανάλυση διαμήκων τομών περιοχής B1

Η μεταλλογραφική ανάλυση των διαμήκων δοκιμίων της περιοχής B1 ανέδειξε την ύπαρξη ρωγμών και διακλαδώσεων μικρής εμβέλειας. Η προετοιμασία των διαμήκων δοκιμίων κοντά στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς δεν είναι η καλύτερη δυνατή και αυτό επηρέασε την ευκρίνεια των εικόνων κοντά στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς.

Στο δοκίμιο B1.3 εμφανίζονται 12 ρωγμές μέσου μήκους 1,34mm, στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,39mm και αρχικής μέσης κλίσης 29°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.21 απεικονίζεται μία χαρακτηριστική ρωγμή του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



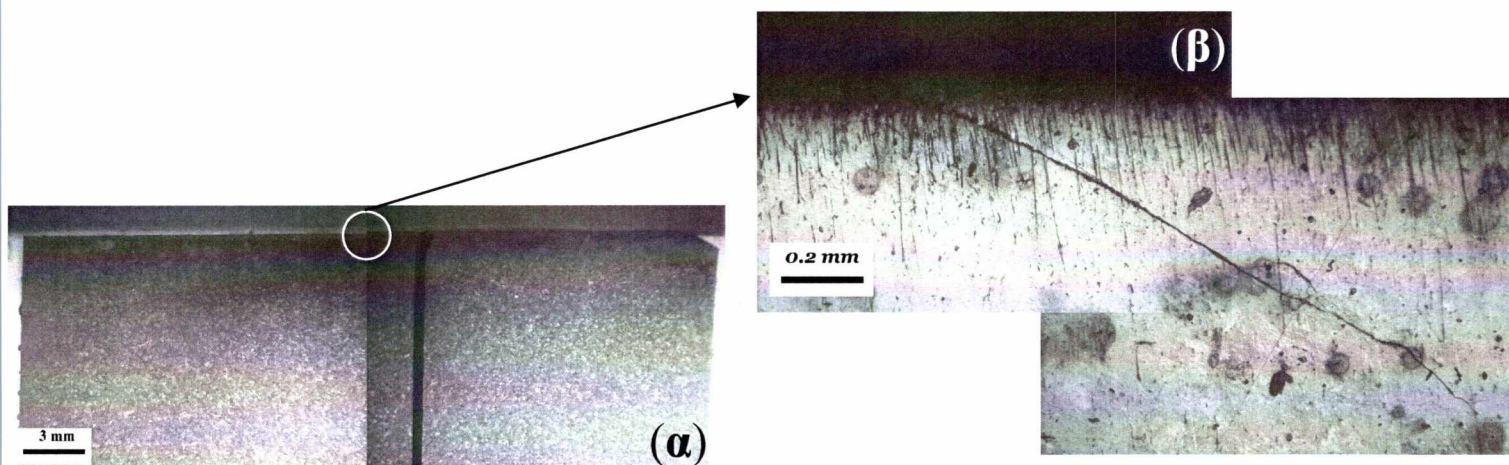
Σχήμα 4.21 Δοκίμιο B1.3 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Διακλάδωση ρωγμής

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται μία ρωγμή η οποία ξεκινά με μικρή κλίση από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και διακλαδίζεται σε μικρό βάθος από αυτή.

Πίνακας 4.14 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.3

α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	1,58	-	27
2	1,55	-	30
3	1,69	-	27
4	1,01	-	18
5	1,10	-	18
6	1,28	-	32
7	1,44	-	23
8	1,56	-	32
9	1,25	-	39
10	1,62	-	32
11	0,29	0,19	39
12	1,66	0,58	31
Μέσος Όρος	1,34	0,39	29,00
Τυπική Απόκλιση	0,38	0,20	6,57

Στο δοκίμιο B1.4 εμφανίζονται 13 ρωγμές μέσου μήκους 1,29mm, στην περιοχή του gauge corner, μέσου βάθους από την επιφάνεια 0,61mm και αρχικής μέσης κλίσης 29,31°. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.22 απεικονίζεται μία αντιπροσωπευτική ρωγμή του δοκιμίου, ενώ στον Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρωγμών.



Σχήμα 4.22 Δοκίμιο B1.4 α) Μακροσκοπική φωτογραφία, β) Αντιπροσωπευτική ρωγμή δοκιμίου

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται μία ρωγμή η οποία ξεκινά με μεγάλη κλίση από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και εξελίσσεται υπό σταθερή κλίση στο εσωτερικό της.

Πίνακας 4.15 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών δοκιμίου B1.4

α/α Ρωγμής	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
1	1.43	0.72	35
2	0.84	0.48	37
3	1.82	0.76	9
4	1.16	0.61	35
5	1.05	0.56	37
6	1.97	0.88	21
7	1.03	0.49	26
8	1.72	-	31
9	1.68	-	35
10	0.99	0.59	37
11	1.03	0.51	28
12	0.79	0.41	21
13	1.21	0.65	29
Μέσος Όρος	1.29	0.61	29.31
Τυπική Απόκλιση	0.38	0.13	8.04

Συγκρίνοντας τα δύο διαμήκη δοκίμια της περιοχής B1 παρατηρείται όμοια συμπεριφορά τόσο στο μέσο μήκος ρωγμής όσο και στην αρχική κλίση της ρωγμής, ενώ το μέσο βάθος ρωγμής παρουσιάζει σημαντική διαφορά στα δύο δοκίμια. Στο δοκίμιο B1.3 δεν ήταν δυνατή η μέτρηση του βάθους στην πλειοψηφία των ρωγμών και για αυτό το λόγο παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση στο μέσο βάθος ρωγμής των δύο δοκιμίων.

