

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς θραύσης περλιτικού
χάλυβα UIC60 Grade 900A**

Μιχαλάκης Αλέξανδρος Βασίλειος

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

Βόλος 2014



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

Αριθ. Εισ.: 13280/1
Ημερ. Εισ.: 04-11-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2014
ΜΙΧ

© 2014 Μιχαλάκης Αλέξανδρος Βασίλειος

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. Αλέξης Κερμανίδη
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Μποντόζογλου Βασίλης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου αλλά και για τις γνώσεις που απέκτησα από τη διδασκαλία των μαθημάτων του σχετικών με την επιστήμη των υλικών. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, τον καθηγητή κ. Γρηγόριο Χαϊδεμενόπουλο καθώς και τον καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους και φυσικά για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών . Οφείλω ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Πέτρο Χριστοδούλου για την πολύτιμη βοήθεια του στα πειράματα που πραγματοποίησα στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας τόσο σε πρακτικά αλλά και θεωρητικά ζητήματα που προέκυψαν. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος θέλω να ευχαριστώ όλους τους φίλους(ες) μου για τις μοναδικές στιγμές που μοιραστήκαμε αυτά τα 6 χρόνια.

Αλέξανδρος Μιχαλάκης

**Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς θραύσης περλιτικού
χάλυβα UIC60 Grade 900A**

Μιχαλάκης Αλέξανδρος Βασίλειος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης , Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Οι σιδηροτροχιές υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενα δυναμικά φορτία με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπείς στη φυσική φθορά και στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω εσωτερικών σφαλμάτων. Αν μια ρωγμή δεν ελεγχθεί έγκαιρα υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να αναπτυχθεί απότομα και να φτάσει σε ένα κρίσιμο μέγεθος που θα οδηγήσει σε θραύση. Το κρίσιμο μέγεθος μιας ρωγμής κόπωσης όμως συνδέεται άμεσα με την δυσθραυστότητα του υλικού καθώς και με τον ρυθμό εξέλιξής της υπό τα κυκλικά φορτία.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς θραύσης του περλιτικού χάλυβα UIC60 Grade 900A, ο οποίος συχνά χρησιμοποιείται στην βιομηχανία των σιδηροδρόμων. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει μηχανικές δοκιμές δυσθραυστότητας καθώς και μηχανικές δοκιμές με στόχο τον προσδιορισμό του ρυθμού εξέλιξης φυσικής ρωγμής υπό κυκλικά φορτία.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμών για τον χάλυβα UIC60 Grade 900A. Η φιλοσοφία σχεδιασμού με “ανοχή στη βλάβη” σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται σήμερα η συντήρηση των σιδηροτροχιών σε όλη την Ευρώπη είναι πολλά υποσχόμενη και βελτιώνεται συνεχώς τόσο σε θέματα ασφάλειας όσο και οικονομικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν βοηθούν στην εφαρμογή των προγραμματισμένων προληπτικών ελέγχων αξιολόγησης των σιδηροτροχιών και αντικατάστασης τους όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορική Αναδρομή	1
1.2	Τύποι χάλυβα που χρησιμοποιούνται σε σιδηροτροχιές	4
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	5
2.1	Συντελεστής Έντασης Τάσεων K_{IC}	5
2.1.1	Τύποι θραύσης μιας ρωγμής.....	6
2.2	Δυσθραυστότητα (K_{IC})	6
2.2.1	Πάχος.....	7
2.2.2	Θερμοκρασία.....	8
2.3	Εξέλιξη Ρωγμής σε Κόπωση	8
3	Πειραματική διαδικασία	14
3.1	Στόχος	14
3.2	Υλικό Δοκιμών	14
3.3	Δοκίμια	15
3.4	Πειραματική Διάταξη	16
3.4.1	Μηχανή Εφελκυσμού Instron 8801	16
3.4.2	Κατασκευή συσκευής για τα πειράματα (Ιδιοκατασκευή)	16
3.5	Πειράματα δυσθραυστότητας	19
3.5.1	Εξαγωγή δοκιμών από σιδηροτροχιά	19
3.5.2	Δημιουργία Αρχικής ρηγμάτωσης (pre-cracking)	22
3.5.3	Στατική Φόρτιση για προσδιορισμό K_{IC}	24
3.6	Πειράματα εξέλιξης ρωγμής	26
3.6.1	Εξαγωγή δοκιμών από σιδηροτροχιά	26
3.6.2	Υπολογισμός του μήκους ρωγμής.....	29
4	Αποτελέσματα	30
4.1	Δυσθραυστότητα.....	30
4.2	Αποτελέσματα δοκιμών εξέλιξης ρωγμής.....	36

4.3	Υπολογισμός των σταθερών Paris.....	41
5	Συμπεράσματα.....	45
6	Βιβλιογραφία.....	46
7	Παράρτημα	48
7.1	Προσέγγιση πειραματικών σημείων για την εξαγωγή των σταθερών του Paris....	48

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 - Εικόνα - Richard Trevithick Steam Locomotive	1
Σχήμα 1.2 - Εικόνα - Rocket.....	2
Σχήμα 1.3 - Εικόνα - Μετρό Αθήνας.....	2
Σχήμα 1.4 - Εικόνα - 1210 GNER Intercity 225	3
Σχήμα 2.1 Η πλαστική ζώνη μπροστά από μια ρωγμή.....	5
Σχήμα 2.2 Οι τρόποι προώθησης ρήγματος	6
Σχήμα 2.3 Κρίσιμο Κι συναρτήσει του πάχους του δοκιμίου	7
Σχήμα 2.4 Συμπεριφορά δυσθραυστότητας συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας..	8
Σχήμα 2.5 Κυκλική φόρτιση με σταθερό σ_{max}	9
Σχήμα 2.6 - Διάγραμμα - Ανάπτυξη ρωγμής κατα την κόπωση	10
Σχήμα 2.7 Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK	12
Σχήμα 2.8 Επίδραση της μέσης τάσης στον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής κόπωσης	13
Σχήμα 3.1 - Διάγραμμα - Καμπύλη $\sigma - \epsilon$ χάλυβα UIC60 Grade 900A.....	14
Σχήμα 3.2 Σκαρίφημα δοκιμών Κάμψης 3 Σημείων	15
Σχήμα 3.3 - Εικόνα - Διάταξη μηχανής Instron 8801 στο εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας	16
Σχήμα 3.4 - Εικόνα - Ιδιοκατασκευή.....	18
Σχήμα 3.5 - Εικόνα - Στήριξη ιδιοσυσκευής στις αρπάγες	19
Σχήμα 3.6 Εξαγωγή δοκιμίου δυσθραυστότητας	20
Σχήμα 3.7 - Εικόνα - Δοκίμιο δυσθραυστότητας	21
Σχήμα 3.8 - Εικόνα - Εγκοπή σε δοκίμιο δυσθραυστότητας.....	21
Σχήμα 3.9 - Εικόνα - Ρέπλικες. Οι δύο πλευρές ενός δοκιμίου KIc μετά από 190.000 κύκλους κόπωσης όπως φαίνονται στο μικροσκόπιο.....	23
Σχήμα 3.10 - Εικόνα - Μέτρηση της Αρχικής Ρωγμής σε δοκίμιο δυσθραυστότητας μετά την θραύση	23
Σχήμα 3.11 Τρεις πιθανοί τύποι διαγράμματος Δύναμης-COD για τον υπολογισμό του P_Q	24
Σχήμα 3.12 - Εικόνα - Εκτέλεση Πειράματος Δυσθραυστότητας.....	25
Σχήμα 3.13 Εξαγωγή δοκιμίου εξέλιξης ρωγμής.....	26
Σχήμα 3.14 - Εικόνα - Δοκίμιο εξέλιξης ρωγμής	27
Σχήμα 3.15 - Εικόνα - Εγκοπή σε δοκίμιο εξέλιξης ρωγμής	28

Σχήμα 4.1 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_1)	32
Σχήμα 4.2 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_2)	33
Σχήμα 4.3 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_3)	34
Σχήμα 4.4 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_4)	35
Σχήμα 4.5 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής α συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμο_1)	37
Σχήμα 4.6 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔΚ (Pmax=13 kN, R=0,1).....	37
Σχήμα 4.7 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής α συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμο_2)	38
Σχήμα 4.8 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔΚ (Pmax=13kN, R=0,1).....	38
Σχήμα 4.9 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής α συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμο_3)	39
Σχήμα 4.10 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔΚ (Pmax=14,5kN, R=0,5).....	39
Σχήμα 4.11 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής α συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμο_4)	40
Σχήμα 4.12 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔΚ (Pmax=14,5kN, R=0,5).....	40
Σχήμα 4.13 - Διάγραμμα - Ρυθμός διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔΚ για R=0,1 και R=0,5.....	42
Σχήμα 4.14 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής συναρτήσει των κύκλων κόπωσης.....	43

Κατάλογος Πινάκων

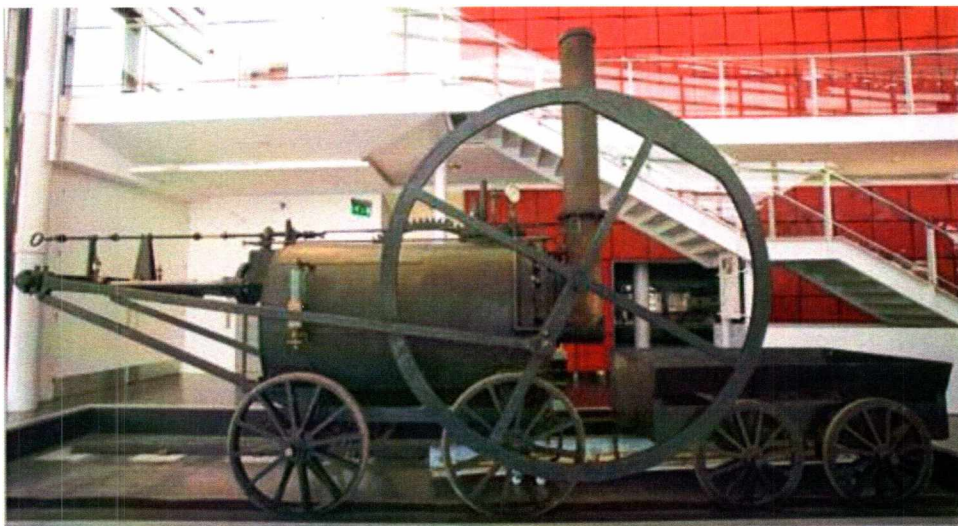
Πίνακας 3.1 Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα UIC60 Grade 900A	15
Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση (%κ.β.) του χάλυβα UIC60 Grade 900A	15
Πίνακας 3.3 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα Uddeholm Nimax.....	17
Πίνακας 3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου δυσθραυστότητας	20
Πίνακας 3.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου εξέλιξης ρωγμής.....	27
Πίνακας 4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών δυσθραυστότητας.....	30
Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών δυσθραυστότητας	31
Πίνακας 4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών εξέλιξης ρωγμής.....	36
Πίνακας 4.4 Υπολογισμός σταθερών Paris.....	41
Πίνακας 4.5 Υπολογισμός σταθερών Paris	41
Πίνακας 4.6 Συγκεντρωτικά Δεδομένα της Κόπωσης όλων των δοκιμών.....	44

Σύμβολο	Ορολογία
K_{IC}	Δυσθραυστότητα
σ	Τάση
σ_m	Μέση τάση
K	Συντελεστής έντασης τάσεων
E	Μέτρο Ελαστικότητας
σ_{UTS}	Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό
σ_y	Όριο διαρροής
R	Λόγος τάσεων ή φορτίων
ΔK	Εύρος συντελεστή έντασης τάσεων
da/dN	Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής
B	Πάχος δοκιμίου
W	Πλάτος δοκιμίου
S	Διάστημα φόρτισης δοκιμίου
P_{max}	Μέγιστο φορτίο
a	Μήκος εγκοπής
a_p	Μήκος αρχικής-ρωγμής (pre-crack)
a_0	Μήκος ρωγμής κάθε χρονική στιγμή μαζί με την εγκοπή
b_0	$W - a_0$

1 Εισαγωγή

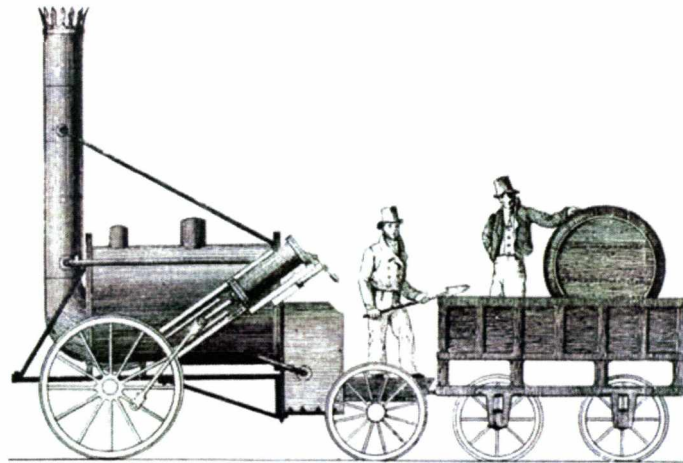
1.1 Ιστορική Αναδρομή

Το χαρακτηριστικό της ελεύθερης κύλισης είναι αυτό που καθιστά την λειτουργία του σιδηρόδρομου τόσο αποδοτικό. Οι χαλύβδινοι τροχοί κυλιόμενοι επί χαλύβδινων σιδηροτροχιών, έχουν πολύ μικρή τριβή κύλισης. Ενδεικτικά τα οδικά μέσα μεταφοράς φορτίων απαιτούν ισχύ περίπου δέκα ίππων ανά μικτό ελκόμενο τόνο ενώ ο σιδηρόδρομος μόλις έναν ίππο ανά μικτό ελκόμενο τόνο. Ο πρώτος σιδηρόδρομος που κατασκευάστηκε ήταν στα μέσα του 16^{ου} αιώνα στα Ευρωπαϊκά ορυχεία. Ο Σύγχρονος σιδηρόδρομος μπορεί να θεωρηθεί ότι προέκυψε με την εμφάνιση της ατμοκινούμενης κινητήριας μονάδας (steam locomotive) το 1804 στην Ουαλία από τον Richard Trevithick Σχ. 1.1 [1].



Σχήμα 1.1 - Εικόνα - Richard Trevithick Steam Locomotive

Ακολούθησε ο σιδηρόδρομος του Λίβερπουλ και Μάντσεστερ (Liverpool and Manchester Railway) το 1830, ο οποίος, με την εισαγωγή της ατμομηχανής "Rocket" που κατασκευάστηκε από τον Stephenson και τον γιο του Robert, μπορεί να θεωρηθεί αφετηρία της εποχής των σιδηροδρόμων Σχ 1.2.



Σχήμα 1.2 - Εικόνα - Rocket

Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα οι ατμοκίνητες μονάδες είχαν αντικατασταθεί από τις diesel-ηλεκτρικές κινητήριες μονάδες (diesel-electric locomotives) στα περισσότερα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Για να έρθουμε στην νέα εποχή των σιδηροδρόμων όπου οι αυξημένες απαιτήσεις σε ταχύτητα και βάρος του φορτίου αλλά και η αυξημένη κίνηση επιβαρύνει όλο και περισσότερο τις σιδηροτροχιές και τους τροχούς των βαγονιών. Στο Σχ. 1.3 φαίνεται το μετρό της Αθήνας.



Σχήμα 1.3 - Εικόνα - Μετρό Αθήνας

Οι σιδηροτροχιές κατά την κίνηση του συρμού υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενα δυναμικά φορτία και συγκεκριμένα σε κόπωση επαφής με κύλιση (Rolling contact fatigue). Το φαινόμενο του RCF είναι γνωστό ότι οδηγεί σε φθορά και στην ανάπτυξη ρωγμών κατά

την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος συρμού-σιδηροτροχιάς. Παράλληλα το περιβάλλον λειτουργίας προκαλεί συχνά διάβρωση με αποτέλεσμα το φαινόμενο RCF να μεγεθύνεται.

Για την αποφυγή φαινομένων εκτεταμένης βλάβης και ατυχημάτων γίνεται συντήρηση των σιδηροδρομικών γραμμών. Για την αντιμετώπιση μικρών ρηγματώσεων πραγματοποιείται λείανση της σιδηροτροχιάς ενώ για τα βαθύτερα ρήγματα απαιτούνται πολλαπλά περάσματα λείανσης. Φυσικά σε περίπτωση σοβαρής ρηγματώσης απαιτείται αντικατάσταση της σιδηροτροχιάς.

Για τον εντοπισμό των ρωγμών σε αρχικά επίπεδα υπάρχει τακτικός έλεγχος π.χ. με υπέρηχους και οπτική επιθεώρηση [2]. Επίσης γίνεται έλεγχος και διαμορφώνεται η τριβή της σιδηροτροχιάς-τροχού με διάφορες τεχνικές για την πρόληψη της δημιουργίας ρωγμών. Ο τακτικός έλεγχος όμως είναι πολύ δαπανηρός και απαιτεί την διακοπή κίνησης στο σιδηροδρομικό δίκτυο σε τακτά χρονικά διαστήματα. Αν μια ρωγμή δεν ελεγχθεί έγκαιρα υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να μεγαλώσει απότομα και να οδηγηθεί σε αστοχία του δομικού μέρους. Το κρίσιμο μέγεθος ρωγμής συνδέεται άμεσα με την δυσθραυστότητα και την συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής του υλικού που αποτελούν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας με σοβαρές συνέπειες στην ασφάλεια του συρμού. Για τον λόγο αυτό η μελέτη των χαρακτηριστικών θραύσης του υλικού είναι πολύ σημαντική.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα RCF είναι το ατύχημα που συνέβη στο τρένο 1210 GNER Intercity 225 που κατευθυνόταν από το Λονδίνο στο Λιντς στις 17 Οκτωβρίου του 2000, το οποίο εκτροχιάστηκε από αστοχία της σιδηροτροχιάς ταξιδεύοντας με ταχύτητα 185 χμ/ώρα σκοτώνοντας τέσσερις ανθρώπους και τραυματίζοντας πολλούς ακόμα Σχ. 1.4 [3]. Μετά από αυτό το ατύχημα η Ευρωπαϊκή Ένωση πήρε μέτρα για εντατικούς ελέγχους και επιθεωρήσεις ασφαλείας σε όλα τα δίκτυα. Εκτιμάτε ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση το ετήσιο κόστος των προγραμματισμένων ελέγχων ασφαλείας αγγίζει τα 70 εκατομμύρια Ευρώ [4].



