



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 700
ΜΕ ΠΡΟΫΠΑΡΧΟΥΣΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ**

ΥΠΟ

ΒΟΜΒΥΡΑΣ-ΒΑΡΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Διπλωματική Εργασία

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

Βόλος, 2024

© 2024 Βόμβυρας-Βαρτής Γεώργιος

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. Κερμανίδης Αλέξης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής :	Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόριος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής :	Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, τον Δρ.Αλέξη Κερμανίδη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή όπου κατέβαλε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόριος και Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης για την προσεκτική ανάγνωση αλλά και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον φίλο και συνάδελφο Ιωάννη Γούλα για την καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την πρώτη μου επαφή με τον εργαστηριακό εξοπλισμό, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια του σε προβλήματα που προέκυψαν στο εργαστήριο κατά την περίοδο που ήταν παρών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου, Ιωάννη και Ειρήνη, όπως και τα αδέρφια μου, Κωσταντίνο, Μαρία-Αλεξία και Ευφροσύνη-Σοφία οι οποίοι με υποστήριξαν καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου σε όλους τους τομείς.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 700 ΜΕ ΠΡΟΫΠΑΡΧΟΥΣΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

BOMBYRAS-BARTHIS ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2024

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Κερμανίδης Αλέξης,

Αναπληρωτής Καθηγητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Περίληψη

Ο κλάδος της αυτοκινητοβιομηχανίας στοχεύει συνεχώς στην χρήση προηγμένων υλικών για την βελτίωση της ποιότητας και μείωση του βάρους του πλαισίου των οχημάτων, ταυτόχρονα με την εξασφάλιση της αξιοπιστίας ενάντι τυχόν αστοχιών αλλά και την ασφάλεια προς τους επιβάτες. Γι' αυτό τον λόγο γίνεται έρευνα για την ανάπτυξη υλικών και κατεργασιών που θα ενισχύσουν την διαμορφωσιμότητα και την αντοχή των υλικών για την συγκεκριμένη χρήση. Η καλή διαμορφωσιμότητα και η υψηλή αντοχή βοηθούν στην κατασκευή στοιχείων αμαξώματος μικρότερου πάχους που οδηγεί στην μείωση του βάρους του αυτοκινήτου, του κόστους κατασκευής, αλλά και στην παραγωγή οχημάτων τα οποία είναι φιλικότερα ως προς το περιβάλλον λόγω των μειωμένων ρύπων. Στην κατηγορία τέτοιων προηγμένων υλικών ανήκουν οι πολυφασικοί χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity 'Μετασχηματισμός υπαγόμενος από την παραμόρφωση'), με την ονομασία τους να προέρχεται από τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη υπό την παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης. Υπό την παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός αλλάζει την μικροδομή του υλικού και τις μηχανικές του ιδιότητες. Η μελέτη του φαινομένου TRIP λόγω προϋπάρχουσας πλαστικής παραμόρφωσης έχει μελετηθεί κυρίως σε προβλήματα στατικής φόρτισης ενώ σε θέματα κυκλικής φόρτισης και εξέλιξης ρωγμής υπάρχει έλλειψη βιβλιογραφικών δεδομένων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται πειραματική μελέτη του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής σε χάλυβα TRIP 700 που έχει προϋπάρχουσα πλαστική παραμόρφωση και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με χάλυβα σε απαραμόρφωτη κατάσταση. Επίσης μελετάται πειραματικά η επίδραση του φαινομένου του κλείσιματος της ρωγμής στον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής για δοκίμια χάλυβα TRIP με και χωρίς προϋπάρχουσα πλαστική παραμόρφωση

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP	2
2.1 Παραμόρφωση χαλύβων Trip	2
2.2 Διαδικασία παραγωγής.....	4
2.3 Χαρακτηριστικά μαρτενσιτικού μετασχηματισμού	4
2.4 Σύγκριση μεταξύ χαλύβων υψηλής αντοχής	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΠΡΟΪΠΑΡΧΟΥΣΑ ΡΩΓΜΗ.....	8
3.1 Γενικά	8
3.2 Πεδίο τάσεων στο άκρο της ρωγμής	9
3.3 Επίπεδη ένταση και επίπεδη παραμόρφωση.....	11
3.4 Συνθήκη μικρής πλαστικότητας-Συνθήκη γραμμικής ελαστικής θεωρίας.....	12
3.5 Ρυθμός διάδοσης ρηγμάτωσης	14
3.6 Μηχανισμός κλεισίματος ρωγμής (Crack Closure)	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	19
4.1 Στόχοι πειραματικής μελέτης	19
4.2 Διαδικασία πειραμάτων	20
4.2.1 Διαστασιολόγηση και υπολογισμός διαφόρων παραμέτρων για την έναρξη του πειράματος	20
4.2.2 Εξισώσεις του κανονισμού ASTM E647-00 για τα διαγράμματα Paris-Erdogan.....	22
4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	34
5.1 Συμπεράσματα.....	34
5.2 Προτάσεις για μελλοντική εύρενα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 :ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	35

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σημεία οχήματος όπου χρησιμοποιείται ο χάλυβας Trip	4
Εικόνα 2.2: Οπτική μικρογραφία ενός χάλυβα Trip.....	5
Εικόνα 2.3: Αντιστοιχία πλεγμάτων για τον μετασχηματισμό του FCC(αριστερό πλέγμα) σε BCT (δεξίο πλέγμα).....	5
Εικόνα 2.4: Ανακατανομή πλέγματος	7
Εικόνα 3.1: Βασικά είδη τύπου φόρτισης	10
Εικόνα 3.2: Γεωμετρία και διαστάσεις δοκιμίου με πλευρική ρωγμή.....	11
Εικόνα 3.3: Μέγεθος πλαστικής ζώνης σε σχέση με το πεδίο K	13
Εικόνα 3.4: Εξωγενείς μηχανισμοί που επιδρούν στο δοκίμιο κατά την διάρκεια της κόπωσης. α) Τοπική πλαστικότητα δοκιμίου, b) Τραχύτητα κατά το κλείσιμο της ρωγμής, c) Οξείδωση λόγω έκθεσης στην ατμόσφαιρα και d) Τοπικός μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη	16
Εικόνα 4.1: Μηχανή Instron 8801	19
Εικόνα 4.2: Διαστάσεις δοκιμίου C(T) σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM E 647 – 00	20
Εικόνα 4.3: Διαστάσεις εγκοπής ($h=W/16$ είναι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της εγκοπής που ορίζει ο κανονισμός)	21
Εικόνα 4.4: Τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρο για την καταγραφή παραμόρφωσης v_{max}	22