4.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων των τομών των περιοχών B1 και C1

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο γίνεται σύγκριση αποτελεσμάτων όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρωγμών που μετρήθηκαν στις εγκάρσιες και διαμήκεις τομές. Τα αποτελέσματα των εγκάρσιων και διαμήκων τομών παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 4.16 και 4.17 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.16 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών εγκάρσιων τομών

	C1			B1		
	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
Μέσος Όρος	3,55	1,02	12,10	1,75	0,55	12,52
Τυπική Απόκλιση	1,51	0,44	4,39	0,87	0,25	12,48

Τα δοκίμια εγκάρσιων τομών της περιοχής C1 παρουσιάζουν διπλάσιο μέσο μήκος ρωγμών και διπλάσιο μέσο βάθος ρωγμών από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια της περιοχής B1, ενώ παρατηρείται παρομοιότυπη συμπεριφορά στη μέση αρχική κλίση ρωγμών.

Πίνακας 4.17 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ρωγμών διαμήκων τομών

	C1			B1		
	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)	Μήκος Ρωγμής (mm)	Βάθος Ρωγμής (mm)	Κλίση (°)
Μέσος Όρος	3,02	0,35	13,11	1,31	0,57	29,16
Τυπική Απόκλιση	1,43	0,17	4,97	0,38	0,16	7,37

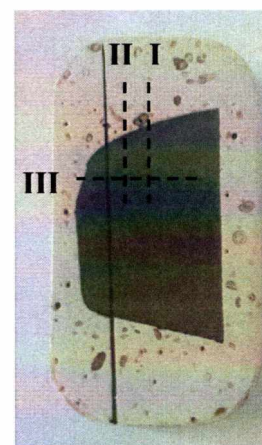
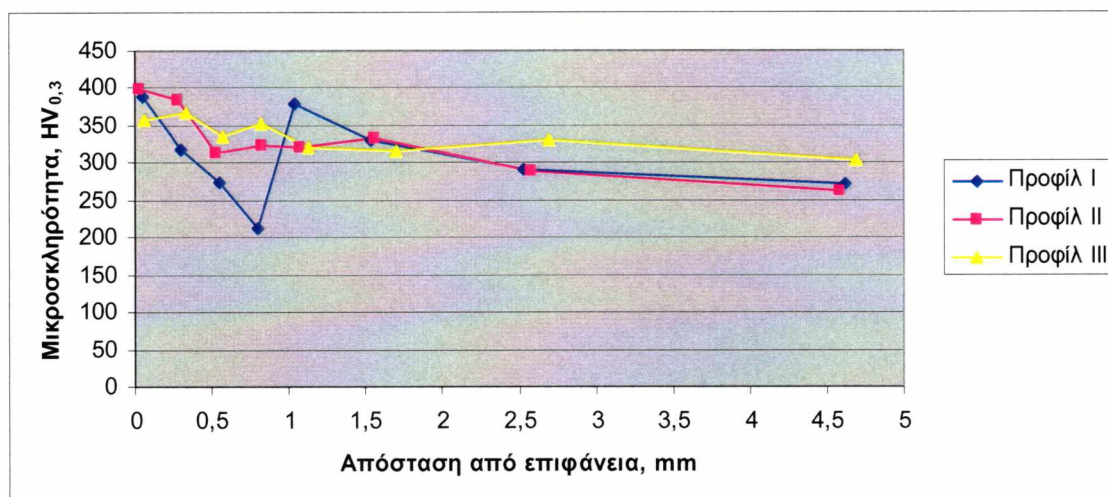
Τα δοκίμια διαμήκων τομών της περιοχής B1 παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερο μέσο βάθος ρωγμών από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και αρκετά μεγαλύτερη μέση αρχική κλίση ρωγμών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια της περιοχής C1, ενώ στα δοκίμια της περιοχής C1 παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερο μέσο μήκος ρωγμών.