Σχήμα 1.4 - Εικόνα - 1210 GNER Intercity 225

1.2 Τύποι χάλυβα που χρησιμοποιούνται σε σιδηροτροχιές

Στις σιδηροτροχιές χρησιμοποιούνται κυρίως τύποι χαλύβων με μπαινιτική και περλιτική μικροδομή. Έρευνες που έχουν γίνει στην μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων έδειξαν ότι οι μπαινιτικοί χάλυβες υπερτερούν όσον αφορά την συμπεριφορά σε κόπωση και θραύση.

Οι μηχανικές ιδιότητες όπως η δυσθραυστότητα και ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής σε κόπωση των μπαινιτικών, μαγγανιούχων και περλιτικών σιδηροδρομικών χαλύβων μελετήθηκαν το 2011 από το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ και τα αποτελέσματα των δοκιμών τους έδειξαν ότι ο μπαινιτικός χάλυβας υπερτερεί των άλλων δυο για χρήση στις σιδηροδρομικές ράγες [5]. Η μελέτη των ιδιοτήτων των τριών τύπων χάλυβα αποκάλυψαν ότι ο μπαινιτικός χάλυβας έχει τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τον ωστενιτικό μαγγανιούχο χάλυβα (AMS) και τον περλιτικό χάλυβα.

Σχετικά με την συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής ο μπαινιτικός χάλυβα έχει χαμηλότερο ρυθμό ανάπτυξης από εκείνο του περλιτικού και του ωστενιτικού μαγγανιούχου (AMS) [5].

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

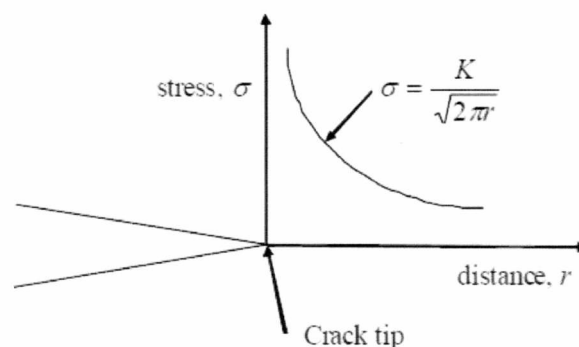
2.1 Συντελεστής Έντασης Τάσεων K

Έχοντας υπό όψιν τις πρακτικές δυσκολίες της μεθόδου του Ενεργειακού Ισοζυγίου (Griffith-Irwin), το 1950 ο Irwin ανέπτυξε τη μέθοδο της Έντασης Τάσεων.

Κατ' αρχήν έδειξε ότι οι τάσεις σ στη περιοχή της ρωγμής έχουν τη μορφή:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad \text{Εξ. 2.1}$$

όπου, r είναι η απόσταση από την αιχμή της ρωγμής, και, K είναι μια σταθερά που μας δίνει το μέγεθος του πεδίου ελαστικής τάσης και καλείται Συντελεστής Έντασης Τάσεων [6]. Στο Σχ. 2.1 φαίνεται η συσχέτιση της τάσης και της απόστασης από την ρωγμή.



Σχήμα 2.1 Η πλαστική ζώνη μπροστά από μια ρωγμή.

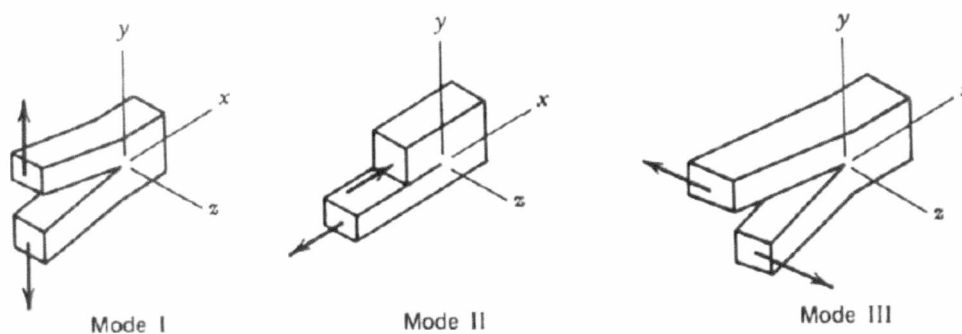
Ο Συντελεστής Έντασης Τάσεων K δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \text{Εξ. 2.2}$$

όπου $f(a/w)$ είναι μια αδιάστατη παράμετρος η οποία εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του δοκιμίου, το πλάτος του (W), και, το μήκος της ρωγμής (a).

2.1.1 Τύποι θραύσης μιας ρωγμής

Οι τύποι θραύσης μιας ρωγμής είναι τρεις και παρουσιάζονται στο Σχ. 2.2. Ο τύπος I είναι εφελκυστικός, ο τύπος II συνεπίπεδος διατμητικός και ο τύπος III αντιεπίπεδος διατμητικός. Ο Τύπος I (εφελκυστική φόρτιση) συναντάται στη πλειοψηφία των περιπτώσεων και γι' αυτό έχει λάβει πολύ μεγαλύτερη προσοχή σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Ο τύπος II (ολίσθηση) είναι ο λιγότερο συχνός και λιγότερο σημαντικός. Εμφανίζεται συνήθως μαζί με τον I ή III οι οποίοι είναι και οι κυρίαρχοι τρόποι φόρτισης. Ο τύπος III (ψαλιδισμός) εμφανίζεται κατά την στρέψη μιας ράβδου που φέρει ρωγμή.



Σχήμα 2.2 Οι τρόποι προώθησης ρήγματος

Ο τύπος θραύσης I είναι αυτός που θα μελετηθεί στα πειράματα δυσθραυστότητας που ακολουθούν [7].

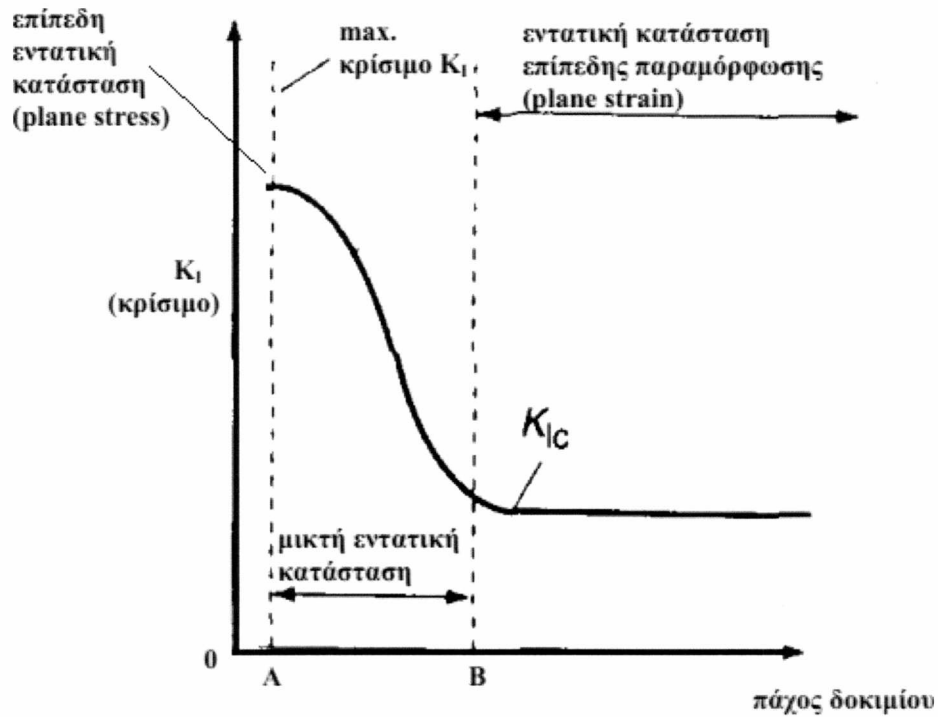
2.2 Δυσθραυστότητα (K_{IC})

Η σταθερή κρίσιμη τιμή του K που θα συμβεί η θραύση για πάχος μεγαλύτερο του B στο Σχ. 2.3 είναι ιδιότητα του υλικού, και ονομάζεται δυσθραυστότητα (fracture toughness) και συμβολίζεται με το K_{IC} . Αυτή είναι η ιδιότητα που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό κατασκευών για αντοχή σε θραύση.

Η δυσθραυστότητα ενός υλικού εξαρτάται από την μικροδομή, την θερμοκρασία, τον ρυθμό παραμόρφωσης και το περιβάλλον.

Για να ελεγχθεί η ασφάλεια ενός μηχανικού εξαρτήματος υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή εντάσεως τάσεων K και συγκρίνεται με την δυσθραυστότητα K_{IC} .

Η υψηλή δυσθραυστότητα των μετάλλων οφείλεται στην ικανότητα τους να παραμορφώνονται πλαστικά που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση την ένταση της τάσης στην άκρη της ρωγμής.



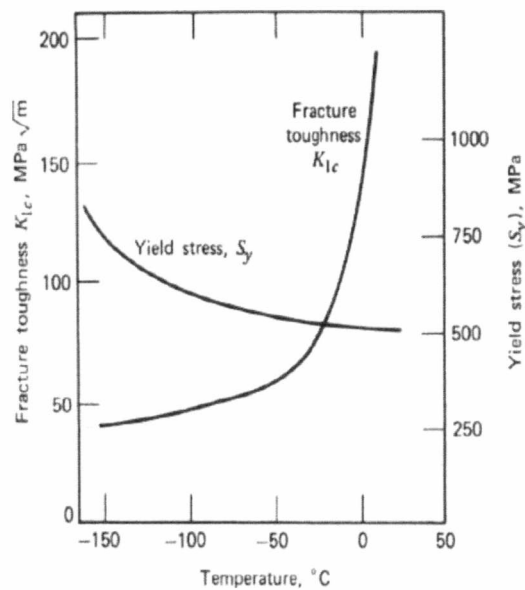
Σχήμα 2.3 Κρίσιμο K_I συναρτήσει του πάχους του δοκιμίου

2.2.1 Πάχος

Το πάχος ενός στοιχείου καθορίζει την εντατική κατάσταση στην κορυφή του ρήγματος, δηλαδή αν θα είναι επίπεδη εντατική κατάσταση (plane stress) η επίπεδη παραμόρφωση (plane strain). Η επίπεδη εντατική κατάσταση αναφέρεται στην περίπτωση που το δοκίμιο έχει πολύ λεπτό πάχος διατομής και η επίπεδη παραμόρφωση στην περίπτωση που το δοκίμιο έχει μεγάλο πάχος διατομής οπότε μπροστά στην αιχμή του ρήγματος επικρατεί γενική εντατική κατάσταση. Για τιμές του πάχους πάνω από μία θεωρητική τιμή του πάχους $B=2,5(K_{IC}/\sigma_y)^2$ το πάχος δεν επηρεάζει αισθητά την τιμή του K_{IC} όπως φαίνεται στο Σχ.2.3 Στην αποτίμηση της σιδηροτροχιάς η επίπεδη παραμόρφωση είναι η περίπτωση που την αντιπροσωπεύει.

2.2.2 Θερμοκρασία

Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται το K_{Ic} συνήθως μειώνεται, ενώ το όριο διαρροής αυξάνει. Έτσι με την μείωση της θερμοκρασίας η αντίσταση στην αύξηση της ρωγμής μπορεί να μειωθεί δραστικά όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4.



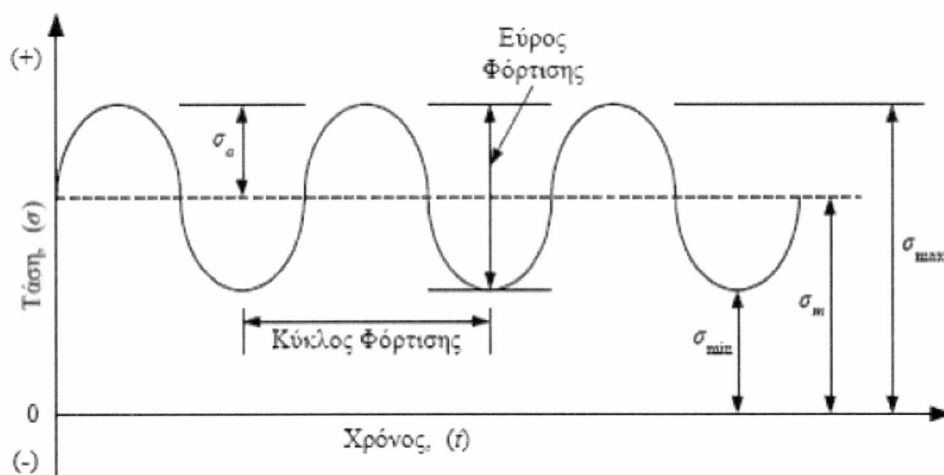
Σχήμα 2.4 Συμπεριφορά δυσθραυστότητας συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ένα υλικό με μεγάλη δυσθραυστότητα επιδεικνύει ανοχή σε μεγαλύτερες ρωγμές. Αυτή είναι και η βάση της φιλοσοφίας σχεδιασμού με "ανοχή σε βλάβη" σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείτε σήμερα ο σχεδιασμός και η συντήρηση των σιδηροτροχιών. Οι ρωγμές παρακολουθούνται και η διάδοσή τους ελέγχεται με μη καταστρεπτικούς ελέγχους (NDT) [9].

2.3 Εξέλιξη Ρωγμής σε Κόπωση

Οι σιδηροτροχιές των τρένων είναι μια χαρακτηριστική περίπτωση κατασκευής που υποβάλλεται σε κόπωση καθώς οι συρμοί των τρένων περνάνε καθημερινά εκατοντάδες φορές. Σε συνδυασμό με την ύπαρξη ρηγματώσεων από το φαινόμενο RCF το φαινόμενο μετατρέπεται σε φαινόμενο θραύσης, όπου ρήγματα μπορούν να εξελιχθούν κάτω από κυκλικά φορτία. Για τον λόγο αυτό ενδιαφέρον έχει η μελέτη της συμπεριφοράς εξέλιξης ρωγμής σε ένα τέτοιο υλικό και ο προσδιορισμός του ρυθμού με τον οποίο ένα ρήγμα

μεγαλώνει στον περλιτικό χάλυβα UIC60 Grade 900A. Για την ανάλυση της εξέλιξης ρωγμής στο εν λόγω υλικό είναι χρήσιμο να δώσουμε κάποιες βασικές έννοιες της κόπωσης σε σταθερό εύρος τάσης. Η μορφή μιας ημιτονοειδούς μεταβαλλόμενης φόρτισης σταθερού εύρους τάσης με τον χρόνο δίνεται στο Σχ2.5 [10].



Σχήμα 2.5 Κυκλική φόρτιση με σταθερό σ_{max}

Όπου:

σ_{max} : μέγιστη τάση

σ_{min} : ελάχιστη τάση

σ_m : μέση τάση

σ_a : πλάτος τάσης

Επίσης χρησιμοποιείται ο λόγος των τάσεων R που ορίζεται: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}}$ (Εξ. 2.3)

Το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK ορίζεται:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

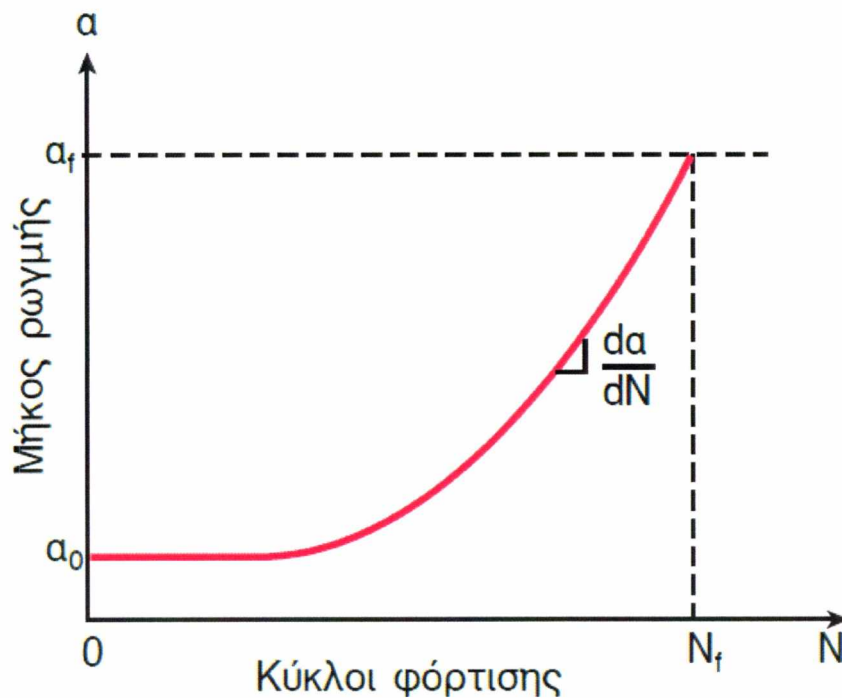
$$K_{max} = Q\sigma_{max}\sqrt{\pi a} \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

$$K_{min} = Q\sigma_{min}\sqrt{\pi a} \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

$$\Delta K = Q\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

Όπου K_{max} και K_{min} ο μέγιστος και ελάχιστος συντελεστής εντάσεως των τάσεων κατά την διάρκεια του κύκλου και σ_{max} σ_{min} η μέγιστη και ελάχιστη τάση του κύκλου αντίστοιχα και το Q γεωμετρικός διορθωτικός συντελεστής.

Η καμπύλη ανάπτυξης ρωγμής κατά την κόπωση για ένα όλκιμο μέταλλο φαίνεται στο Σχ. 2.6. Όπου a_0 είναι το αρχικό μήκος ρωγμής και a_f το τελικό μήκος ρωγμής συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Η κλίση της καμπύλης ανάπτυξης ρωγμής σε κάθε σημείο είναι ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής da/dN .



