

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΔΙΦΑΣΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ**

υπό

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟ ΚΛΕΠΚΟ

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

2010

Επιβλέπων: Λέκτορας Αλέξης Κερμανίδης



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

Αριθ. Εισ.: 8779/1
Ημερ. Εισ.: 09-09-2010
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιδετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΚΛΕ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΔΙΦΑΣΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ**

υπό

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟ ΚΛΕΠΚΟ

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

2010

Επιβλέπων: Λέκτορας Αλέξης Κερμανίδης

© 2010 Αλέξανδρος Κλέπκος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών 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

(Επιβλέπων)

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης

Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Αράβας

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Αλέξη Κερμανίδη, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ εκτενέστερα με το αντικείμενο των υλικών, προσφέροντας μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και για την πολύτιμη του βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Έλενα Καμούτση και την Άννα Ζερβάκη για την ευχάριστη συνεργασία τους στο που συνέβαλαν ουσιαστικά στην πραγματοποίηση της εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον Ανδρέα Τζαμτζή για το ενδιαφέρον του, τις συμβουλές του και για το ευχάριστο κλίμα που υπήρχε στο εργαστήριο.

Οφείλω πολλές ευχαριστίες στον αδερφό μου Κώστα για τις ατέλειωτες συμβουλές και την καθοδήγηση του όλα αυτά τα χρόνια.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συνεργάτες Χρήστο Σάββα, Πανταζή Τσούση, Αλέξη Παπαϊωάννου, Δημήτρη Παρίση, Γιάννη Ζυγογιώργο, Μιχάλη Γκοσλίοπουλο, Σωτήρη Μπάτο, Νίκο Κασίδη, Βασίλη Γιάγκο, Δημήτρη Τσιούλη, Δημήτρη Τσιόλια, Γιώργο Γαβότση και τις φίλες μου Βάσια Μοντζολή, Άννα Ρωμνάκη, Νάνσυ Μαγκουάιρ και Εύα Παράφορου για την ηθική τους υποστήριξη, αλλά και τις ατέλειωτες ώρες διασκέδασης και χαράς αυτά τα πέντε χρόνια.

Τέλος θέλω να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη στους γονείς μου Σωτήρη και Ντίνα για τη δυνατότητα που μου δώσανε να ζήσω πέντε αξέχαστα χρόνια στο Βόλο ως φοιτητής. Ως ελάχιστο δείγμα της ευγνωμοσύνης μου τους αφιερώνω την παρούσα εργασία.

Αλέξανδρος Κλέπκος

Περίληψη

Ο χάλυβας, λόγω των βασικών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων αντοχής και διαμορφωσιμότητάς του, χρησιμοποιείται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών που περιλαμβάνει κατασκευές όπως κτίρια, γέφυρες βιομηχανικές εφαρμογές, μεταφορές κτλ. Ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία η απαίτηση για χρήση προηγμένων υλικών με στόχο τη μείωση του βάρους των κατασκευών και ταυτόχρονη αύξηση της αντοχής τους, δίνει στην χρήση προηγμένων χαλύβων μεγάλες δυνατότητες.

Σημαντικό πρόβλημα σε τέτοιες κατασκευές που δέχονται δυναμικά φορτία είναι η κόπωση που με τον χρόνο λειτουργίας μειώνει την ικανότητα του υλικού να φέρει φορτία. Η βλάβη σε κόπωση εκκινεί αρχικά με τη μορφή μικρορωγμών στην επιφάνεια του υλικού και στη συνέχεια ως ρωγμή που διαδίδεται κάτω από κυκλικά φορτία μέχρι την αστοχία.

Η μελέτη για την έναρξη της ρωγμής σε κόπωση είναι πολύ σημαντική, καθώς μετά την έναρξη της ρωγμής μένει ελάχιστος χρόνος ζωής στο υλικό (συγκριτικά με την συνολική διάρκεια ζωής), γεγονός που σημαίνει ότι το υλικό οδεύει προς την αστοχία. Η γνώση των μηχανισμών έναρξη της ρωγμής των υλικών σε κόπωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερο σχεδιασμό των κατασκευών και αποφυγή της αστοχίας.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται αρχικά μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου παρουσιάζονται οι χάλυβες και οι ιδιότητές τους. Κατόπιν ακολουθεί πειραματική μελέτη που αφορά στην έναρξη ρωγμής κόπωσης σε χάλυβες υψηλής αντοχής, όπως είναι οι διφασικοί χάλυβες. Τέλος γίνεται η αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, και κατόπιν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κόπωσης των χαλύβων που μελετήθηκαν και εξάγονται συγκριτικά συμπεράσματα μεταξύ διφασικών χαλύβων και κοινού κατασκευαστικού χάλυβα St 37.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή – Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας	11
2	Χαρακτηριστικά χαλύβων υψηλής αντοχής	13
2.1	Γενικά στοιχεία.....	13
2.2	Χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης.....	15
2.3	Χάλυβες DP και TRIP.....	17
3	Κόπωση Χαλύβων	22
3.1	Τι είναι η κόπωση.....	22
3.1.1	Κόπωση χωρίς προϋπάρχουσες ρωγμές.....	24
3.1.2	Κόπωση με προϋπάρχουσες ρωγμές.....	27
3.2	Μηχανισμοί βλάβης στην κόπωση.....	30
4	Πειραματική Διαδικασία	33
4.1	Προετοιμασία δοκιμίων.....	34
4.2	Ιδιοσυσκευή συγκράτησης δοκιμίων.....	39
4.3	Πειράματα εφελκυσμού.....	41
4.4	Πειράματα κοπώσης.....	42
4.5	Διαδικασία προσδιορισμού έναρξης ρωγμής σε κόπωση (replica).....	43
4.6	Μελέτη της διάδοσης μικρο-ρωγμής σε μικροκλίμακα.....	44
5	Αποτελέσματα	45
5.1	Πειράματα εφελκυσμού.....	45
5.2	Πειράματα κόπωσης.....	47
5.2.1	Συμπεριφορά κόπωσης δοκιμίων με εγκοπή.....	52
5.2.2	Συμπεριφορά έναρξης ρωγμής.....	58
6	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	63
7	Συμπεράσματα	66
8	Βιβλιογραφία	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1 Μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων	47
Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίων χωρίς εγκοπή	48
Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμίων κόπωσης σε δοκίμια με εγκοπή.....	51
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα μήκους ρωγμής κύκλων φόρτισης που προέκυψαν από τα διακοπτόμενα πειράματα κόπωσης.....	60
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα ποσοστού διάρκειας ζωής σε κόπωση των δοκιμίων που αντιστοιχεί στην φάση της έναρξης ρωγμής.....	60

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Μικροδομή χάλυβα διπλής φάσεως. Με σκούρο χρώμα είναι ο μαρτενσίτης και με λευκό ο φερρίτης.....	18
Εικόνα 2.2 Μικροδομή χάλυβα TRIP (Fe-0.2C-1Mn-1Si). Με λευκό χρώμα απεικονίζεται ο παραμένων ωστενίτης.....	19
Εικόνα 2.3 Θερμική κατεργασία για την παραγωγή χάλυβα TRIP.....	20
Εικόνα 2.4 Συγκριτικό διάγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων για τους χάλυβες διπλής φάσεως, TRIP και υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης [1].....	21
Εικόνα 3.1 Στάδιο I και II στάδιο εξέλιξης της βλάβης, κάτω από συνθήκες κόπωσης χαμηλής συχνότητας.....	23
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα μέγιστης τάσης σ_{max} σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης N_f , όπου διακρίνονται οι περιοχές ολιγοκυκλικής κόπωσης, πολυκυκλικής κόπωσης και διαρκούς αντοχής σε κόπωση.....	25
Εικόνα 3.3 Πλάτος τάσης σε συνάρτηση με την διάρκεια ζωής για χάλυβα και αλουμίνιο (καμπύλη S-N) [4].....	26
Εικόνα 3.4 Ταχύτητα αναπτύξεως της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK [3].....	29
Εικόνα 3.5(α) Ανάπτυξη ρωγμής με απλή διάτμηση.....	31
Εικόνα 4.1 Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού Instron του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.....	34
Εικόνα 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών εφελκυσμού των χαλύβων σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 8 M.....	35
Εικόνα 4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών κόπωσης των χαλύβων σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 466.....	35
Εικόνα 4.4 Σχήμα και διαστάσεις των δοκιμών κόπωσης των χαλύβων με εγκοπή.....	36
Εικόνα 4.5 Διάγραμμα K_I συναρτήσει του λόγου $2*t/D$, για επίπεδα δοκίμια [7].....	38
Εικόνα 4.6 Το δοκίμιο στις ιδιοσυσκευές συγκράτησης.....	40
Εικόνα 4.7 Το δοκίμιο στην μηχανή εφελκυσμού.....	40
Εικόνα 4.8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ιδιοσυσκευής συγκράτησης.....	41
Εικόνα 4.9 Καμπύλη ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης σε εφελκυσμό [3].....	42

Εικόνα 5.1 Ονομαστικό διάγραμμα σ-ε για τον χάλυβα DP 500.....	45
Εικόνα 5.2 Ονομαστικό διάγραμμα σ-ε για τον χάλυβα DP 600.....	46
Εικόνα 5.3 Ονομαστικό διάγραμμα σ-ε για τον χάλυβα St 37	46
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα S-N για τον χάλυβα DP 500 χωρίς εγκοπή.....	48
Εικόνα 5.5 Διάγραμμα S-N για τον χάλυβα DP 500 με εγκοπή.....	49
Εικόνα 5.6 Διάγραμμα S-N του χάλυβα St 37 με εγκοπή	49
Εικόνα 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα S-N όλων των υλικών.....	51
Εικόνα 5.8 Αποτύπωμα ρέπλικας του 2 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 200X μετά από 19.000 κύκλους.....	52
Εικόνα 5.9 Αποτύπωμα ρέπλικας του 2 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 200X μετά από 21.000 κύκλους.....	53
Εικόνα 5.10 Αποτύπωμα ρέπλικας του 6 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 100.000 κύκλους.....	53
Εικόνα 5.11 Αποτύπωμα ρέπλικας του 6 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 110.000 κύκλους, όπου διακρίνεται η διάδοση του ρήγματος.....	54
Εικόνα 5.12 Αποτύπωμα ρέπλικας του 6 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 120.000 κύκλους.....	54
Εικόνα 5.13 Αποτύπωμα ρέπλικας του 7 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 115.000 κύκλους, όπου φαίνεται η έναρξη της ρωγμής.....	55
Εικόνα 5.14 Αποτύπωμα ρέπλικας του 7 ^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 125.000 κύκλους, όπου φαίνεται η μεγάλη διάδοση της ρωγμής.....	55
Εικόνα 5.15 Αποτύπωμα ρέπλικας του 5 ^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 70.000 κύκλους, όπου φαίνεται πρώτη φορά η έναρξη της ρωγμής	56
Εικόνα 5.16 Αποτύπωμα ρέπλικας του 5 ^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 80.000 κύκλους, με την διάδοση της ρωγμής	56
Εικόνα 5.17 Αποτύπωμα ρέπλικας του 8 ^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X, με την έναρξη της ρωγμής στους 70.000 κύκλους	57
Εικόνα 5.18 Αποτύπωμα ρέπλικας του 8 ^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X, με την διάδοση της ρωγμής στους 80.000 κύκλους.....	57

Εικόνα 5.19 Αποτύπωμα ρέπλικας του 8 ^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X, με την διάδοση της ρωγμής στους 90.000 κύκλους.....	58
Εικόνα 5.20 Μικροδομή του χάλυβα DP 500.....	61
Εικόνα 5.21 Μικροδομή του χάλυβα DP 500 στην ρωγμή.....	61
Εικόνα 5.22 Μικροδομή του χάλυβα St 37.....	62
Εικόνα 5.23 Μικροδομή του χάλυβα St 37 στην ρωγμή.....	62
Εικόνα 6.1 Διάδοση της μικρορωγμής (σε μm) κάθε υλικού συναρτήσει των κύκλων κόπωσης.....	64

1 Εισαγωγή – Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Στις μηχανολογικές κατασκευές η επιλογή του κατάλληλου υλικού γίνεται με βάση κριτήρια, όπως το κόστος, οι μηχανικές του ιδιότητες, η διάρκεια ζωής του, η φιλικότητα προς το περιβάλλον κτλ.

Ειδικότερα σε κατασκευές ή εξαρτήματα μηχανών που προορίζονται να παραλαμβάνουν δυναμικά μηχανικά φορτία, είναι απαραίτητο για τον μηχανικό να γνωρίζει τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής του υλικού σε κόπωση. Οι τιμές αυτές όσο δεν ξεπερνιούνται κατά την λειτουργία του, εξασφαλίζουν ότι το δομικό στοιχείο ή εξάρτημα δεν θα υποστεί αστοχία. Με τον όρο αστοχία περιγράφεται η αδυναμία ενός δομικού στοιχείου μηχανών να συνεχίσει να επιτελεί ομαλά, αποτελεσματικά και με ασφάλεια την λειτουργία του. Η αντοχή σε κόπωση του υλικού, προσδιορίζεται με βάση την εργαστηριακή μηχανική δοκιμή κόπωσης και τις καμπύλες S-N σε δείγματα υλικού περιορισμένης κλίμακας.

Η διάρκεια ζωής σε κόπωση του υλικού καθορίζεται από το στάδιο της δημιουργίας μικρορωγμής και εξέλιξης της σε μακρορωγμή (με μήκος συνήθως $>0,5$ mm) και το στάδιο της διάδοσης της μακρορωγμής μέχρι την αστοχία. Το πρώτο στάδιο αποτελεί συνήθως το 70-90% της διάρκειας ζωής σε κόπωση. Γίνεται έτσι αντιληπτό πόσο σημαντική είναι για ένα υλικό η ικανότητα του να αντιστέκεται στην έναρξη ρωγμών κόπωσης.

Οι προηγμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, δίνουν τη δυνατότητα χρήσης δομικών στοιχείων μικρότερου πάχους και συνεισφέρουν στην ελάττωση του συνολικού βάρους της κατασκευής. Τέτοιοι χάλυβες, όπως οι πολυφασικοί χάλυβες, απαιτείται εκτός άλλων ιδιοτήτων να παρουσιάζουν και καλή συμπεριφορά σε κόπωση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετάται πειραματικά η συμπεριφορά έναρξης ρωγμής κόπωσης σε διφασικούς χάλυβες υψηλής αντοχής (χάλυβες dual-phase DP) και τα αποτελέσματα

συγκρίνονται με τη συμπεριφορά κόπωσης ενός κοινού κατασκευαστικού χάλυβα (St 37).

Η μελέτη της έναρξης ρωγμής στο υλικό γίνεται με χρήση της πειραματικής τεχνικής αποτυπωμάτων ρέπλικας που χρησιμοποιούνται στα δοκίμια κατά την δοκιμή κόπωσης. Ο προσδιορισμός της μικρορωγμής έγινε με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την ικανότητα των χαλύβων DP να φέρουν αντίσταση στην έναρξη ρωγμής σε κόπωση.

2 Χαρακτηριστικά χαλύβων υψηλής αντοχής

2.1 Γενικά στοιχεία

Ο χάλυβας σήμερα είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα μέταλλα και βασικό δομικό στοιχείο σε πάρα πολλές κατασκευαστικές δραστηριότητες καθώς αποτελούν πάνω από το 80% των βιομηχανικών κραμάτων. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται επίσης σε μεγάλο βαθμό στο χαμηλό τους κόστος και στην σχετική ευκολία παραγωγής χαλύβων σε μεγάλες ποσότητες και με ακριβείς προδιαγραφές. Μάλιστα παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων με αντοχές που κυμαίνονται από τα 200 έως και τα 5.000 MPa. Επιπλέον πρόσθετοι λόγοι για την υπεροχή των χαλύβων είναι τα μεγάλα παγκόσμια αποθέματα μεταλλεύματος, που ανάγονται εύκολα στη μεταλλική κατάσταση σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανακυκλώσεως του παλαιοσιδήρου, καθώς και το σημείο τήξεως του σιδήρου (1539° C) που επιτρέπει τη θερμική ενεργοποίηση διεργασιών σε θερμοκρασίες άνω των 400° C που επιτυγχάνονται σχετικά εύκολα και ελέγχονται βιομηχανικά.

Ο χάλυβας είναι ίσως το πιο σύνθετο μεταλλικό κράμα. Η ευρεία εμπειρική γνώση που έχει συσσωρευτεί δεν έχει οδηγήσει στην πλήρη κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς του. Μόνο πρόσφατα υπήρξε πρόοδος και ουσιαστική κατανόηση χαλύβων οι οποίοι ανταποκρίνονται σε ειδικές απαιτήσεις.

Αναφερόμενοι στον χάλυβα, εννοούμε τα κράματα του σιδήρου (Fe), στα οποία περιέχεται άνθρακας (C). Το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο που διαμορφώνει τη μικροδομή και τις ιδιότητες του χάλυβα είναι ο άνθρακας. Οι χάλυβες έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 2% και ανάλογα με την περιεκτικότητά τους διακρίνονται σε ευτηκτοειδείς (όταν %C=0,8), υποευτηκτοειδείς (όταν %C<0,8) και

υπερευθηκτοειδείς (όταν $\%C > 0,8$). Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα αυξάνονται η σκληρότητα, η αντοχή και η εμβαιπτότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα. Τα κράματα περιεκτικότητας άνθρακα άνω του 2% ονομάζονται χυτοσίδηροι.

Άλλα σημαντικά κραματικά στοιχεία που περιέχονται στους χάλυβες και επηρεάζουν την συμπεριφορά τους είναι:

το μαγγάνιο (Mn): προστίθεται κυρίως για την αποθείωση,

το πυρίτιο (Si): προστίθεται για την αποξείδωση του χάλυβα,

ο φώσφορος (P): παρουσία του πάνω από κάποιο όριο οδηγεί σε μείωση της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας, ιδιαίτερα της αντοχής σε κρούση κυρίως χάλυβες βαφής και επαναφοράς,

το θείο (S): προκαλεί μείωση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας, της αντοχής σε κρούση και της συγκολλησιμότητας και υποβαθμίζει την κατεργασιμότητα,

το χρώμιο (Cr): τα καρβίδια του χρωμίου αυξάνουν την σκληρότητα και τις αντιτριβικές ιδιότητες του χάλυβα, επίσης αυξάνει την εμβαιπτότητα και την αντοχή σε οξείδωση και διάβρωση,

το νικέλιο (Ni): προσδίδει ολκιμότητα και αυξάνει την δυσθραυστότητα, ενώ προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας μεταβάσεως,

το μολυβδαίνιο (Mo): τα καρβίδια του μολυβδαινίου αυξάνουν την εμβαιπτότητα των χαλύβων και προσθήκη τους σε ανοξειδωτους χάλυβες αυξάνουν και την διάβρωση,

το άζωτο (N): αυξάνει την σκληρότητα και την αντοχή, ενώ μειώνει την ολκιμότητα

το κοβάλτιο (Co): μειώνει την εμβαιπτότητα του χάλυβα και έχει μικρή επίδραση στην σκληρότητα του, συμβάλει όμως και στην διατήρηση της μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες

το βολφράμιο (W), το βανάδιο (V), το τιτάνιο (Ti) και το νιόβιο (Nb): τα στοιχεία αυτά συντελούν στη αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής και ταυτόχρονα περιορίζουν την ανάπτυξη των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ειδικότερα στις μηχανολογικές κατασκευές βασικό κριτήριο επιλογής είναι και η μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Ο όρος αυτός αφορά τον τομέα της μεταλλουργίας που ασχολείται με την απόκριση των υλικών σε μηχανικά φορτία λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες λειτουργίας και περιβάλλοντος. [1]

2.2 Χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (High-strength low-alloy steels) είναι σχεδιασμένοι για να προσφέρουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη αντίσταση στην ατμοσφαιρική διάβρωση από τους κοινούς χάλυβες. Η χημική σύνθεση ενός συγκεκριμένου χάλυβα υψηλής αντοχής μπορεί να διαφέρει για διαφορετικά πάχη υλικών για να συναντούν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα (0,05 ~ 0,25 %C) με σκοπό να έχουν επαρκή διαμορφωσιμότητα και συγκολλησιμότητα, και περιέχουν μέχρι 2% μαγνήσιο. Μικρές ποσότητες χρωμίου, νικελίου, μολυβδενίου, χαλκού, αζώτου, βαναδίου, νιοβίου, τιτανίου και ζirkονίου χρησιμοποιούνται για διάφορους συνδυασμούς.