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Διάγραμμα Παραμόρφωσης(%)-Μέγιστη τάση(MPa) για τους AHSS.....	1
Διάγραμμα 2.1: α)Καμπύλες ελεύθερης ενέργειας συναρτήση με την θερμοκρασία για ωστενιτική και μαρτενσιτική φάση, β)Θερμοκρασία για την έναρξη του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού συναρτήση της εφαρμοζόμενης τάσης.....	2
Διάγραμμα 2.2: Θερμική κατεργασία χαλύβων δύο σταδίων.....	3
Διάγραμμα 2.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης χαλύβων υψηλής αντοχής Dual-Phase(DP),High-Strength Low-Alloy(HSLA) και Transformation Induced Plasticity(TRIP)	6
Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή τάσης με τον χρόνο για σταθερό πλάτος σ_{amp}	8
Διάγραμμα 3.2: Πεδίο συγκέντωσης τάσεων στην ακμή της εγκοπής.....	9
Διάγραμμα 3.3: Επίδραση πάχους t στην κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεως.....	12
Διάγραμμα 3.4: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής προς συντελεστή έντασης τάσεως	14
Διάγραμμα 3.5: Μεταβολή του συντελεστή έντασης τάσεως K συναρτήση του χρόνου	17
Διάγραμμα 3.6: Εφαρμοζόμενο φορτίο συνάρτηση της μετατόπισης που λαμβάνουμε απο το επιμηκυνσιόμετρο	17
Διάγραμμα 3.7: α) Εφαρμοζόμενο φορτίο συνάρτηση της μετατόπισης για φόρτιση και αποφόρτιση,β) Οπτική απεικόνιση διάσπασεις τμημάτων για την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων του διαγράμματος μετατόπισης συναρτήση δυνάμεως,γ) Διάγραμμα δύναμης με ποσοστό αντιστάθμισης συμμόρφωσης offset	18
Διάγραμμα 4.1: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων όλων των δοκιμών	24
Διαγράμματα 4.2: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων των δοκίμιων αναφοράς (Reference) και με μόνιμη παραμόρφωση 4%.....	24
Διάγραμμα 4.3: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων των δοκίμιων αναφοράς (Reference) και με μόνιμη παραμόρφωση 8%.....	25
Διάγραμμα 4.4: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων των δοκίμιων αναφοράς (Reference) και με μόνιμη παραμόρφωση 12%.....	25
Διάγραμμα 4.5: Μήκος ρωγμής a με αριθμό κύκλων N όλων των δοκίμιων με μόνιμη παραμόρφωση	26
Διάγραμμα 4.6: Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση των μέσων τιμών των συντελεστών C , n για κάθε ποσοστό προέντασης	27
Διάγραμμα 4.7: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης τάσης όλων των δοκιμών. 28	
Διάγραμμα 4.8: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης δοκιμών αναφοράς και με μόνιμη παραμόρφωση 4%	28

Διάγραμμα 4.9: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης τάσης δοκιμίων και με μόνιμη παραμόρφωση 8%.....	29
Διάγραμμα 4.10: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης τάσης δοκιμίων και με μόνιμη παραμόρφωση 12%.....	29
Διάγραμμα 4.11: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης τάσης όλων δοκιμίων με προένταση	30
Διάγραμμα 4.12: Μέσες τιμές αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με συντελεστή έντασης τάσεων όλων των δοκιμίων	30
Διάγραμμα 4.13: Μέση τιμή δύναμης Ρ _{0ρ} για κάθε ποσοστό προέντασης	31
Διάγραμμα 4.14: Δύναμη κλεισίματος ρωγμής συναρτήση του ποσοστού συμμόρφωσης (offset) δοκιμίων αναφοράς	32
Διάγραμμα 4.15: Δύναμη κλεισίματος ρωγμής συναρτήση του ποσοστού συμμόρφωσης (offset) δοκιμίων με προένταση 4%	32
Διάγραμμα 4.16: Δύναμη κλεισίματος ρωγμής συναρτήση του ποσοστού συμμόρφωσης (offset) δοκιμίων με προένταση 8%	33
Διάγραμμα 4.17: Δύναμη κλεισίματος ρωγμής συναρτήση του ποσοστού συμμόρφωσης (offset) δοκιμίων με προένταση 12%	33

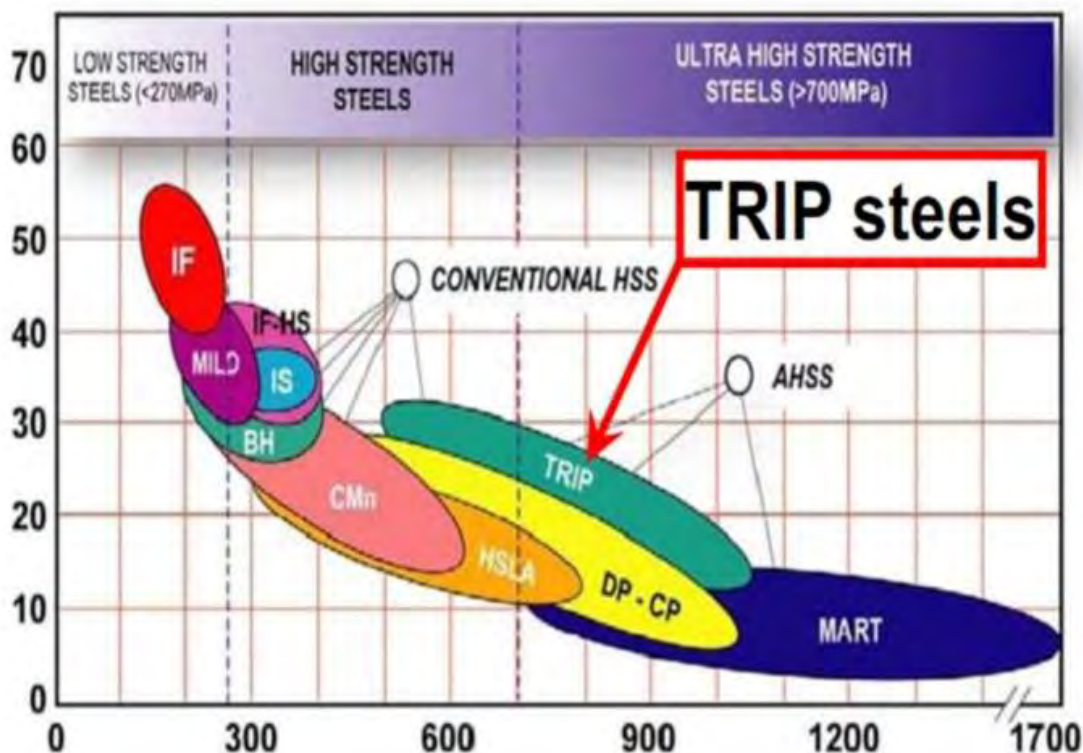
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ποσοστά μεταλλευμάτων ενός τυπικού χάλυβα Trip	3
Πίνακας 4-1: Ποσοστά παραμένουστος ωστενίτη για κάθε ποσοστού προέντασης	19
Πίνακας 4.2: Διαστάσεις δοκιμίων Trip	21
Πίνακας 4.3: Συντελεστές C και n για την γραμμική περιοχή Paris-Erdogan	27
Πίνακας 4.4: Μέση τιμή συντελεστών C και n	27
Πίνακας 4.5: Δύναμη P_{op} για 2% offset	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί αύξηση του ενδιαφέροντος της αυτοκινητοβιομηχανίας για τους προηγμένους χάλυβες υψηλής αντοχής (Advance high strength steel AHSS) **Διάγραμμα 1.1** καθώς υπερτερούν σε μεγάλο βαθμό από τους τυπικούς χάλυβες που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν, στην κατασκευή οχημάτων με ελαφρύτερα πλαίσια, διατηρώντας ταυτόχρονα την υψηλή αντοχή στις καταπονήσεις, με στόχο την παραγωγή φιλικότερων για το περιβάλλον μέσων μεταφοράς καθώς μειώνεται σε αρκετό βαθμό το βάρος του οχήματος και συνεπώς αυξάνεται η εξοικονόμηση καυσίμου. Σε αυτό μεγάλο ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη χαλύβων υψηλής αντοχής με υψηλή διαμορφωσιμότητα όπως οι χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity 'Μετασχηματισμός υπαγόμενος από την παραμόρφωση').