Σχήμα 2.6 - Διάγραμμα - Ανάπτυξη ρωγμής κατά την κόπωση

Η πρόβλεψη της εξέλιξης ενός ρήγματος σε κόπωση έγινε πολύ ευκολότερη τη δεκαετία του 1960, όταν ο Paris σύνδεσε εμπειρικά το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων ΔK με τον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής, με την εξ. 2.8.

$$\log(da / dN) = m \log(\Delta K) + \log(C) \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

Ισοδύναμα:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

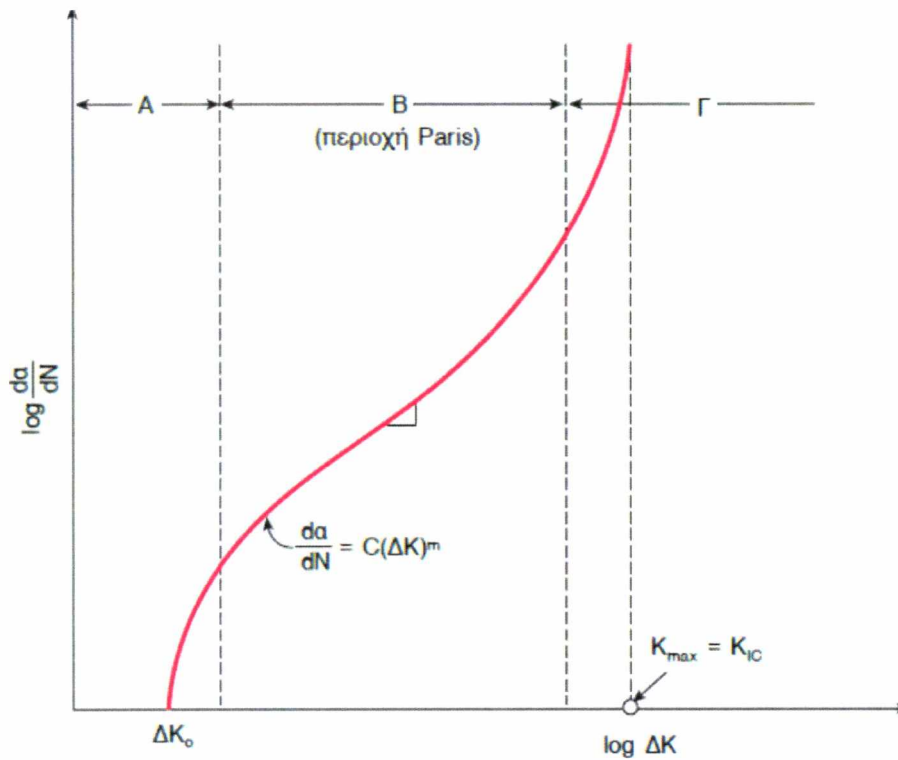
Συμπεράνε για μια σειρά υλικών ότι ο ρυθμός ανάπτυξης μιας ρωγμής da/dN εξαρτάται γραμμικά από το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων ΔK σε λογαριθμική κλίμακα [11].

Το διάγραμμα του Σχ. 2.7 δείχνει μία τυπική καμπύλη $da/dN - \Delta K$ για ένα όλκιμο μεταλλικό υλικό. Και οι δύο άξονες του διαγράμματος εκφράζονται σε λογαριθμική (log) κλίμακα. Η καμπύλη διακρίνεται σε τρεις διακριτές περιοχές.

Στην περιοχή Α τα ρήγματα έχουν πολύ μικρό ρυθμό εξέλιξης, δηλαδή δεν υπάρχει παρατηρήσιμη αύξηση του μεγέθους τους με αύξηση του ΔK . Η περιοχή Α εκτείνεται μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή ΔK_{th} , η οποία ονομάζεται τάση “κατωφλίου” (threshold). Από πειράματα που έχουν γίνει έχει αποδειχθεί ότι η τιμή του ΔK_{th} δεν είναι σταθερά του υλικού αλλά επηρεάζεται από τον λόγο τάσεων R . Σύμφωνα με την ASTM Standard E 647 για ρυθμό ανάπτυξης ρωγμής της τάξεως των 10^{-10} m/κύκλο θεωρείτε πως η ρωγμή παραμένει αμετάβλητη [12].

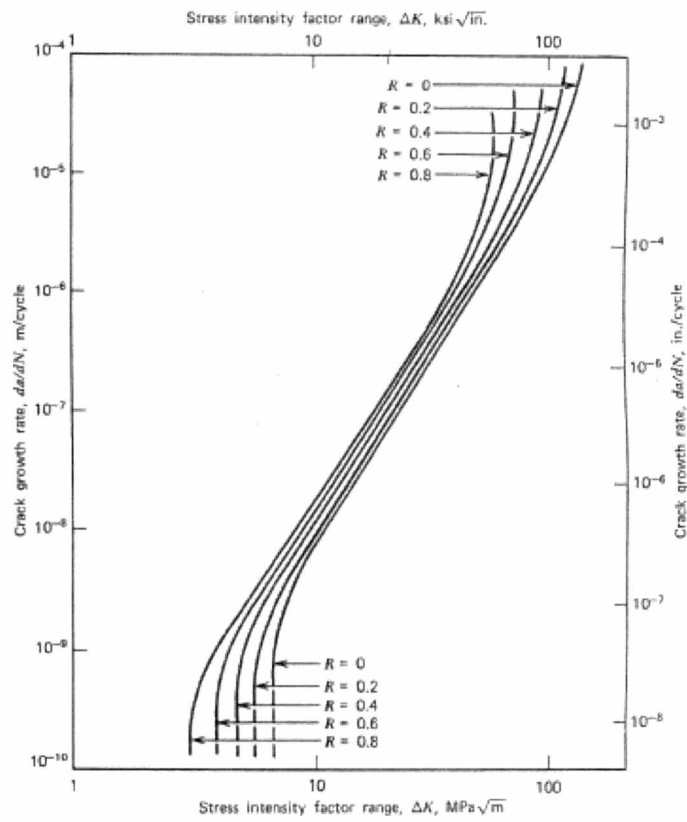
Η περιοχή Β εμφανίζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από πρακτικής απόψεως, καθώς εδώ εμφανίζεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ του $\log(da/dN)$ και του $\log(\Delta K)$ που προαναφέρθηκε. Στην περιοχή Β η διάδοση ρωγμής με κόπωση δεν επηρεάζεται από την μικροδομή και την μέση τάση όπως στις περιοχές Α και Γ [13]. Το m είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος στην περιοχή Β και το C είναι η αποτέμνουσα του ευθύγραμμου τμήματος στον άξονα da/dN . Τα C και m είναι σταθερές του υλικού και εξαρτώνται από την μικροδομή, την θερμοκρασία, το περιβάλλον λειτουργίας και τον λόγο τάσεων R [9].

Στην περιοχή Β η ανάπτυξη της ρωγμής πραγματοποιείται κάθετα προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης κυκλικής τάσεως που αντιστοιχεί στον τύπο φόρτισης I [14]. Τέλος, στην περιοχή Γ τα ρήγματα γίνονται ασταθή και ο ρυθμός προώθησής τους αυξάνεται ραγδαία. Εδώ πλέον η τιμή του K_{max} αρχίζει να προσεγγίζει τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσεων του υλικού K_{IC} . Η τελική θραύση του υλικού θα συμβεί όταν $K_{max} = K_{IC}$. Στην περιοχή Γ η μικροδομή έχει πάλι σημαντική επίδραση καθώς το K_{max} πλησιάζει την δυσθραυστότητα του υλικού. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να θυμίσουμε ότι το K_{IC} εξαρτάται ιδιαίτερα από τη γεωμετρία του αντικειμένου που περιέχει τα ρήγματα και όχι μόνο από το υλικό του.



Σχήμα 2.7 Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK

Η αύξηση της μέσης τάσης σ_m του κύκλου κόπωσης, που ισοδυναμεί με αύξηση του λόγου $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = K_{min}/K_{max}$, οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού εξέλιξης της ρωγμής και στις 3 περιοχές της καμπύλης (δηλαδή η καμπύλη μετατοπίζεται συνολικά προς τα πάνω). Αυτό συμβαίνει διότι, αύξηση της σ_m σημαίνει μεγαλύτερο εφελκυστικό τασικό πεδίο στην αιχμή της ρωγμής (στην περίπτωση που υπάρχει σταθερό ΔP), γεγονός που ευνοεί τον ταχύτερο ρυθμό διάδοσής της, όπως φαίνεται στο **Σχ. 2.8** [15]. Ωστόσο, στην περιοχή B η αύξηση είναι μικρότερη.



Σχήμα 2.8 Επίδραση της μέσης τάσης στον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής κόπωσης

3 Πειραματική διαδικασία

3.1 Στόχος

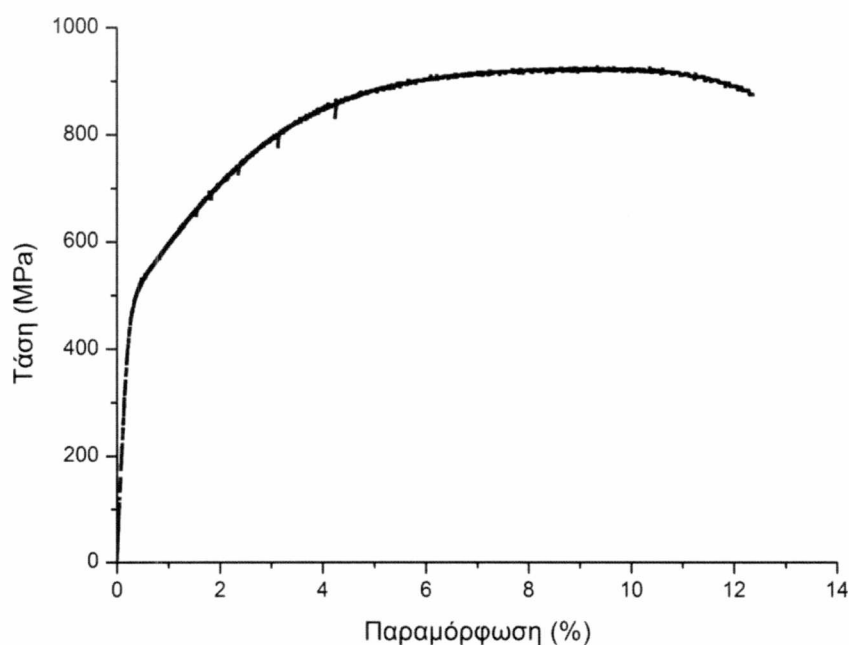
Η πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε έχει σαν στόχο την μελέτη των χαρακτηριστικών θραύσης σε στατική και κυκλική καταπόνηση του χάλυβα “Grade 900A UIC60 “που χρησιμοποιείται στις σιδηροτροχιές

Συγκεκριμένα έγινε:

- Προσδιορισμός της Δυσθραυστότητας του χάλυβα “Grade 900A UIC60 “ σε δοκίμια κάμψης 3 σημείων σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 1820 – 01
- Προσδιορισμός του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής για τον χάλυβα “Grade 900A UIC60 “ σε δοκίμια κάμψης 3 σημείων σύμφωνα με την προδιαγραφή BS ISO 12108:2002

3.2 Υλικό Δοκιμών

Στο **Διάγραμμα** του **Σχ 3.1** που ακολουθεί παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού που εξετάστηκε και οι μηχανικές ιδιότητες μετά την αποτίμηση στον **Πίνακα 3.1**.



Σχήμα 3.1 - Διάγραμμα - Καμπύλη σ - ϵ χάλυβα UIC60 Grade 900A

Πίνακας 3.1 Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα UIC60 Grade 900A

$\sigma_{y0.2} =$	533	Mpa
$\sigma_{UTS} =$	924	MPa
$\epsilon_{f(50)} =$	12	%
$E =$	195.2	GPa

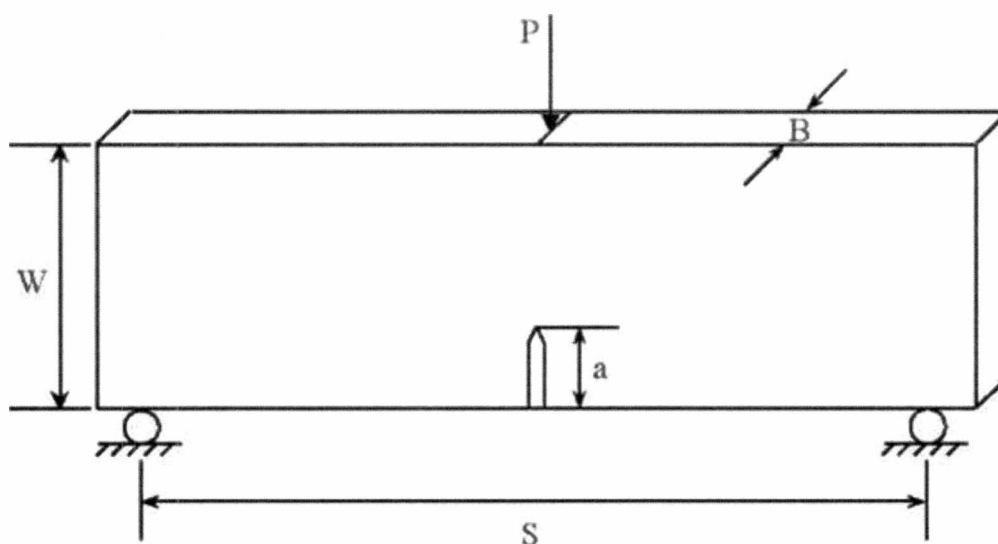
Η χημική σύσταση του χάλυβα δίνεται στον **Πίνακα 3.2** και είναι σε συμφωνία με τα όρια της προδιαγραφής για τον χάλυβα Grade 900A της προδιαγραφής UIC860.

Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση (%κ.β.) του χάλυβα UIC60 Grade 900A

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Υλικό	0,68	0,26	1,11	0,02	0,01	0,03	0,02
Όρια Προδιαγραφής	0,60-0,80	0,1-0,5	0,8-1,3	0,04 max	0,04 max	-	-

3.3 Δοκίμια

Η κατασκευή των δοκιμών δυσθραυστότητας και εξέλιξης ρωγμής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία **prEN 13674-1:2002 (E)**. Συνολικά κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια κάμψης 3 σημείων, 4 για κάθε πειραματική διαδικασία, σκαρίφημα των οποίων δίνεται στο **Σχ. 3.2**.



Σχήμα 3.2 Σκαρίφημα δοκιμών Κάμψης 3 Σημείων

3.4 Πειραματική Διάταξη

3.4.1 Μηχανή Εφελκυσμού Instron 8801

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 του εργαστηρίου. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από 3 τμήματα, την υδραυλική αντλία λαδιού, το πλαίσιο φόρτισης, στο οποίο το κάτω έμβολο είναι το κινούμενο ενώ το πάνω παραμένει σταθερό και τον Η/Υ. Πρόκειται για ένα σύστημα ελέγχου μηχανικών δοκιμών κλειστού βρόχου, όπου οι εντολές για κίνηση του εμβόλου από τον χρήστη μεταφέρονται σαν ηλεκτρικό σήμα από την κονσόλα στην αντλία λαδιού, η οποία με την σειρά της κινεί το έμβολο στο πλαίσιο φόρτισης. Η διάταξη της μηχανής Instron 8801 στο εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας φαίνεται στο **Σχ. 3.3**.



Σχήμα 3.3 - Εικόνα - Διάταξη μηχανής Instron 8801 στο εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

3.4.2 Κατασκευή συσκευής για τα πειράματα (Ιδιοκατασκευή)

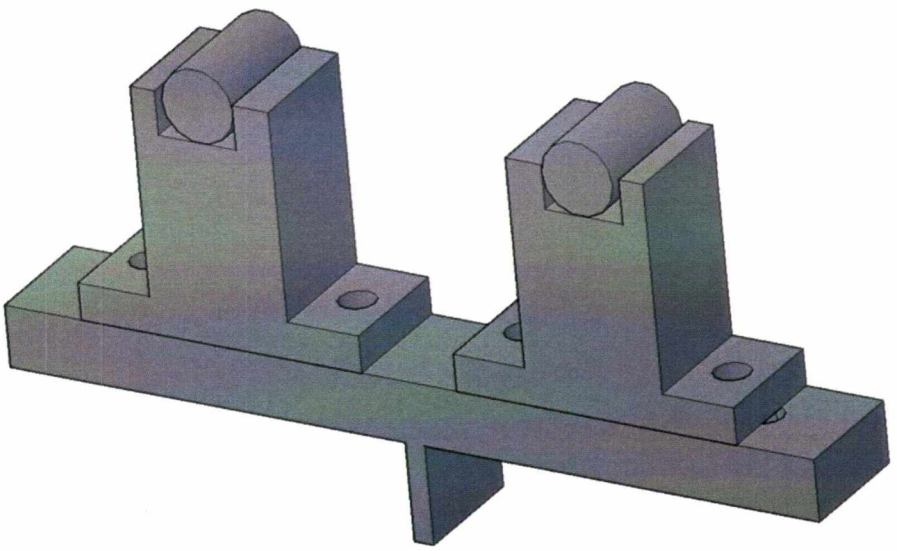
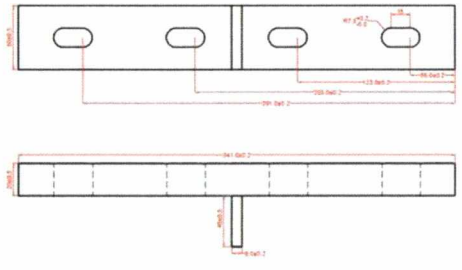
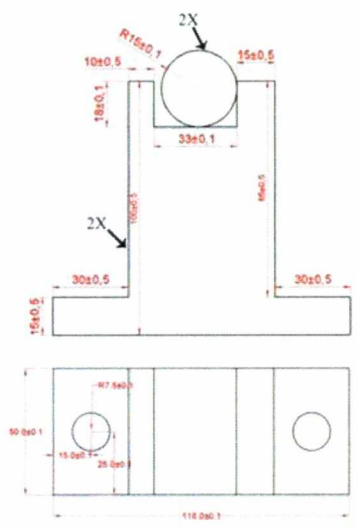
Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων σε δοκίμια κάμψης 3 σημείων ήταν αναγκαία η σχεδίαση και κατασκευή ιδιοκατασκευής, για την στήριξη των δοκιμίων με μεγάλη ακρίβεια. Η ιδιοκατασκευή έγινε από υλικό μεγάλης σκληρότητας ώστε να αποφευχθούν τυχόν πλαστικές παραμορφώσεις κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου. Έτσι επιλέχθηκε ο κάλυβας *Uddeholm Nimax*, ο οποίος διαθέτει σκληρότητα 370 HB και πληροί την απαίτηση

για σκληρότητα (>40 HRC)για το υλικό της σιδηροτροχιάς, το οποίο και εξετάζεται. Οι μηχανικές ιδιότητες του παραθέτονται στον **Πίνακα 3.3**

Πίνακας 3.3 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα Uddeholm Nimax

Yield Strength $R_{p0.2}$	(MPa)	785
Tensile Strength R_m	(MPa)	1265
Elongation	(%)	11
Area Contraction	(%)	47
Compressive strength $R_{c0.2}$	(MPa)	1000

Η βάση φαίνεται στο **Σχ. 3.4** και έχει την δυνατότητα μετακίνησης των κυλίνδρων στήριξης για εκτέλεση διαφορετικών πειραμάτων.