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι κυρίως θερμής έλασης στα συνήθη προϊόντα (φύλλα, ταινίες, μπάρες, πλάκες και κατασκευαστικά τμήματα) και θερμαίνονται συνήθως στην κατάσταση έλασης. Ωστόσο, η παραγωγή προϊόντων χαλύβων υψηλής αντοχής θερμής έλασης, μπορεί να περιέχει ειδικές θερμές διεργασίες που βελτιώνουν περαιτέρω τις μηχανικές ιδιότητες κάποιων χαλύβων υψηλής αντοχής.

Επιπλέον των προϊόντων θερμής ελάσεως οι χάλυβες υψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή χαλυβδοταινιών ψυχρής ελάσεως και σφυρήλατων. Το κύριο πλεονέκτημα των σφυρήλατων χαλύβων υψηλής αντοχής (όπως τα προϊόντα θερμής έλασης των χαλύβων υψηλής αντοχής) είναι ότι το όριο

διαρροής κυμαίνεται από 275 μέχρι 485 MPa ή μπορεί να επιτευχθεί και μεγαλύτερο χωρίς θερμική κατεργασία. Βασικά συνθετικά των εν λόγω σφυρήλατων μικροκραμάτων είναι 0,3 - 0,4% C και 1,4 - 1,6% Mn. Έχουν σχεδιαστεί επίσης μπαινιτικοί, χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, σφυρήλατοι χάλυβες υψηλής αντοχής.

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής σχεδιάζονται για να παρέχουν συγκεκριμένους επιθυμητούς συνδυασμούς ιδιοτήτων, όπως αντοχή, σκληρότητα, διαμορφωσιμότητα, συγκολλησιμότητα και αντίσταση στην ατμοσφαιρική διάβρωση. Αυτοί οι χάλυβες δε θεωρούνται κραματικοί χάλυβες, αν και οι επιθυμητές τους ιδιότητες πετυχαίνονται με την χρήση μικρών κραματικών προσθηκών. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής κατατάσσονται σαν ξεχωριστή κατηγορία χαλύβων. Αυτή η ξεχωριστή κατηγοριοποίηση των προϊόντων των χαλύβων υψηλής αντοχής αντανακλά στο γεγονός, ότι οι χάλυβες υψηλής αντοχής κοστολογούνται γενικά βάσει της τιμής βάσης των χαλύβων άνθρακα και όχι των κραματικών χαλύβων.

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

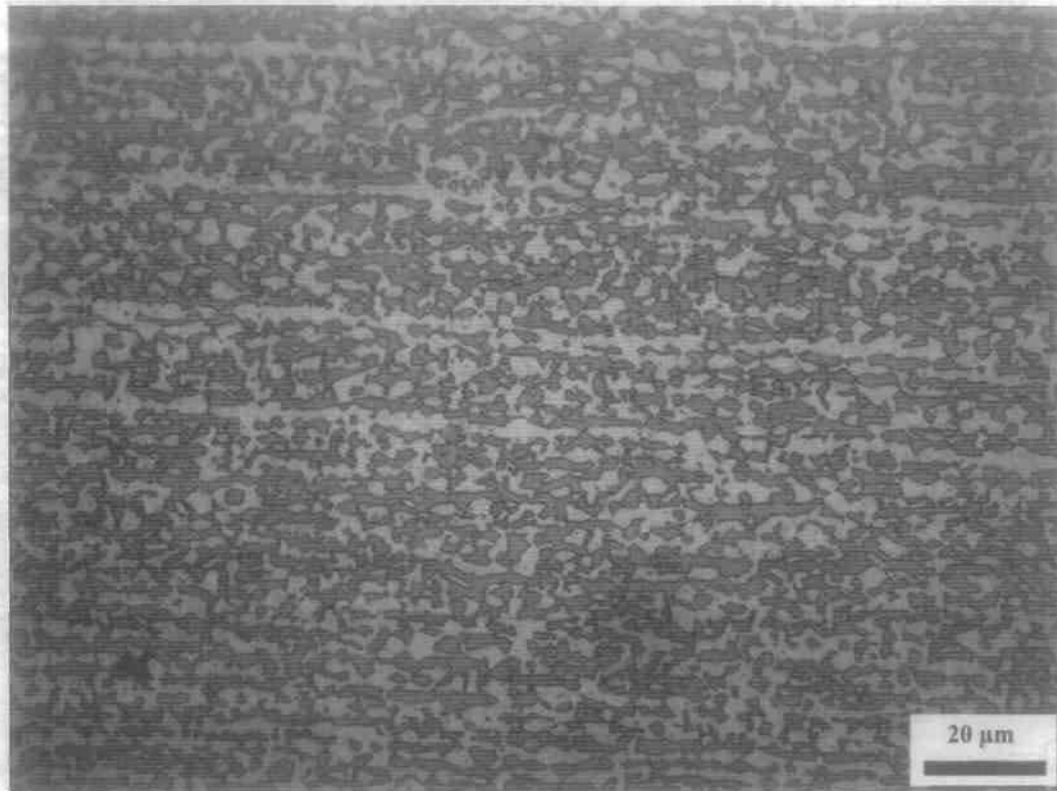
- Διαβρωτικοί χάλυβες
- Μικροκράματα φερριτο-περλιτικοί χάλυβες
- Περλιτικοί χάλυβες ελάσεως
- Χάλυβες ινώδους φερρίτη
- Χάλυβες εγκλεισμάτων ελεγχόμενου σχήματος

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν πληθώρα εφαρμογών που περιλαμβάνουν αυτοκινητοδρόμους μεγάλης κυκλοφορίας και εκτός δρόμου οχήματα, κατασκευαστικά και αγροτικά μηχανήματα, βιομηχανικό εξοπλισμό, δεξαμενές αποθήκευσης, ορυχεία και βαγόνια σιδηροδρόμων, μικρά φορτηγά, γλοοκοπτικές μηχανές και αυτοκίνητα για το χιόνι και συστατικά επιβατικών αυτοκινήτων. Γέφυρες, πύργοι μετάδοσης ρεύματος, δοκάρια κτηρίων και πλάκες είναι κάποιες επιπλέον χρήσεις αυτών των χαλύβων.

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου χάλυβα υψηλής αντοχής εξαρτάται από τις απαιτήσεις των εφαρμογών συμπεριλαμβανομένου τη μείωση του πάχους, την αντίσταση στην διάβρωση, τη διαμορφωσιμότητα και τη συγκολλησιμότητα. Για πολλές εφαρμογές, ο ποιό σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία της επιλογής είναι ο ευνοϊκός λόγος δύναμης προς βάρος των χάλυβων υψηλής αντοχής συγκρινόμενος με αυτόν των συμβατικών χάλυβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει οδηγήσει στην αυξημένη τους χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία. [2]

2.3 Χάλυβες DP και TRIP

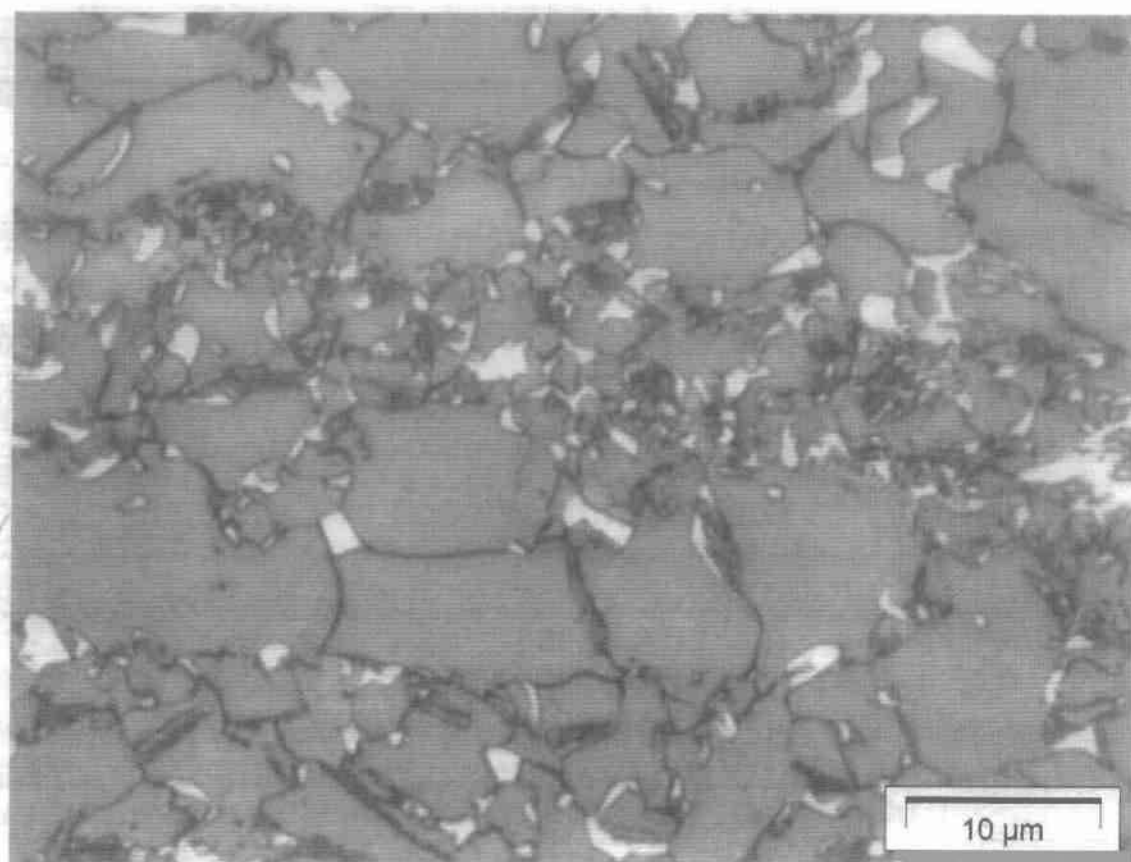
Όπως δηλώνει το όνομα τους οι χάλυβες DP (Dual-Phase Steels) αποτελούνται από μίγμα δύο φάσεων, μαλακού φερρίτη (μήτρα) και διασπορά σκληρού μαρτενσίτη. Χαρακτηριστική εικόνα μικροδομής χάλυβων DP δίνεται στην **Εικόνα 2.1**. Είναι ο συνδυασμός αυτός που προσδίδει στον χάλυβα εξαιρετικές ιδιότητες. η αντοχή των χάλυβων αυτών είναι ανάλογη του ποσοστού του μαρτενσίτη που περιέχουν. Το κύριο όμως χαρακτηριστικό τους είναι το σχετικά χαμηλό όριο διαρροής, λόγω του φερρίτη, σε συνδυασμό με μεγάλη εργοσκήρυνση, λόγω του μαρτενσίτη. Τα χαρακτηριστικά αυτά οδηγούν σε σταθεροποίηση της πλαστικής ροής και σε μεγάλες ομοιόμορφες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα την αύξηση της διαμορφωσιμότητας. Η κατεργασία των χάλυβων DP περιλαμβάνει ενδοκρίσιμη ανόπτηση στην διφασική περιοχή $\alpha+\gamma$ (φερρίτης + ωστενίτης), μεταξύ των θερμοκρασιών A_1 και A_3 (θερμοκρασία ευτηκτοειδούς αντίδρασης, 723°C , και θερμοκρασία μετασχηματισμού από φερρίτη σε ωστενίτη αντίστοιχα). Κατά την διάρκεια της ανοπτήσεως, ο άνθρακας διαχέεται στον ωστενίτη αυξάνοντας έτσι την εμβαπτότητά του. Έτσι κατά την ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη.



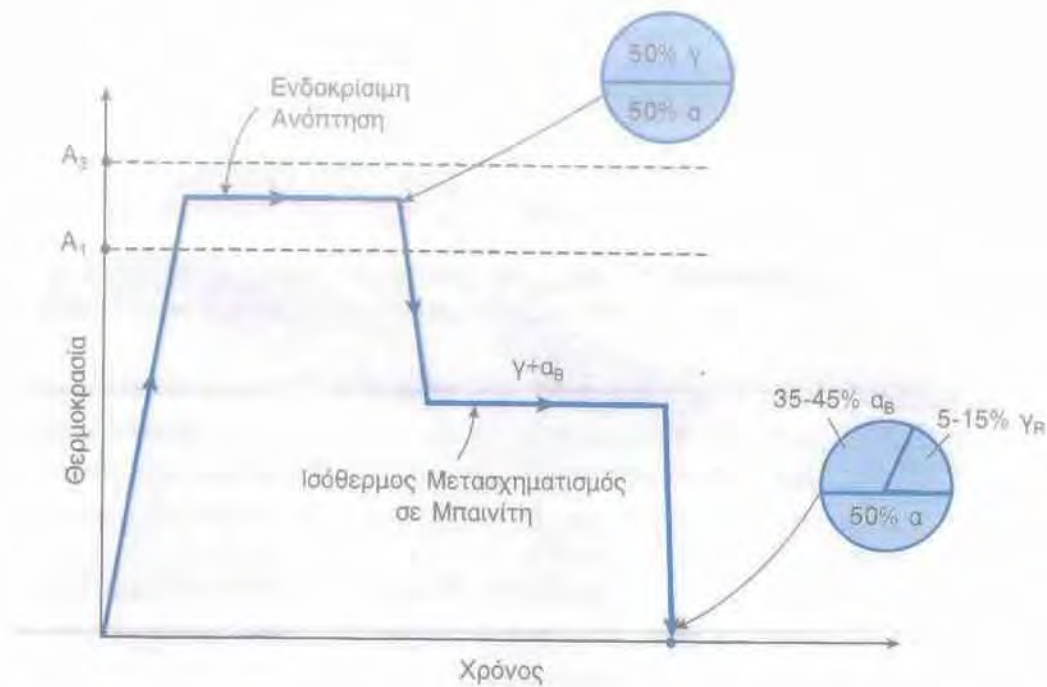
Εικόνα 2.1 Μικροδομή χάλυβα διπλής φάσεως. Με σκούρο χρώμα είναι ο μαρτενσίτης και με λευκό ο φερρίτης

Οι χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity Steels) διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) τους πλήρως ωστενιτικούς χάλυβες TRIP και β) τους πολυφασικούς χάλυβες TRIP με χαμηλή κραμάτωση. Οι πρώτοι διακρίνονται για την εξαιρετική δυσθραυστότητα που διαθέτουν. Η δεύτερη κατηγορία χάλυβων TRIP διακρίνεται κυρίως για την εξαιρετική διαμορφωσιμότητα. Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν τρεις φάσεις: φερρίτη, μαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί με την εφαρμογή μηχανικών τάσεων ή πλαστικών παραμορφώσεων. Το φαινόμενο TRIP συνοδεύεται από σταθεροποίηση της πλαστικής ροής με συνέπεια την αύξηση της ομοιόμορφης παραμορφώσεως και διαμορφωσιμότητας. Η πλαστικότητα μετασχηματισμού εμφανίζεται κατά την ψυχρή διαμόρφωση ενός χάλυβα που περιέχει διασπορά παραμένοντα ωστενίτη. Κατά την διαμόρφωση, ο παραμένων ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη αυξάνοντας έτσι την διαμορφωσιμότητα του

χάλυβα. Όσον αφορά στην κατεργασία για την διαμόρφωση της μικροδομής των χαλύβων TRIP, η σημαντικότερη προϋπόθεση είναι η διατήρηση διασποράς ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου. Η αρχική μικροδομή ενός χάλυβα TRIP τυπική σύσταση Fe-0.2C-1Mn-1Si είναι φερριτοπερλιτική (**Εικόνα 2.2**). Ο χάλυβας υφίσταται ενδοκρίσιμη ανόπτηση, μεταξύ των θερμοκρασιών A_1 και A_3 , για τον σχηματισμό μίγματος φερρίτη και ωστενίτη σε ποσοστά περίπου 50%. Στη συνέχεια ο χάλυβας φέρεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία για τον ισόθερμο μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαινίτη (**Εικόνα 2.3**).



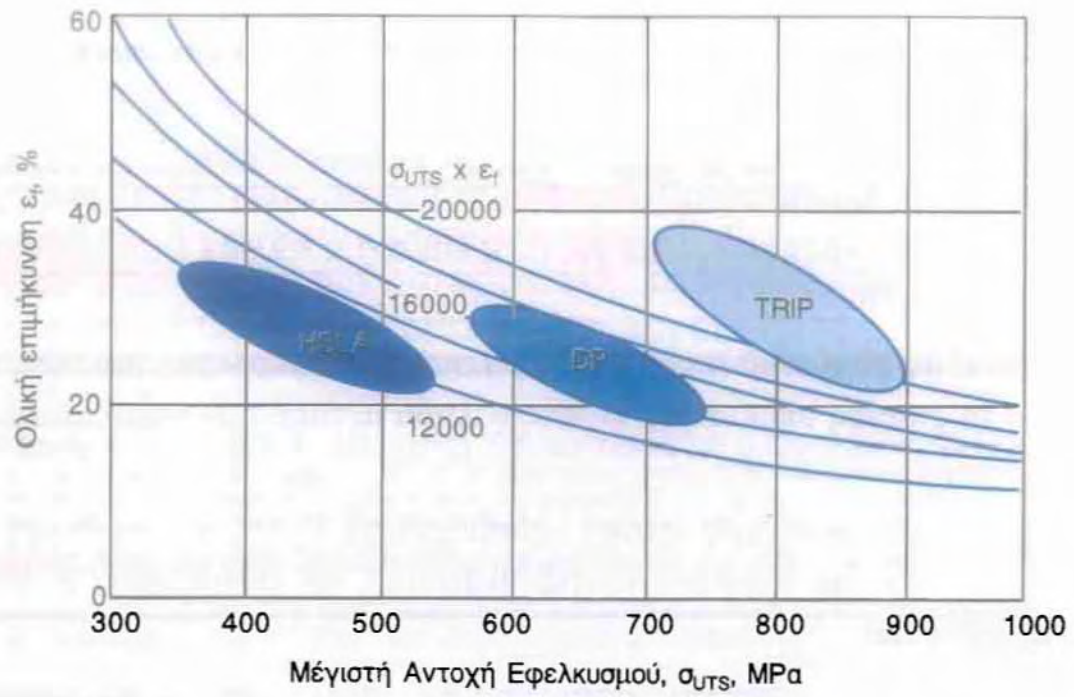
Εικόνα 2.2 Μικροδομή χάλυβα TRIP (Fe-0.2C-1Mn-1Si). Με λευκό χρώμα απεικονίζεται ο παραμένων ωστενίτης.



Εικόνα 2.3 Θερμική κατεργασία για την παραγωγή χάλυβα TRIP

Λόγο της σχετικά υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο, αποτρέπεται ο σχηματισμός σεμενίτη κατά την διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού. Έτσι ο άνθρακας που αποβάλλεται από τον μπαινίτη περιέρχεται στον υπολειπόμενο ωστενίτη γ_R . Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα μειώνει την θερμοκρασία M_s σε τιμές κάτω από την θερμοκρασία δωματίου. Η ισόθερμη παραμονή στους 400°C διακόπτεται πριν ολοκληρωθεί ο μπαινιτικός μετασχηματισμός και να παραμείνει ένα ποσοστό της τάξεως του 10% ωστενίτη. Ο ωστενίτης αυτός δε μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη κατά την ψύξη του χάλυβα σε θερμοκρασία δωματίου, διότι έχει σταθεροποιηθεί από τον άνθρακα. Είναι αυτός ο παραμένων ωστενίτης, που κατά την ψυχρή διαμόρφωση του χάλυβα εμφανίζει το φαινόμενο TRIP και οδηγεί σε αύξηση της διαμορφωσιμότητας.

Στην **Εικόνα 2.4** δίνονται συγκριτικά οι μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού για τις τρεις κατηγορίες χαλύβων που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 2.4 Συγκριτικό διάγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων για τους χάλυβες διπλής φάσεως, TRIP και υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης [1].