Η διαφορά των χαλυβών TRIP με τους (Dual Phase) και τους Mart (Martensitic Steel) σχετίζεται με τα ποσοστά φάσεων της μικροδομής, με τους χάλυβες DP να έχουν μικροδόμη ~ 50% φερριτικής φάσης, ~50% μαρτενσιτικής φάσης και σε πολύ μικρό ποσοστό ~1% παραμένων ωστενίτη, ιδιότητες που κάνουν τους DP να έχουν καλή αναλογία αντοχής με παραμορφωσιμότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μαρτενσιτική μικροδόμη ως μια ψαθυρή αλλά σκληρή δομή δίνει υψηλή αντοχή στο υλικό, ενώ η φερριτική ως μια όλκιμη αλλά μαλακή δομή δίνει υψηλά ποσοστά παραμόρφωσης. Αντιθέτως οι χάλυβες Mart αποτελούνται από 100% μαρτενσιτική μικροδόμη η οποία δίνει υψηλές τιμές αντοχής αλλά περιορισμένες δυνατότητες ως προς την παραμόρφωση. Σχετικά με τους χάλυβες DP και MART δεν θα γίνει κάποια περαιτέρω αναφορά καθώς δεν είναι στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

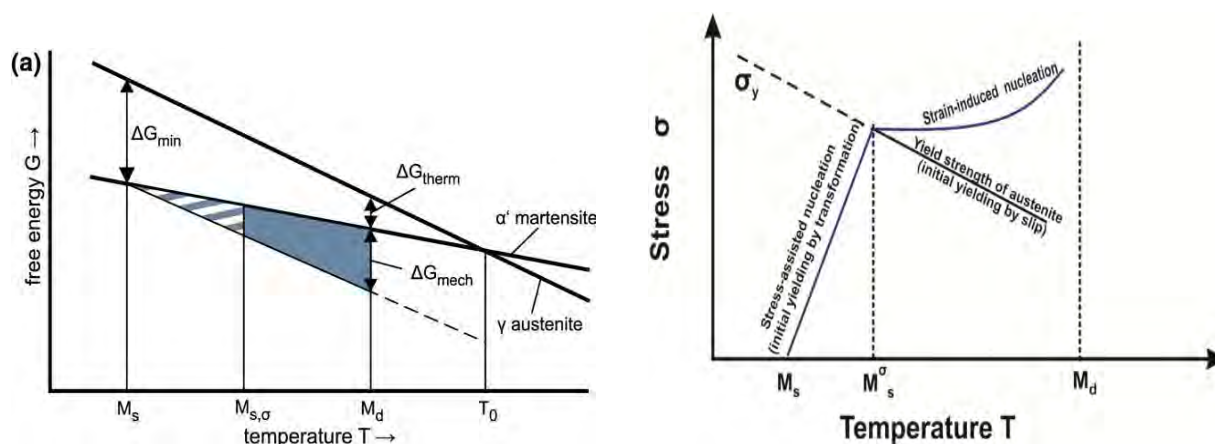


Διάγραμμα 1.1: Διάγραμμα Παραμόρφωσης(%) - Μέγιστη τάση(MPa) για τους AHSS [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP

2.1 Παραμόρφωση χαλύβων Trip

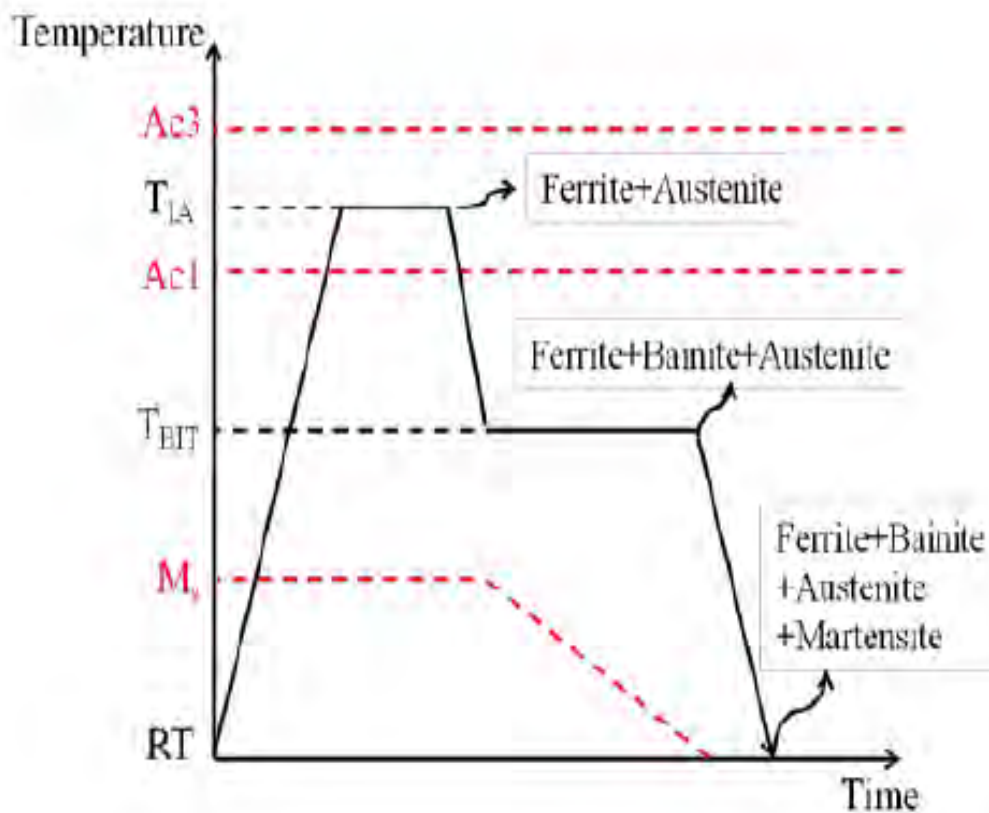
Οι χάλυβες Trip έχουν την ικανότητα να μετασχηματίζονται σε μαρτενσίτη υπο την εφαρμογή μηχανικών φορτίων, μία ιδιαιτερότητα που τους ξεχωρίζει από τα άλλα είδη χαλύβων, με αποτέλεσμα να δίνεται έντονη έμφαση από τις βιομηχανίες για την αξιοποίηση αυτού του φαινομένου. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη υπο παρουσία εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων εξαρτάται έντονα από την θερμοκρασία και την κινούσα δύναμη ΔG όπως απεικονίζεται στα **Διαγράμματα 2.3α-β**. Όταν η θερμοκρασία T είναι μικρότερη από την M_s δεν απαιτείται παρουσία μηχανικού φορτίου ΔG_{mech} έτσι ώστε να συμβεί ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός καθώς η κινούσα δύναμη $\Delta G_{therm} \geq \Delta G_{min}$ επαρκεί για την έναρξη του μετασχηματισμού, καθώς όμως αυξάνεται η θερμοκρασία και λαμβάνει τιμές μεταξύ της M_s και $M_{s,\sigma}$ τότε απαιτείται η επιβολή τάσης μικρότερης από το όριο διαρροής της ωστενιτικής φάσης, αυτός ο μετασχηματισμός ονομάζεται επαγόμενος υπό την τάση (Stress-Induced). Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της $M_{s,\sigma}$ και μικρότερες της M_d , απαιτείται η επιβολή μεγαλύτερης τάσης από το όριο διαρροής της ωστενιτικής φάσης για να λάβει χώρα ο μετασχηματισμός, ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται επαγόμενος υπό την παραμόρφωση (Strain-Induced). Τέλος για τιμές πάνω από την M_d δεν πραγματοποιείται μετασχηματισμός ανεξαρτήτως του μεγέθους του επιβαλλόμενου φορτίου [2].