4.4 Μικροσκληρομέτρηση εγκάρσιων και διαμήκων τομών

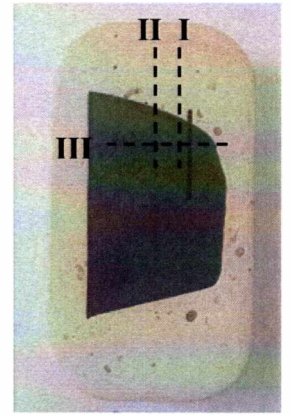
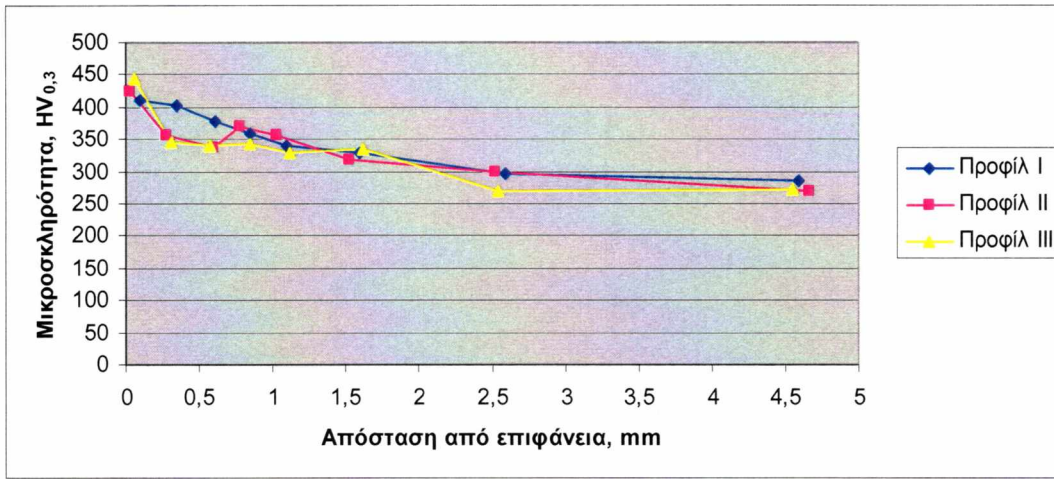
Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια εγκάρσιων και διαμήκων τομών των περιοχών B1 και C1 με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή της σκληρότητας από την επιφάνεια κοντά στο gauge corner προς το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς. Η αρχική σκληρότητα του πυρήνα της σιδηροτροχιάς είναι 300 HV.

4.4.1 Μικροσκληρομέτρηση εγκάρσιων τομών

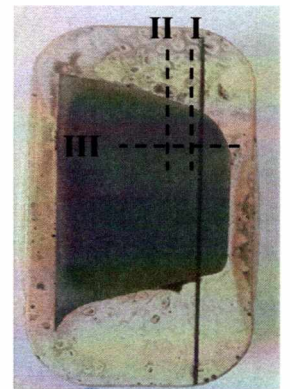
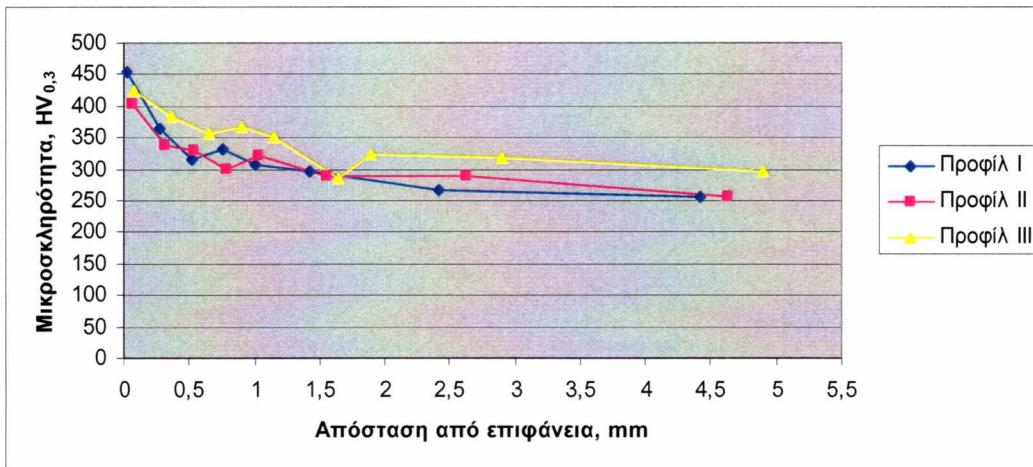
Τα αποτελέσματα της μέτρησης των προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων εγκάρσιων τομών της περιοχής C1 παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.23 και 4.24, ενώ τα αντίστοιχα δοκίμια της περιοχής B1 παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.25 και 4.26.



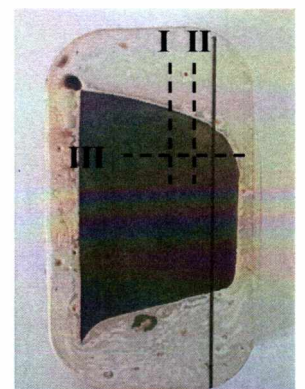
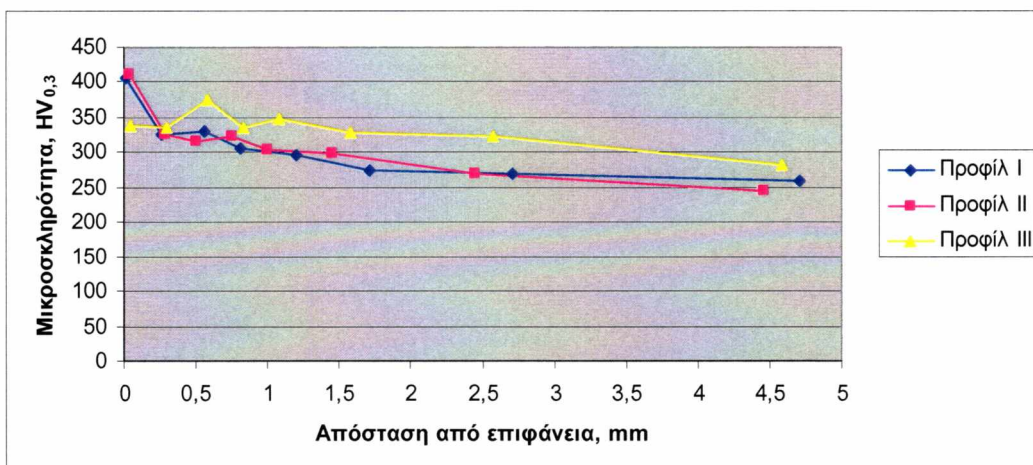
Σχήμα 4.23 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου C1.1