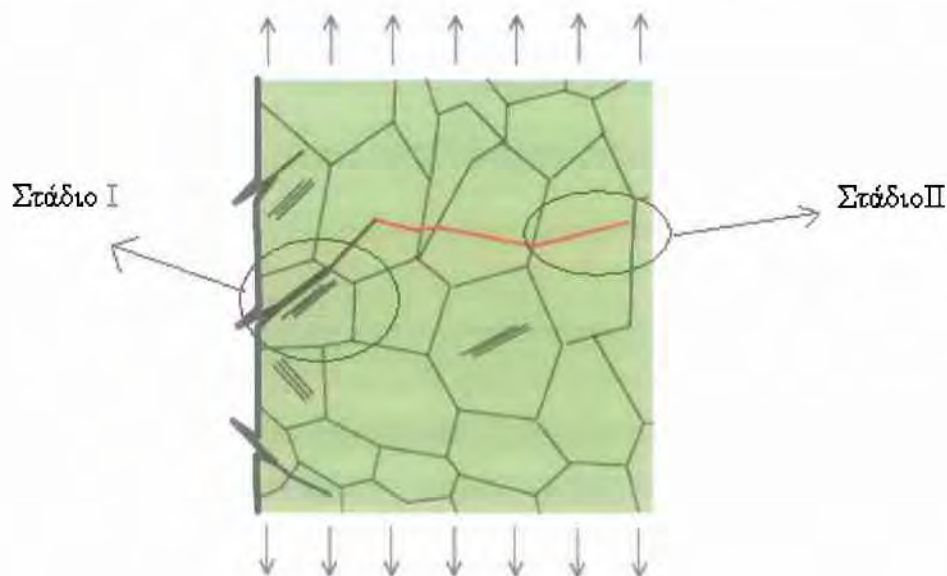
3 Κόπωση Χαλύβων

3.1 Τι είναι η κόπωση

Κόπωση ενός υλικού έχουμε όταν μία κατασκευή υφίσταται επαναλαμβανόμενες κυκλικές μηχανικές τάσεις, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν αστοχίες σε τάσεις μικρότερες του ορίου θραύσης, σ_{UTS} , ή ακόμη και μικρότερες του ορίου διαρροής, σ_y . Η κόπωση έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά στην φόρτιση, η οποία είναι κυκλική, δηλαδή το υλικό υποβάλλεται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η βλάβη που προκαλείται στο υλικό. Η βλάβη είναι ένας γενικός όρος που μπορεί να αντιστοιχεί σε τοπική πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό μικρορωγμών, καθώς και σχηματισμό και διάδοση μίας κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται από την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Η τελική, γρήγορη θραύση επέρχεται όταν η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, έτσι ώστε να ικανοποιείται η κρίσιμη συνθήκη θραύσεως. Έτσι ενώ κατά την στατική φόρτιση η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται με αύξηση της τάσεως, στην κόπωση η συνθήκη ικανοποιείται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Ενώ στην στατική φόρτιση η αστοχία από θραύση γίνεται ακαριαία, στην κόπωση η αστοχία απαιτεί χρόνο, έως ότου η ρωγμή αποκτήσει κρίσιμο μέγεθος. Έτσι στην κόπωση μιλάμε για διάρκεια ζωής του υλικού. Την διάρκεια ζωής δεν τη μετράμε σε μέρες ή χρόνια, αλλά σε κύκλους φορτίσεως και την συμβολίζουμε με N_f .

Στην κόπωση διακρίνουμε δύο φάσεις της διάρκειας ζωής. Η πρώτη φάση αποτελείται από τους κύκλους N_i , που απαιτούνται για την δημιουργία της μικρορωγμής και διάδοσης της μέχρι ένα μήκος της τάξης μεγέθους μεγαλύτερο από 2-3 διαμέτρους κόκκων. Αυτό είναι το Στάδιο I της συσσώρευσης βλάβης κόπωσης. Η μικρορωγμή δημιουργείται από τα χαρακτηριστικά ολίσθησης σε μικροκλίμακα του υλικού και έχει την διεύθυνση των επιπέδων ολίσθησης. Στο Στάδιο II η ρωγμή έχει μεγαλώσει και διαδίδεται κάθετα στην εφαρμοζόμενη τάση. Εδώ αντιστοιχεί η

δεύτερη φάση της διάρκειας ζωής. Η δεύτερη φάση αποτελείται από τους κύκλους N_p , που απαιτούνται για την διάδοση της ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος αστοχίας. Η διάρκεια ζωής είναι επομένως το άθροισμα των φάσεων N_i , N_p ($N_f = N_i + N_p$). Τα στάδια I και II συσσώρευσης βλάβης στην κόπωση φαίνονται στην **Εικόνα 3.1**.



Εικόνα 3.1 Στάδιο I και II στάδιο εξέλιξης της βλάβης, κάτω από συνθήκες κόπωσης χαμηλής συχνότητας

Στο σημείο αυτό είναι καλό να διακρίνουμε δύο μεθοδολογίες που αφορούν την ανάλυση και τον σχεδιασμό για την διαχείριση της κόπωσης στις κατασκευές. Σε ελαφρές, σύνθετες κατασκευές, όπως αεροναυπηγικές κατασκευές, δεχόμαστε ότι προϋπάρχουν ρωγμές με μήκος τουλάχιστον ίσο με το όριο ανίχνευσης των μη καταστρεπτικών μεθόδων (NDT). Στην περίπτωση αυτή $N_i=0$ και η διάρκεια ζωής είναι οι κύκλοι φορτίσεως για την ανάπτυξη της προϋπάρχουσας ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος. Αυτές οι κατασκευές σχεδιάζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία ανοχής στην βλάβη (damage tolerance ή defect tolerance). Αντίθετα, σε κατασκευαστικά στοιχεία όπως αυτά των μηχανών (άξονες, οδοντώσεις, έδρανα κύλισης κλπ.), θεωρούμε ότι δεν προϋπάρχουν ρωγμές (damage free ή defect free). Στην περίπτωση αυτή το N_i μπορεί να είναι ένα μεγάλο ποσοστό του N_f . Το N_i αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος των επιβαλλόμενων κυκλικών φορτίων και εξαρτάται από την

κατάσταση της επιφάνειας του υλικού. Σε πολύ λεία δοκίμια το N_i μπορεί να αποτελεί έως και το 90% της διάρκειας ζωής, ενώ σε διαβρωμένα δοκίμια, ή σε δοκίμια που έχουν επιφανειακές εγχοπές και γενικότερα σημεία συγκεντρώσεως των τάσεων, το N_i μπορεί να είναι μόλις το 10% της διάρκειας ζωής.

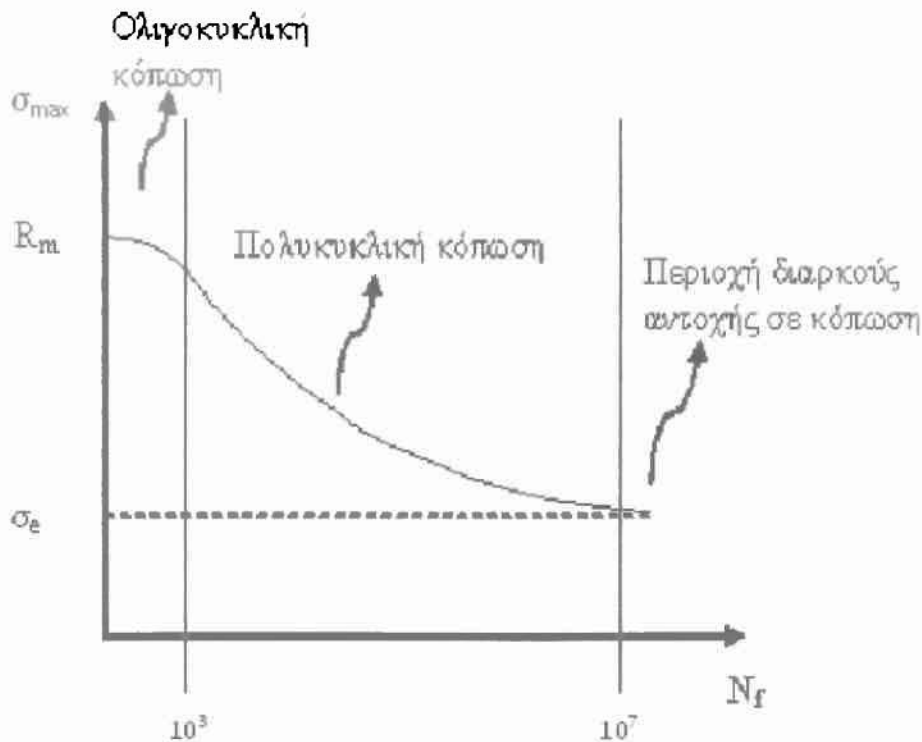
Παρακάτω αναλύονται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι δύο βασικές κατηγορίες κόπωσης που αφορούν σε κυκλική καταπόνηση χωρίς και με προϋπάρχουσες ρωγμές.

3.1.1 Κόπωση χωρίς προϋπάρχουσες ρωγμές

Στη μελέτη της κόπωσης χωρίς προϋπάρχουσες ρωγμές γίνονται δύο βασικές υποθέσεις:

- Ότι δεν υπάρχουν ρωγμές στο υλικό
- Ότι η διάρκεια ζωής δίνεται από τη σχέση: $N_f = N_i + N_p$

Η κόπωση υποδιαιρείται σε δύο περιοχές, την πολυκυκλική κόπωση (High Cycle Fatigue – HCF) και την ολιγοκυκλική κόπωση (Low Cycle Fatigue – LCF) **Εικόνα 3.2**. Η πρώτη αφορά αρκετά χαμηλές καταπονήσεις, έτσι ώστε η διάρκεια ζωής να υπερβαίνει τους 10^3 με 10^4 κύκλους. Στην περίπτωση αυτή οι κυκλικές τάσεις προκαλούν κυρίως ελαστικές παραμορφώσεις. Παραδείγματα κατασκευών που σχεδιάζονται με γνώμονα την πολυκυκλική κόπωση αποτελούν τα περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών, καθώς και στοιχεία που υπόκεινται σε ταλαντώσεις. Αντίθετα, η ολιγοκυκλική κόπωση αφορά αρκετά υψηλές καταπονήσεις, έτσι ώστε η διάρκεια ζωής να είναι μικρότερη από 10^3 με 10^4 κύκλους. Οι κυκλικές τάσεις, στην περίπτωση αυτή, προκαλούν σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Παραδείγματα κατασκευών που σχεδιάζονται με γνώμονα την ολιγοκυκλική κόπωση αποτελούν στοιχεία των πυρηνικών αντιδραστήρων και πολλά σκαπτικά και χωματουργικά μηχανήματα κοπτοκά εργαλεία, τα οποία περιστασιακά υπόκεινται σε υπερφορτίσεις που είναι δυνατόν να προκαλέσουν πλαστικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα μέγιστης τάσης σ_{\max} σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης N_f , όπου διακρίνονται οι περιοχές ολιγοκυκλικής κόπωσης, πολυκυκλικής κόπωσης και διαρκούς αντοχής σε κόπωση

Στην πολυκυκλική κόπωση η κυκλική φόρτιση χαρακτηρίζεται από το εύρος τάσεως $\Delta\sigma$, το πλάτος σ_a , τη μέση τάση σ_m και τον λόγο των τάσεων R , όπου

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$$

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$$

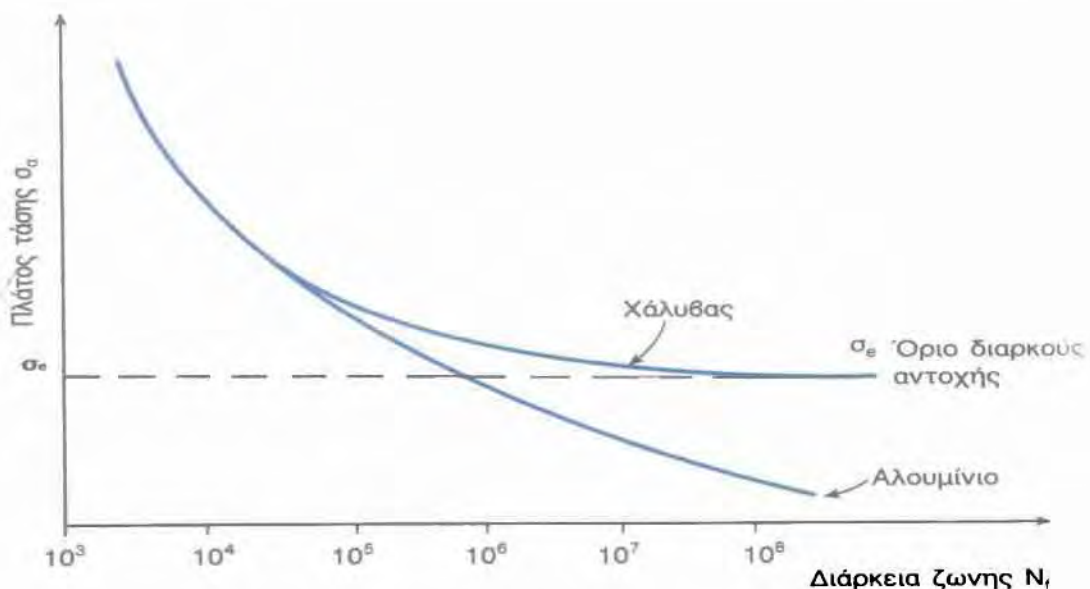
$$R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$$

με σ_{\max} , σ_{\min} τη μέγιστη και την ελάχιστη τάση του κύκλου αντίστοιχα.

Στην περίπτωση κυκλικής φορτίσεως με πλήρη αναστροφή της τάσεως με $\sigma_m=0$ και χαμηλές τιμές του πλάτους τάσεως σ_a , η διάρκεια ζωής υπερβαίνει τους 10^3 με 10^4 κύκλους και η εξάρτηση της διάρκειας ζωής από την επιβαλλόμενη τάση σ_a

φαίνεται στην **Εικόνα 3.3**. Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται διαγράμματα S-N και από αυτά προσδιορίζεται το όριο αντοχής σ_e (endurance limit), το οποίο αντιστοιχεί στο πλάτος της κυκλικής τάσεως κάτω από το οποίο το υλικό εμφανίζει ουσιαστικά άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Εάν τα πειραματικά δεδομένα του διαγράμματος S-N τοποθετηθούν σε διπλή λογαριθμική κλίμακα ως $\log \sigma_a$ σε συνάρτηση με $\log 2N_f$, όπου $2N_f$ ο αριθμός των ανστροφών του φορτίου, τότε η σχέση που προκύπτει είναι γραμμική και περιγράφεται από την εξίσωση: $\sigma_a = \sigma_f (2N_f)^b$,

η οποία ονομάζεται νόμος του Basquin για την πολυκυκλική κόπωση. Το σ_f είναι ο συντελεστής αντοχής σε κόπωση και αντίστοιχα το b είναι ο εκθέτης αντοχής σε κόπωση ή εκθέτης Basquin. Οι παράμετροι σ_f και b αποτελούν ιδιότητες του μετάλλου. Συχνά $\sigma_f = \sigma_t$, δηλαδή το όριο θραύσεως σε μονοτονική φόρτιση, ο εκθέτης b κυμαίνεται στην περιοχή $-0,12 < b < -0,05$ με τυπική τιμή $b = -0,1$.



Εικόνα 3.3 Πλάτος τάσης σε συνάρτηση με την διάρκεια ζωής για χάλυβα και αλουμίνιο (καμπύλη S-N) [4]

Η επίδραση της μέσης τάσεως είναι σημαντική κυρίως στην πολυκυκλική κόπωση, όπου η πλαστικές παραμορφώσεις είναι μικρές. Αντίθετα στην ολιγοκυκλική κόπωση, η μέση τιμή χαλαρώνει γρήγορα μέσω των πλαστικών

παραμορφώσεων. Η επίδραση της εφελκυστικής μέσης τάσεως, είναι η μείωση της διάρκειας ζωής στην περιοχή της πολυκυκλικής κοπώσεως σε σύγκριση με την φόρτιση με μέση τάση $\sigma_m=0$. Αντίθετα, όταν η μέση τιμή είναι θλιπτική ($\sigma_m<0$) η διάρκεια ζωής αυξάνεται.

Στα μεταλλικά κατασκευαστικά στοιχεία, στα οποία δεν προϋπάρχουν ρωγμές, το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας ζωής αναλύεται στον σχηματισμό ή δημιουργία της ρωγμής. Ρωγμές συνήθως σχηματίζονται σε ασυνέχειες στην επιφάνεια του μετάλλου, σε εγκλείσματα, καθώς και σε χαραγές ή εγκοπές που οφείλονται στην κατεργασία. Σε πολύ λεία δοκίμια οι ασυνέχειες δημιουργούνται στην επιφάνεια του μήκους των ζωνών εντοπισμένης πλαστικής παραμορφώσεως, που ονομάζονται επίμονες ζώνες ολισθήσεως. Οι ρωγμές μπορούν να σχηματίσουν είτε απ' ευθείας από τις ενδολισθήσεις και εξολισθήσεις είτε από την αλληλεπίδραση της παραμορφώσεως με εγκλείσματα ή σύνορα κόκκων. Τα εγκλείσματα παίζουν πιο σημαντικό ρόλο στα βιομηχανικά κράματα, ενώ τα σύνορα κόκκων αποτελούν θέσεις σχηματισμού ρωγμών σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σημαντικό ρόλο στην διάρκεια ζωής έχει η κατάσταση της επιφάνειας. Μία λεία επιφάνεια με χαμηλή τραχύτητα συμβάλλει σε μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού περιορίζονται οι ασυνέχειες που προκαλούν σχηματισμό ρωγμών. Για τον ίδιο λόγο η διάβρωση και η κακή μηχανουργική κατεργασία μειώνουν δραστικά την διάρκεια ζωής.

3.1.2 Κόπωση με προϋπάρχουσες ρωγμές

Όπως αναφέρθηκε η διάρκεια ζωής ενός κατασκευαστικού στοιχείου που υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση αποτελείται από την φάση του σχηματισμού ρωγμής και την φάση της αναπτύξεως της ρωγμής. Στην περίπτωση που προϋπάρχει ρωγμή η διάρκεια ζωής αποτελείται από τους κύκλους φορτίσεως που απαιτούνται για την εξέλιξη μίας κύριας ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος $a=a_{cr}$, όπου a_{cr} το κρίσιμο μήκος ρωγμής για αστοχία. Τότε ισχύει: $N_f = N_p$. Η κυκλική φόρτιση εκφράζεται από το εύρος:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min},$$

$$K_{\max} = Q\sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

$$K_{\min} = Q\sigma_{\min} \sqrt{\pi a}$$

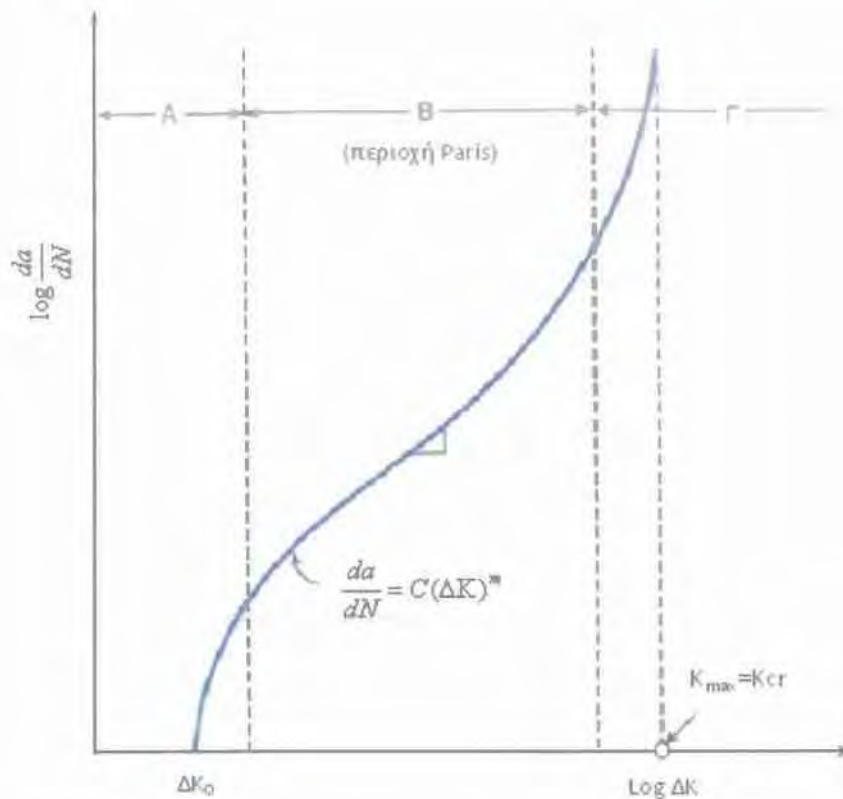
όπου K_{\max} και K_{\min} ο μέγιστος και ο ελάχιστος συντελεστής εντάσεως των τάσεων κατά την διάρκεια του κύκλου αντίστοιχα. Ο παράγοντας εντατική κατάσταση κυκλικής φόρτισης, ΔK , αυξάνει με τον χρόνο διότι αυξάνεται το μήκος του ρήγματος. Στην περιοχή της σταθερής κατάστασης ο ρυθμός αύξησης του ρήγματος είναι:

$$da/dN = A\Delta K^m,$$

όπου τα A και m είναι σταθερές του υλικού και εξαρτώνται από την θερμοκρασία, την μικροδομή, το περιβάλλον λειτουργίας και τον λόγο των τάσεων R .