Διάγραμμα 2.1: Καμπύλες ελεύθερης ενέργειας συναρτήση με την θερμοκρασία για ωστενιτική και μαρτενσιτική φάση (αριστερό σχήμα) [2], Θερμοκρασία για την έναρξη του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού συναρτήση της εφαρμοζόμενης τάσης(δεξίο σχήμα)[3].

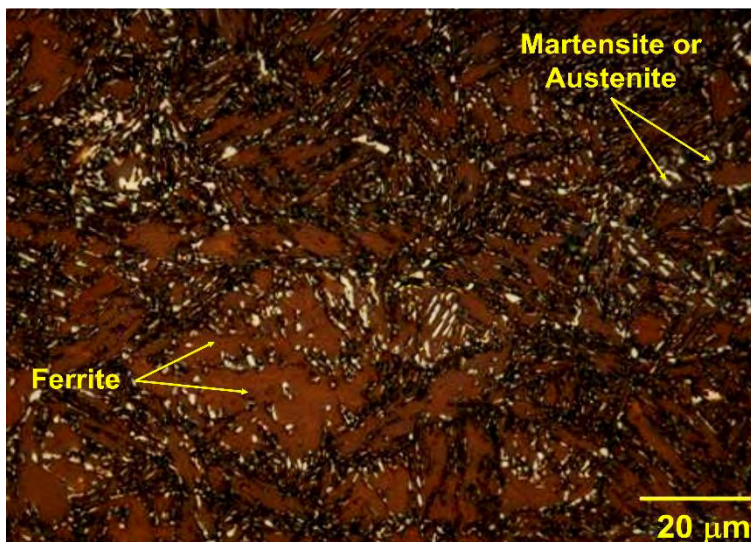
2.2 Διαδικασία παραγωγής

Για την παραγωγή των χαλυβων Trip υπάρχουν δύο μέθοδοι κατεργασίας. Η πρώτη είναι η κατεργασία του χάλυβα μέσω θερμής έλασης, ενώ η δεύτερη μέσω ψυχρής έλασης όπου και οι δυο μέθοδοι δημιουργούν την ίδια μικροδομή στους χάλυβες Trip. Η μόνη σημαντική διαφορά είναι ότι στους χάλυβες της ψυχρής διέλασης θα πρέπει να αναθερμανθούν, πράγμα που αυξάνει το κόστος παραγωγής[4]. Για αυτόν τον λόγο οι αυτοκινητοβιομηχανίες προτιμούν τους χάλυβες θερμής έλασης από την στιγμή που το κόστος παίζει σημαντικό ρόλο. Η παραγωγή χαλυβων ψυχρής έλασης αποτελείται από θερμική κατεργασία δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο το δοκίμιο πρέπει να θερμανθεί μέχρι μια θερμοκρασία T_{IA} η οποία βρίσκεται ανάμεσα στις θερμοκρασίες Ac_1 και Ac_3 όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 2.2** όπου εκεί θα υποστεί ενδοκρίσιμη ανόπτηση και θα σχηματιστεί ένα μίγμα 50% φερρίτη και 50% ωστενίτη. Έπειτα ψύχονται απότομα σε θερμοκρασία T_{BIT} όπου γίνεται ισόθερμος μπαινιτικός μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινίτη. Η απότομη ψύξη στους χάλυβες γίνεται έτσι ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός της περλιτικής φάσης, καθώς ο περλίτης για το σχηματισμό του καταναλώνει άτομα άνθρακα, με αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση του παραμένοντος ωστενίτη στην θερμοκρασία δωματίου [5].



Διάγραμμα 2.2: Θερμική κατεργασία χαλυβων δύο σταδίων [5]

Η μικροδομή του χάλυβα κατα το τέλος της θερμικής κατεργασίας φαίνεται στην **Εικόνα 2.1**, όπου ο φερρίτης απεικονίζεται με καφέ απόχρωση, ο μπαινίτης με μαύρη και ο ωστενίτης-μαρτενσίτης με λευκή.

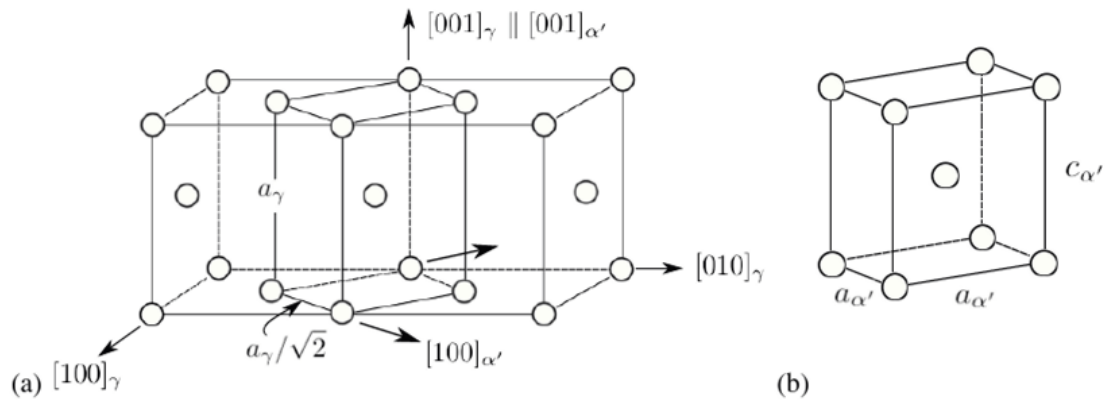


Εικόνα 2.1: Οπτική μικρογραφία ενός χάλυβα Trip [6]