Σχήμα 3.4 - Εικόνα - Ιδιοκατασκευή

Στο Σχ. 3.5 φαίνεται η στήριξη της ιδιοκατασκευής στην κάτω αρπάγη της μηχανής εφελκυσμού.



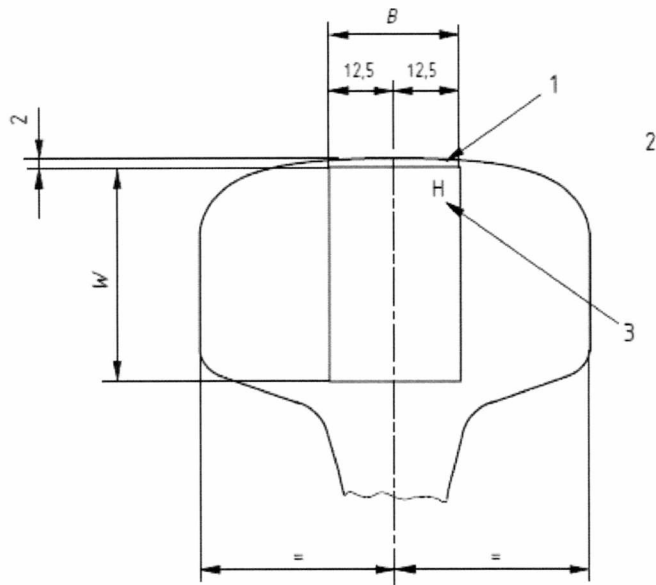
Σχήμα 3.5 - Εικόνα - Στήριξη ιδιοσυσκευής στις αρπάγες

3.5 Πειράματα δυσθραυστότητας

3.5.1 Εξαγωγή δοκιμίων από σιδηροτροχιά

Τα δοκίμια δυσθραυστότητας κατασκευάστηκαν από σιδηροτροχιά που προμηθεύτηκε το εργαστήριο από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ βάση της Ευρωπαϊκής οδηγίας prEN 13674-1:2002 (Ε). Τα δοκίμια εξήχθησαν από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς από την θέση που φαίνεται στο Σχ. 3.6 με την γεωμετρία που φαίνεται στο Σχ. 3.7. Στον Πίνακα 3.4 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου Δυσθραυστότητας το σκαρίφημα του οποίου φαίνεται στο Σχ. 3.2.

Dimensions in millimetres



Key

- 1 Notch machined in this face
- 2 Section through rail head
- 3 Letter 'H' to be stamped on end face of test piece as shown

B = 25

W = see B.2.2

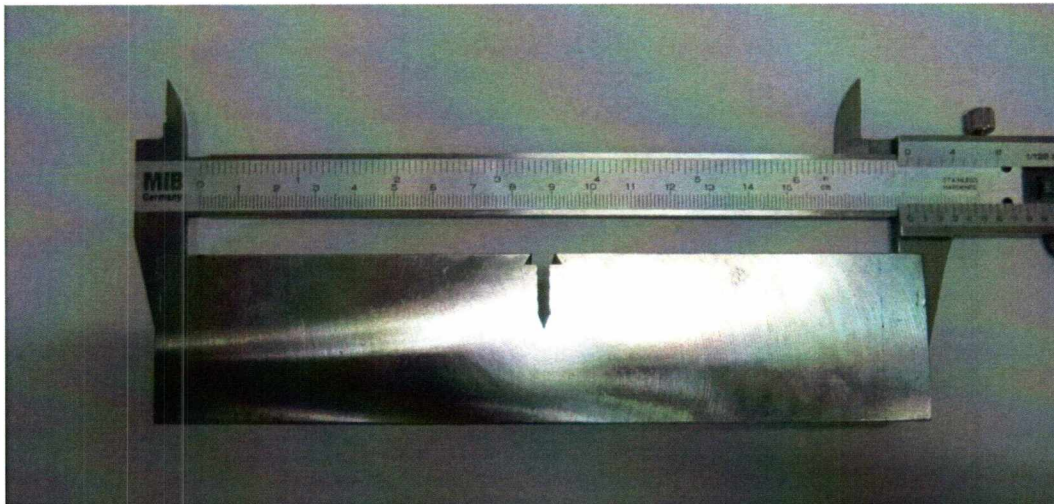
For all other test piece proportions

see ASTM E399

Σχήμα 3.6 Εξαγωγή δοκιμίου δυσθραυστότητας

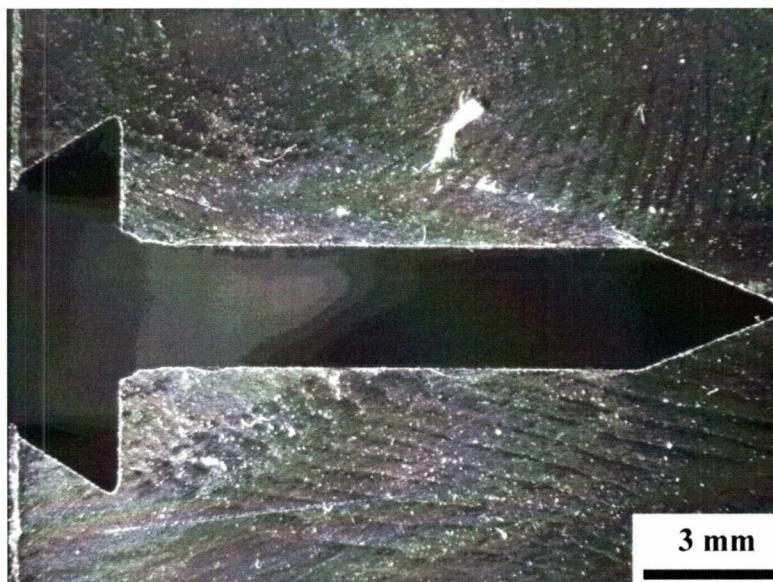
Πίνακας 3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου δυσθραυστότητας

Μήκος :	(mm)	180
Πάχος B:	(mm)	25
Πλάτος W:	(mm)	40
Μήκος Εγκοπής a:	(mm)	17
Πλάτος Εγκοπής:	(mm)	2,7



Σχήμα 3.7 - Εικόνα - Δοκίμιο δυσθραυστότητας

Για την μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων μετά την μηχανουργική κοπή, το κάθε δοκίμιο ελέγχθηκε και μετρήθηκε με παχύμετρο ακριβείας 0,05 mm και η εγκοπή ελέγχθηκε και μετρήθηκε με την βοήθεια στερεοσκοπίου Σχ 3.8. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε το πάχος του δοκιμίου B , το ύψος W , το βάθος της εγκοπής και το πάχος της καθώς και η απόσταση του ανοίγματος της εγκοπής στο σημείο που συνδέεται το επιμηκυνσιόμετρο ώστε να είναι εντός των ορίων. Για κάθε δοκίμιο εξήχθη η αντίστοιχη γεωμετρική σταθερά $f(a_i / W)$.



Σχήμα 3.8 - Εικόνα - Εγκοπή σε δοκίμιο δυσθραυστότητας

Η δυσθραυστότητα προσδιορίστηκε βάση της προδιαγραφής **ASTM E 1820 – 01**. Τα πειράματα δυσθραυστότητας διεξήχθησαν σε δύο στάδια, αρχικά τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση, έτσι ώστε να δημιουργηθεί φυσική ρωγμή στο υλικό (αρχική ρηγμάτωση) και στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε στατικό πείραμα κάμψης 3 σημείων. Κατά την κυκλική φόρτιση διατηρήθηκε σταθερός λόγος φορτίων R και σταθερό μέγιστο φορτίο P_{max}. Έτσι η φόρτιση είχε ημιτονοειδές μορφή όπως φαίνεται στο **Σχ. 2.5**. Κατά την στατική φόρτιση η ταχύτητα κίνησης ήταν της τάξης των 0,05mm/λεπτό.

Προτού τα δοκίμια υποβληθούν σε κυκλική φόρτιση, πραγματοποιήθηκε ελαφριά λείανση με χρήση γυαλόχαρτου καρβιδίου-σιλικόνης D#500 D#800 και D#1000, έτσι ώστε να περιοριστούν οι ατέλειες των επιφανειών, όπως γρέζια από την κατασκευή τους.

Το στήσιμο του δοκιμίου στην ιδιοκατασκευή πραγματοποιήθηκε με κατάλληλο κεντράρισμα του δοκιμίου στην μηχανή.

3.5.2 Δημιουργία Αρχικής ρηγμάτωσης (pre-cracking)

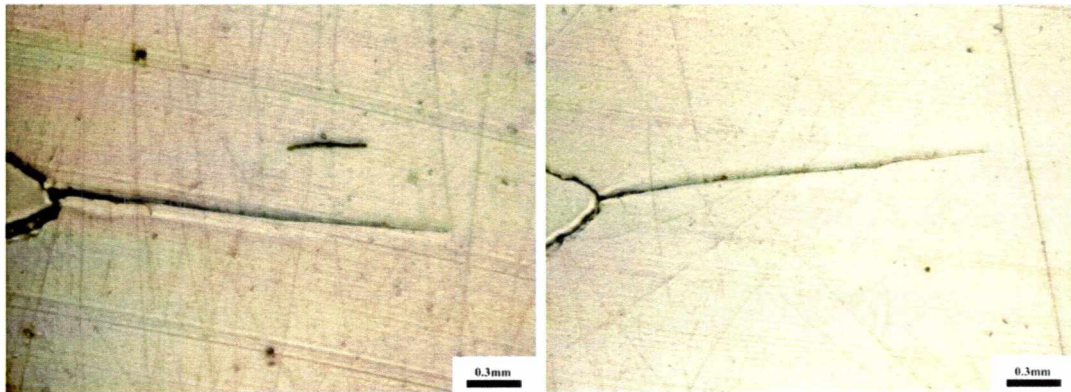
Αρχικά τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση με συχνότητα 20 Hz, λόγο φορτίων R=0,1 και P_{max}= 8kN με σκοπό την δημιουργία της επιθυμητής αρχικής ρηγμάτωσης από την μηχανουργικά κατασκευασμένη εγκοπή. Βάση της προδιαγραφής η αρχική ρηγμάτωση έπρεπε να κυμαίνεται εντός των ορίων 1,3mm < a_p < 4,5mm . Η τιμή του μέγιστου φορτίου (P_{max}) για την δημιουργία της αρχικής ρηγμάτωσης υπολογίστηκε ώστε να μην υπερβαίνει τα όρια της προδιαγραφής [16]:

$$P_{max} \leq P_f = \frac{0.5Bb_0^2 \sigma_Y}{S} \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

$$P_{max} < 70\%P_Q \quad (\text{Εξ. 3.2}) \quad \text{όπου } P_Q \text{ η τιμή που λαμβάνεται από το πείραμα}$$

Για τον προσδιορισμό του μήκους της αρχικής ρωγμής χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του αποτυπώματος ρέπλικας, σύμφωνα με την οποία ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν διακοπή του πειράματος και ασκούσαν στο δοκίμιο η δύναμη P (**Σχ 3.2**) μέχρι η τιμή του φορτίου να φτάσει λίγο πιο κάτω από το P_{max}, με σκοπό αν έχει εμφανιστεί ρωγμή, να παραμείνει «ανοιχτή». Κατόπιν, τοποθετούνταν στην αιχμή της εγκοπής ένα κομμάτι ρέπλικας με ειδική κόλλα και αποτυπώνονταν έτσι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του δοκιμίου. Τα αποτυπώματα ρέπλικας που χρησιμοποιήθηκαν, μελετήθηκαν σε οπτικό

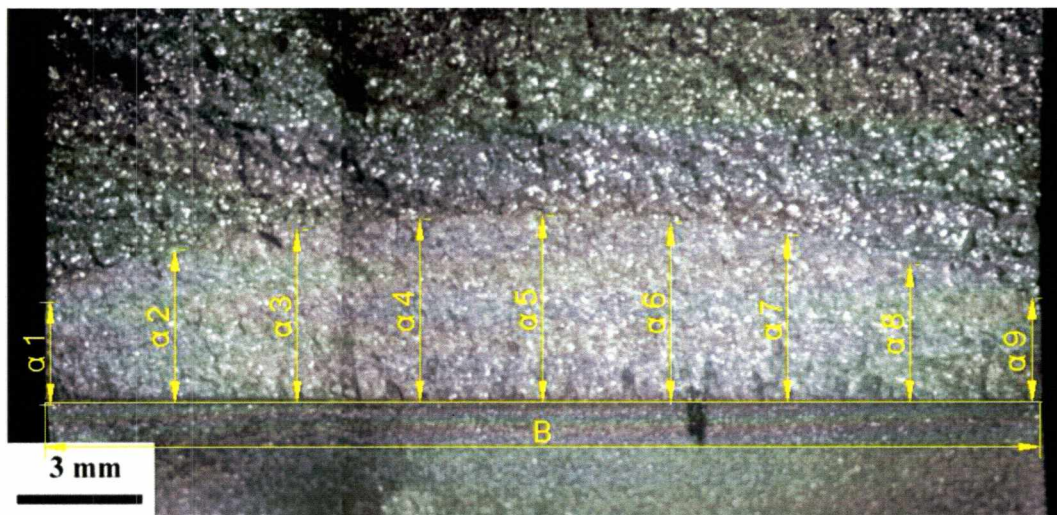
μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Σχ 3.9. Οι ρέπλικες αναλύθηκαν με σκοπό να μετρηθεί το μήκος της ρωγμής και στις δυο πλευρές του δοκιμίου.



Σχήμα 3.9 - Εικόνα - Ρέπλικες. Οι δύο πλευρές ενός δοκιμίου KIC μετά από 190.000 κύκλους κόπωσης όπως φαίνονται στο μικροσκόπιο.

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος όλα τα δοκίμια αναλύθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10. Καθώς η ζώνη κόπωσης κατά την εξέλιξη της φυσικής ρωγμής μπορεί εύκολα να διακριθεί από την περιοχή της απότομης θραύσης λόγω της στατικής φόρτισης, χωρίστηκε σε 9 ίσα μέρη (κατά το πάχος του δοκιμίου) α1- α9 και έτσι μετρήθηκε και αποτιμήθηκε το μέσο μήκος της προ-ρωγμής. Η προ-ρωγμή a_p ορίζεται ως :

$$\alpha_p = \frac{\sum a_i}{9} \quad \text{όπου } i=1-9 \quad (\text{Εξ. 3.3})$$



Σχήμα 3.10 - Εικόνα - Μέτρηση της Αρχικής Ρωγμής σε δοκίμιο δυσθραυστότητας μετά την θραύση

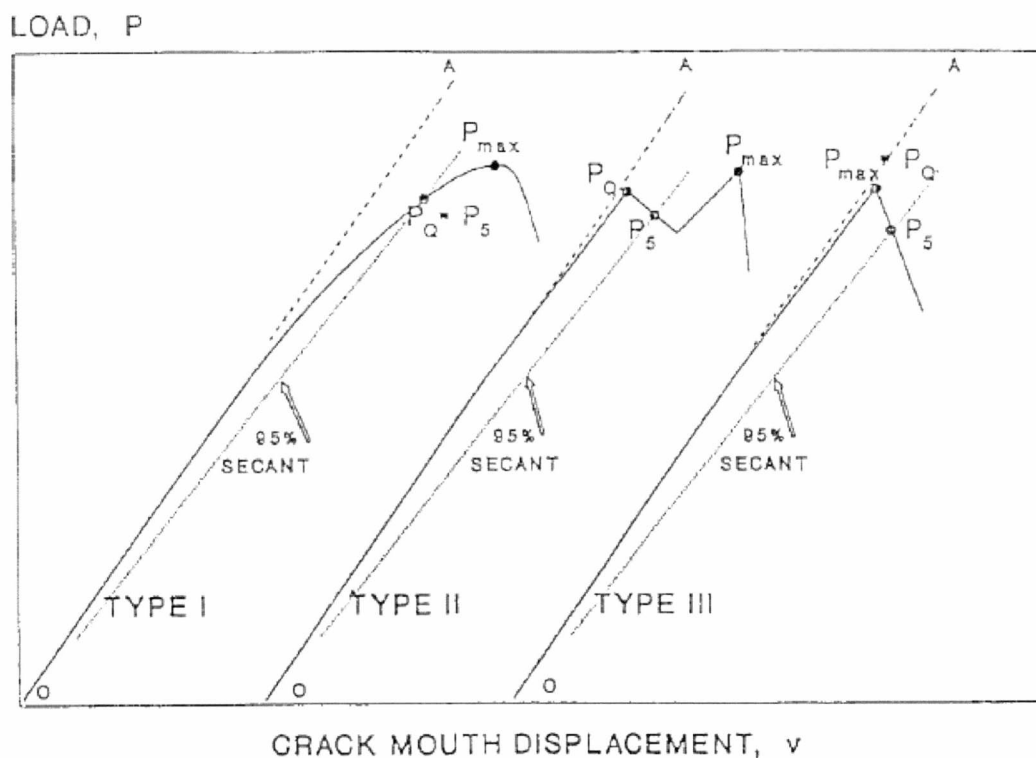
3.5.3 Στατική Φόρτιση για προσδιορισμό K_{IC}

Τόσο η δημιουργία ρωγμής όσο και η στατική φόρτιση έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου 20°C . Η ταχύτητα μετατόπισης του εμβόλου που χρησιμοποιήθηκε ήταν $0,05\text{mm}/\text{min}$.