Στα περισσότερα μεταλλικά κράματα η παραπάνω σχέση εκφράζεται με μία σιγμοειδή καμπύλη, στην οποία διακρίνονται τρεις περιοχές, A , B και Γ , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.4**.

- Περιοχή A : για χαμηλές τιμές του ΔK , μικρότερες από το κατώφλι ΔK_0 , η ανάπτυξη της ρωγμής είναι εξαιρετικά αργή, μικρότερη από μία πλεγματική σταθερά ανά κύκλο, ώστε να θεωρείται ότι η ρωγμή δεν αναπτύσσεται.
- Περιοχή B : στην περιοχή αυτή, που είναι γνωστή ως η περιοχή Paris, η ρωγμή αναπτύσσεται σταθερά κάτω από την επενέργεια του ΔK . Στην περιοχή αυτή η σταθερά m κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4.
- Περιοχή Γ : στην περιοχή αυτή το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων είναι πολύ μεγάλο και η ρωγμή αναπτύσσεται ταχύτατα μέχρι την τελική γρήγορη θραύση [3,4].



Εικόνα 3.4 Ταχύτητα αναπτύξεως της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK [3]

Η ύπαρξη γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως οπές, εγκοπές σφηνάλαυκες κ.τ.λ., έχουν μεγάλη επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού, για δύο κυρίως λόγους: α) κοντά στην ασυνέχεια υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση των τάσεων, δηλαδή οι τάσεις που επικρατούν τοπικά κοντά στην ασυνέχεια είναι πολύ υψηλότερες από ότι στο υπόλοιπο υλικό και β) η εντατική κατάσταση που επικρατεί γύρω από μία ασυνέχεια εμφανίζει τριαξονικότητα, δηλαδή γύρω από την ασυνέχεια επικρατεί μία σύνθετη εντατική κατάσταση. Στις περιπτώσεις αυτές υπεισέρχεται η έννοια του θεωρητικού ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων: $K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}}$, όπου σ_{\max} η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται επάνω στην ασυνέχεια και σ_{nom} η τάση που καταπονεί το υλικό μακριά από την ασυνέχεια.

Η επίδραση τέτοιου είδους γεωμετρικών ασυνεχειών στη συμπεριφορά ενός υλικού σε κόπωση είναι μεγάλη. Για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση αυτή κατασκευάζονται δοκίμια του υλικού στα οποία δημιουργείται εσκεμμένα μία εγκοπή

και τα οποία υποβάλλονται στη συνέχεια σε δοκιμές κόπωσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα του ίδιου υλικού, σε δοκίμια χωρίς εγκοπή.

Η σύγκριση τέτοιων πειραματικών αποτελεσμάτων έχει δείξει ότι η ύπαρξη της εγκοπής μειώνει δραματικά το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού σ_e , αλλά και την διάρκεια ζωής σε κόπωση για ένα δεδομένο επίπεδο δυναμικής καταπόνησης. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά σε διαγράμματα καμπυλών S-N για ένα συγκεκριμένο υλικό με και χωρίς εγκοπή. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της εγκοπής στο όριο διαρκούς αντοχής του υλικού έχει προταθεί η χρήση του συντελεστή κόπωσης με εγκοπή (fatigue notch factor) K_f , όπου εκφράζει τον λόγο του ορίου διαρκούς αντοχής ενός υλικού χωρίς εγκοπή προς το όριο διαρκούς αντοχής του ίδιου υλικού με εγκοπή, $K_f = \text{όριο κόπωσης} / \text{όριο κόπωσης με εγκοπή}$.

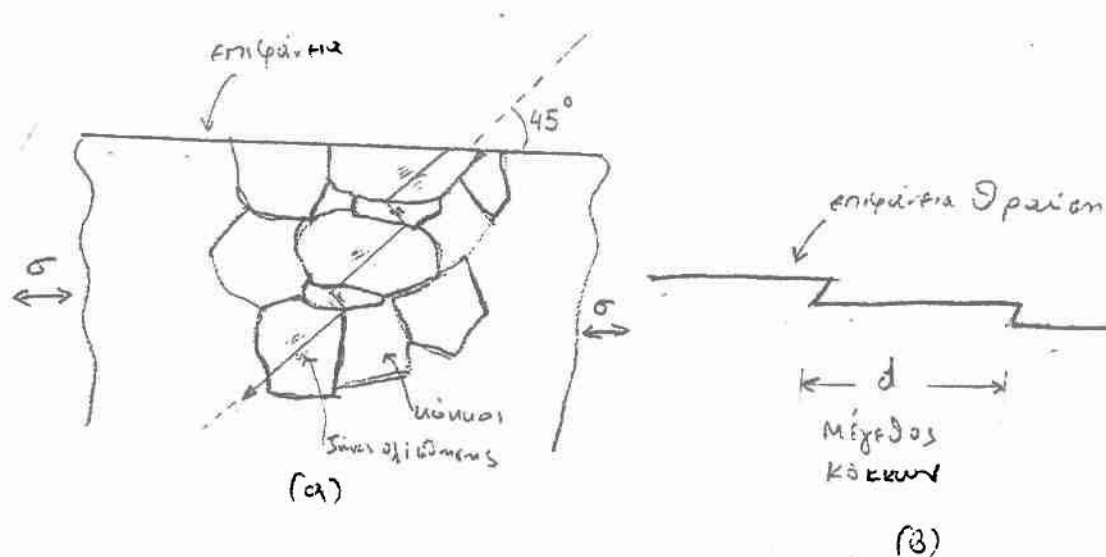
Ακόμα πρέπει να αναφερθεί και ο συντελεστής ευαισθησίας εγκοπής (notch sensitivity) q , που ορίζεται $q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$. Για $q=0$ (ή $K_{ef} = 1$) υποδηλώνεται μηδενική ευαισθησία εγκοπής, ενώ για $q=1$ (ή $K_{ef} = K_t$) υποδηλώνεται μεγάλη ευαισθησία εγκοπής.

3.2 Μηχανισμοί βλάβης στην κόπωση

Η μικροσκοπική ανάπτυξη της ρωγμής κατά την κόπωση επηρεάζεται από την πλαστικότητα του υλικού, την μικροδομή του και τα χαρακτηριστικά της κυκλικής φορτίσεως. Κατά την διάρκεια του εφελκυστικού κύκλου δημιουργείται μπροστά από το ρήγμα μία πλαστική ζώνη, που αναγκάζει το ρήγμα να ανοίξει κατά μία απόσταση δ . Ο θλιπτικός κύκλος συμπιέζει και κλείνει το ρήγμα, ενώ ταυτόχρονα η αιχμή του ρήγματος επεκτείνεται κατά δ . Στον επόμενο κύκλο επαναλαμβάνεται το ίδιο φαινόμενο και έτσι το ρήγμα προωθείται με ρυθμό $da/dN \sim \delta$. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στο υλικό περιέχονται σωματίδια δεύτερης φάσης, οξειδία, καρβίδια και εγκλείσματα. Μέσα στην πλαστική ζώνη δημιουργούνται οπές από την αποκόλληση των σωματιδίων αυτών. Οι οπές συνδέονται μεταξύ τους και με την αιχμή του ρήγματος, διευκολύνοντας έτσι την προώθηση του ρήγματος. Σε υλικά με προϋπάρχοντα ρήγματα οι διεργασίες αυτές καθορίζουν την διάρκεια ζωής. Σε υλικά

χωρίς προϋπάρχοντα ρήγματα, τα οποία υπόκεινται σε κόπωση χαμηλής συχνότητας (ολιγοκυκλική κόπωση), η πλαστικότητα δημιουργεί μία τραχεία επιφάνεια. Στην επιφάνεια αυτή δημιουργούνται εσοχές και εξοχές, που οφείλονται στις τοπικές μπάντες ολίσθησης και ονομάζονται ενδολισθήσεις και εξολισθήσεις.

Γενικά διακρίνονται δύο φάσεις κατά την ανάπτυξη της ρωγμής στην κόπωση. Η 1^η φάση αντιστοιχεί στην περιοχή Α. Όταν το υλικό υποβάλλεται σε μικρά ΔΚ, τόσο το μήκος της ρωγμής όσο και το μέγεθος της πλαστικής ζώνης συγκρίνονται με το μέγεθος των κόκκων. Το ρήγμα δημιουργείται σαν προέκταση των ενδολισθήσεων ή εξολισθήσεων και προωθείται κατά μήκος του ενεργού επιπέδου ολίσθησης. Η ενεργοποίηση ενός μόνο επιπέδου ολίσθησης οδηγεί τις περισσότερες φορές σε μία διαδρομή ρωγμής τύπου zig-zag, διότι η ρωγμή αλλάζει κατεύθυνση από κόκκο σε κόκκο. Η επιφάνεια θραύσεως της ρωγμής κατά την 1^η φάση παρουσιάζει οδοντώσεις σε με μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο μέσο μέγεθος κόκκων του μετάλλου. Επειδή το ενεργό επίπεδο ολίσθησης έχει την κατεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσεως, η ανάπτυξη της ρωγμής κατά την 1^η φάση γίνεται σε γωνιά περίπου 45° ως προς την εφαρμοζόμενη κυκλική τάση (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5(α) Ανάπτυξη ρωγμής με απλή διάτμηση

(β) Επιφάνεια θραύσεως κατά την φάση I [4]

Η ρωγμή εισέρχεται στην 2^η φάση της αναπτύξεως στην περιοχή Β σε υψηλότερες τιμές του ΔΚ, όταν η πλαστική ζώνη μεγαλώσει σε μέγεθος έτσι ώστε να καλύψει αρκετούς κόκκους. Στην περίπτωση αυτή ενεργοποιούνται δύο συστήματα ολισθήσεως και η ρωγμή αναπτύσσεται κατά μήκος της τομής των ζωνών εντοπισμένης πλαστικής παραμορφώσεως χωρίς να αλλάζει κατεύθυνση από κόκκο σε κόκκο. Η ανάπτυξη της ρωγμής πραγματοποιείται κάθετα προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης κυκλικής τάσεως, που αντιστοιχεί στον τύπο Ι (εφελκυστικό) στη στατική θραύση. Η επιφάνεια θραύσης κατά την 2^η φάση παρουσιάζει χαρακτηριστικές αυλακώσεις. Σε πολλές περιπτώσεις το πλάτος των αυλακώσεων συσχετίζεται με την ανάπτυξη της ρωγμής da/dN . Η παρουσία των αυλακώσεων χρησιμοποιείται συχνά κατά τις μελέτες αστοχίας των υλικών ως απόδειξη ότι η αστοχία οφείλεται σε κόπωση. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι οι χαρακτηριστικές αυλακώσεις δεν εμφανίζονται σε όλα τα μέταλλα που υποβάλλονται σε κόπωση. Μάλιστα σε υψηλές τιμές του ΔΚ, η επιφάνεια θραύσεως παρουσιάζει και χαρακτηριστικά στατικής θραύσεως. Στην περίπτωση αυτή ο συσχετισμός του πλάτους των αυλακώσεων με την ανάπτυξη της ρωγμής da/dN δεν είναι ακριβής.

Στην περίπτωση της κόπωσης υψηλής συχνότητας (πολυκυκλική κόπωση) ο μηχανισμός είναι διαφορετικός. Όταν η μηχανική τάση είναι κάτω από το όριο ροής, σχεδόν όλη η διάρκεια ζωής καταναλίσκεται για την πυρήνες του ρήγματος. Παρά την απουσία γενικής πλαστικότητας, υπάρχει τοπική πλαστικότητα σε εγκοπές και σε περιοχές συγκέντρωσης τάσης. Το ρήγμα δημιουργείται σε μία περιοχή συγκέντρωσης τάσεων μέσα στην τοπική πλαστική ζώνη και προωθείται αρχικά αργά και κατόπιν με ταχύτερους ρυθμούς, μέχρι την τελική θραύση. Για τους λόγους αυτούς οι απότομες αλλαγές διατομής, οι εγκοπές και οι χαραγές είναι πολύ επικίνδυνες για την κόπωση υψηλής συχνότητας και συχνά μειώνουν κατά πολλές τάξεις μεγέθους την διάρκεια ζωής [3,4].

4 Πειραματική Διαδικασία

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων κόπωσης. Αυτή περιλαμβάνει την προετοιμασία και κοπή των δοκιμίων, την κατασκευή της ιδιοσυσκευής, για την συγκράτηση των δοκιμίων με εγκοπή στις αρπάγες της μηχανής και την εκτέλεση των δοκιμών σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή.

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Το πλαίσιο φόρτισης της μηχανής εφελκυσμού αποτελείται από δύο κατακόρυφες στήλες που εδράζονται πάνω στην βάση του πλαισίου. Στη βάση του πλαισίου είναι ενσωματωμένο το έμβολο φόρτισης και προσαρτημένο πάνω στην άκρη του βρίσκεται η κάτω αρπάγη της μηχανής. Στο επάνω στέλεχος (κεφαλή) του πλαισίου, το οποίο μπορεί να κινείται ελεύθερα, μέσω των κινητών μεταλλικών υποστυλωμάτων, εδράζεται η πάνω αρπάγη της μηχανής, η οποία φέρει στην κορυφή της δυναμοκυψέλη με μεγίστη δυνατότητα καταγραφής δύναμης τα 100 kN. Το έμβολο φόρτισης ελέγχεται από ηλεκτρονική μονάδα που επικοινωνεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον προγραμματισμό των πειραμάτων. Η κίνηση του εμβόλου επιτυγχάνεται με παροχή υδραυλικού λαδιού μέσω αντλίας λαδιού που επικοινωνεί με το έμβολο με ειδικές σωλήνες υψηλής πίεσης. Η διάταξη της μηχανής κόπωσης 100 kN φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**.



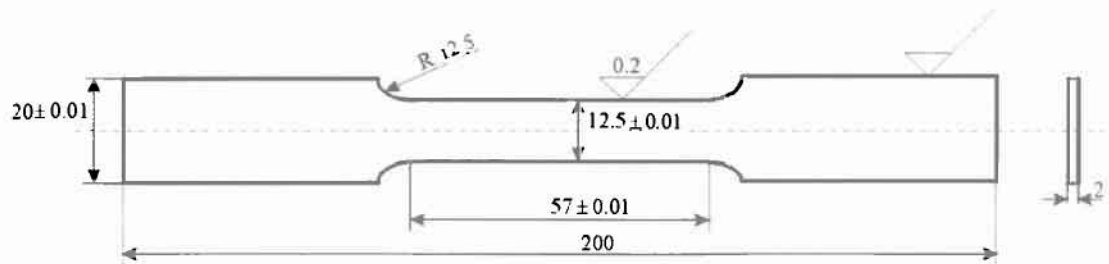
Εικόνα 4.1 Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού Instron του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

4.1 Προετοιμασία δοκιμών

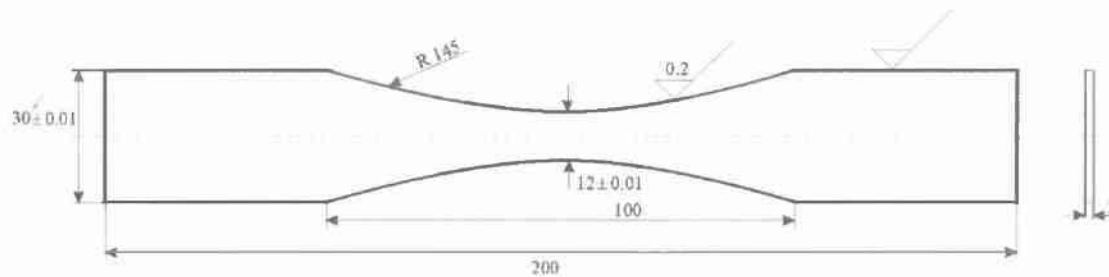
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μελέτη ήταν διφασικοί χάλυβες DP 500 και DP 600 καθώς και ο κοινός κατασκευαστικός χάλυβας St 37. Για τη μελέτη της έναρξης ρωγμής χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι χάλυβες DP 500 και St 37. Όλα τα δοκίμια έχουν κοπεί παράλληλα στην διεύθυνση της έλασης, καθώς λόγω της έλασης ο χάλυβας έχει αποκτήσει μεγαλύτερη αντοχή και καλύτερες ιδιότητες. Για την αρχική αποτίμηση των ιδιοτήτων αντοχής πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών εφελκυσμού.

Τα δοκίμια εφελκυσμού κόπηκαν και επεξεργάστηκαν μηχανουργικά κατά την προδιαγραφή ASTM E 8M (**Εικόνα 4.2**).

Όσον αφορά στα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν δύο τύποι πειραμάτων. Η πρώτη κατηγορία περιελάμβανε δοκίμια χωρίς εγκοπή, ενώ η δεύτερη κατηγορία περιελάμβανε δοκίμια με εγκοπή. Για τα πειράματα κόπωσης χωρίς εγκοπή η κοπή και η μηχανουργική κατεργασία των δοκιμίων έγινε κατά την προδιαγραφή ASTM E 466. Στην **Εικόνα 4.3** φαίνεται το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 466.



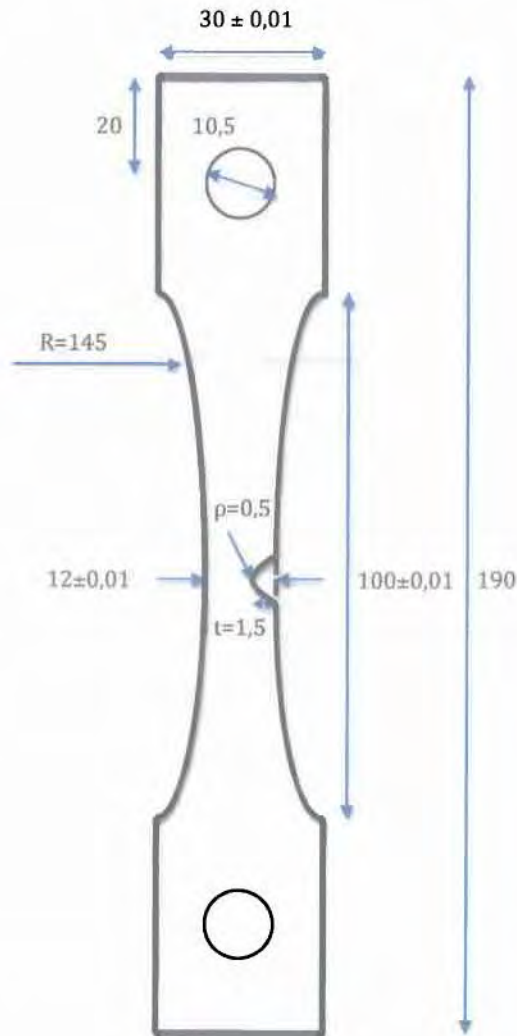
Εικόνα 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων εφελκυσμού των χαλύβων σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 8 M



Εικόνα 4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων κόπωσης των χαλύβων σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 466

Η προδιαγραφή της κοπής και της μηχανουργικής κατεργασίας των δοκιμίων με πλευρική εγκοπή είναι η ASTM E 466 και πιο συγκεκριμένα η παράγραφος 5.2.3. Η προδιαγραφή ASTM E 466 προβλέπει για τα δοκίμια κόπωσης με πλευρική εγκοπή την χρήση συνθηκών στήριξης με ελεύθερη περιστροφή (άρθρωση) στις αρπάγες της μηχανής. Για τον λόγο αυτό χρειάστηκε να δημιουργηθούν οπές στην κάθε πλευρά των δοκιμίων και στη συνέχεια κατασκευάστηκε ειδική ιδιοσυσκευή συγκράτησης

των δοκιμίων στις αρπάγες. Η ιδιοσυσκευή περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο. Ο λόγος της ανάγκης ύπαρξης άρθρωσης στα σημεία στήριξης του δοκιμίου είναι η ομοιόμορφη κατανομή εφελκυστικού φορτίου στο επίπεδο της εγκοπής.