Σχήμα 4.24 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου C1.2



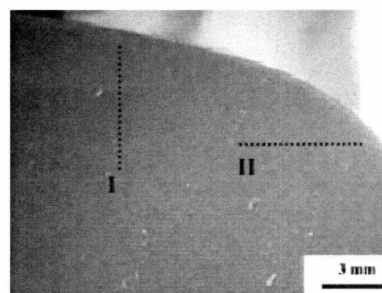
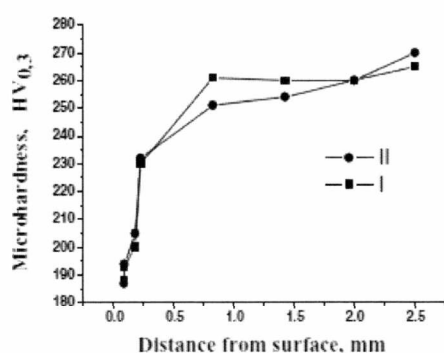
Σχήμα 4.25 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου B1.1



Σχήμα 4.26 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας εγκάρσιου δοκιμίου B1.2

Τα εγκάρσια δοκίμια τόσο της περιοχής C1, όσο και της περιοχής B1 παρουσιάζουν σημαντική εργοσκληρύνση, η οποία είναι υψηλότερη κοντά στην περιοχή του gauge corner και σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Πιο συγκεκριμένα, το δοκίμιο C1.1 παρουσιάζει υψηλότερη εργοσκληρύνση κατά τη διεύθυνση του προφίλ II, το δοκίμιο C1.2 κατά τη διεύθυνση του προφίλ I, ενώ τα δοκίμια της περιοχής B1 κατά τη διεύθυνση του προφίλ III.

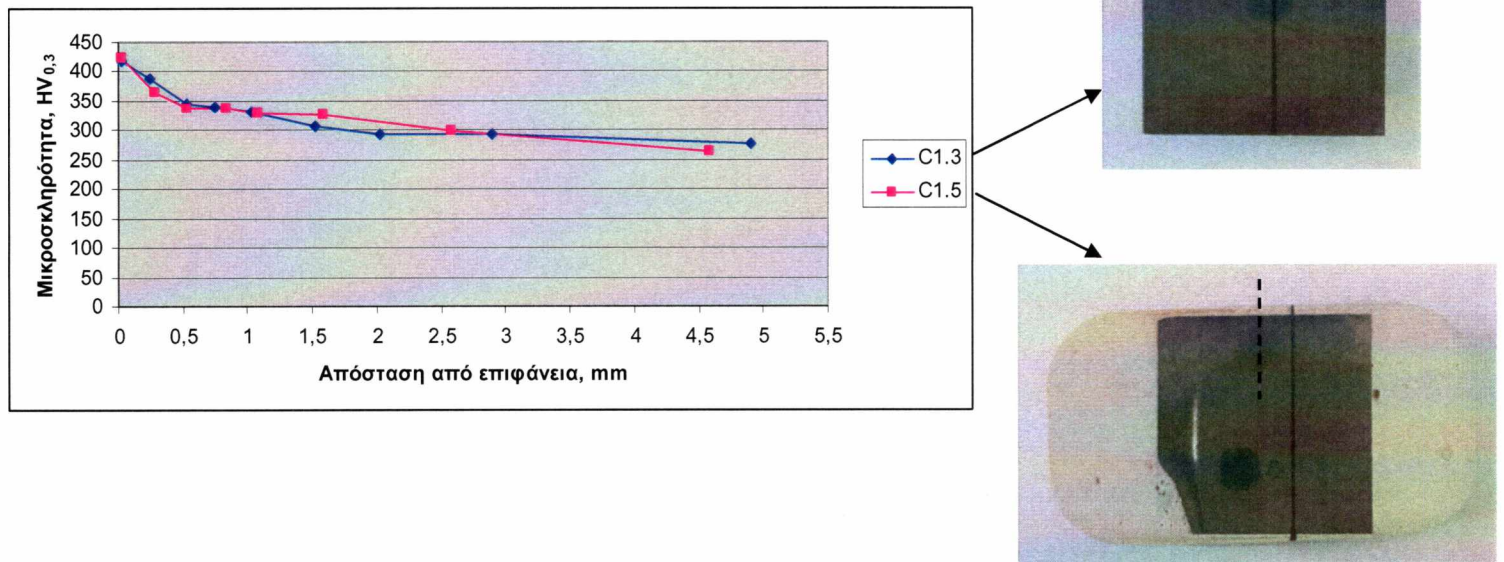
Για να γίνει πιο κατανοητό το μέγεθος της εργοσκληρύνσης που υφίσταται η επιφάνεια της σιδηροτροχιάς παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.27 το προφίλ μικροσκληρομέτρησης μίας αχρησιμοποίητης σιδηροτροχιάς. Η επιφάνεια της αχρησιμοποίητης σιδηροτροχιάς είναι μαλακότερη από ότι το εσωτερικό της σιδηροτροχιάς, καθώς η παρουσία προετηκτοειδή φερρίτη στα σύνορα των κόκκων κάνει το υλικό πιο μαλακό. Κατά τη λειτουργία το στρώμα του προετηκτοειδή φερρίτη απαλείφεται λόγω της φυσικής φθοράς της σιδηροτροχιάς.