Το (COD) τοποθετείται στην άκρη της εγκοπής και μετράει το άνοιγμα των χελιών της εγκοπής όπως φαίνεται στο **Σχ 3.12**.

Η μέτρηση της τιμής K_{IC} βασίζεται στον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής τιμής συντελεστή έντασης τάσης K_Q από ένα διάγραμμα μεταβολής της στατικής δύναμης με το άνοιγμα των επιφανειών του ρήγματος (COD)

Το φορτίο P_Q ορίζεται ως εξής: Στο διάγραμμα Φορτίου- COD από τα δεδομένα που προκύπτουν από το στατικό πείραμα σχεδιάζεται ευθεία με κλίση 95% από το γραμμικό-ελαστικό τμήμα του διαγράμματος (ευθεία OA) όπως φαίνεται και στο **Σχ. 3.11**. Το σημείο όπου η ευθεία αυτή τέμνει την καμπύλη ορίζεται σαν P_5 . Αν η δύναμη σε κάθε σημείο του διαγράμματος που προηγείται της δύναμης P_5 είναι μικρότερη από την P_5 , τότε το P_5 είναι το P_Q (TYPE I) **Σχ. 3.11**. Αν ωστόσο υπάρχει ένα μεγαλύτερο φορτίο πού προηγείται του P_5 τότε αυτό το φορτίο ορίζεται ως P_Q (TYPE II) (TYPE III) **Σχ. 3.11**.



Σχήμα 3.11 Τρεις πιθανοί τύποι διαγράμματος Δύναμης-COD για τον υπολογισμό του P_Q

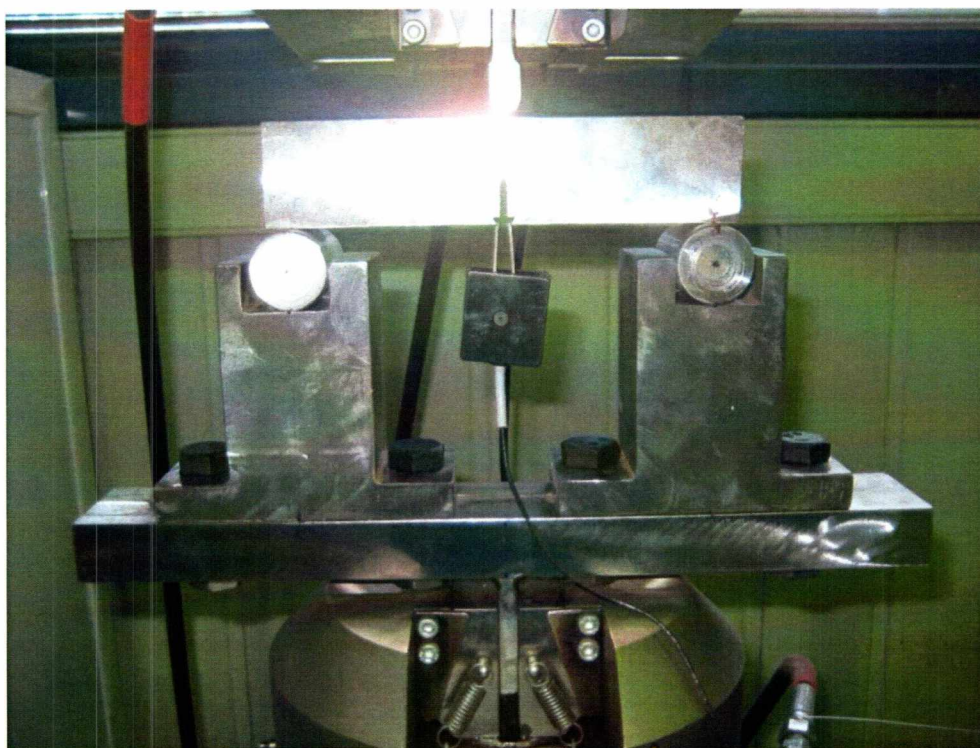
Ο υπολογισμός της τιμής K_Q πραγματοποιείται από την Εξ. 3.5 που περιέχει την γεωμετρική σταθερά $f(a_i / W)$ η οποία προκύπτει αναλυτικά από την Εξ 3.4. Για κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν οι διαστάσεις B , S και W , οι οποίες μετρήθηκαν με την βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου και του παχύμετρου.

$$f(a_i / W) = \frac{3(a_i / W)^{1/2} [1.99 - (a_i / W)(1 - (a_i / W)(2.15 - 3.93(a_i / W) + 2.7(a_i / W)^2)]}{2(1 + 2(a_i / W))(1 - (a_i / W))^{3/2}} \quad (\text{Εξ } 3.4)$$

$$K_Q = \left[\frac{P_Q S}{BW^{3/2}} \right] f(a_i / W) \quad (\text{Εξ } 3.5)$$

Για να θεωρηθεί η μέτρηση του K_Q έγκυρη και ανεξάρτητη του μεγέθους του δοκιμίου, ($K_Q = K_{IC}$) πρέπει να τηρούνται δύο βασικοί περιορισμοί:

- Ο λόγος P_{max}/P_Q να είναι μικρότερος από 1,1
- Το γινόμενο $2,5(K_Q/\sigma_{ys})^2$ να είναι μικρότερο από το πάχος του δοκιμίου B και μικρότερο από το εναπομένον μέρος του δοκιμίου μετά την προ-ρωγμή b_0 , δηλαδή ($b_0 = W - a_0$)

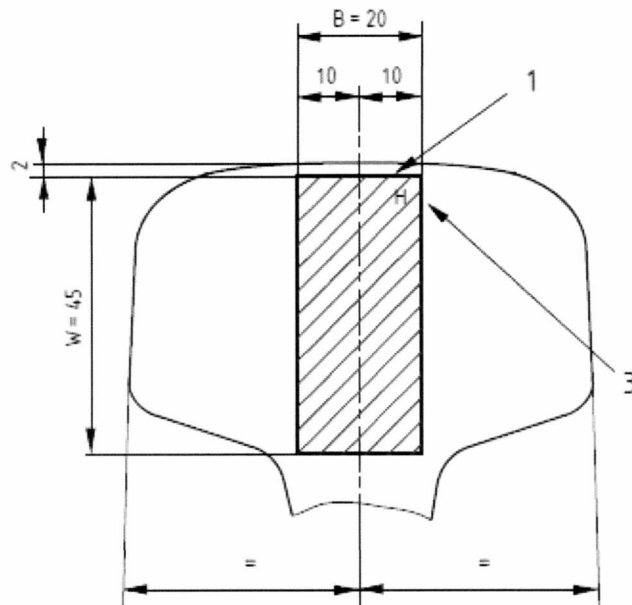


Σχήμα 3.12 - Εικόνα - Εκτέλεση Πειράματος Δυσθραυστότητας

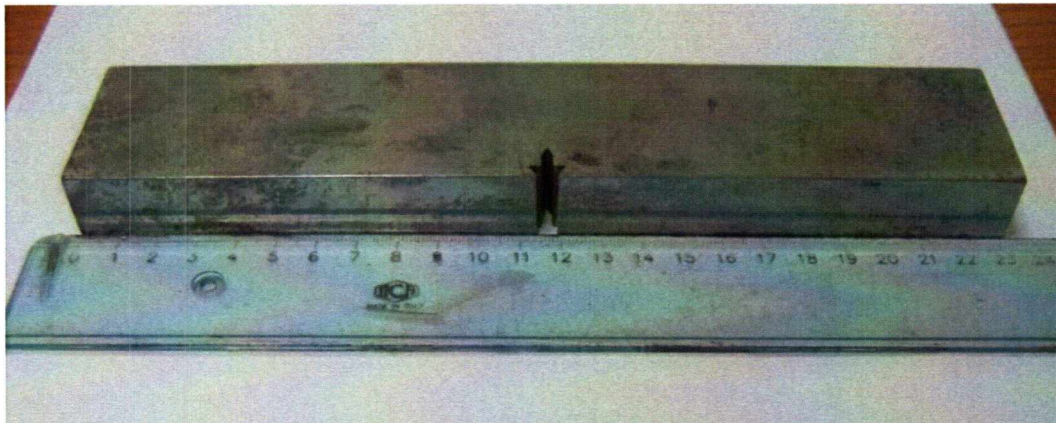
3.6 Πειράματα εξέλιξης ρωγμής

3.6.1 Εξαγωγή δοκιμίων από σιδηροτροχιά

Τα δοκίμια προσδιορισμού του ρυθμού εξέλιξης της ρωγμής κόπωσης κατασκευάστηκαν από σιδηροτροχιά που προμηθεύτηκε το εργαστήριο από το ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ βάση της Ευρωπαϊκής οδηγίας prEN 13674-1:2002 (E) [17]. Τα δοκίμια εξήχθησαν από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς από την θέση που φαίνεται στο Σχ. 3.13 με την γεωμετρία που φαίνεται στο Σχ. 3.14. Στον Πίνακα 3.5 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου εξέλιξης ρωγμής το σκαρίφημα του οποίου φαίνεται στο Σχ. 3.2.



Σχήμα 3.13 Εξαγωγή δοκιμίου εξέλιξης ρωγμής

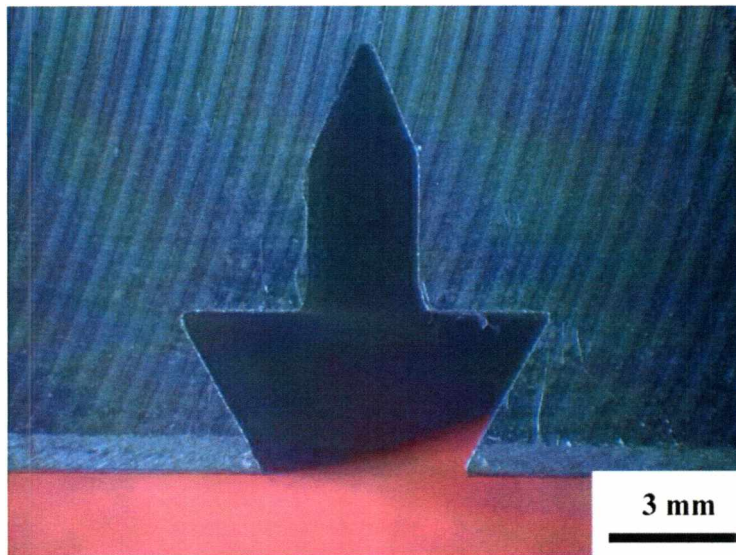


Σχήμα 3.14 - Εικόνα - Δοκίμιο εξέλιξης ρωγμής

Πίνακας 3.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου εξέλιξης ρωγμής

Μήκος :	(mm)	220
Πάχος:	(mm)	20
Πλάτος:	(mm)	45
Μήκος Εγκοπής:	(mm)	10
Πλάτος Εγκοπής:	(mm)	2,5

Για την μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων μετά την μηχανουργική κοπή, το κάθε δοκίμιο ελέγχθηκε και μετρήθηκε με παχύμετρο ακριβείας 0,05 mm και η εγκοπή ελέγχθηκε και μετρήθηκε με την βοήθεια στερεοσκοπίου **Σχ 3.15**. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε το πάχος του δοκιμίου B, το ύψος W, το βάθος της εγκοπής και το πάχος της καθώς και η απόσταση του ανοίγματος της εγκοπής στο σημείο που συνδέεται το επιμηκυνσιόμετρο ώστε να είναι εντός των ορίων της προδιαγραφής.



Σχήμα 3.15 - Εικόνα - Εγκοπή σε δοκίμιο εξέλιξης ρωγμής

Τα πειράματα με σκοπό τον προσδιορισμό του ρυθμού εξέλιξης της ρωγμής κόπωσης, πραγματοποιήθηκαν βάση της προδιαγραφής **BS ISO 12108:2002** και είχαν ως στόχο τον προσδιορισμό των σταθερών Paris (C και m) :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (\text{Εξ. 3.6})$$

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 20 C°. Από τα 4 δοκίμια που κατασκευάστηκαν τα δύο υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση με λόγο φορτίων R=0,1 και τα άλλα δύο σε R=0,5 με συχνότητα 25Hz. Στα πρώτα η μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη ήταν P_{max}=13kN ενώ στα δοκίμια που αντιστοιχούν σε λόγο φορτίων R=0,5 το μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο ήταν P_{max}=14,5kN. Προτού τα δοκίμια υποβληθούν σε κυκλική φόρτιση, πραγματοποιήθηκε ελαφριά λείανση με χρήση γυαλόχαρτου καρβιδίου-σιλικόνης D#500 D#800 και D#1000, έτσι ώστε να περιοριστούν οι ατέλειες των επιφανειών, όπως γρέζια από την κατασκευή τους.

Το στήσιμο του δοκιμίου στην ιδιοκατασκευή πραγματοποιήθηκε με κατάλληλο κεντράρισμα του δοκιμίου στην μηχανή.

3.6.2 Υπολογισμός του μήκους ρωγμής

Με την χρήση του COD και κατάλληλη χρήση των Εξ (3.7) και (3.8) της προδιαγραφής **ASTM International E 399 – 09** υπολογίστηκε το μήκος της ρωγμής a σε κάθε χρονική στιγμή. Για τον ακριβέστερο υπολογισμό, σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 3 στοπ στην πειραματική διαδικασία και μετρήθηκε η ρωγμή με ρέπλικα σε οπτικό μικροσκόπιο [18]. Βάση του αποτελέσματος της ρέπλικας για το μήκος της ρωγμής έγινε κατάλληλη βαθμονόμηση της Εξ 3.8 με αλλαγή της σταθεράς E .

$$\frac{a}{W} = 1.000 - 4.500U + 13.157U^2 - 172.551U^3 + 879.944U^4 - 1514.671U^5 \quad (\text{Εξ. 3.7})$$

Όπου:

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{E' B_e V_m}{P}}} \quad (\text{Εξ. 3.8})$$

Όταν το μήκος ρωγμής ξεπερνούσε τα 2,5 mm ξεκινούσε η καταγραφή του ρυθμού αύξησης της ρωγμής έως και την θραύση του δοκιμίου. Τα δεδομένα κύκλων N , φορτίου P και του ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής από το COD (V) καταγράφηκαν σε αρχεία excel μέσω ειδικού λογισμικού και με κατάλληλη επεξεργασία υπολογίστηκαν ανά προκαθορισμένα διαστήματα το μήκος ρωγμής a , το ΔK και ο ρυθμός αύξησης της ρωγμής da/dN .

Τα διαστήματα Δa που επιλέχθηκαν ακολουθούν τον κανόνα της προδιαγραφής **BS ISO 12108:2002** όπου:

$$\Delta a \leq 0,04W \quad \text{για} \quad 0,25 \leq a/W \leq 0,40$$

$$\Delta a \leq 0,02W \quad \text{για} \quad 0,40 \leq a/W \leq 0,60$$

$$\Delta a \leq 0,01W \quad \text{για} \quad a/W \geq 0,60$$

Μέσω του προγράμματος Origin Pro 8 τα σημεία ΔK και da/dN που καταγράφηκαν λογαριθμίστηκαν και ενώθηκαν με την εντολή Linear Fitting. Όπου η κλίση είναι η σταθερά m και η σταθερά C προκύπτει με απολογαρίθμηση της αποτέμνουσας.

4 Αποτελέσματα

4.1 Δυσθραυστότητα

Οι αρχικές ρωγμές και στα 4 δοκίμια κατασκευάστηκαν σε συχνότητα 20Hz και λόγο φορτίων $R=0,1$ με $P_{max}=8kN$.

Από τα πειράματα δυσθραυστότητας ελήφθησαν τα **Διαγράμματα (Σχ 4.1 – 4.4)** COD συναρτήσει της δύναμης με σταθερή ταχύτητα εμβόλου.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 4 δοκιμών κάμψης 3 σημείων και οι συνολικοί κύκλοι κόπωσης που χρειάστηκαν για την δημιουργία της επιθυμητής προ-ρωγμής παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1**.

Πίνακας 4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών δυσθραυστότητας

Δοκίμιο	W	B	a_0	a_p	a	b_0	Κύκλοι για προ-ρωγμή
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
1	39,9375	24,78333	20,92778	3,65778	17,27	19,00972	190000
2	40,125	24,8	21,26494	3,92444	17,3405	18,86006	210000
3	40,25	24,65	20,91667	3,51667	17,4	19,33333	200000
4	40,0375	24,65	22,84222	5,59222	17,25	17,19528	262700

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το μήκος της προ-ρωγμής στο δοκίμιο 4 ξεπέρασε το επιτρεπόμενο όριο των 4,5 mm και έτσι δεν μπορεί να θεωρηθεί έγκυρο το αποτέλεσμα που λήφθηκε από το δοκίμιο αυτό. Τα υπόλοιπα δοκίμια πληρούν όλους τους γεωμετρικούς κανονισμούς.