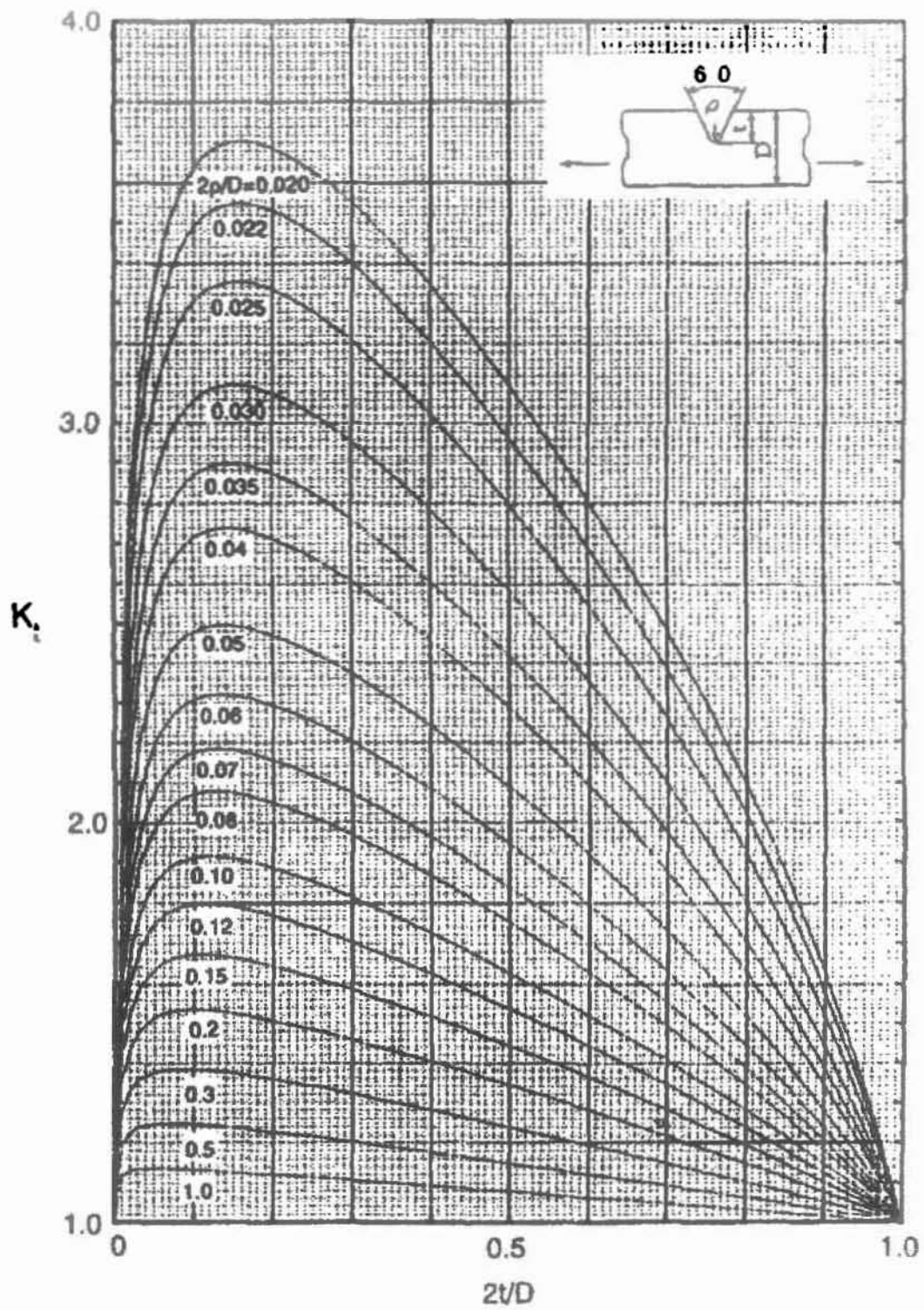
Εικόνα 4.4 Σχήμα και διαστάσεις των δοκιμίων κόπωσης των χαλύβων με εγκοπή

Για την εγκοπή επιλέχθηκε θεωρητικός συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων $K_t = 2$. Οι διαστάσεις της εγκοπής (βάθος, γωνία άκρου εγκοπής) προέκυψαν από διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν από την εργασία [7]. Το διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στην **Εικόνα 4.5**. Με βάση το διάγραμμα και για τιμή $K_t = 2$ προέκυψαν οι διαστάσεις της εγκοπής ως εξής: $2 \cdot \rho / D = 0,083$ και $2 \cdot t / D = 0,25$. Η

εγκοπή του δοκιμίου έχει πάχος $t = 1,5 \text{ mm}$, καμπυλότητα $\rho = 0,5 \text{ mm}$ και η γωνία που σχηματίζουν τα άκρα της εγκοπής μεταξύ τους είναι $\varphi = 60^\circ$.

Προτού γίνουν τα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν κατεργασίες καθαρισμού τις επιφάνειες του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, έγιναν κατεργασίες λείανσης και στύλβωσης, ούτως ώστε να μην υπάρχουν ατέλειες, όπως γρέζια από την κοπή, και θαμπάδες. Οι κατεργασίες αυτές απαιτούνται και στα δοκίμια εφελκυσμού και στα δοκίμια κόπωσης έτσι ώστε να μη διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα στα δύο πειράματα.

Για την λείανση χρησιμοποιήθηκαν γυαλόχαρτα καρβιδίου - σιλικόνης D#800 και D#1000 και για την στύλβωση χρησιμοποιείται χαρτί λείανσης MD Nap με διαμαντόπαστα (DP Paste), M 1 μm . Οι κατεργασίες έγιναν στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα K_t συναρτήσει του λόγου $2t/D$, για επίπεδα δοκίμια [7]

4.2 Ιδιοσυσκευή συγκράτησης δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα δοκίμια συγκρατήθηκαν στην μηχανή κόπωσης από ειδικές ιδιοσυσκευές οι οποίες με την σειρά τους δένονται στις αρπάγες (grip) της μηχανής. Οι διαστάσεις των ιδιοσυσκευών συγκράτησης δοκιμίων που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας φαίνονται στην **Εικόνα 4.8**. Οι ιδιοσυσκευές αυτές χρησιμοποιούνται ούτως ώστε να μη δημιουργείται εκκεντρότητα από την εφαρμογή της φόρτισης στο δοκίμιο και στο επίπεδο εγκοπής από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού κατά την διαδικασία συγκράτησης των δοκιμίων. Οι ιδιοσυσκευές και το δοκίμιο ενώνονται με κοχλίες μέσω των οποίων μεταφέρεται η δύναμη από την μηχανή εφελκυσμού στο δοκίμιο.

Οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατηγορίας M10, με διάμετρο κορμού 10 mm και ανήκουν στην κατηγορία 4.6, το οποίο σημαίνει ότι έχουν όριο διαρροής $f_y = 240 \text{ MPa}$ και όριο αντοχής $f_u = 400 \text{ MPa}$. Ακόμα, η αντοχή του κορμού του κοχλία σε διάτμηση ελέγχθηκε από την σχέση:

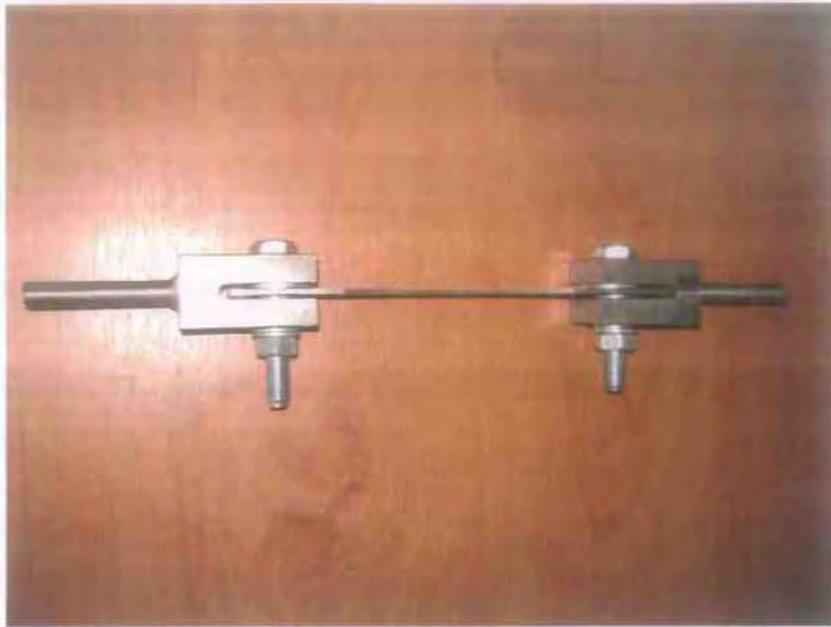
$$F_{v,Rd} = (0,6n \cdot f_u \cdot A) / Y_{M2} \quad (1)$$

$$\text{όπου } n: \text{ ο αριθμός των επιπέδων διάτμησης (στην περίπτωση μας } n = 2) \quad (2)$$

$$f_u: \text{ το όριο θραύσης χάλυβα του κοχλία} \quad (3)$$

$$A: \text{ η διατομή του κορμού} \quad (4)$$

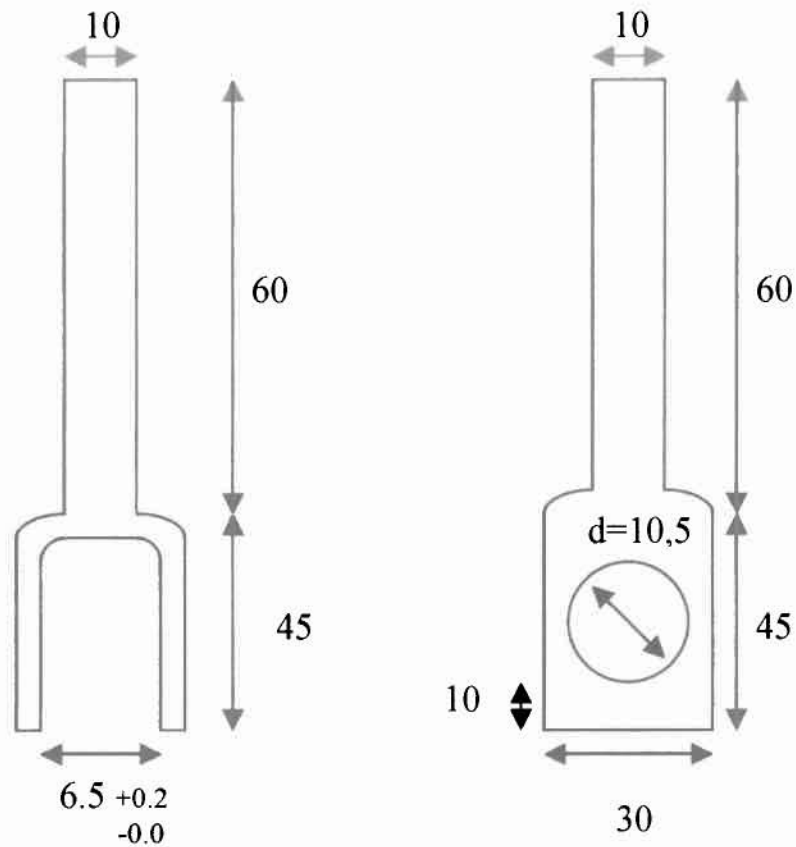
$$Y_{M2} = 1,25 \quad (5)$$



Εικόνα 4.6 Το δοκίμιο στις ιδιοσυσκευές συγκράτησης



Εικόνα 4.7 Το δοκίμιο στην μηχανή εφελκυσμού



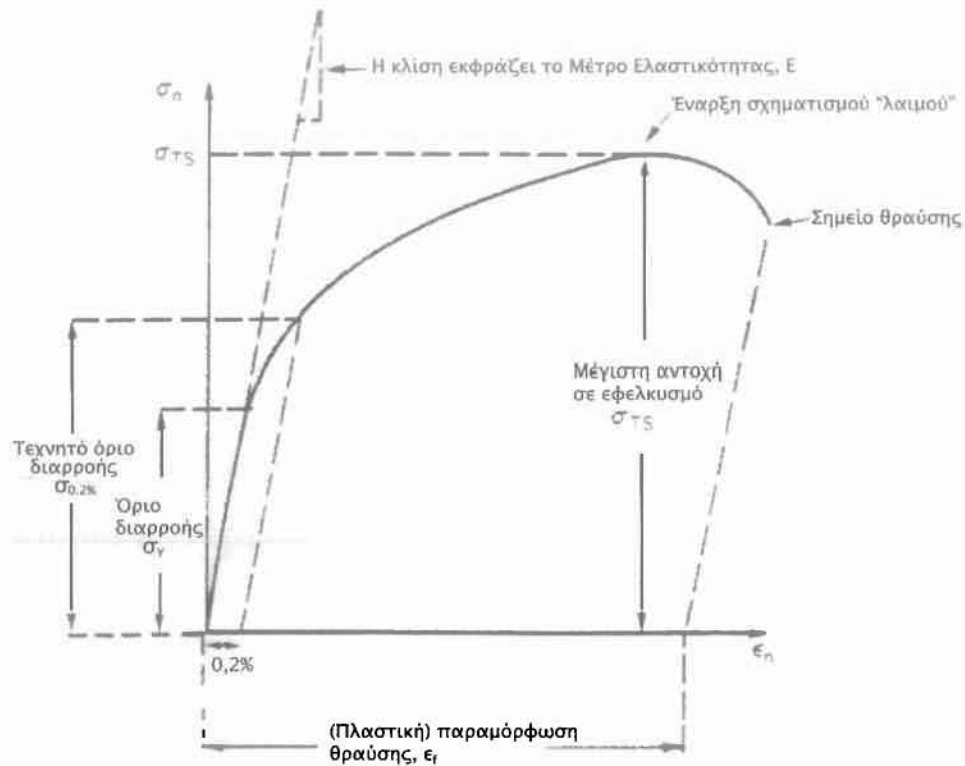
Εικόνα 4.8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ιδιοσυσκευής συγκράτησης

4.3 Πειράματα εφελκυσμού

Τα πειράματα εφελκυσμού έγιναν χρησιμοποιώντας τη μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Από τα πειράματα εφελκυσμού προσδιορίστηκαν οι ονομαστικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και αποτιμήθηκαν οι βασικές μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού (**Εικόνα 4.9**). Οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες που αποτιμήθηκαν είναι οι εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας, E
- Συμβατική τάση ροής, $\sigma_{0.1}$ ή $\sigma_{0.2}$
- Όριο θραύσης ή αντοχής εφελκυσμού, σ_{UTS} ή UTS

- Παραμόρφωση θραύσης, ϵ_f



Εικόνα 4.9 Καμπύλη ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης σε εφελκυσμό [3]

Από τα πειράματα εφελκυσμού που έγιναν λάβαμε τα αποτελέσματα για τα υλικά, τα οποία παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.4 Πειράματα κοπώσης

Όπως τα πειράματα εφελκυσμού, έτσι και τα πειράματα κοπώσεως πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα μηχανικών δοκιμών της Instron. Τα πειράματα της κόπωσης πραγματοποιήθηκαν με σταθερό $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0.1$ και μεταβαλλόμενη σε κάθε πείραμα την μέγιστη τιμή της τάσης σ_{\max} , προκειμένου να προσδιοριστούν οι

καμπύλες S-N κόπωσης του υλικού και να βρεθούν τα όρια κόπωσης. Όλα τα δοκίμια καταπονήθηκαν με συχνότητα 25 Hz.

Με βάση τις τιμές του ορίου διαρροής $R_{p0.2}$ που προέκυψαν από τα πειράματα εφελκυσμού εκτελέστηκαν δοκιμές κόπωσης σε μέγιστη τάση, που αντιστοιχεί σε κάθε υλικό στην τιμή σε κάποιο ποσοστό της $R_{p0.2}$. Στην συνέχεια, σε επόμενα δοκίμια η τάση αυξανόταν ή μειωνόταν προοδευτικά ανάλογα με την διάρκεια ζωής που προέκυπτε για κάθε πείραμα.

4.5 Διαδικασία προσδιορισμού έναρξης ρωγμής σε κόπωση (replica)

Με την τεχνική αποτυπωμάτων ρέπλικας (replica technique) μελετήθηκαν τα δοκίμια μετά την κόπωση για υπάρχουσες μικρορωγμές. Η μελέτη αυτή έγινε στα δοκίμια σε διακοπτόμενα πειράματα μετά το πέρας κάποιου αριθμού κύκλων και επαναλήφθηκε μέχρι τον προσδιορισμό της έναρξης ρωγμής. Η διαδικασία που ακολουθείται για τη μελέτη με την ρέπλικα αναλύεται η παρακάτω.

Αρχικά γινόταν διακοπή του πειράματος κόπωσης για να ασκηθεί εφελκυστικό φορτίο στο δοκίμιο, τάξεως ίδιας με της σ_{max} που ασκείται στο πείραμα κόπωσης. Ο λόγος ήταν για να παραμείνει «ανοιχτή» η ρωγμή προκειμένου να φανεί το αποτύπωμα της στην ρέπλικα. Κατόπιν αφότου ασκήθηκε η σ_{max} στο δοκίμιο (ούτως ώστε να «ανοίξει» η ρωγμή και να είναι πιο ευδιάκριτη) τοποθετήθηκε η ρέπλικα επάνω στο δοκίμιο για να αποτυπωθεί οποιαδήποτε ατέλεια του. Η ρέπλικα μελετήθηκε στη συνέχεια στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο Leica του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση της ρέπλικας αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.6 Μελέτη της διάδοσης μικρο-ρωγμής σε μικροκλίμακα

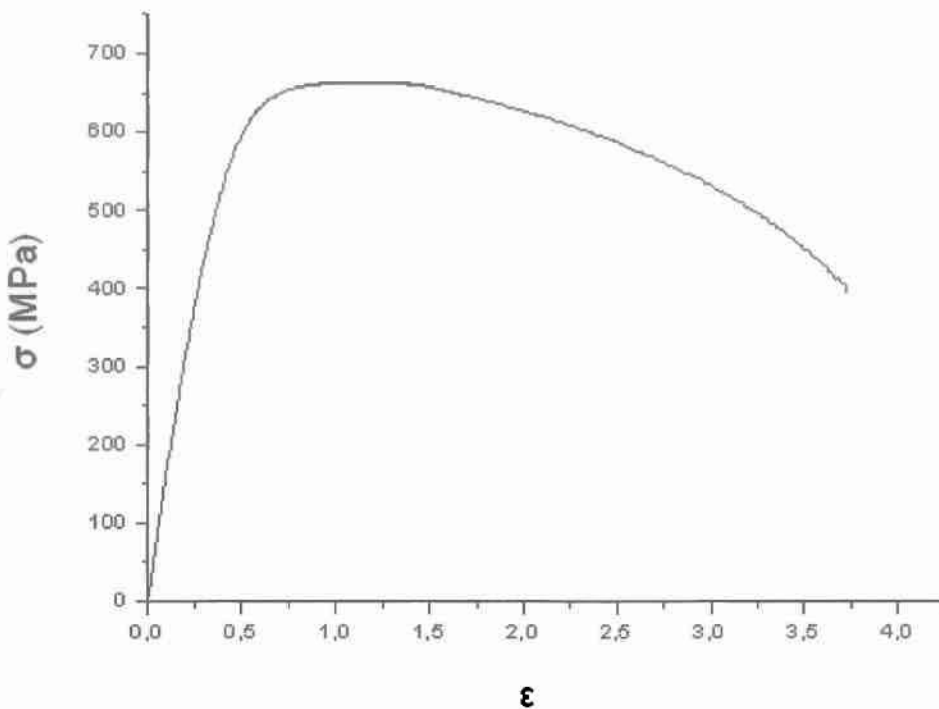
Στο τελευταίο κομμάτι της πειραματικής διαδικασίας, μελετάμε τον τρόπο διάδοσης της ρωγμής. Ο πιο συνήθης μηχανισμός ψαθυρής θραύσης είναι ο σχισμός ή το σχίσσιμο κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Έτσι σε κλίμακα κόκκου η επιφάνεια θραύσεως είναι επίπεδη. Η διάδοση της ρωγμής μπορεί να γίνει είτε περικρυσταλλικά είτε διακρυσταλλικά σχηματίζοντας την αντίστοιχη θραύση. Η περικρυσταλλική διάδοση της ρωγμής γίνεται, όταν η διάδοση ακολουθεί τα σύνορα των κόκκων, ενώ στην διακρυσταλλική θραύση η ρωγμή αλλάζει κατεύθυνση από κόκκο σε κόκκο για να συνεχίσει την διάδοση κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών επιπέδων σχισμού [1].