2.3 Χαρακτηριστικά μαρτενσιτικού μετασχηματισμού

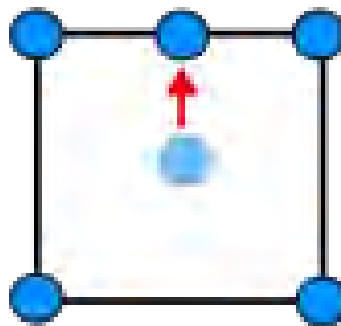
Ο χάλυβας TRIP είναι ένα αρκετά δημοφιλές υλικό λόγω του μετασχηματισμού του παραμένων ωστενίτη σε μαρτενσίτη, μια διαδικασία η οποία ενισχύει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του υλικού. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά αυτού του μετασχηματισμού είναι τα εξής:

- 1) Είναι μη-διαχυτικός (diffusionless): Δεν απαιτείται διάχυση των ατόμων κατά τον μετασχηματισμό, μόνο μικρές κινήσεις οι οποίες είναι συνήθως μικρότερες από τις διατομικές αποστάσεις (interatomic distances). Τα άτομα διατηρούν τις σχετικές τους αποστάσεις κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης[7] .
- 2) Είναι μετατοπιστικός (displacive): Η διαδικασία περιλαμβάνει συνεργατική μετατόπιση των ατόμων διασφαλίζοντας μια αντιστοιχία μεταξύ της αρχικής και της τελικής θέσης. Η συνεργατική μετατόπιση προκύπτει από τον συνδυασμό δύο τύπων παραμορφώσεων [8]:
 - Ομογενής παραμόρφωση πλέγματος (homogenous lattice transformation): Είναι μια συνεργατική μετατόπιση ατόμων όπου το ένα πλέγμα μετασχηματίζεται σε ένα άλλο όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.2**. Για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, η ωστενιτική φάση από την αρχική της μικροδομή FCC μετατρέπεται σε μαρτενσιτική όπου η δομή του πλέγματος είναι BCC (ή BCT). Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται αλλιώς και παραμόρφωση Bain.



Εικόνα 2.2: Αντιστοιχία πλεγμάτων για τον μετασχηματισμό του FCC(αριστερό πλέγμα) σε BCT (δεξί πλέγμα).

- Ανακατανομές: Είναι συνεργατικές μετατοπίσεις ατόμων στο εσωτερικό της κυψελίδας, όπου δύναται να προκαλέσουν αλλαγή της δομής χωρίς όμως να αλλοιώσουν την παραμόρφωση του πλέγματος. Στους μαρτενσιτικούς μετασχηματισμούς, μειονεκτούν σε σύγκριση με τις ομογενείς παραμορφώσεις πλέγματος.



Shuffle

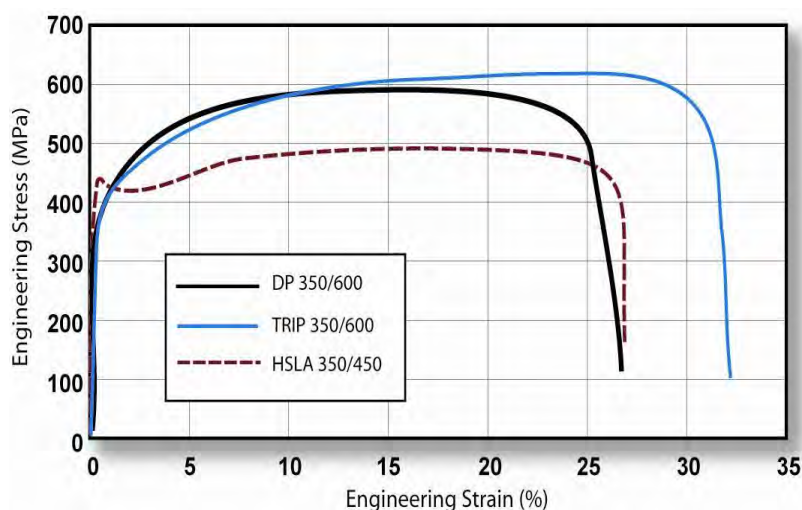
Εικόνα 2.3: Ανακατανομή πλέγματος

- 3) Η κινητική και η μορφολογία τους εξαρτώνται από την ενέργεια παραμορφώσεως η οποία προέρχεται κυρίως από διατμητικές παραμορφώσεις: Η στρεπτική ενέργεια κατά τις διατμητικές παραμορφώσεις επηρεάζει σημαντικά την κινητική του μετασχηματισμού όσο και την μορφολογία του προϊόντος μετασχηματισμού.
- 4) Είναι αθερμικός: Το ποσοστό της μαρτενσιτικής φάσης δεν αυξάνεται με τον χρόνο παρά μόνον με την αύξηση της πτώσης της θερμοκρασίας από την M_s κατά την ψύξη.

2.4 Σύγκριση μεταξύ χαλύβων υψηλής αντοχής

Οι χάλυβες Trip ονομάζονται έτσι λόγω του φαινομένου Trip (Transformation Induced Plasticity), όπου κάτω ύπο την επίδραση μηχανικών τάσεων ο παραμένων ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη, μια ιδιότητα η οποία τους καθιστά αρκετά ιδιαίτερους καθώς λόγω του μετασχηματισμού αλλάζουν οι ιδιότητες τους. Η μικροδομή τους αποτελείται απο φερρίτη, παραμένων ωστενίτη, μπαινίτη και σε ενα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη. Με τον παραμένων ωστενίτη να αποτελείται απο μια υψηλή θερμοκρασιακή φάση η οποία είναι μετασταθής σε θερμοκρασία δωματίου υπό συνθήκες ισορροπίας, το γεγονός αυτό οδηγεί στον ειδικό χειρισμό ως προς την θερμική και χημική επεξεργασίας των χαλυβων έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή μικροδομή.

Οι χάλυβες Trip έχουν έναν εξαιρετικά καλό συνδιασμό μηχανικών ιδιοτήτων αντοχής και διαμορφωσιμότητας όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 2.1** σε σύγκριση με άλλους χάλυβες υψηλής αντοχής [9], οι ιδιότητες αυτές του χάλυβα TRIP οφείλονται στο φαινόμενο του μετασχηματισμού και το στον καλο συνδυασμό της φερριτικής φάσης (ολκιμότητα) και της μαρτενσιτικής φάσης (σκληρότητας) όπου του προσδίδουν υψηλή αντοχή και παραμόρφωση.