Τα πειραματικά δεδομένα των 4 δοκιμών κάμψης 3 σημείων και ο υπολογισμός της δυσθραυστότητας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2**.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών δυσθραυστότητας

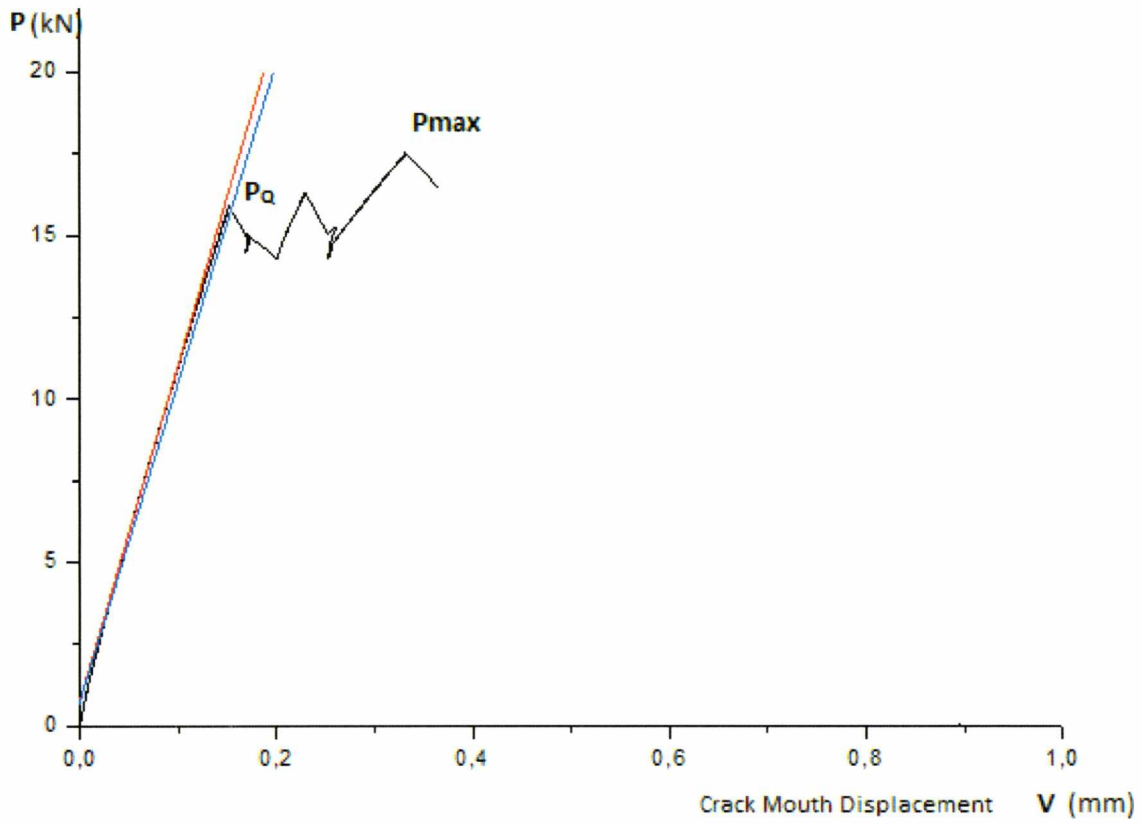
Δοκίμιο	(a/W)	f(a/W)	P _{max}	P _Q	P _{max} /P _Q	2.5(K _Q /σ _{YS}) ²	K _Q	K _{Ic}
			(kN)	(kN)			(MPa m 1/2)	MPa m 1/2
1	0,432426	2,877782	17,4	15,9	1,094	0,012055	37,01212	37,01212
2	0,432162	2,935287	15,5	13,86	1,1	0,009384	32,65574	32,65574
3	0,432298	2,836907	16,4	12,2	1,344262	0,006811	27,8201*	27,8201*
4	0,430846	3,379051	13,79	10,5kN	1,3142	0,007272	28,74661	-
Μέση τιμή K_{Ic}								32,83

Η αποτίμηση του δοκιμίου 3 δεν είναι έγκυρη στο κριτήριο του λόγου P_{max}/P_Q και έτσι το K_Q δεν μπορεί να θεωρηθεί τιμή της δυσθραυστότητας.

Σύμφωνα όμως με την Ευρωπαϊκή Οδηγία **prEN 13674-1:2002 (E)** [17] επειδή δεν υπάρχουν 5 έγκυρες τιμές K_{Ic} πρέπει να συμπεριληφθεί η τιμή του K_Q^{*} για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της Δυσθραυστότητας. Όπου με K_Q^{*} συμβολίζονται τα K_Q των δοκιμών που η αποτίμηση τους αποτυγχάνει σε ένα μόνο από τα κριτήρια αποδοχής.

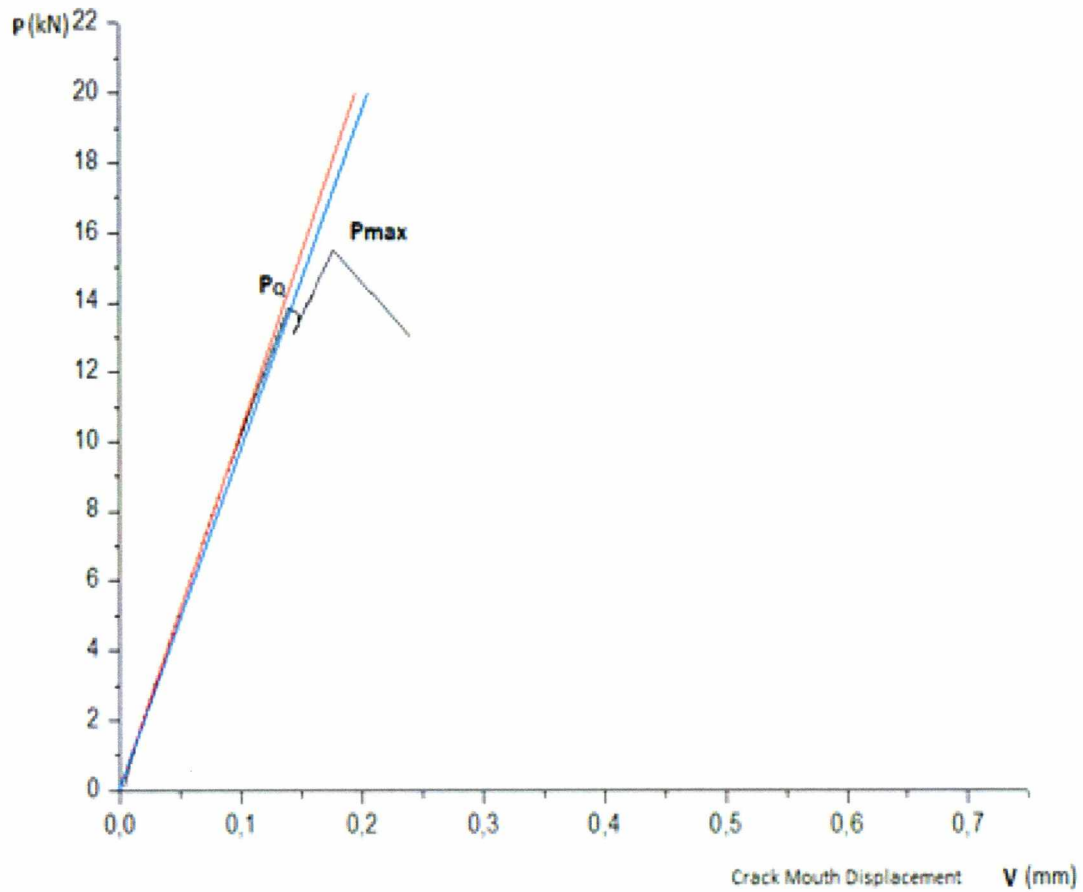
Συνεπώς, η μέση τιμή της δυσθραυστότητας για το υπό εξέταση υλικό είναι **32,83**
MPa√m

Δοκίμο 1:



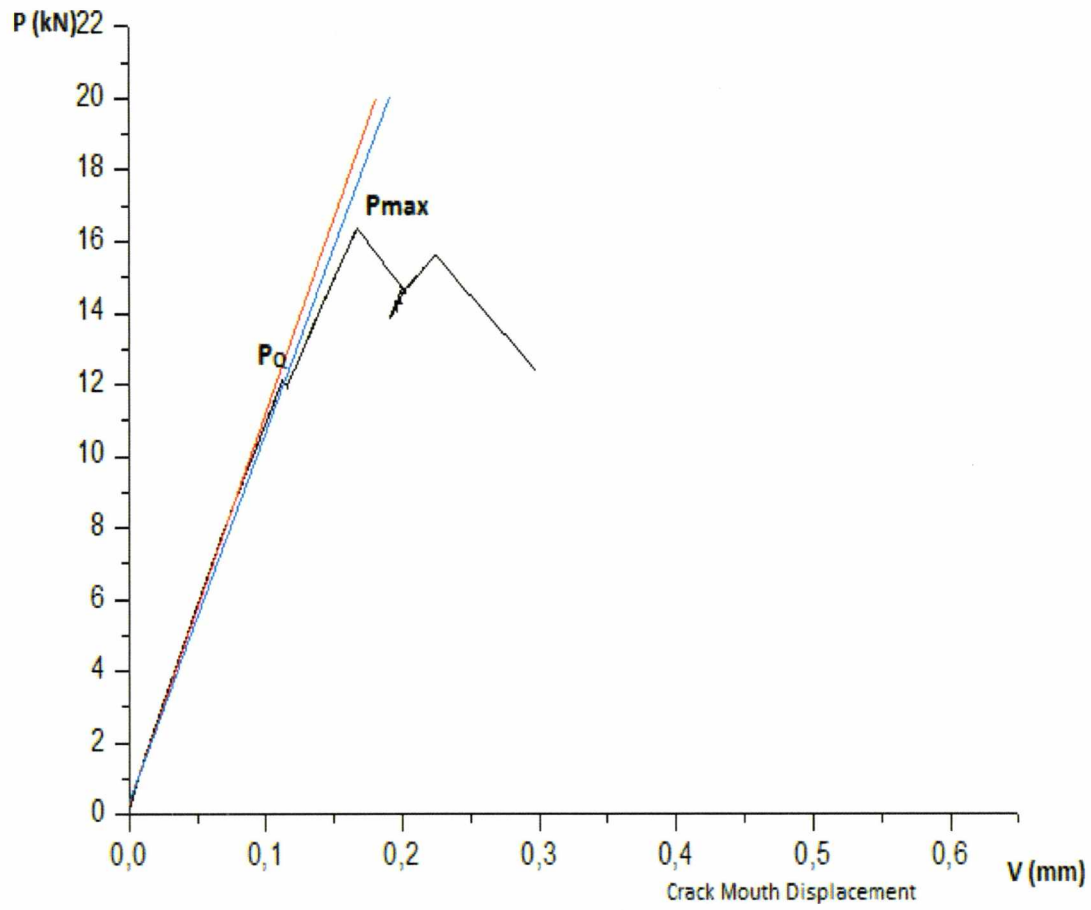
Σχήμα 4.1 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_1)

Δοκίμο 2:



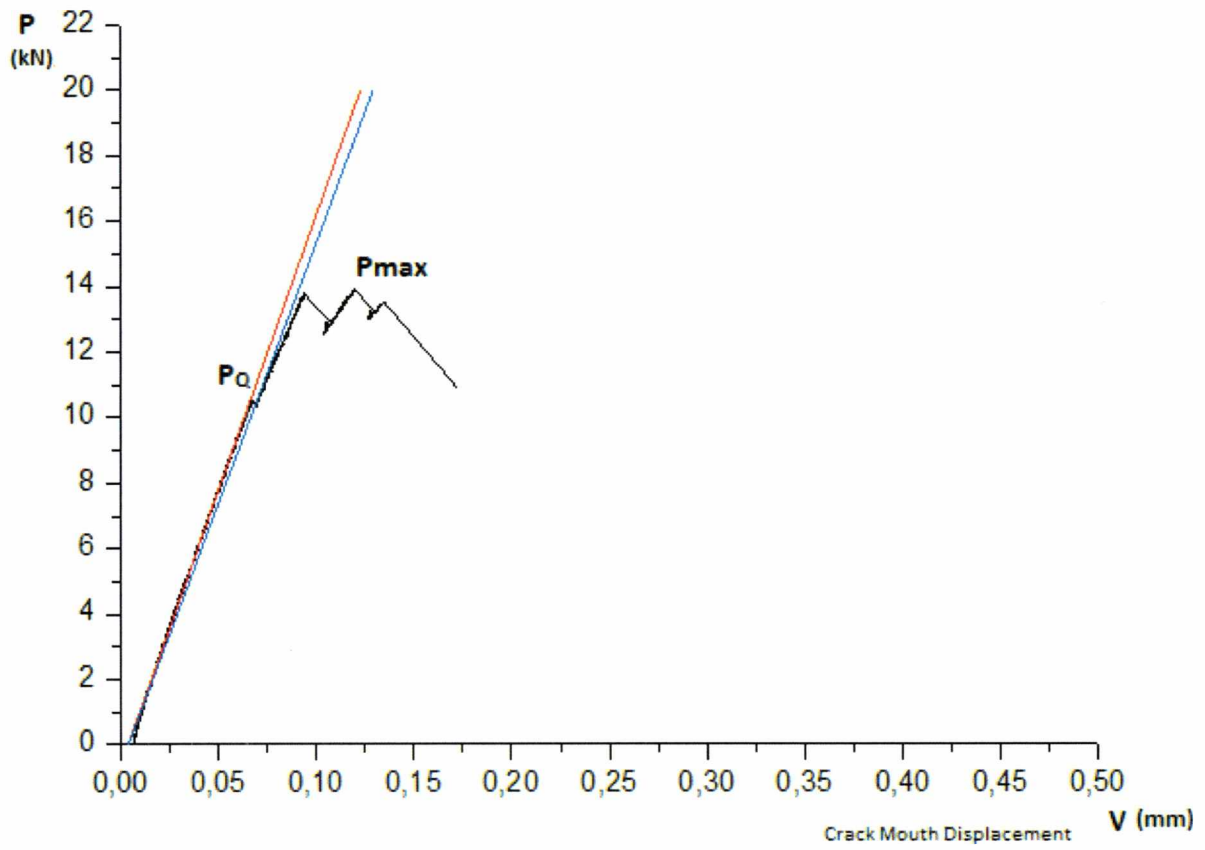
Σχήμα 4.2 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_2)

Δοκίμο 3:



Σχήμα 4.3 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_3)

Δοκίμο 4:



Σχήμα 4.4 - Διάγραμμα - Άνοιγμα Χειλέων του Ρήγματος (COD) συναρτήσει φορτίου (δοκίμο_4)

4.2 Αποτελέσματα δοκιμών εξέλιξης ρωγμής

Η κυκλική φόρτιση πραγματοποιήθηκε σε συχνότητα 20Hz και σε θερμοκρασία 20°C και στα 4 δοκίμια.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων δοκιμών κάμψης 3 σημείων καθώς και οι συνθήκες κόπωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.3**.

Πίνακας 4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών εξέλιξης ρωγμής

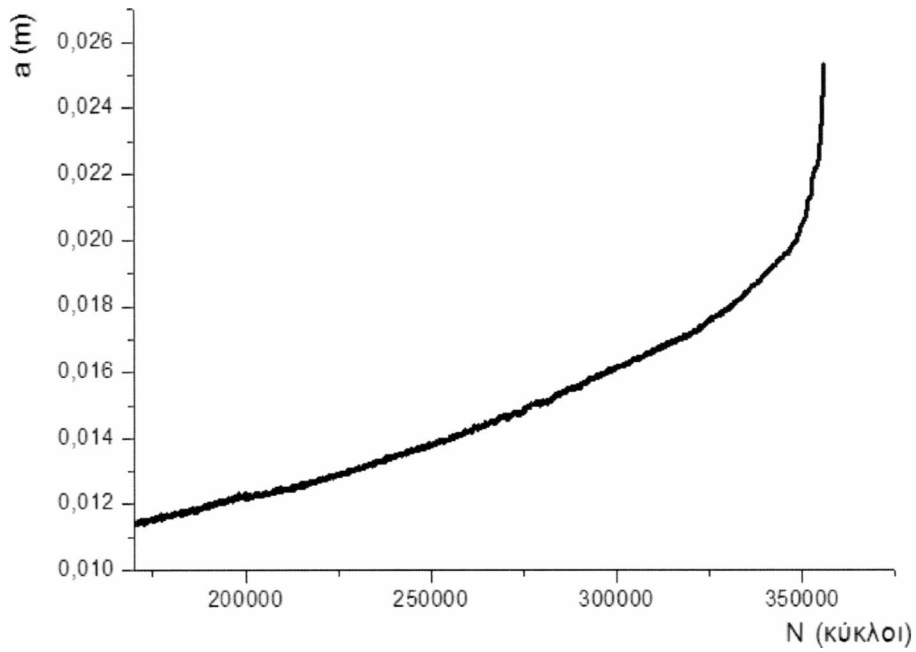
Δοκίμιο	W	B	a _n	a _p	a _{fat}	b ₀	R	P _{max}
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(kN)
1	45,125	19,97	9,8	12,3	2,5	32,825	0,1	13
2	45,04	19,967	10	12,5	2,5	32,54	0,1	13
3*	44,925	19,93	9,24	11,74	2,5	33,185	0,5	14,5
4	44,95	19,95	9,86	12,36	2,5	32,59	0,5	14,5

Το a_{fat} είναι το μήκος ρωγμής από το οποίο και έπειτα ξεκινάει η καταμέτρηση των σημείων.

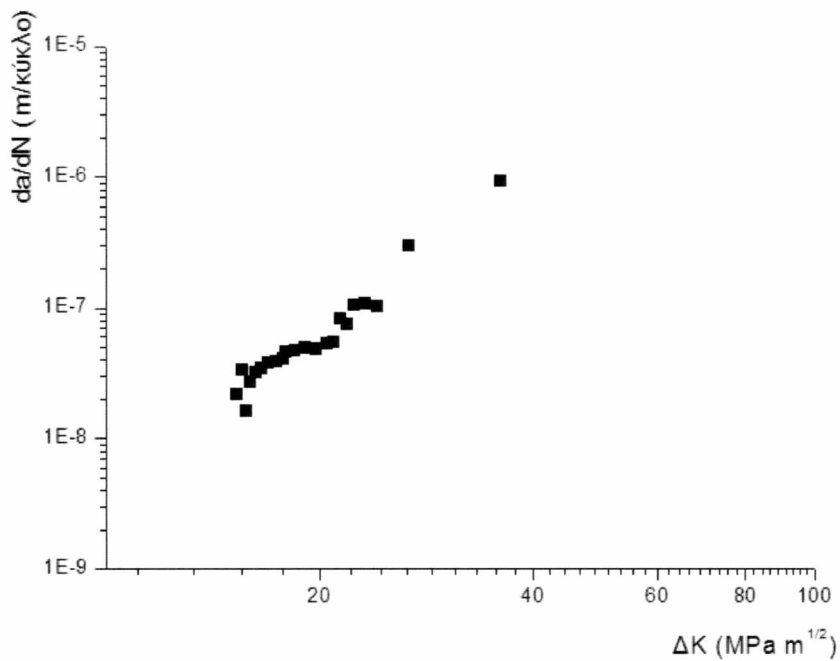
*Στο δοκίμιο 3 η αρχική ρωγή πραγματοποιήθηκε με P_{max}= 13kN για 1.050.000 κύκλους. Για τους υπόλοιπους επιλέχθηκε να αυξηθεί το φορτίο στο P_{max}=14,5kN . Η ρωγή δεν είχε φτάσει το a_{fat} όταν αυξήθηκε το φορτίο οπότε δεν επηρεάστηκε η αποτίμηση των σταθερών του Paris

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται για κάθε δοκίμιο η αύξηση της ρωγμής (a) συναρτήσει των κύκλων κόπωσης (N) και ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής (da/dN) συναρτήσει του εύρους του συντελεστή έντασης τάσεων (ΔK).