Για να γίνει η παραπάνω μελέτη, κόπηκαν τα δοκίμια προς μελέτη εκατέρωθεν της ρωγμής, για να εγκιβωτιστούν, στα υπό μελέτη τμήματα, τα κομμένα μέρη (στα οποία βρίσκεται η ρωγμή) και αφότου υπέστησαν κατεργασίες λείανσης, στίλβωσης και χημικής προσβολής, μελετήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η μελέτη αυτή έγινε για τα δοκίμια χάλυβα DP 500 και χάλυβα St 37 με εγκοπή και έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

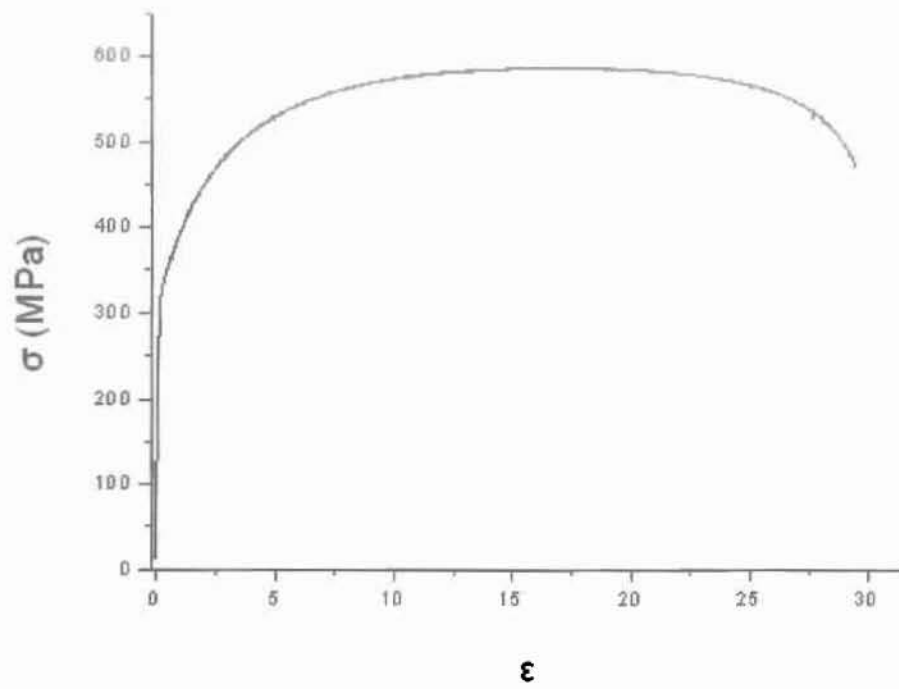
5 Αποτελέσματα

5.1 Πειράματα εφελκυσμού

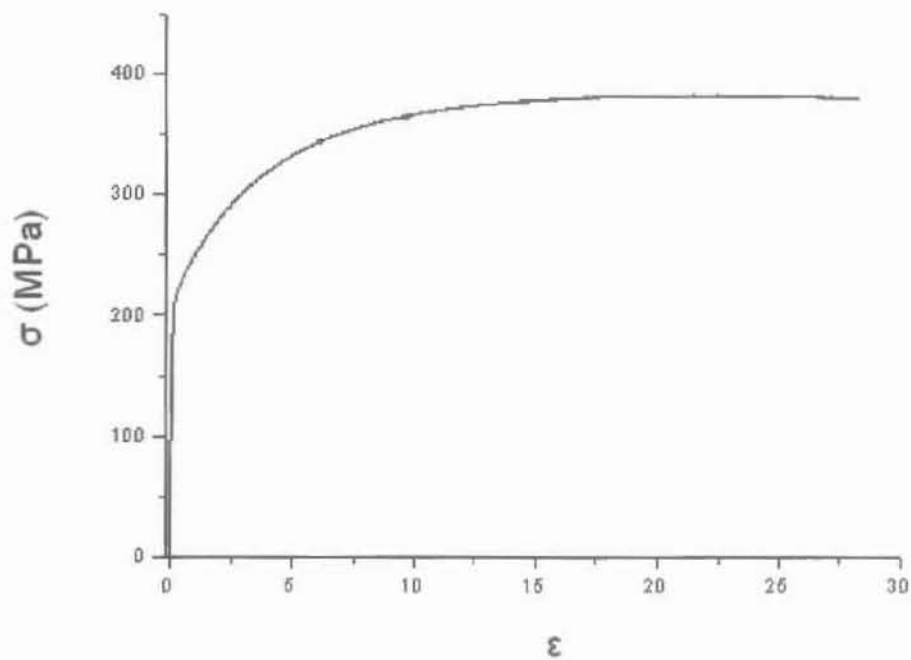
Από τα πειράματα εφελκυσμού που έγιναν στα δοκίμια ελήφθησαν τα χαρακτηριστικά διαγράμματα που φαίνονται στις **Εικόνες 5.1-5.3** και αποτιμήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 5.1**.



Εικόνα 5.1 Ονομαστικό διάγραμμα σ - ϵ για τον χάλυβα DP 500



Εικόνα 5.2 Ονομαστικό διάγραμμα σ - ϵ για τον χάλυβα DP 600



Εικόνα 5.3 Ονομαστικό διάγραμμα σ - ϵ για τον χάλυβα St 37

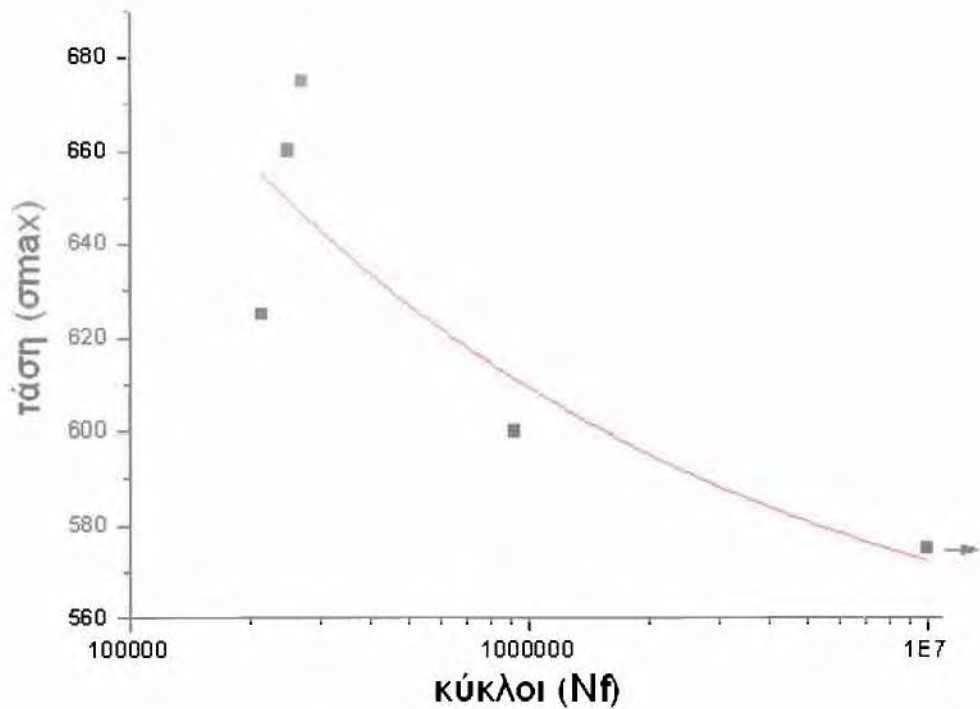
Υλικό		Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0,2}$ (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης, A_{50} (mm/mm %)
DP 600	Δοκίμιο 1	585	333	29
	Δοκίμιο 2	611	362	30
DP 500	Δοκίμιο 1	680	645	3,8
	Δοκίμιο 2	662	625	3,45
St 37	Δοκίμιο 1	377	217	28,25
	Δοκίμιο 2	382	219	28

Πίνακας 5.1 Μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων

5.2 Πειράματα κόπωσης

Όπως έχει αναφερθεί όλα τα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν με σταθερό $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0.1$.

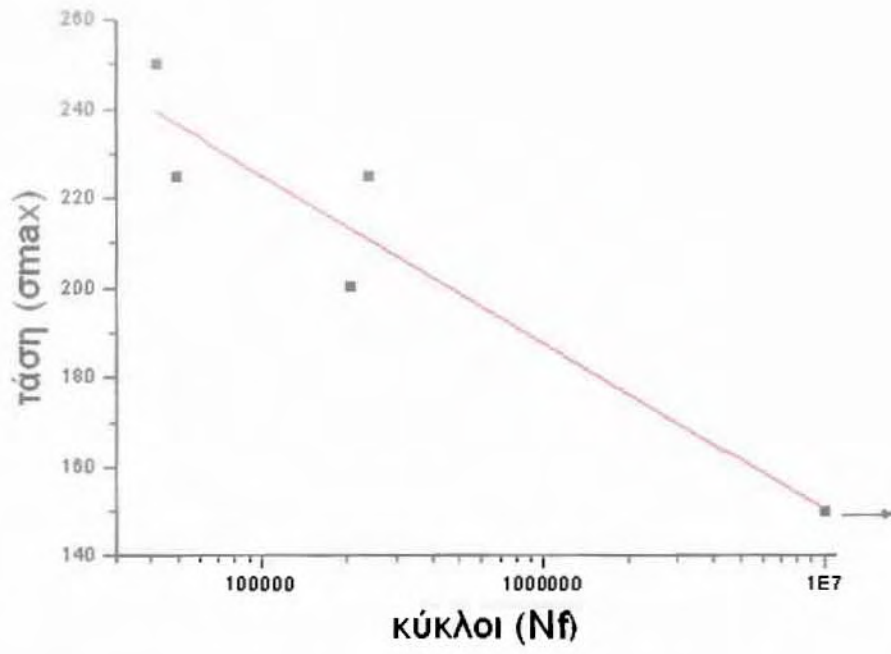
Οι καμπύλες S-N που προέκυψαν για τα δοκίμια με και χωρίς εγκοπή παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



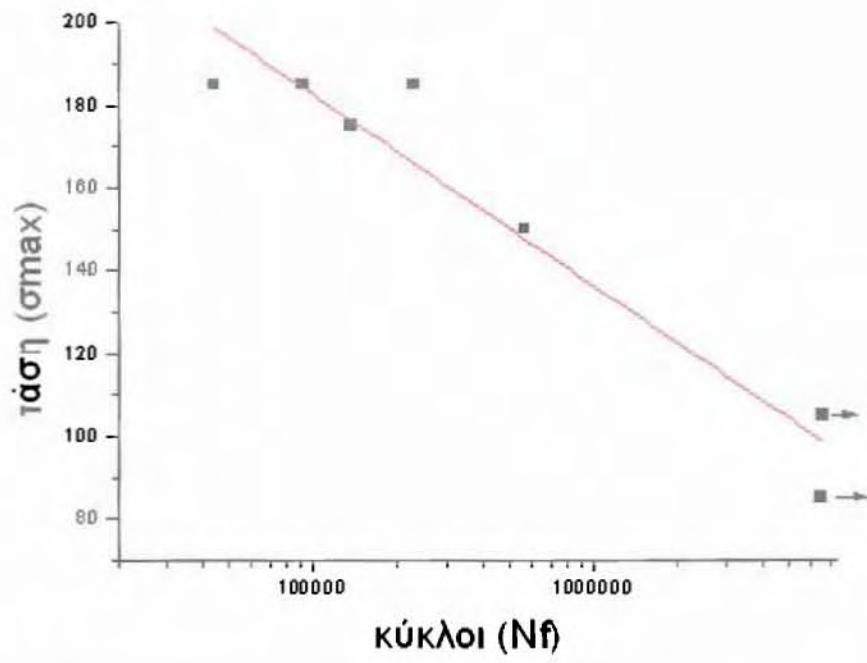
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα S-N για τον χάλυβα DP 500 χωρίς εγκοπή

Υλικό		Μέγιστη τάση, σ_{max} (MPa)	Διάρκεια ζωής, N_f (κύκλους)
DP 500	Δοκίμιο 1	486	6.553.000
	Δοκίμιο 2	648	145.170
	Δοκίμιο 3	648	6.000.000
	Δοκίμιο 4	675	270.000
	Δοκίμιο 5	660	250.000
	Δοκίμιο 6	625	215.000
	Δοκίμιο 7	575	10.000.000
	Δοκίμιο 8	600	925.000

Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών χωρίς εγκοπή



Εικόνα 5.5 Διάγραμμα S-N για τον χάλυβα DP 500 με εγκοπή

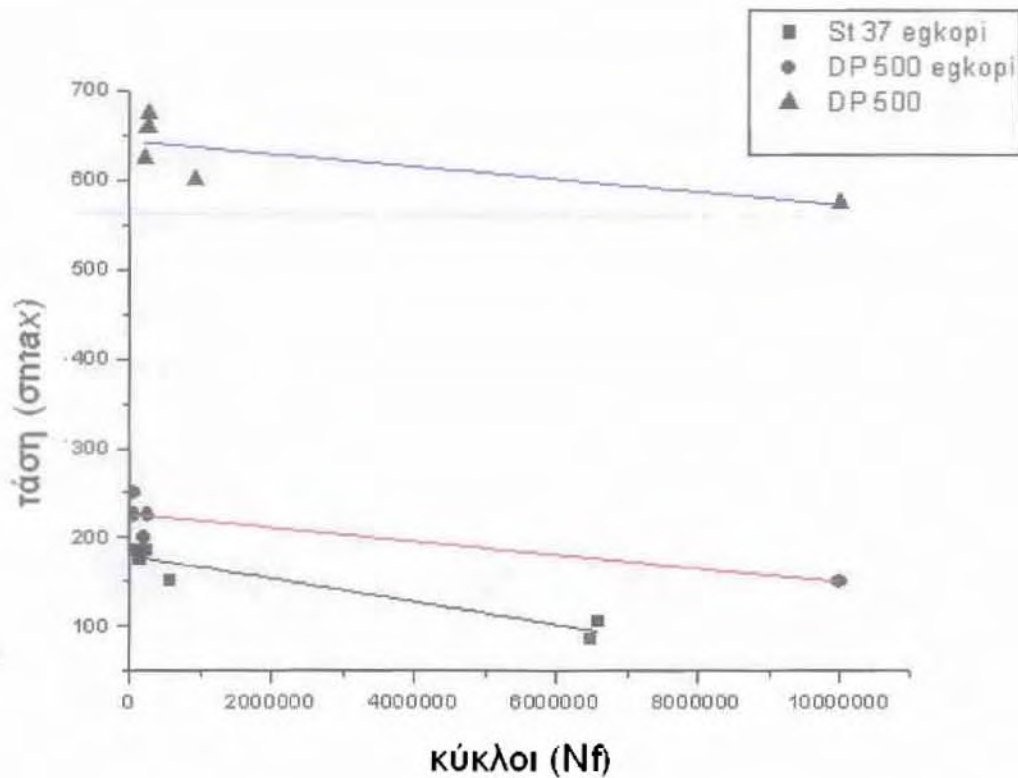


Εικόνα 5.6 Διάγραμμα S-N του χάλυβα St 37 με εγκοπή

Υλικό		Μέγιστη τάση, σ_{\max} (MPa)	Διάρκεια ζωής, N_f (κύκλους)
DP 500	Δοκίμιο 1	250	42.228
	Δοκίμιο 2	250	23.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 3	225	242.000
	Δοκίμιο 4	225	50.000
	Δοκίμιο 5	200	206.000
	Δοκίμιο 6	200	140.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 7	225	145.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 8	150	10.000.000
St 37	Δοκίμιο 1	85	6.500.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 2	105	6.600.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 3	150	560.000
	Δοκίμιο 4	175	136.000
	Δοκίμιο 5	175	110.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 6	185	226.000
	Δοκίμιο 7	185	92.000

	Δοκίμιο 8	185	100.000 (διακόπηκε πριν από την τελική θραύση)
	Δοκίμιο 9	185	44.000

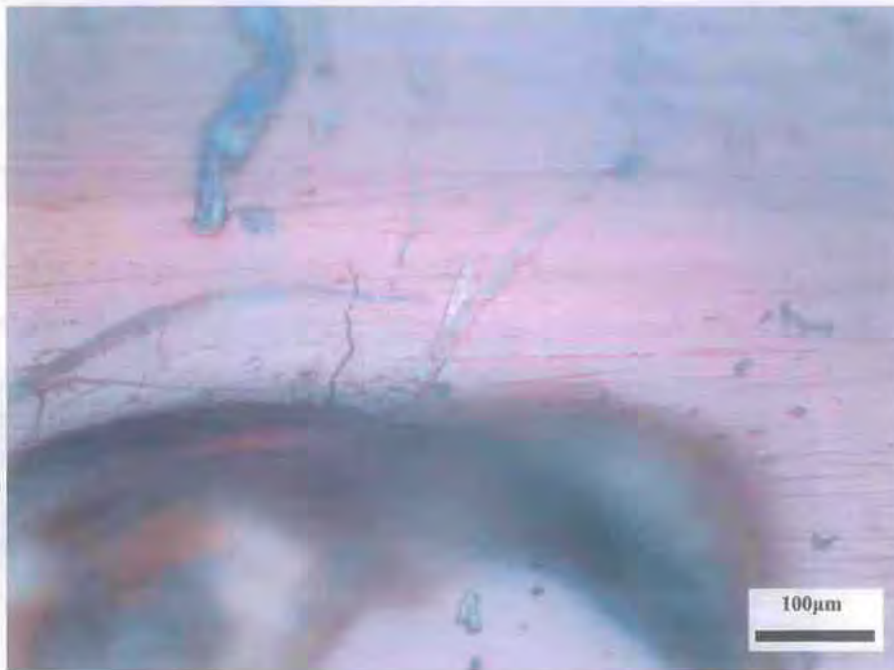
Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών κόπωσης σε δοκίμια με εγκοπή



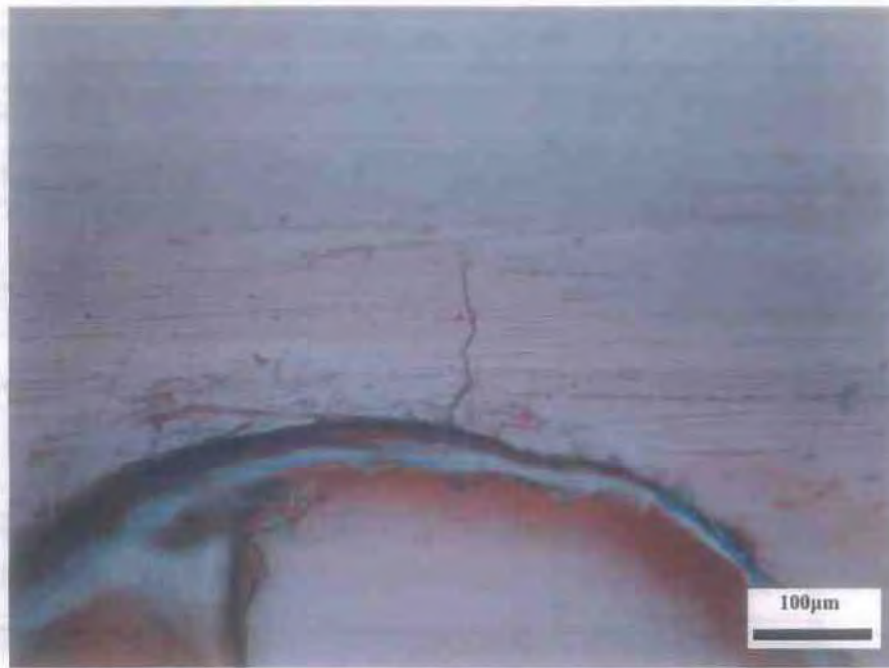
Εικόνα 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα S-N όλων των υλικών

5.2.1 Συμπεριφορά κόπωσης δοκιμίων με εγκοπή

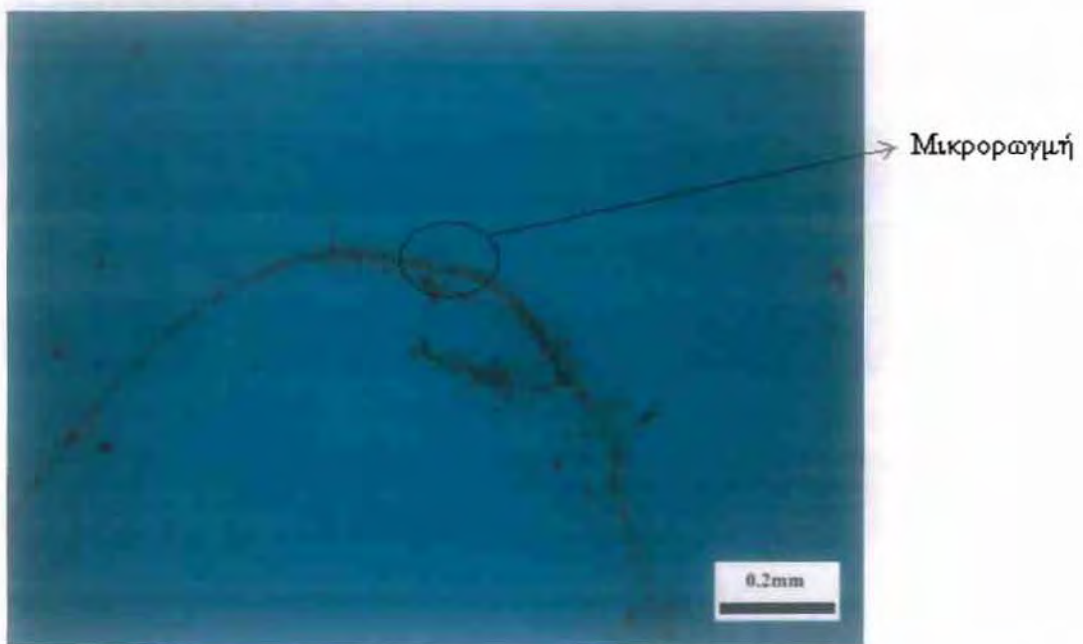
Στις Εικόνες 5.8-5.19 παρουσιάζονται τα αποτυπώματα έναρξης μικρο-ρωγμής κατά την κόπωση που προέκυψαν για τους χάλυβες DP 500 και St 37 από τα διακοπτόμενα πειράματα κόπωσης σε διαφορετικά ποσοστά της διάρκειας ζωής των δοκιμίων και σε διαφορετικές τάσεις σ_{max} .