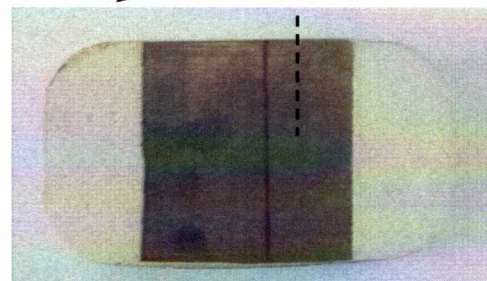
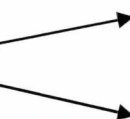
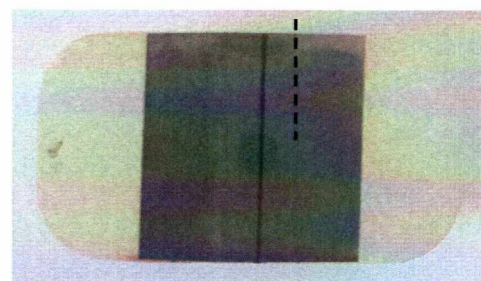
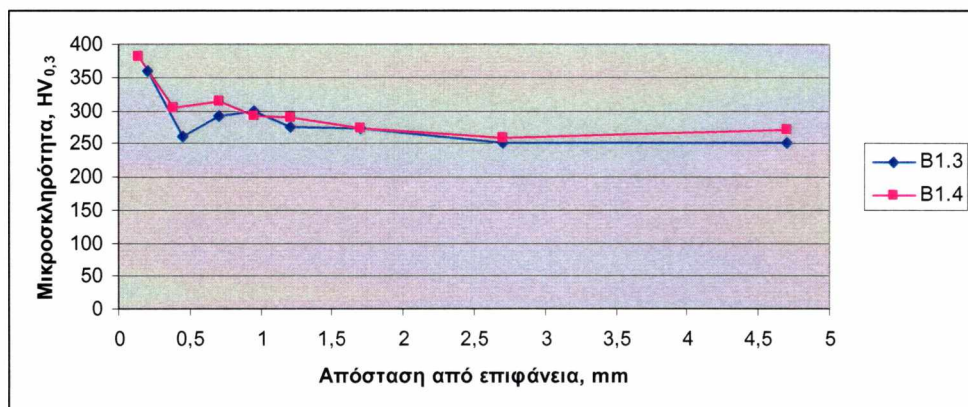
Σχήμα 4.27 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας αχρησιμοποίητης σιδηροτροχιάς

4.4.2 Μικροσκληρομέτρηση διαμήκων τομών

Τα αποτελέσματα της μέτρησης των προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων διαμήκων τομών της περιοχής C1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.28, ενώ τα αντίστοιχα δοκίμια της περιοχής B1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.29.



Σχήμα 4.28 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας διαμήκων δοκιμίων C1.3 και C1.5



Σχήμα 4.29 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων και περιοχές δειγματοληψίας διαμήκων δοκιμίων B1.3 και B1.4

Τα διαμήκη δοκίμια τόσο της περιοχής C1, όσο και της περιοχής B1 παρουσιάζουν σημαντική εργοσκληύρυνση. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια διαμήκων τομών της περιοχής C1 παρουσιάζουν υψηλότερη εργοσκληύρυνση σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια της περιοχής B1.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σιδηροτροχιές του Μετρό Αθηνών είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με το χάλυβα Grade 900A της προδιαγραφής UIC860. Η περιλιτική μικροδομή του συγκεκριμένου χάλυβα προσφέρει σημαντική ολκιμότητα και το μεγάλο ποσοστό άνθρακα προσφέρει αυξημένη αντοχή στο χάλυβα. Ο εργαστηριακός έλεγχος επικεντρώθηκε στις περιοχές B1 και C1 δύο ξεχωριστών σιδηροτροχιών.

Ο οπτικός έλεγχος μετά την εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων δείχνει την ύπαρξη μεγάλου μήκους πυκνών ρωγμών με μορφή shelling και αποφλοιώσεων στην περιοχή B1 και ύπαρξη μεγάλου μήκους πυκνών ρωγμών με μορφή shelling χωρίς όμως αποφλοιώσεις στην περιοχή C1. Οι ρηγματώσεις εντοπίζονται στην περιοχή του gauge corner και αναπτύσσονται προς την αντίθετη κατεύθυνση από τη φορά κίνησης.