Δοκίμιο 1:

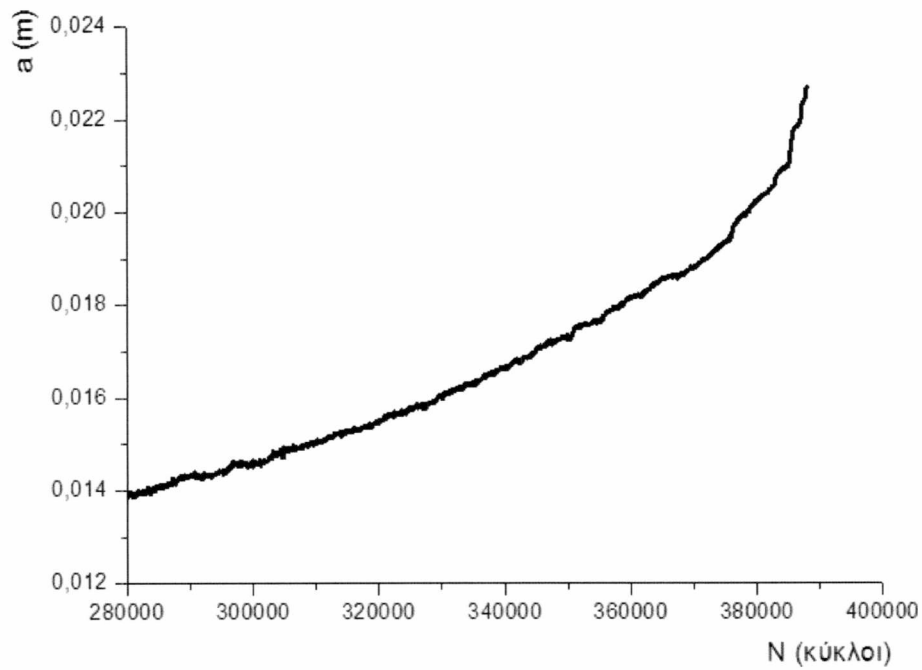


Σχήμα 4.5 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής a συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμιο_1)

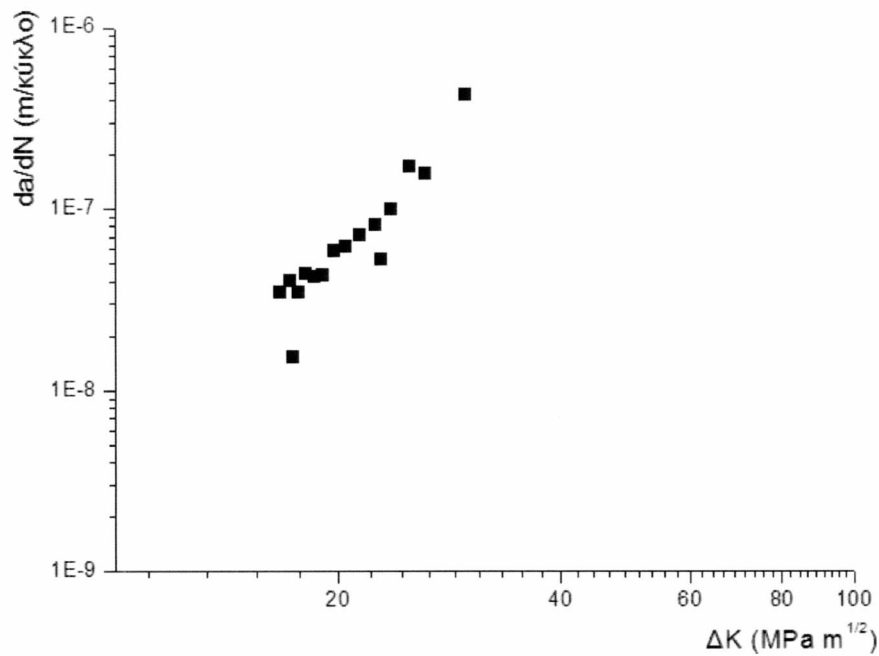


Σχήμα 4.6 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔK ($P_{max}=13$ kN, $R=0,1$)

Δοκίμιο 2:

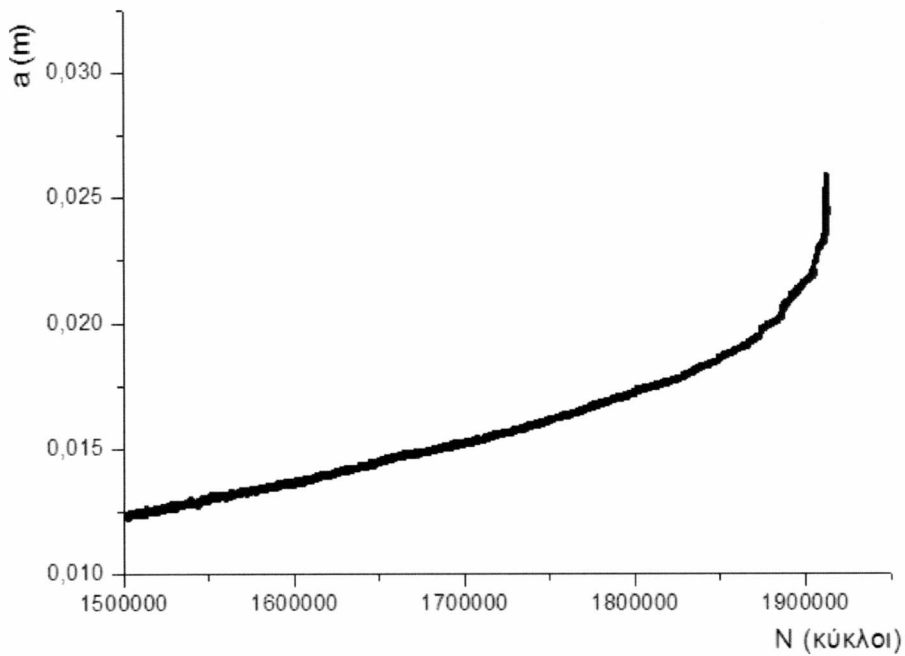


Σχήμα 4.7 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής a συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμιο_2)

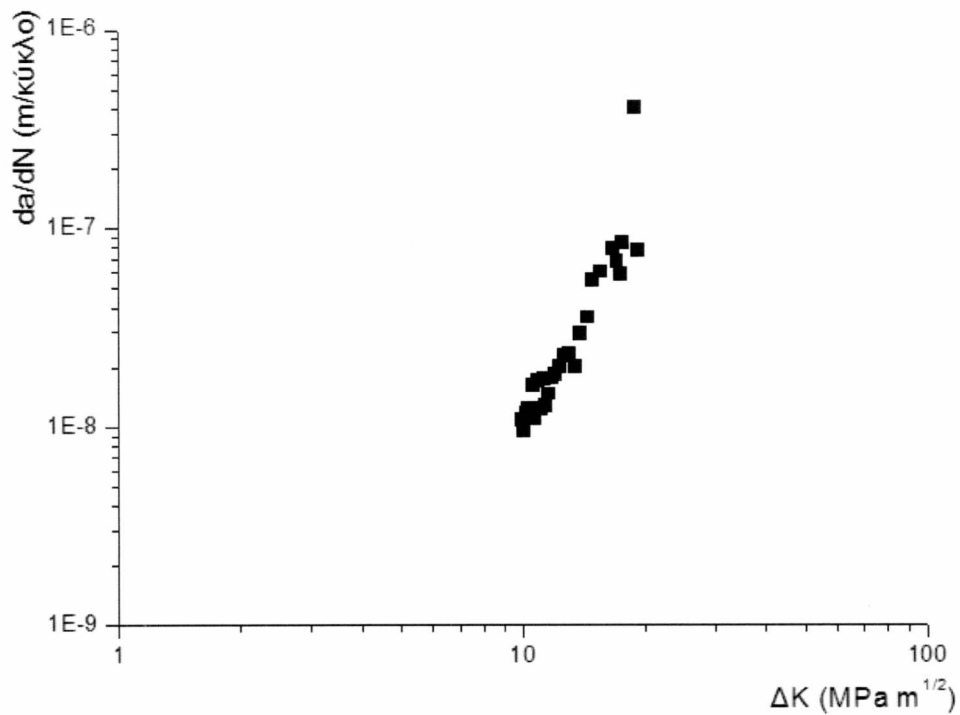


Σχήμα 4.8 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔK ($P_{max}=13kN$, $R=0,1$)

Δοκίμιο 3:

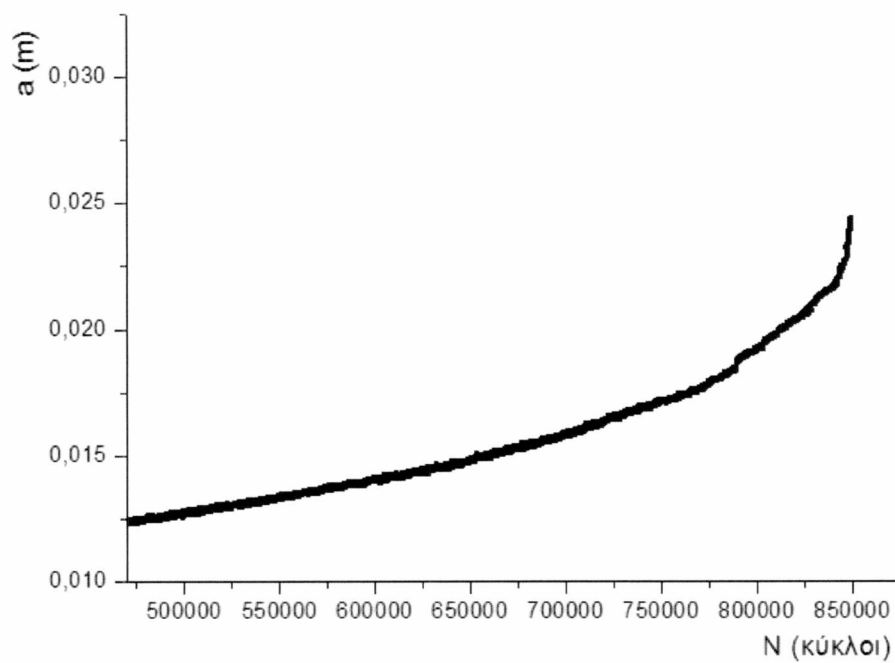


Σχήμα 4.9 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής a συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμιο_3)

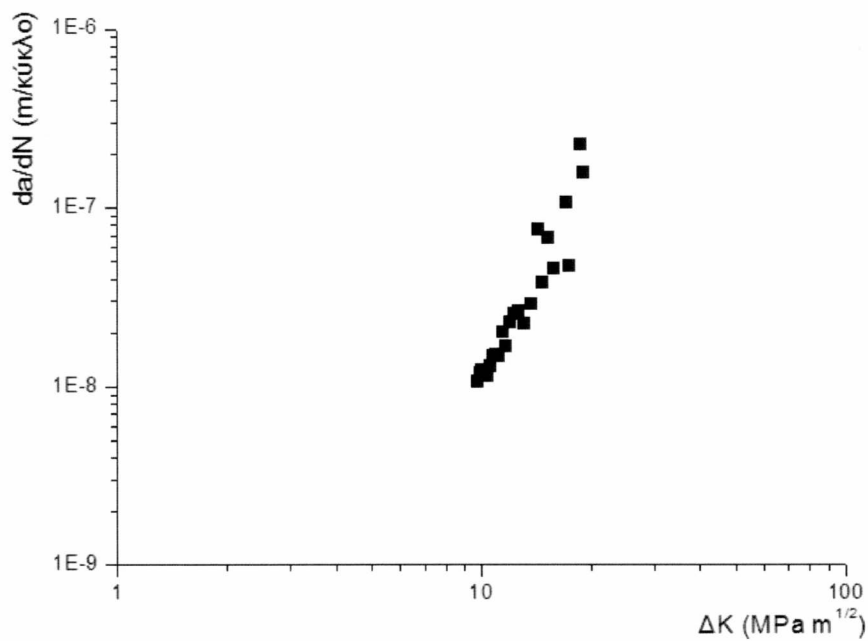


Σχήμα 4.10 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔK ($P_{max}=14,5kN, R=0,5$)

Δοκίμιο 4:



Σχήμα 4.11 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής a συναρτήσει κύκλων κόπωσης (δοκίμιο_4)



Σχήμα 4.12 - Διάγραμμα - Ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων, ΔK ($P_{max}=14,5kN$, $R=0,5$)

4.3 Υπολογισμός των σταθερών Paris

Για τον προσδιορισμό των σταθερών του νόμου του Paris, χρησιμοποιήθηκαν τα Διαγράμματα του παραρτήματος **A1**. Η σταθερά m προσδιορίστηκε από την κλίση της ευθείας ενώ η σταθερά C υπολογίστηκε με απολογαρίθμηση της αποτέμνουσας στον άξονα $\log(da/dN)$.

Αποτιμώντας τα **Διαγράμματα στα Σχ.(4.6, 4.8, 4.10, 4.12)** με την χρήση του λογισμικού Origin Pro 8, υπολογίστηκαν οι σταθερές του Paris για τους δύο λόγους τάσεων $R=0,1$ και $R=0,5$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.5**.

Πίνακας 4.4 Υπολογισμός σταθερών Paris

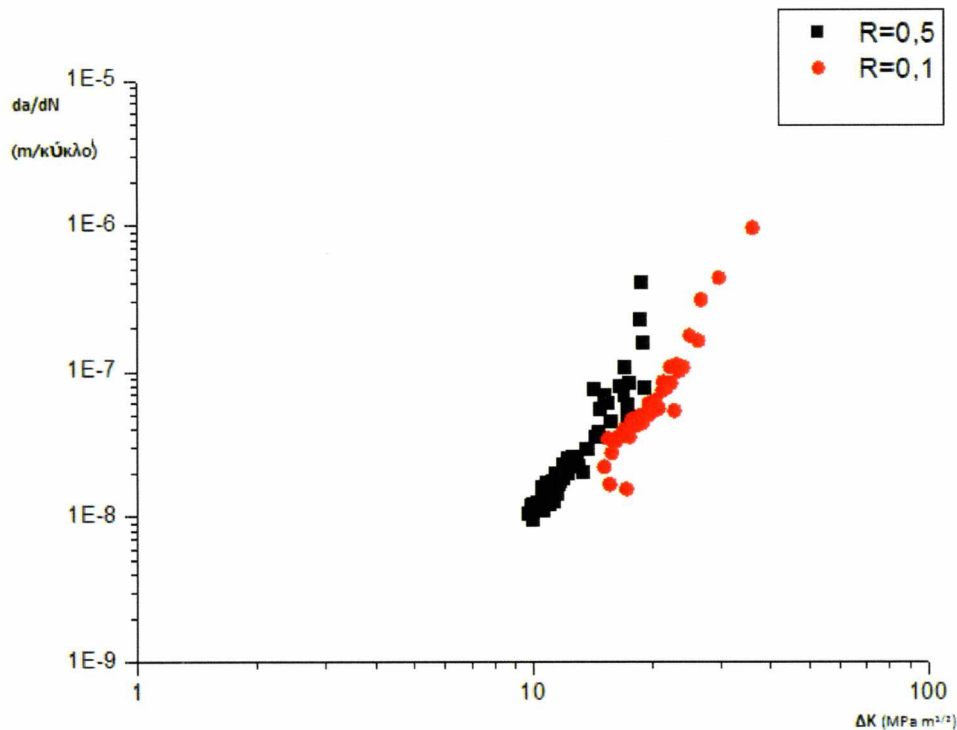
Δοκίμιο	Αποτέμνουσα	Κλίση	R
1	-12,535	4,113	0,1
2	-12,78	4,25	0,1
3	-11,98459	3,97334	0,5
4	-11,90275	3,94317	0,5

Πίνακας 4.5 Υπολογισμός σταθερών Paris

Δοκίμιο	Σταθερά	
	Σταθερά C	m
1	$2,9174 \cdot 10^{-13}$	4,113
2	$1,6596 \cdot 10^{-13}$	4,25
3	$1,0361 \cdot 10^{-12}$	3,97334
4	$1,2509 \cdot 10^{-12}$	3,78382

Για λόγο τάσεων $R=0,1$ προκύπτει ότι η σταθερά C είναι ίση με $2,2885 \cdot 10^{-13}$ και σταθερά $m=4,1815$, ενώ για λόγο τάσεων $R=0,5$ η σταθερά C είναι ίση με $1,1435 \cdot 10^{-12}$ και σταθερά $m=3,87858$.

Στο **Σχ. 4.13** παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τεσσάρων δοκιμών. Όπου με κόκκινο φαίνεται ο ρυθμός εξέλιξης ρωγμής συναρτήσει του εύρους συντελεστή έντασης τάσεων για $R=0,1$ και με μαύρο χρώμα για $R=0,5$. Η επίδραση του λόγου τάσεων R συμφωνεί με την βιβλιογραφία και ελέγχθηκε με την εξίσωση του Walker.