Διάγραμμα 2.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης χαλύβων υψηλής αντοχής Dual-Phase (DP), High-Strength Low-Alloy (HSLA) και Transformation Induced Plasticity (TRIP) [9]

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά τους καθιστούν ιδανικούς για την αυτοκινητοβιομηχανία καθώς λόγω της αντοχής αλλά και της διαμορφωσιμότητάς, έχουν την ικανότητα να να μπρούν να διαμορφωθούν σε μικρά πάχη και να απορροφούν μεγάλα ποσά κρουστικής ενέργειας στα κυριότερα τμήματα του οχήματος (**Εικόνα 2.1**) έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια που θα δεχθούν οι επιβάτες.



Εικόνα 2.4: Σημεία οχήματος όπου χρησιμοποιείται ο χάλυβας TRIP

Μία τυπική χημική σύσταση χάλυβα TRIP φαίνεται στον **Πίνακα 2.1** [10] :

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu
$\leq 0.3\%$ κ.β	$\leq 2.2\%$ κ.β	$\leq 2.5\%$ κ.β	$\leq 0.09\%$ κ.β	$\leq 0.015\%$ κ.β	$\geq 0.01\%$ κ.β	$\leq 0.2\%$ κ.β

Πίνακας 2.1: Ποσοστά μεταλλευμάτων ενός τυπικού χάλυβα Trip.

Η μικροδομή τους εμπεριέχει μια μήτρα 50-60% κ.ο φερρίτη, 25-40% κ.ο μπαινίτη, 5-15% κ.ο ωστενίτη και ένα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη. Η προσθήκη πυριτίου (Si) και άλλοτε αλουμινίου (Al) στον χάλυβα είναι καίριας σημασίας καθώς συμβάλει στον ταχύτερο ρυθμό σχηματισμού του μπαινίτη, αυτό γίνεται με σκοπό να αποφευχθεί ο σχηματισμός της περλιτικής φάσης εξαιτίας της μειωμένης ολκιμότητας και της δυθραυστότητας αυτής της μικροδομής, επίσης αποτρέπεται η καθίζηση καρβιδίων στην μπαινιτική περιοχή με αποτέλεσμα να εμπλουτίζουν την ωστενιτική μικροδομή η οποία σταθεροποιείται ανάλογα του ποσοστού του άνθρακα [11].

Η προσθήκη μαγγανίου Mn στην μικροδομή αυξάνει την διαλυτότητα του C στον ωστενίτη και επιβραδύνει τον σχηματισμό του περλίτη. Επίσης μειώνει την μαρτενσιτική θερμοκρασία M_s όπου ξεκινάει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη μέχρι την θερμοκρασία λήξης M_f , αυτό επιφέρει την αύξηση του παραμένον ωστενίτη στην μικροδομή [12]. Υπάρχουν πολλές εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας M_s με την πιο ευρέως διαδεδομένη να είναι η εξίσωση Andrews καθώς αναφέρεται σε κράματα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα όπως οι χάλυβες TRIP. Η εξίσωση για την εύρεση της θερμοκρασίας M_s είναι [13]:

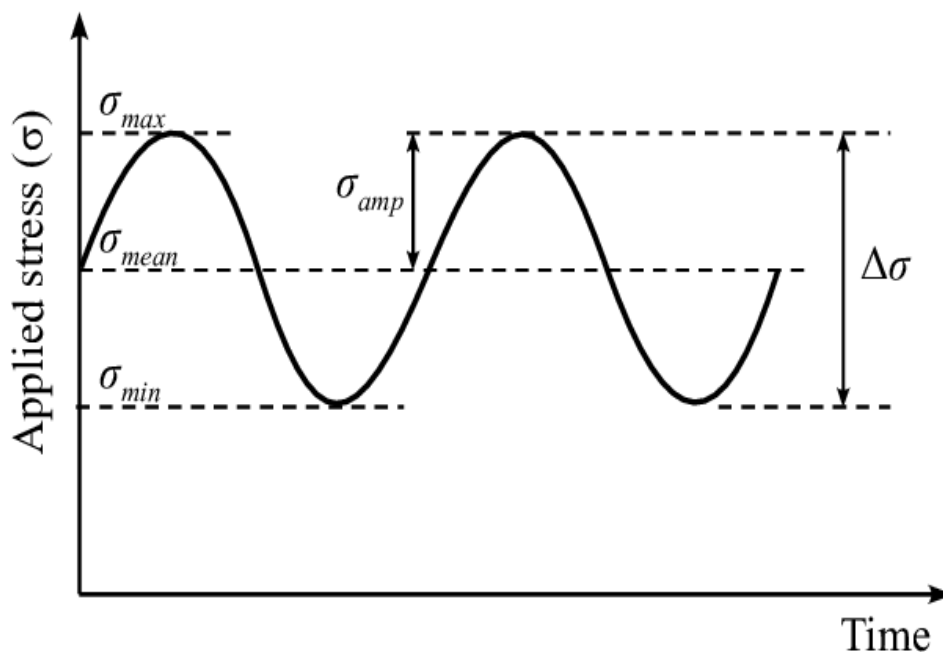
$$M_s = 539 - 423 \cdot C - 30.4 \cdot Mn - 12.1 \cdot Cr - 17.7 \cdot Ni - 7.5 \cdot Mo + 10 \cdot Co - 7.5 \cdot Si \quad (2.1)$$

Όπου στα χημικά σύμβολα αντιστοιχούν οι % κ.β περιεκτικότητες των στοιχείων του χάλυβα. Όπως παρατηρείται από την εξίσωση, τον πρωτεύοντα ρόλο για την μείωση της M_s τον έχει ο άνθρακας. Ανάλογα με την σύσταση του κράματος, η M_s μπορεί να πάρει υψηλές ή και χαμηλές τιμές (υπό του μηδενός).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΠΡΟΫΠΑΡΧΟΥΣΑ ΡΩΓΜΗ

3.1 Γενικά

Η φιλοσοφία σχεδιασμού με ανοχή στην βλάβη εφαρμόζεται κυρίως στην αεροναυπηγική αλλά επεκτείνεται και σε άλλους πιο συμβατικές κατασκευές του τομέα μεταφορών για την μελέτη και κατασκευή ελαφριών δομών. Η βασική πληροφορία που απαιτείται είναι η πειραματική μελέτη της εξέλιξης ρωγμών σε κόπωση. Στα πειράματα αυτά η φόρτιση που, μελετάται φαίνεται στο **Διάγραμμα 3.1** και είναι ημιτονοειδούς συναρτήσεως, όπου το πλάτος της τάσεως παραμένει σταθερό καθόλη την διάρκεια του πειράματος. Οι τιμές σ_{min} και σ_{max} είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της τάσεως, ενώ η τάση σ_{mean} είναι η μέση τάση και σ_{amp} το πλάτος της τάσεως



Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή τάσης με τον χρόνο για σταθερό πλάτος σ_{amp}