Από τη μέτρηση των μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρωγμών των σιδηροτροχιών συμπεραίνεται ότι:

- 1) Το μήκος ρωγμών της περιοχής B1 είναι μεγαλύτερο από αυτό της περιοχής C1 (18,69 mm έναντι 11,63 mm).
- 2) Η απόσταση μεταξύ των ρωγμών παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά και στις δύο περιοχές (B1: 1,41 mm, C1: 1,45 mm).
- 3) Δεν μπορεί να γίνει σύγκριση για την απόσταση του άκρου των ρωγμών από το gauge corner.
- 4) Οι ρωγμές που παρουσιάζουν σιγμοειδούς μορφής καμπυλότητα ξεκινούν ως κυρτές με μικρή καμπυλότητα ($9,83 \text{ mm}^{-1}$) και κοντά στο gauge corner μετατρέπονται σε κοίλες μεγάλης καμπυλότητας ($20,42 \text{ mm}^{-1}$) στην περιοχή B1, ενώ στην περιοχή C1 ξεκινούν ως κοίλες με μικρή καμπυλότητα ($9,51 \text{ mm}^{-1}$) και κοντά στο gauge corner μετατρέπονται σε κυρτές διατηρώντας την καμπυλότητά τους ($9,55 \text{ mm}^{-1}$).
- 5) Η περιοχή C1 βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης ρωγμών (χωρίς αποφλοιώσεις) που μετά το πέρασμα κάποιων κύκλων φόρτισης θα παρουσιάσει αποφλοιώσεις προσεγγίζοντας τη συμπεριφορά της περιοχής B1.

Η μεταλλογραφική ανάλυση των εγκάρσιων τομών της περιοχής C1 ανέδειξε την ύπαρξη ρωγμών στην περιοχή του gauge corner και διακλαδώσεων τους, την ύπαρξη παραμορφωμένων κόκκων και προευθηκτοειδή φερρίτη στα σύνορα των κόκκων, ενώ στην περιοχή B1 παρατηρούνται ρωγμές στην περιοχή του gauge corner, συνενώσεις ρωγμών, αποφλοιώσεις στην επιφάνεια και προευθηκτοειδής φερρίτης στα σύνορα των κόκκων.

Η μεταλλογραφική ανάλυση των διαμήκων τομών της περιοχής C1 ανέδειξε την ύπαρξη ρωγμών, διακλαδώσεων ρωγμών, συνενώσεων ρωγμών και την έναρξη ρωγμών λόγω τρηματικής διάβρωσης, ενώ στην περιοχή B1 παρατηρούνται ρωγμές και διακλαδώσεις ρωγμών.

Από τη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ρωγμών στις εγκάρσιες και διαμήκεις τομές συμπεραίνεται ότι:

- 1) Τα δοκίμια εγκάρσιων τομών της περιοχής C1 παρουσιάζουν διπλάσιο μήκος ρωγμών (3,55 mm έναντι 1,75 mm) και διπλάσιο βάθος ρωγμών (1,02 mm έναντι 0,55 mm) από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς σε σύγκριση με τα δοκίμια της περιοχής B1.
- 2) Τα δοκίμια εγκάρσιων τομών και των δύο περιοχών παρουσιάζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά στην αρχική κλίση ρωγμών (B1: 12,48°, C1: 12,1°)
- 3) Τα δοκίμια διαμήκων τομών της περιοχής B1 παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερο βάθος ρωγμών (0,57 mm έναντι 0,35 mm) από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς και αρκετά μεγαλύτερη αρχική κλίση ρωγμών (29,16 ° έναντι 13,11 °) σε σύγκριση με τα δοκίμια της περιοχής C1.
- 4) Τα δοκίμια διαμήκων τομών της περιοχής C1 παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερο μήκος ρωγμών (3,02 mm έναντι 1,31mm) σε σύγκριση με τα δοκίμια της περιοχής B1.

Η επιφάνεια της σιδηροτροχιάς B παρουσιάζει αποφλοιώσεις και μεγάλο μέσο μήκος ρωγμών μακροσκοπικά (18,69 mm), ενώ στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς οι ρωγμές παρουσιάζουν μικρό μέσο μήκος (1,75 mm). Αντίθετα, η επιφάνεια της σιδηροτροχιάς C δεν παρουσιάζει αποφλοιώσεις και έχει μικρότερο μέσο μήκος ρωγμών μακροσκοπικά (11,63 mm), ενώ στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέσο μήκος (3,53 mm). Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η περιοχή

που επηρεάζεται περισσότερο από τις τάσεις επαφής Hertzian είναι η επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς στην σιδηροτροχιά Β, ενώ στην σιδηροτροχιά C είναι η περιοχή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια.

Τέλος, τα προφίλ μικροσκληρομετρήσεων των εγκάρσιων δοκιμίων όλων των σιδηροτροχιών παρουσιάζουν σημαντική εργοσκληρυνση κοντά στην περιοχή του gauge corner και σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς. Αντίστοιχα, και τα προφίλ μικροσκληρομετρήσεων των διαμήκων δοκιμίων όλων των σιδηροτροχιών παρουσιάζουν σημαντική εργοσκληρυνση σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια της σιδηροτροχιάς για τον ίδιο ακριβώς λόγο.