Σχήμα 4.13 - Διάγραμμα - Ρυθμός διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔK για $R=0,1$ και $R=0,5$

Εξίσωση Walker:
$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)^{m(1-\lambda)}} = C''(\Delta K)^m$$

Όπου C, m οι σταθερές του Paris για $R=0$

Άρα:
$$C'' = \frac{C}{(1-R)^{m(1-\lambda)}}$$

Στην εξίσωση του Walker θεωρείται πως η κλίση m δεν επηρεάζεται από το R.

Έστω ότι για $R=0$ και $R=0,1$ τα C και m είναι ίσα.

Οπότε θεωρώ ότι $C = 2,289 \cdot 10^{-13}$ και $m = 4,18$

Επίσης θεωρούμε από βιβλιογραφία ότι η σταθερά λ είναι ίση με $\lambda = 0,5$.

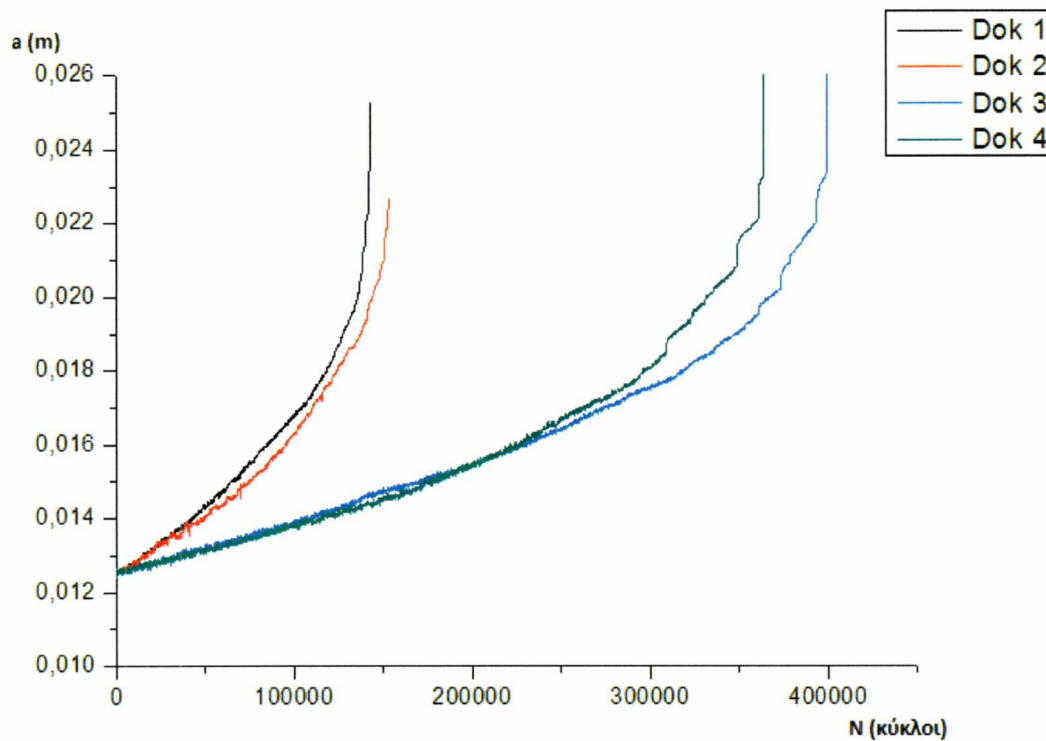
Για $R=0,5$ προκύπτει:
$$C'' = \frac{2,289 \cdot 10^{-13}}{(1-0,5)^{4,18(1-0,5)}} = \frac{2,289 \cdot 10^{-13}}{0,2349} = 9,74 \cdot 10^{-13}$$

Πειραματικά για $R=0,5$ το C'' βρέθηκε $11,4 \cdot 10^{-13}$

Άρα η εξίσωση του Walker προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα με ικανοποιητική ακρίβεια.

Από τα **Διαγράμματα Σχ. (4.5, 4.7, 4.9 και 4.11)** παρατηρείται ότι τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε εύρος $R=0,5$ είχαν αισθητά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής παρόλο που υποβλήθηκαν σε μεγαλύτερο P_{max} .

Στο **Σχ. 4.14** παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής των δοκιμών με αφετηρία το μήκος ρωγμής $a_{fat}=2,5\text{mm}$. Δηλαδή παρουσιάζεται η αύξηση της ρωγμής a συναρτήσει των κύκλων κόπωσης N μέχρι και την θραύση χωρίς το κομμάτι έναρξης ρωγμής. Η καταγραφή των κύκλων κόπωσης ξεκινά από $a_0 \approx 12,5 \text{ mm}$.



Σχήμα 4.14 - Διάγραμμα - Αύξηση ρωγμής συναρτήσει των κύκλων κόπωσης

Τα συγκεντρωτικά δεδομένα της κόπωσης και των τεσσάρων δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 Συγκεντρωτικά Δεδομένα της Κόπωσης όλων των δοκιμών

Δοκίμιο	Κύκλοι δημιουργίας προ-ρωγμής	Συνολικοί κύκλοι μέχρι την θραύση	R	Pmax
				(kN)
1	214.600	356.000	0,1	13
2	235.500	388.000	0,1	13
3*	1.463.400	1.912.400	0,5	14,5
4	477.500	843.600	0,5	14,5

*Στο δοκίμιο 3 η προ-ρωγμή πραγματοποιήθηκε με Pmax= 13kN για 1.050.000 κύκλους. Για τους υπόλοιπους επιλέχθηκε να αυξηθεί το φορτίο στο Pmax=14kN . Η ρωγμή δεν είχε φτάσει το a_{fat} όταν αυξήθηκε το φορτίο οπότε δεν επηρεάστηκε η αποτίμηση των σταθερών του Paris

5 Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη προσδιορισμού της Δυσθραυστότητας και του ρυθμού αύξησης ρωγμής για το υλικό UIC60 Grade 900A.

- Η δυσθραυστότητα βρέθηκε: $K_{Ic} = 32,83 \text{ MPa}\sqrt{m}$
- Για λόγο φορτίων $R=0,1$ οι σταθερές του νόμου του Paris είναι $C = 2,2885 \cdot 10^{-13}$ και $m=4,1815$.
- Για λόγο φορτίων $R=0,5$ οι σταθερές του νόμου του Paris είναι $C = 1,1435 \cdot 10^{-12}$ και $m=3,8786$

Για το υλικό UIC60 Grade 900A που εξετάστηκε η Ευρωπαϊκή οδηγία **prEN 13674-1:2002 (E)** βάση της οποίας πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα δυσθραυστότητας, παρέχει ένα κάτω επιτρεπτό όριο για την τιμή της δυσθραυστότητας ώστε η σιδηροτροχιά να είναι αποδεκτή. Δηλαδή η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή είναι $K_{Ic \text{ min}} = 26 \text{ MPa}\sqrt{m}$. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή $K_{Ic} = 32,83 \text{ MPa}\sqrt{m}$, είναι αποδεκτή.

Έχει ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε άλλα πανεπιστημιακά ιδρύματα για το ίδιο υλικό.

- Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2008 στο Semnan University, Semnan, Iran από τους A. Hassani και R. Ravaee πραγματοποιήθηκαν πειράματα δυσθραυστότητας στο UIC60 Grade 900A σε θερμοκρασία $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ και βρέθηκε η τιμή δυσθραυστότητας $K_{Ic} = 30,4 \text{ MPa}\sqrt{m}$.
- Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2014 στο MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY από τον Ali Motameni Tabatabaei σε χάλυβα R260 η δυσθραυστότητα βρέθηκε ίση με $K_{Ic} = 34,1 \text{ MPa}\sqrt{m}$. Επίσης για λόγο φορτίων $R=0,1$ οι σταθερές του Paris βρέθηκαν $C = 1,64 \cdot 10^{-13}$ και $m=4,1$.

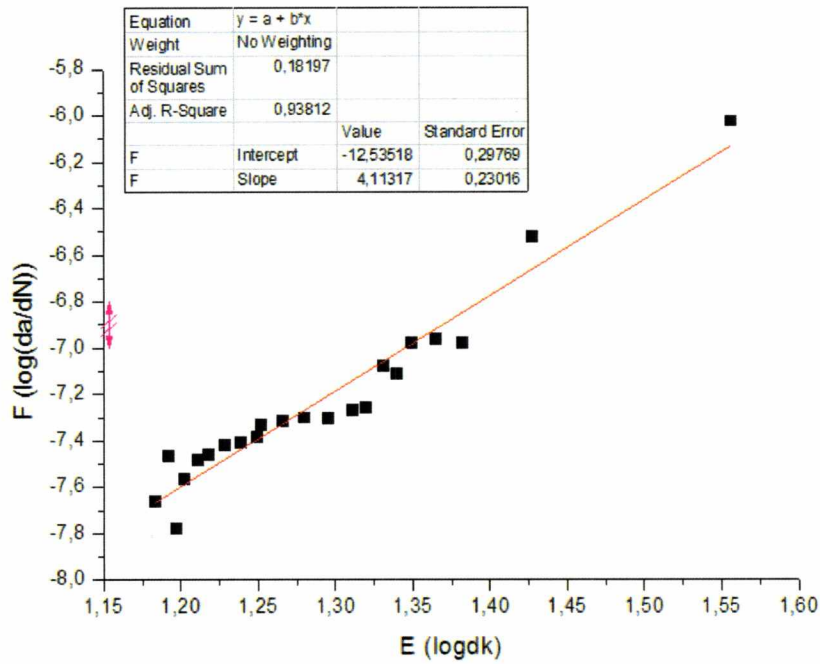
6 Βιβλιογραφία

- [1] «National Museum Wales,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.museumwales.ac.uk/>. [Πρόσβαση 25 September 2014].
- [2] C. Hardwick και R. Lewis, «The Effects of Alternative Top of Rail Materials on Preexisting Rolling Contact Fatigue Cracks,» University of Sheffield, UK, 2014.
- [3] R. A. Smith, «Rolling Contact Fatigue of Rails: what remains to be done?,» Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- [4] K. Saurabh, «Study of Rail Breaks,» Lulea Railway Research Center, Lulea, Sweden, 2006.
- [5] A. A. Heshmat, «Fatigue Crack Growth and Fracture Behavior of Bainitic Rail Steels,» Tuskegee University, Tuskegee, 2011.
- [6] S. Beretta, M. Boniardi, M. Carboni και H. Desimone, «Engineering Failure Analysis,» τόμ. 12, αρ. 12, pp. 157-165, 2005.
- [7] S. S. Manson και G. R. Halford, Fatigue and Durability of Structural Materials. Materials Park, OH: ASM International, Ohio: ASM International, 2006, pp. 206-207.
- [8] A. Skyttebol, B. L. Josefson και J. W. Ringsberg, «Engineering Fracture Mechanics,» αρ. 72, pp. 271-285, 2005.
- [9] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2007, pp. 539-542.
- [10] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens και H. O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, New York: John Wiley & Sons, 2001, pp. 61-62.
- [11] P. Paris και F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws, Bethlehem: Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1963, pp. 528-534.
- [12] J. Schijve, Fatigue of Structures and Materials, 2nd επιμ., Plymouth: Springer, 2008, pp. 218-220.
- [13] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens και H. O. Fuchs, Meta Fatigue In Engineering, 2nd επιμ., New York: John Wiley& Sons, 2001, pp. 144-146.
- [14] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2007, pp. 575-579.
- [15] Α. Ι. Κατσάμας και Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, Βόλος: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, 2005, p. 192.

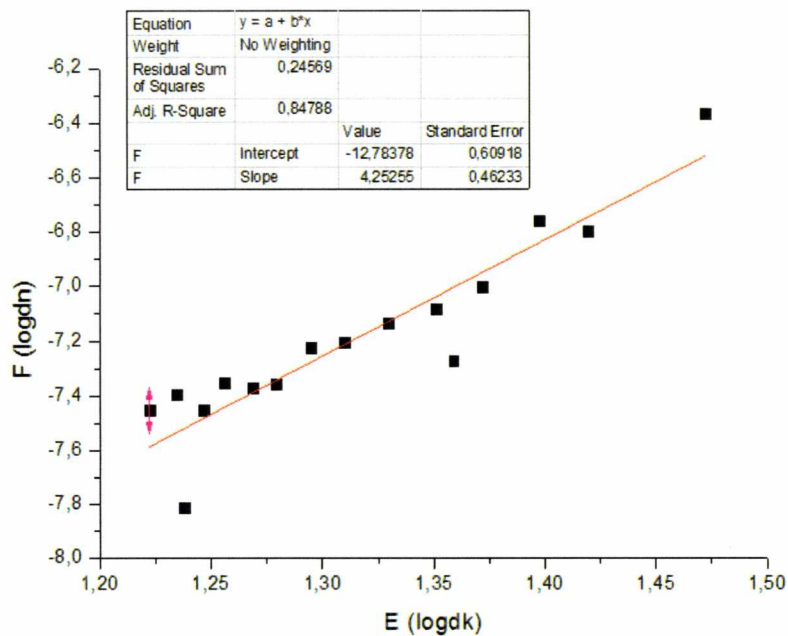
- [16] «ASTM International E 1820 - 01,» ASTM International, West Conshohocken UNITED STATES, 2003.
- [17] «European Standard prEN 13674-1:2002,» EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels, 2002.
- [18] «ASTM International E 399,» ASTM International, West Conshohocken United States, 2009.
- [19] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens και H. O. Fuchs, Metal Fatigue In Engineering, 2nd εκμ., New York: John Wiley & Sons, 2001, p. 300.

7 Παράρτημα

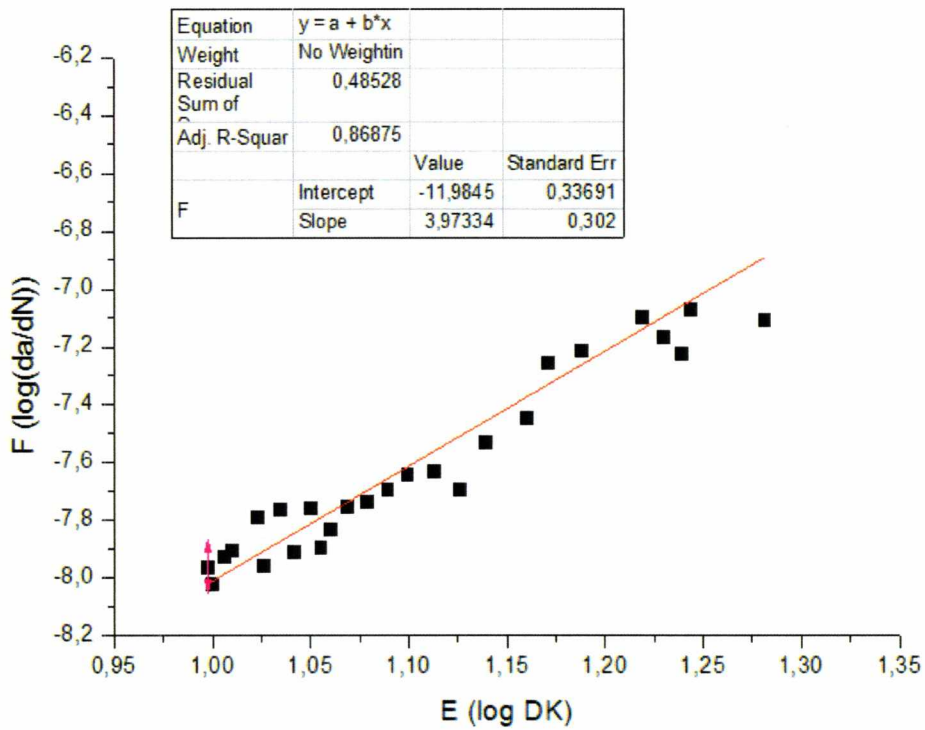
7.1 Προσέγγιση πειραματικών σημείων για την εξαγωγή των σταθερών του Paris



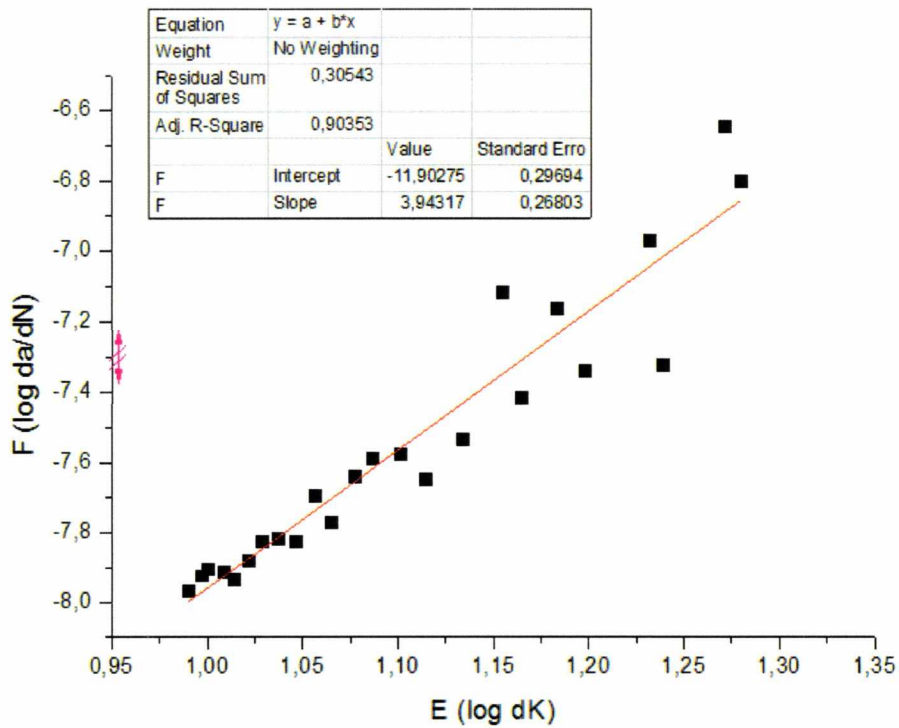
Διάγραμμα 7.1 Δοκίμιο 1



Διάγραμμα 7.2 Δοκίμιο 2



Διάγραμμα 7.3 Δοκίμο 3



Διάγραμμα 7.4 Δοκίμο 4



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000123966