Οι σχέσεις που συνδέουν τις παραπάνω τιμές είναι:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{amp} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.3)$$

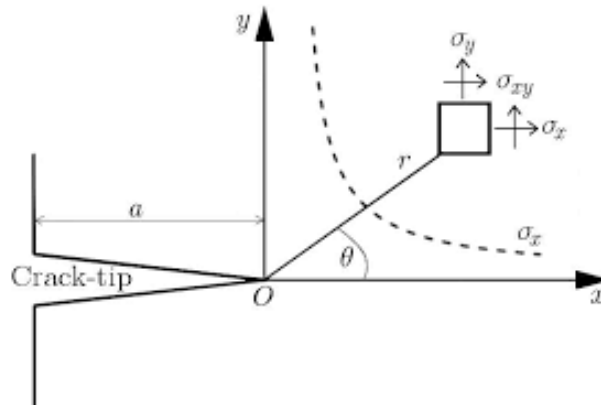
Επίσης μια χρήσιμη σχέση είναι ο λόγος τάσεων R:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad \text{ή} \quad \sigma_{\min} = R \sigma_{\max} \quad (3.4)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max}(1 - R) \quad (3.5)$$

3.2 Πεδίο τάσεων στο άκρο της ρωγμής

Η ύπαρξη προϋπάρχουσας ρωγμής στο δοκίμιο επιδράει σημαντικά στη μηχανική συμπεριφορά του στοιχείου καθώς προκαλεί τοπική συγκέντρωση τάσεων στην αιχμή της ρωγμής όπως και φαίνεται στο **Διάγραμμα 3.2**.



Διάγραμμα 3.2: Πεδίο συγκέντρωσης τάσεων στην ακμή της εγκοπής.

Στην αιχμή της ρωγμής για ομογενές και ισότροπο γραμμικό ελαστικό σώμα, οι σχέσεις των τάσεων για τύπο θραύσης I είναι [14]:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} * \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.5)$$

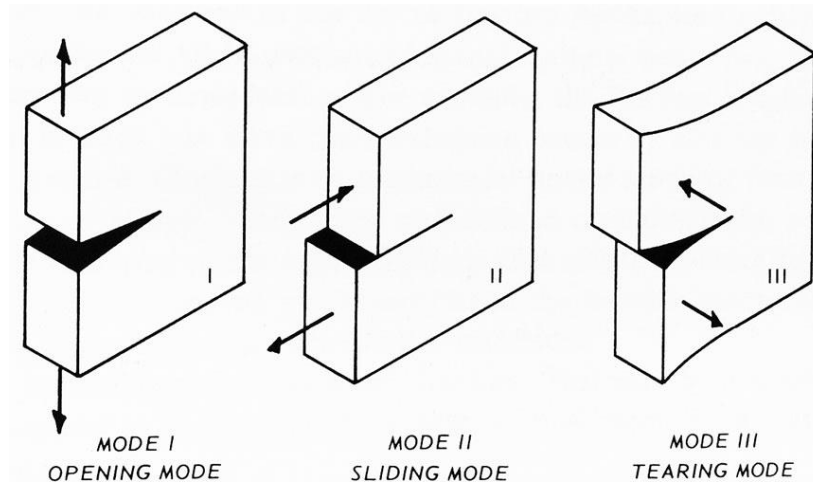
$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} * \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.6)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} * \sin \frac{\theta}{2} * \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.7)$$

Όταν $\theta=0$ τότε οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται ως εξής:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.8)$$

Όπου K είναι ο συντελεστής έντασης τάσεως του υλικού, όπου εξαρτάται από τον τύπο φόρτισης (**Εικόνα 3.1**).



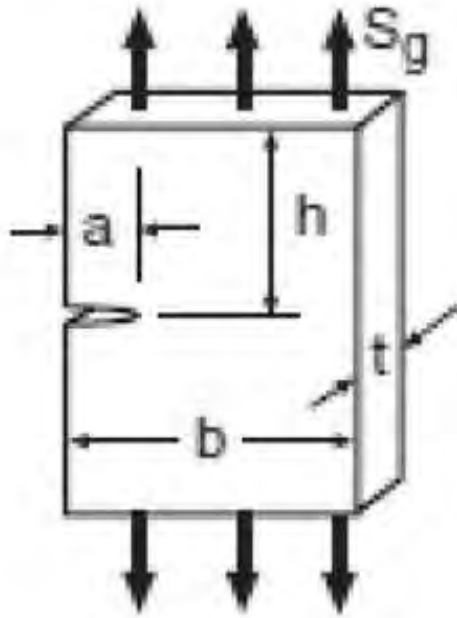
Εικόνα 3.1: Βασικά είδη τύπου φόρτισης

- **Τύπου I (opening mode):** Σε αυτόν τον τύπο θραύσης το εφελκυστικό φορτίο ασκείται κάθετα στο επίπεδο όπου αυξάνεται το μήκος ρωγμής και είναι ο συνηθέστερος τύπος για την εφαρμογή πειραματικών μελετών καθώς απλοποιείται σημαντικά την διαδικασία του πειράματος.
- **Τύπου II (sliding mode):** Εξαιτίας της εφαρμογής διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται εφαπτομενικά στο επίπεδο ρηγματώσεις, οι επιφάνειες του ρήγματος ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη.
- **Τύπου III (tearing mode):** Εξαιτίας της εφαρμογής διατμητικών δυνάμεων όπου ασκούνται παράλληλα στο επίπεδο ρηγματώσεις, οι επιφάνειες του ρήγματος ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη.

Για φόρτιση τύπου I, ο συντελεστής έντασης τάσεων εκφράζεται από την σχέση:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.9)$$

Όπου Y είναι ένας διορθωτικός συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από την γεωμετρία αλλά και από τις διαστάσεις του δοκιμίου, δηλαδή από τον λόγο μήκους ρωγμής a προς συνολικό πλάτος b του δοκιμίου.



Εικόνα 3.2:Γεωμετρία και διαστάσεις δοκιμίου με πλευρική ρωγμή

3.3 Επίπεδη ένταση και επίπεδη μαραμόρφωση

Το πάχος του δοκιμίου t επιδρά σημαντικά στην δυσθραυστότητα K_c , καθώς για μικρά πάχη το δοκίμιο υπόκειται σε επίπεδη ένταση, με την αύξηση του πάχους η τιμή K_c μειώνεται έως ότου το t υπερβεί μια ορισμένη τιμή όπου η δυσθραυστότητα τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή K_{Ic} , τότε το δοκίμιο υπάγεται σε επίπεδη παραμόρφωση[15]. Ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου μπορούμε να το εντάξουμε σε μια από τις δύο εντατικές καταστάσεις (**Διάγραμμα 3.3**):