Ο συσχετισμός των επιφανειακών χαρακτηριστικών του δικτύου των ρωγματώσεων, με την υπο-επιφανειακή όδευση τους, μπορεί να αξιοποιηθεί σε ανάπτυξη προγράμματος ολικού ελέγχου του RCF στις σιδηροτροχιές. Τα παραπάνω δεδομένα εφόσον συνδυαστούν με τα ευρήματα NDT μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο ελέγχου και πρόληψης του φαινομένου με άμεσες συνέπειες τόσο στην ασφάλεια όσο και στο κόστος συντήρησης των σιδηροτροχιών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Grohmann H.-D., and Schoech W. (2002), Contact geometry and surface fatigue minimizing the risk of headcheck formation, *Wear*, **253**, 54-59.
2. Cannon D.F., Edel K.-O., Grassie S.L., and Sawley K. (2003), Rail defects: an overview, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **26**, 865-887.
3. Ringsberg J.W., and Bergkviss A. (2003), On propagation of short rolling contact fatigue cracks, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **26**, 969-983.
4. Zerbst U., Lunden R., Edel K.-O. and Smith R.A. (2009), Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review, *Engineering Fracture Mechanics*, **76**, 2563-2601.
5. Grassie S.L., (2005), Rolling contact fatigue on the British railway system: treatment, *Wear*, **258**, 1310-1358.
6. Patra A.P., Bidhar S., and Kumar U. (2010), Failure prediction of rail considering rolling contact fatigue, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, **17**, 167-177.
7. Beheshti A., and Khonsari M.M. (2011), On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect, *Tribology International*, **44**, 1620-1628.
8. Brouzoulis J., and Ekh M. (2012), Crack propagation in rails under rolling contact fatigue loading conditions based on material forces, *International Journal of Fatigue*, **45**, 98-105.
9. Haidemenepoulos G.N., Zervaki A.D., Terezakis P., Tzanis J., Gianakopoulos A.E. and Kotouzas M.K. (2006), Investigation of rolling contact fatigue cracks in a grade 900A rail steel of a metro crack, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **29**, 887-900.
10. Zerbst U., Mädler K. and Hintze H. (2005), Fracture mechanics in railway applications – an overview, *Engineering Fracture Mechanics*, **72**, 163-194.
11. Steenbergen M., and Dollevoet R. (2013), On the mechanism of squat formation on train rails – Part 1: Origination, *International Journal of Fatigue*, **47**, 361-373.

12. Ekberg A., and Kabo E. (2005), Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview, *Wear*, **258**, 1288-1300.
13. Franklin F.J., Garnham J.E., Fletcher J.E., Davis C.L., and Kapoor A. (2008), Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation, *Wear*, **265**, 1332-1341.
14. Garnham J.E., and Davis C.L. (2008), The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation, *Wear*, **265**, 1363-1372.
15. Χαϊδεμενόπουλος Γ.Ν. (2007), Φυσική Μεταλλουργία, Εκδόσεις Τζιόλα.
16. Magel E., Koney M., Kalousek J., and Sroba P. (2003), The blending of theory and practice in modern rail grinding, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **26**, 921-929.
17. Steenbergen M., and Dollevoet R. (2013), On the mechanism of squat formation on train rails – Part 1: Growth, *International Journal of Fatigue*, **47**, 373-381.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Μετρήσεις μακροσκοπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Περιοχή Β1

α/α ρωγμής	Μήκος ρωγμής (mm)	Απόσταση ρωγμών (mm)	Απόσταση από Gauge Corner (mm)	Απόσταση αποφλοιώσεων (mm)	Μήκος αποφλοιώσεων (mm)	Πλάτος αποφλοιώσεων (mm)
1	24,76	1,22	4,89	2,44	2,44	2,85
2	21,85	1,02	14,06	3,66	3,45	4,88
3	10,24	2,24	8,15	1,02	3,25	5,28
4	20,87	1,22	8,96	2,44	2,24	3,06
5	21,26	2,03	9,38	0	2,64	4,88
6	23,80	1,02	9,59	2,03	3,05	3,26
7	8,79	1,22	10,19	4,06	3,05	3,87
8	26,36	1,02	10,19	4,67	3,25	3,86
9	25,05	0,81	13,05	0	2,44	3,87
10	25,63	1,22	7,34		2,03	3,06
11	9,01	3,05	8,15			
12	30,28	1,22	8,96			
13	16,40	0,41	9,18			
14	22,22	1,42	4,89			
15	22,76	0,20	10,79			
16	20,83	1,42	4,08			
17	7,49	1,83	8,15			
18	27,69	2,03	8,76			
19	29,22	0,41	6,11			
20	27,51	1,63	6,94			
21	9,28	1,22	8,76			
22	26,71	1,42	8,15			
23	28,87	0,61	6,73			
24	6,84	1,02	9,16			
25	26,39	1,83	8,96			
26	25,60	1,22	8,56			
27	4,57	1,22	9,79			
28	21,62	0,61	8,35			
29	17,65	1,42	9,79			
30	8,59	1,42	8,95			
31	12,45	1,42				
32	26,11	1,83				
33	5,19	1,22				
34	11,87					
35	5,96					
36	20,18					
37	17,65					
38	12,81					
Μέσος Όρος	18,69	1,41	8,64	2,26	2,78	3,89
Τυπική Απόκλιση	7,95	0,82	2,06	1,60	0,46	0,82

α/α ρωγμής	Καμπυλότητα Ρωγμών (mm ⁻¹)			
	Κυρτή	Κοίλη	Σιγμοειδής	
			Κυρτή	Κοίλη
1	8.56	19.62	6.36	27.02
2	16.21	52.40	3.97	26.76
3	3.49	16.50	15.11	8.35
4		9.50	20.96	20.19
5		13.44	4.20	23.75
6		24.14	16.21	25.92
7			11.78	18.19
8			2.69	28.98
9			21.37	17.96
10			10.09	2.85
11			10.17	61.95
12			33.85	49.41
13			5.81	67.80
14			2.18	39.58
15			7.42	3.15
16			62.31	22.43
17			3.91	38.03
18			2.78	3.30
19			8.08	13.90
20			8.06	19.81
21			3.38	26.01
22			3.86	12.36
23			0.86	17.10
24			1.16	5.93
25			2.06	9.87
26			2.34	1.06
27			2.86	8.06
28			1.53	3.38
29				5.45
30				2.12
31				16.83
32				2.65
33				7.44
34				68.45
35				9.55
36				19.40
Μέσος όρος	9.42	22.60	9.84	20.42
Τυπική αποκλιση	5.23	14.09	12.58	17.89

Περιοχή C1

Στο δοκίμιο C1 δεν παρατηρούνται αποφλοιώσεις.