Εικόνα 5.8 Αποτύπωμα ρέπλικας του 2^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 200X μετά από 19.000 κύκλους



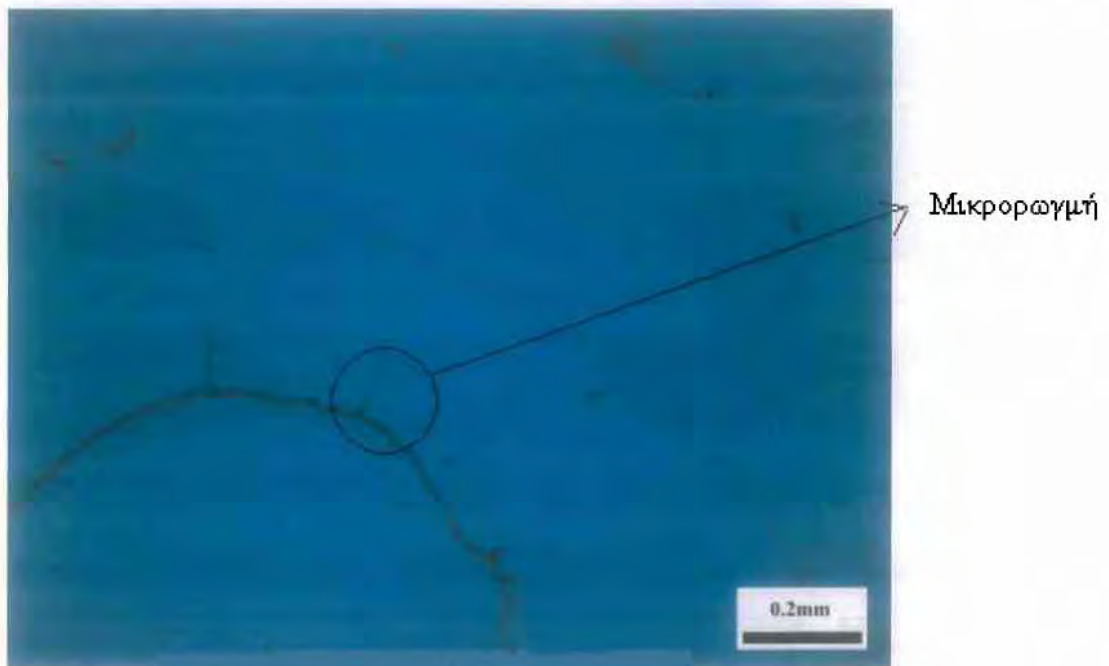
Εικόνα 5.9 Αποτύπωμα ρέπλικας του 2^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 200X μετά από 21.000 κύκλους



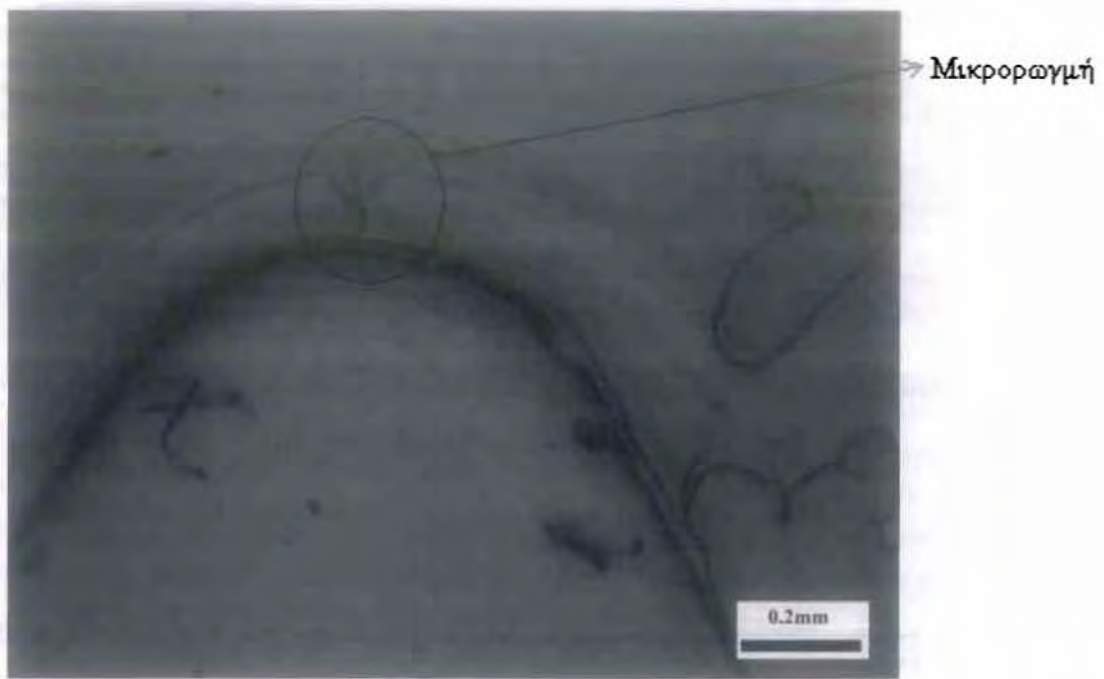
Εικόνα 5.10 Αποτύπωμα ρέπλικας του 6^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 100.000 κύκλους



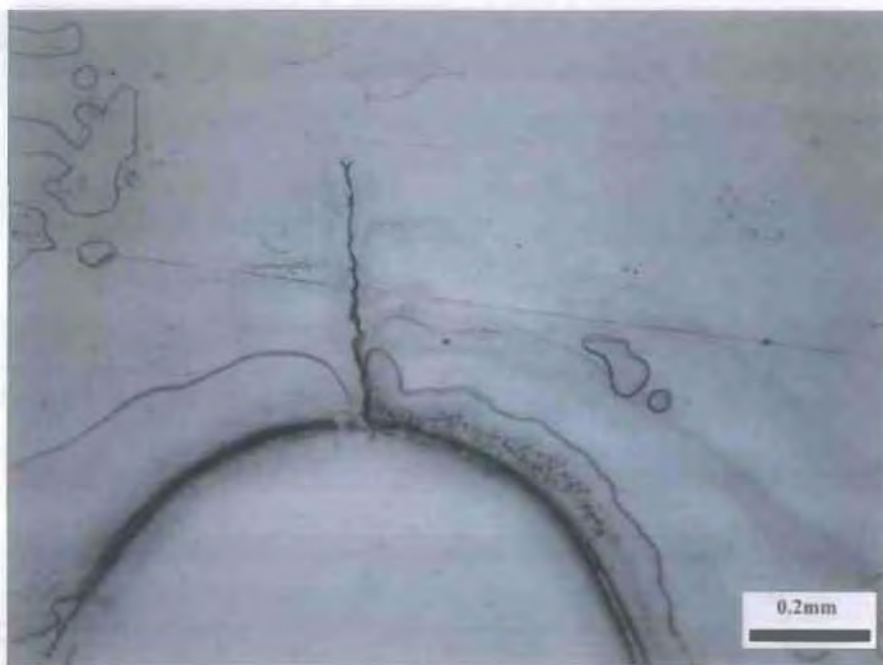
Εικόνα 5.11 Αποτύπωμα ρέπλικας του 6^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 110.000 κύκλους, όπου διακρίνεται η διάδοση του ρήγματος



Εικόνα 5.12 Αποτύπωμα ρέπλικας του 6^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 120.000 κύκλους



Εικόνα 5.13 Αποτύπωμα ρέπλικας του 7^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 115.000 κύκλους, όπου φαίνεται η έναρξη της ρωγμής



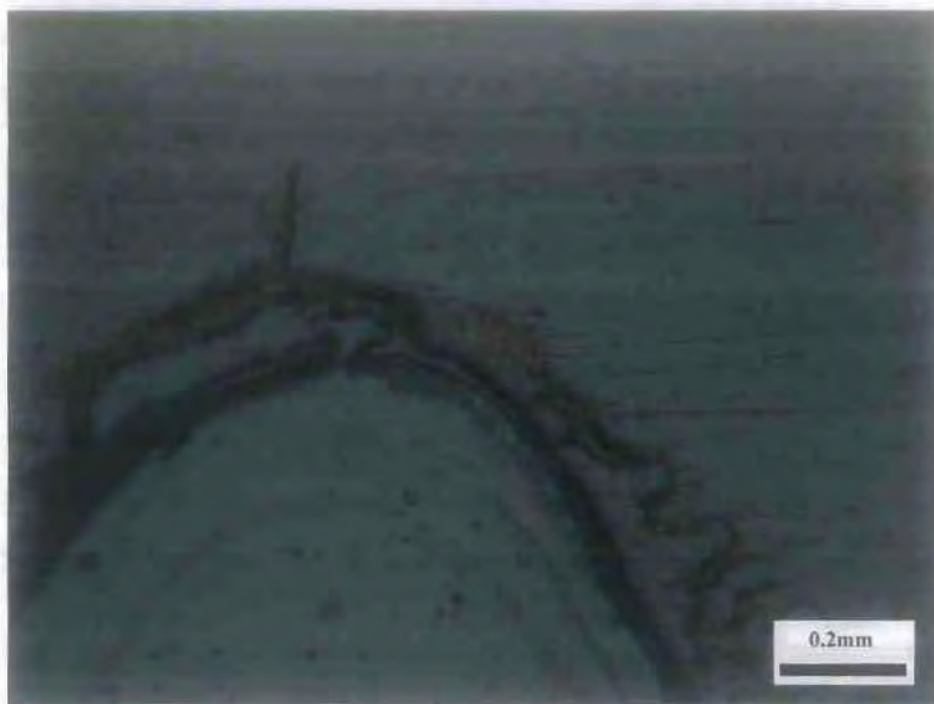
Εικόνα 5.14 Αποτύπωμα ρέπλικας του 7^{ου} δοκιμίου DP 500 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 125.000 κύκλους, όπου φαίνεται η μεγάλη διάδοση της ρωγμής



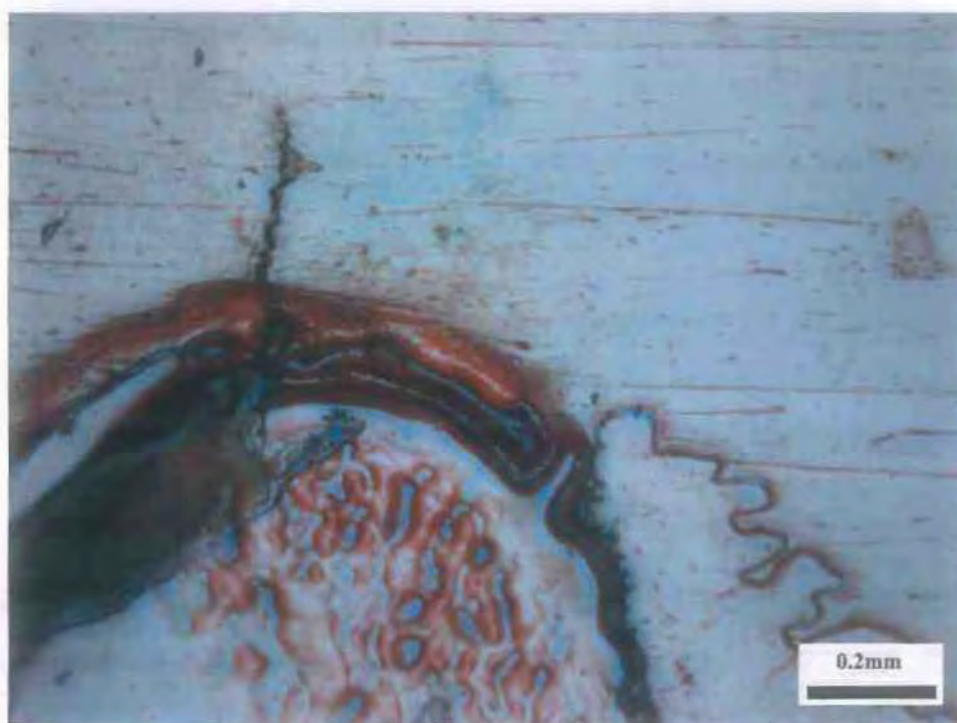
Εικόνα 5.15 Αποτύπωμα ρέπλικας του 5^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 70.000 κύκλους, όπου φαίνεται πρώτη φορά η έναρξη της ρωγμής



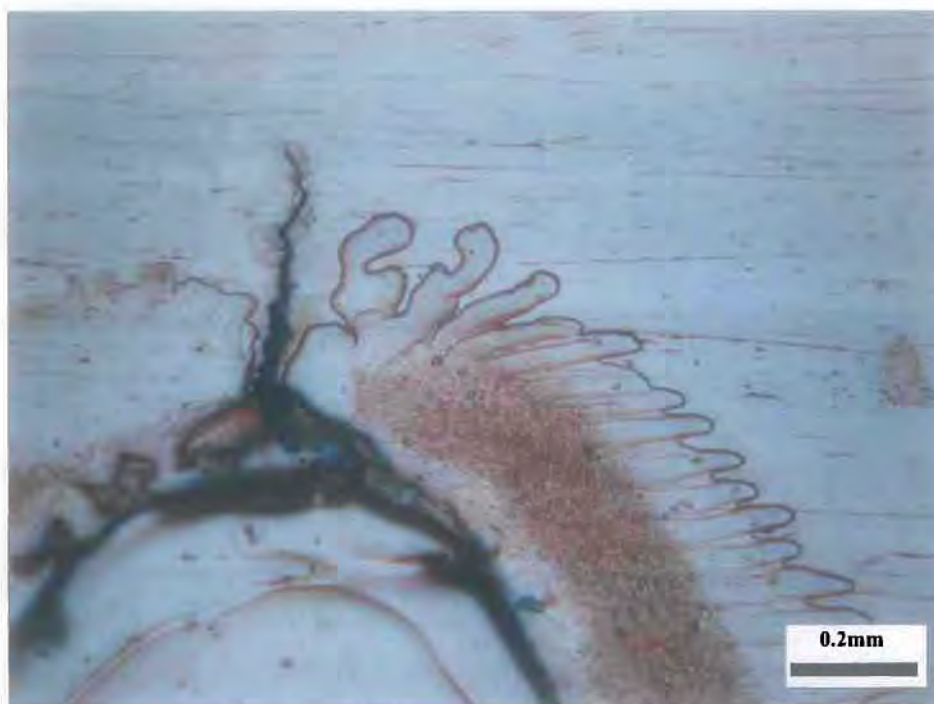
Εικόνα 5.16 Αποτύπωμα ρέπλικας του 5^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X μετά από 80.000 κύκλους, με την διάδοση της ρωγμής



Εικόνα 5.17 Αποτύπωμα ρέπλικας του 8^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X, με την έναρξη της ρωγμής στους 70.000 κύκλους



Εικόνα 5.18 Αποτύπωμα ρέπλικας του 8^{ου} δοκιμίου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X, με την διάδοση της ρωγμής στους 80.000 κύκλους



Εικόνα 5.19 Αποτύπωμα ρέπλικας του 8^{ου} δοκίμιου St 37 με εγκοπή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μεγέθυνσης 100X, με την διάδοση της ρωγμής στους 90.000 κύκλους

5.2.2 Συμπεριφορά έναρξης ρωγμής

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών διάδοσης της ρωγμής έγινε σε δοκίμια χαλύβων DP 500 και St 37 με εγκοπή μεταλλογραφικός έλεγχος σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Έγιναν από δύο μελέτες για κάθε υλικό. Τα δοκίμια που μελετήθηκαν ήταν τα δοκίμια 6 και 7 του χάλυβα DP 500 και τα δοκίμια 5 και 8 του χάλυβα St 37 του **Πίνακα 5.3** με τις τάσεις και κύκλους καταπόνησης που δίνονται στον αντίστοιχο πίνακα. Από τους ελέγχους που έγιναν στα δοκίμια με εγκοπή προέκυψε ότι τόσο για τον χάλυβα DP 500 όσο και για τον St 37 η ρωγμή εκκινεί από την εγκοπή και διαδίδεται διακρυσταλλικά στο υλικό. Η διάδοση της ρωγμής για το δοκίμιο 7 του χάλυβα DP 500 μέχρι μήκος ρωγμής 1.271 μm και για το δοκίμιο 8 του χάλυβα St 37 μέχρι μήκος ρωγμής 500 μm δίνεται στις **Εικόνες 5.21** και **5.23** αντίστοιχα. Λόγω της δυσκολίας εντοπισμού της ρωγμής σε πολύ μικρά μήκη κατά την έναρξη της με τη μέθοδο της ρέπλικας ήταν πολύ δύσκολο να μελετηθεί η διάδοση της ρωγμής σε ακόμα μικρότερη κλίμακα που πιθανώς να έδειχνε κάποια άλλα χαρακτηριστικά όσον

αφορά τη διάδοση της ρωγμής. Στον **Πίνακα 5.4** δίνονται για τα υλικά και τα δοκίμια που μελετήθηκαν η τάση κόπωσης, κύκλοι στους οποίους μετρήθηκε το μήκος ρωγμής και το αντίστοιχο μήκος ρωγμής με την χρήση ρέπλικας. Θεωρώντας ότι έναρξη ρωγμής παρατηρείται όταν αυτή φτάσει σε ένα μήκος 150 μm , υπολογίσθηκε το ποσοστό διάρκειας ζωής σε κόπωση των δοκιμίων που αντιστοιχεί στην φάση της έναρξης ρωγμής. Το ποσοστό αυτό δίνεται στον **Πίνακα 5.5**.