α/α ρωγμής	Μήκος ρωγμής (mm)	Απόσταση ρωγμών (mm)	Απόσταση από Gauge Corner (mm)
1	12,71	3,84	5,95
2	16,55	2,69	3,26
3	10,22	0,96	3,46
4	8,15	1,92	4,03
5	8,92	1,15	4,22
6	9,76	1,54	3,65
7	10,12	1,54	4,99
8	12,49	0,77	3,46
9	6,83	1,54	5,76
10	12,41	1,54	4,80
11	10,91	1,54	5,37
12	7,57	1,92	4,41
13	10,32	0,77	4,99
14	6,12	1,54	5,37
15	6,92	1,34	5,76
16	3,79	0,96	4,03
17	6,89	1,15	4,80
18	9,07	1,15	5,37
19	10,95	1,15	6,14
20	7,66	2,11	5,57
21	12,58	0,77	6,91
22	13,56	0,77	6,91
23	7,93	2,11	5,57
24	14,61	1,34	5,57
25	13,32	1,54	5,37
26	14,91	0,96	5,37
27	10,31	0,96	4,99
28	13,73	1,34	5,95
29	13,16	1,54	4,03
30	8,75	0,77	4,99
31	8,10	2,11	6,72
32	15,19	2,11	5,95
33	15,60	1,34	3,84
34	9,01	1,54	4,80
35	16,08	0,96	5,18
36	16,93	0,96	4,61
37	7,64	1,73	9,41
38	7,01	1,73	4,22
39	13,46	0,96	7,68
40	17,33	1,34	4,41
41	17,37	2,69	3,46

α/α ρωγμής	Μήκος ρωγμής (mm)	Απόσταση ρωγμών (mm)	Απόσταση από Gauge Corner (mm)
42	20,60	0,96	5,37
43	15,55	1,15	4,80
44	11,36	1,15	1,92
45	14,83	0,58	6,91
46	17,71	2,11	5,37
47	12,19		6,91
48	6,35		5,95
49	13,48		8,25
50	14,62		4,80
51			5,57
52			6,33
Μέσος Όρος	11,63	1,45	5,26
Τυπική Απόκλιση	3,74	0,61	1,31

α/α ρωγμής	Καμπυλότητα Ρωγμών (mm ⁻¹)			
	Κυρτή	Κοίλη	Συγμοειδής	
			Κυρτή	Κοίλη
1	8.03	12.04	30.10	18.88
2	10.91		5.07	3.58
3	39.26		12.03	0.51
4			4.05	6.49
5			6.67	63.34
6			47.44	65.03
7			0.68	0.59
8			8.33	16.01
9			1.71	3.18
10			10.84	5.97
11			9.75	24.59
12			1.09	33.43
13			4.72	0.48
14			6.17	0.38
15			2.08	8.07
16			7.97	8.93
17			1.25	10.86
18			0.76	3.10
19			2.50	6.26
20			63.13	8.80
21			5.99	39.85
22			1.25	1.85
23			4.40	1.09
24			9.86	11.69
25			7.67	10.46
26			2.80	3.32
27			0.90	12.12
28			1.12	2.28
29			2.45	9.67
30			2.15	2.37
31			3.01	3.02
32			14.62	6.96
33			1.95	1.31
34			19.75	3.86
35			14.40	9.19
36			0.73	8.58
37			0.79	3.15
38			54.41	1.09
39			15.55	3.82
40			0.69	19.13
41			1.26	4.13
42			28.38	0.68
43			19.13	2.69
44			6.29	21.15

Καμπυλότητα Ρωγμών (mm ⁻¹)				
α/α ρωγμής	Κυρτή	Κοίλη	Σιγμοειδής	
			Κυρτή	Κοίλη
45			7.91	5.20
46			0.68	0.77
47			0.43	19.75
48			1.59	4.51
49				2.56
50				20.04
51				23.19
52				1.34
53				1.03
54				0.83
55				9.07
56				1.09
57				5.89
58				14.26
59				1.85
60				9.64
61				11.05
62				4.17
63				2.45
64				3.04
65				12.65
66				15.07
67				0.76
68				0.51
69				11.57
70				10.78
71				17.91
72				13.70
73				34.03
74				6.66
75				3.40
76				3.57
77				0.66
78				4.45
79				16.14
80				23.91
81				14.55
82				4.51
83				9.35
84				0.68
85				3.25
86				4.33
87				55.39
88				10.92
89				4.69

Καμπυλότητα Ρωγμών (mm⁻¹)				
α/α ρωγμής	Κυρτή	Κοίλη	Σιγμοειδής	
			Κυρτή	Κοίλη
90				12.53
91				8.90
92				0.63
93				2.50
94				0.48
95				7.55
96				1.85
97				1.36
98				3.13
Μέσος όρος	19.40	12.04	9.51	9.55
Τυπική αποκλιση	14.10	0.0	13.69	12.11



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000118299