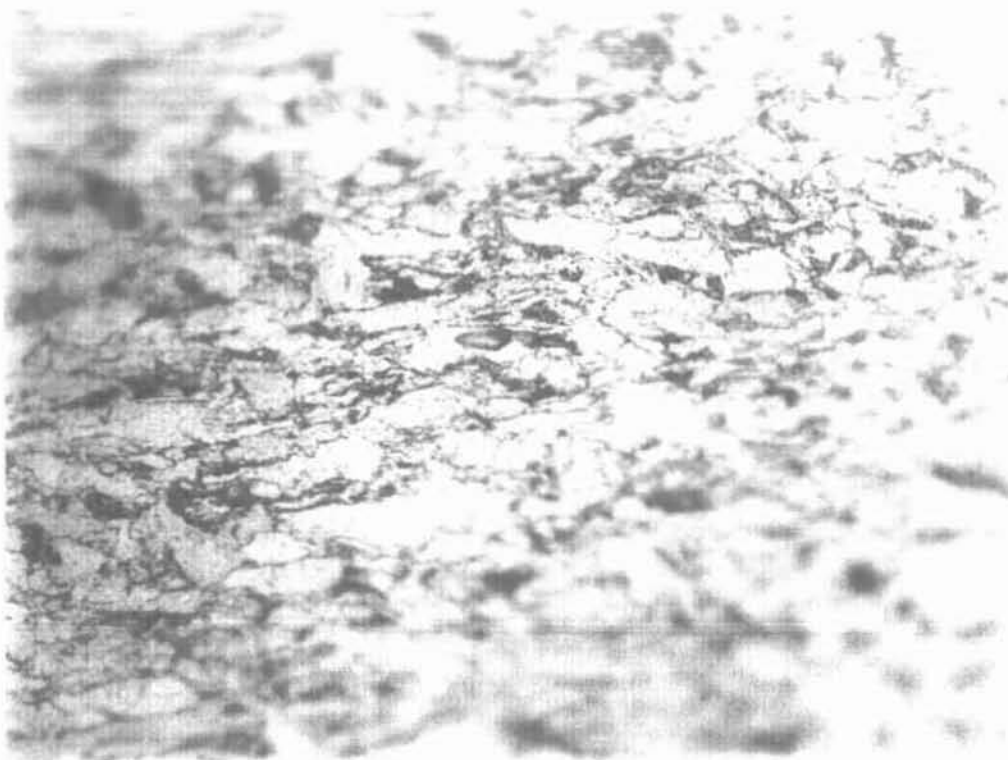
Υλικό	Τάση (MPa)	Κύκλοι	Μήκος Ρωγμής
DP 500 εγκοπή	250	19.000	70 μm
		21.000	133 μm
		23.000	155 μm
	200	100.000	28,5 μm
		110.000	42,8 μm
		120.000	71,4 μm
		130.000	278 μm
		140.000	607 μm
	225	115.000	157 μm
		125.000	446 μm
		135.000	796 μm
		145.000	1.271 μm
St 37 εγκοπή	175	90.000	129 μm
		100.000	214 μm
		110.000	357 μm

	185	80.000	321 μm
		90.000	421 μm
		100.000	500 μm

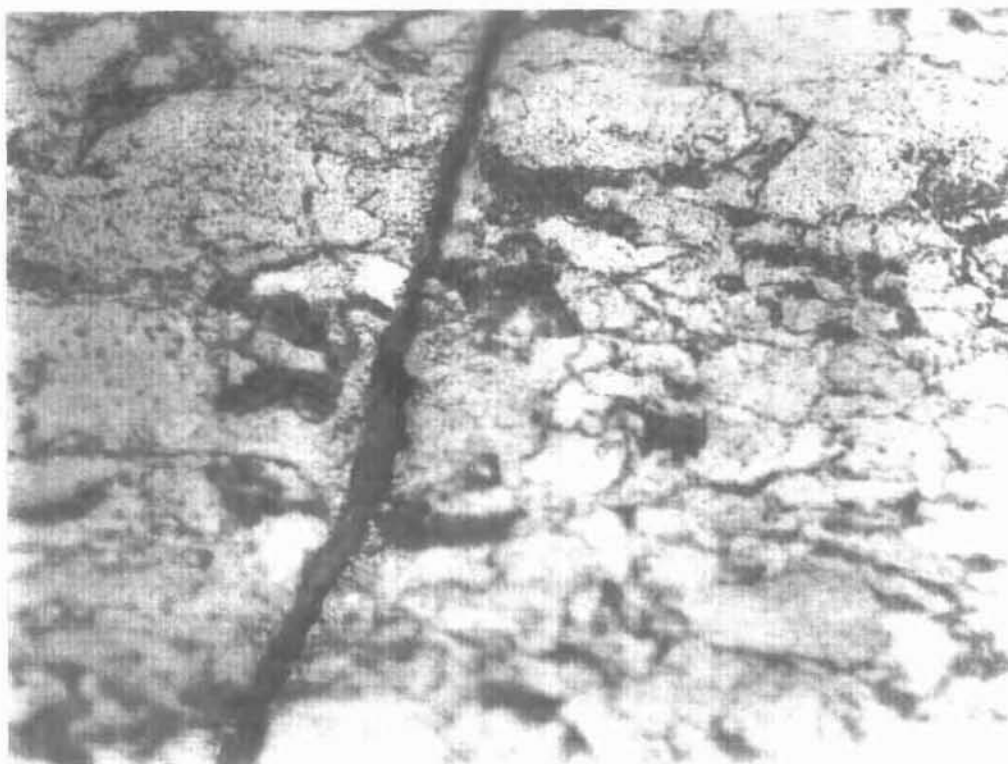
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα μήκους ρωγμής κύκλων φόρτισης που προέκυψαν από τα διακοπτόμενα πειράματα κόπωσης

Υλικό	Τάση (MPa)	Ποσοστό διάρκειας ζωής (%N _f) που αντιστοιχεί σε έναρξη ρωγμής 150 μm	Ποσοστό διάρκειας ζωής (%N _f) που αντιστοιχεί σε έναρξη ρωγμής 300 μm
DP 500 εγκοπή	250	54,5	
	200	59,7	63
	225	47,5	
St 37 εγκοπή	175	67,5	79,5
	185		35,4

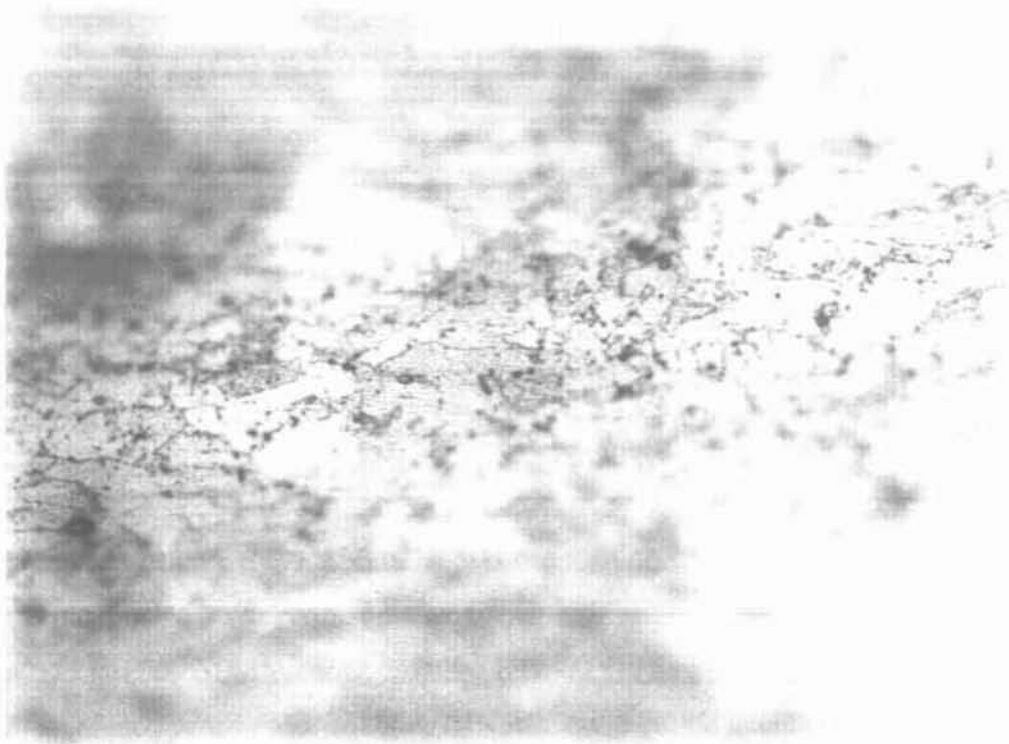
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα ποσοστού διάρκειας ζωής σε κόπωση των δοκιμών που αντιστοιχεί στην φάση της έναρξης ρωγμής



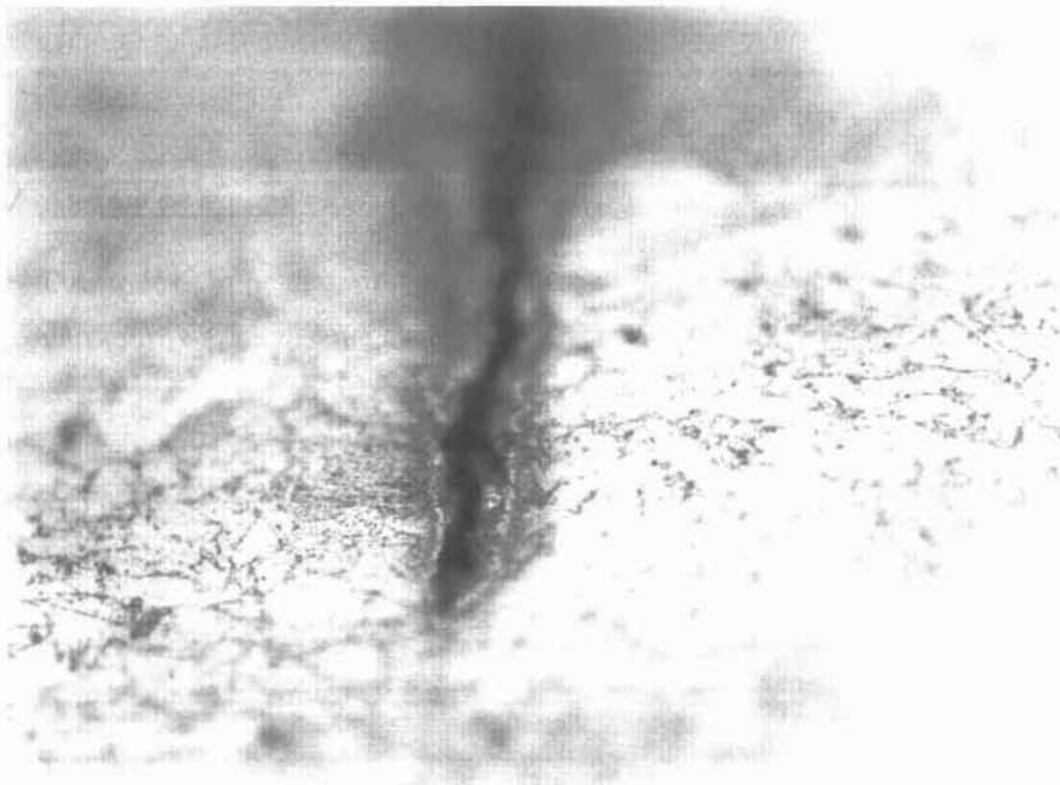
Εικόνα 5.20 Μικροδομή του χάλυβα DP 500



Εικόνα 5.21 Μικροδομή του χάλυβα DP 500 στην ρωγμή



Εικόνα 5.22 Μικροδομή του χάλυβα St 37



Εικόνα 5.23 Μικροδομή του χάλυβα St 37 στην ρωγμή

6 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά των χαλύβων για τα δοκίμια χωρίς και με εγκοπή:

Δοκίμια χωρίς εγκοπή

Η συμπεριφορά του χάλυβα DP 500 σε κόπωση είναι υπέρτερη του χάλυβα St 37. Συγκεκριμένα τα τεχνητά όρια κόπωσης που προκύπτουν για τους δύο χάλυβες είναι 575 και 200 MPa για τους χάλυβες DP 500 και St 37 αντίστοιχα. Αξιοσημείωτη είναι η συμπεριφορά του χάλυβα DP 500 σε υψηλές μέγιστες κοντά στο όριο διαρροής, όπου φαίνεται ότι για τιμές κοντά και πάνω από το όριο διαρροής η διάρκεια ζωής των δοκιμών αυξάνεται σε σχέση με δοκίμια σε τάσεις κοντά αλλά κάτω από το R_p . Η συμπεριφορά αυτή του υλικού χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Δοκίμια με εγκοπή

Για τα δοκίμια με εγκοπή όπως αναμένεται η ύπαρξη της γεωμετρικής ατέλειας με συντελεστή συγκέντρωσης τάσης $K_t=2$ υποβαθμίζει τη συμπεριφορά κόπωσης των υλικών. Συγκεκριμένα το όριο κόπωσης για τον χάλυβα DP 500 για τα δοκίμια με εγκοπή προσδιορίστηκε στα 150 MPa, ενώ για τον St 37 στα 85 MPa. Και στην περίπτωση δοκιμών με εγκοπή η συμπεριφορά κόπωσης (διάρκεια ζωής) του χάλυβα DP 500 υπερτερεί σημαντικά αυτής του κοινού χάλυβα St 37. Τα τεχνητά όρια κόπωσης των χαλύβων προσδιορίστηκαν για διάρκεια ζωής $N_f=10^7$ κύκλους.

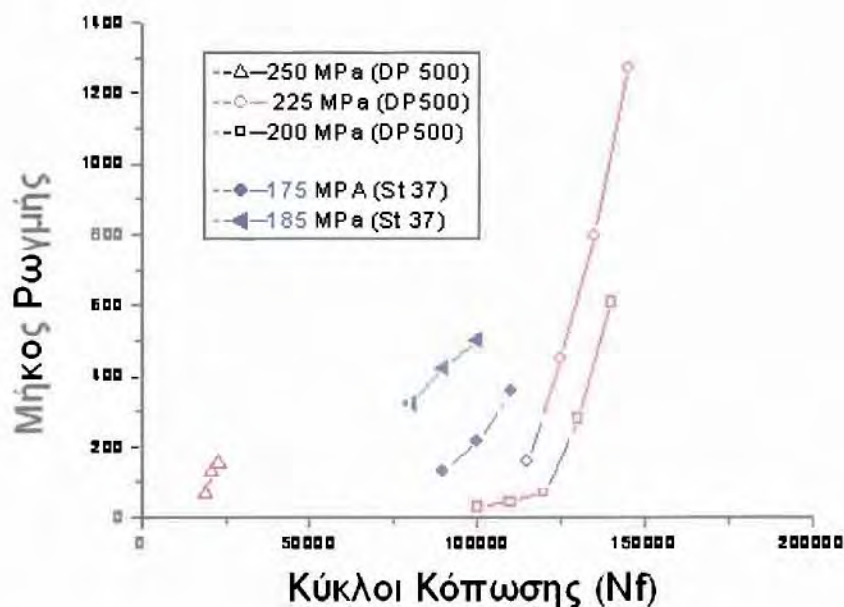
Χαρακτηριστικό στον χάλυβα DP 500 είναι ότι η ύπαρξη εγκοπής με ελαστικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσης $K_t=2$ μειώνει σημαντικά την διάρκεια ζωής των δοκιμών. Η προκύπτουσα μείωση στο όριο κόπωσης είναι της τάξης του 70%, αρκετά υψηλότερη από ότι θα ανέμενε κανείς για μείωση που αντιστοιχεί σε $K_t=2$. Ο συντελεστής εγκοπής σε κόπωση (fatigue notch factor) υπολογίστηκε για τον χάλυβα DP 500 με την βοήθεια του διαγράμματος 5.5 σε $K_t=600/180=3.33$. Προκύπτει έτσι

ότι ο συντελεστής εγκοπής σε κόπωση K_f είναι σημαντικά υψηλότερος από τον αντίστοιχο ελαστικό συντελεστή έντασης τάσης $K_t=2$. Ο παράγοντας ευαισθησίας εγκοπής $q=(K_f-1)/(K_t-1)=(3,33-1)/(2-1)=2,3$.

Η τιμή του $q=2,3>1$ δείχνει ότι η επίδραση της κόπωσης είναι κατά πολύ δείχνει ότι η επίδραση της κόπωσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την επίδραση που αναμενόταν, λόγω της ύπαρξης του K_t . Στην πραγματικότητα επίδραση στο φαινόμενο αυτό μπορεί να έχει η μηχανουργική προετοιμασία της εγκοπής που μπορεί να την κατέστησε πιο αιχμηρή από την προδιαγραφή με αποτέλεσμα η πραγματική τιμή να είναι $K_t>2$.

Διάδοση μικρορωγμής (στάδιο έναρξης ρωγμής)

Στην **Εικόνα 6.1** φαίνεται η συμπεριφορά εξέλιξης της μικρορωγμής με τους κύκλους κόπωσης σε κάθε τάση και για τα δύο υλικά που ελέγχθηκαν. Η γενική συμπεριφορά που παρατηρείται είναι ότι με αύξηση της τάσης η μικρορωγμή ξεκινά σε λιγότερο αριθμό κύκλων και διαδίδεται ταχύτερα.



Εικόνα 6.1 Διάδοση της μικρορωγμής (σε μm) κάθε υλικού συναρτήσει των κύκλων κόπωσης

Η συμπεριφορά εξέλιξης μικρορωγμής είναι πολύ καλύτερη στο υλικό DP 500 όπου φαίνεται ότι σε υψηλότερες τάσεις 200-250 MPa η ταχύτητα εξέλιξης της είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τον St 37 σε χαμηλότερες τάσεις (175-185MPa). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δείχνουν την συνολικά καλύτερη συμπεριφορά του διαφασικού χάλυβα DP σε κόπωση και ανοχή στην βλάβη (από τον κοινό κατασκευαστικό χάλυβα St 37).

Επίσης από τον **Πίνακα 5.5** προκύπτει ότι το ποσοστό της διάρκειας ζωής που αντιστοιχεί σε έναρξη ρωγμής 150 μm κυμαίνεται κοντά στο 50% για τους χάλυβες DP 500, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τους χάλυβες St 37 βρίσκεται στο 67,5%. Το ποσοστό της διάρκειας ζωής που αντιστοιχεί σε έναρξη ρωγμής 300 μm είναι στο 63% για τους χάλυβες DP 500, ενώ για τους St 37 υπάρχει μεγάλη διαφορά καθώς τα δοκίμια έχουν την ρωγμή στο 79,5% και 39,4% της συνολικής διάρκειας ζωής τους. Γεγονός που σημαίνει πως οι διαφασικοί χάλυβες έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην βλάβη από τον χάλυβα St 37.

7 Συμπεράσματα

Από την πειραματική μελέτη της παρούσας εργασίας προέβλεψαν τα κάτωθι συμπεράσματα.

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μελέτη της συμπεριφοράς κόπωσης παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, λόγω της πειραματικής διασποράς των αποτελεσμάτων απαιτείται μεγάλος αριθμός δοκιμίων για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων. Σημαντικό ρόλο παίζουν η μηχανουργική προετοιμασία των δοκιμίων και η κατάσταση της επιφανειάς τους. Παρατηρήθηκε ότι σε δοκίμια που είχαν υποστεί πολύ καλή επιφανειακή κατεργασία βελτιώθηκαν σημαντικά οι ιδιότητες κόπωσης,

Για τα δοκίμια χωρίς εγκοπή, ο διαφασικός χάλυβας DP 500 υπερτερεί του κοινού κατασκευαστικού χάλυβα St 37 καθώς έχει αρκετά υψηλότερο όριο κόπωσης. Για τον χάλυβα DP 500 χωρίς εγκοπή αξία αναφοράς είναι και η συμπεριφορά του σε τάσεις γύρω από το όριο διαρροής, όπου φαίνεται ότι για τιμές κοντά και πάνω από το όριο διαρροής η διάρκεια ζωής των δοκιμίων αυξάνεται σε σχέση με δοκίμια σε τάσεις κοντά αλλά κάτω από το R_p .

Όσον αφορά στη συμπεριφορά στην κόπωση δοκιμίων με εγκοπές η παρουσία τους μειώνει δραματικά την διάρκεια ζωής σε κόπωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο χάλυβας DP 500, του οποίου η διάρκεια ζωής και η αντοχή ελαττώνεται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Η μελέτη έναρξης της ρωγμής έδειξε ότι η ρωγμή στους διαφασικούς χάλυβες ξεκινάει περίπου στο 50% της διάρκειας ζωής, ενώ στον κοινό κατασκευαστικό χάλυβα St 37 η εκκίνηση της ρωγμής έχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα δύο αποτελέσματα. Για τα αποτελέσματα των πειραμάτων με εγκοπή θα πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί καθώς τα ακριβή χαρακτηριστικά της εγκοπής μπορεί να διαφέρουν σε κάθε δοκίμιο, λόγω της μηχανουργικής τους κατεργασίας.

Τέλος όσον αφορά την διάδοση και τη συμπεριφορά της ρωγμής, είναι αξία αναφοράς η διάδοση της, που έγινε διακρυσταλλικά και στα δύο υλικά, ενώ η συμπεριφορά της μικρορωγμής είναι πολύ καλύτερη στον χάλυβα DP 500 όπου σε υψηλότερες τάσεις η εξέλιξη της είναι χαμηλότερη σε σχέση με τον χάλυβα St 37.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα παραπάνω αποτελούν ενδείξεις που προέκυψαν από μια πρώτη σειρά πειραμάτων με χρήση μικρού αριθμού δοκιμίων. Για την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου απαιτείται επιπλέον πειραματική διερεύνηση.

8 Βιβλιογραφία

[1] Φυσική Μεταλλουργία, Δρ Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007

[2] Carbon and Alloy Steels, ASM SPECIALTY HANDBOOK

[3] Εισαγωγή Στην Τεχνολογία Υλικών, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Αντώνης Ι. Κατσαμάς, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2003

[4] Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών, Αντώνης Ι. Κατσαμάς, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2005

[5] ASTM E466-82, “Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”, updated in June 2002

[6] ASTM E647 “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”

[7] Butterworth – Heinemann “Stress concentration factors for round and flat test specimens with notches”, 1995

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104841