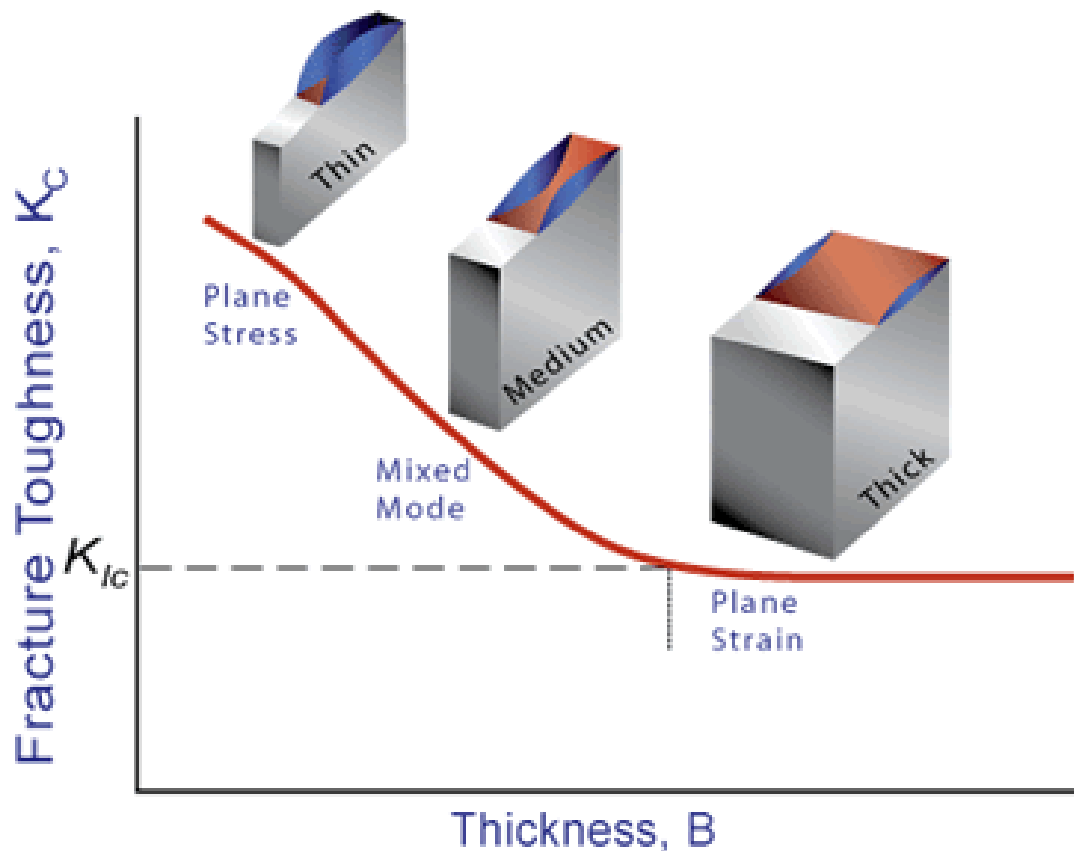
- **Επίπεδη παραμόρφωση (plane strain):** Εάν ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη, τότε στο δοκίμιο υπάγεται σε επίπεδη παραμόρφωση:

$$t, a, a - b, h \geq 2.5 \left(\frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.10)$$

Όπου το K υπολογίζεται από την σχέση 3.9 ανεξαρτήτου τόν τύπο φόρτισης, το σ_0 είναι το όριο διαρροής του υλικού και οι τιμές t, a, b, h είναι οι διαστάσεις του δοκιμίου όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.2**.

- **Επίπεδη ένταση (plane stress):** Αυτή η περίπτωση ισχύει, όταν παραβιάζεται η συνθήκη της σχέσεως 3.10

Για να ισχύει μια από τις δύο θεωρήσεις θα πρέπει να ελεγχθεί εάν ικανοποιείται η συνθήκη μικρής πλαστικότητας-συνθήκη γραμμικής ελαστικής θεωρίας όπου θα αναπτύξουμε στο παρακάτω κεφάλαιο.

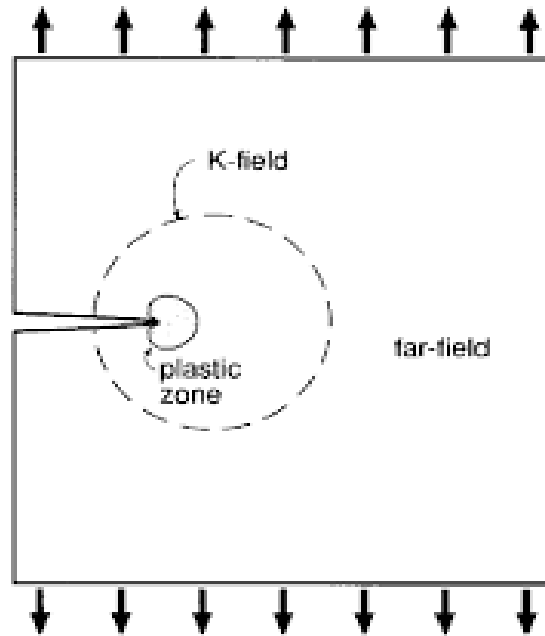


Διάγραμμα 3.3: Επίδραση πάχους t στην κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεως [16]

3.4 Συνθήκη μικρής πλαστικότητας-Συνθήκη γραμμικής ελαστικής θεωρίας

Η γραμμική ελαστική θεωρία θραύσης (Linear Elastic Fracture Mechanics LEFM) αναπτύχθηκε από τον G.Irwin, ο οποίος βασίστηκε στα πρώιμα έργα του A.A.Griffith και E.Orowan. Η βασική ιδέα της γραμμικής ελαστικής θεωρίας θραύσης είναι [17] ότι στην αιχμή της ρωγμής η πλαστική ζώνη πρέπει να έχει μέγεθος μικρότερο από τις άλλες διαστάσεις του δοκιμίου, έτσι ώστε έξω από αυτήν την περιοχή να ισχύουν οι σχέσεις ελαστικού τασικού πεδίου (elastic stress field). Η περιοχή αυτή ονομάζεται πεδίο K (Εικόνα 3.3) και ισχύει η εξίσωση 3.9. Στην περίπτωση που η πλαστική ζώνη έχει μεγαλύτερο μέγεθος, παύουν να ισχύουν οι σχέσεις της γραμμικής ελαστικής θεωρίας θραύσης και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ελαστοπλαστική θεωρία θραύσης (Elastic-Plastic Fracture Mechanics EPFM) [18]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα ασχοληθούμε με την περίπτωση της ελαστοπλαστικής θεωρίας θραύσης καθώς οι διαστάσεις του δοκιμίου ικανοποιούν την συνθήκη γραμμικής ελαστικής θεωρίας. Η σχέση που προσδιορίζει εάν ικανοποιείται ή όχι η συνθήκη είναι η εξής:

$$a, b - a, h \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.11)$$



Εικόνα 3.3: Μέγεθος πλαστικής ζώνης σε σχέση με το πεδίο K

Όταν ικανοποιείται η γραμμική ελαστική θεωρία θραύσης και το σώμα δέχεται επίπεδη ένταση τότε το μήκος την πλαστικής ζώνης r_p υπολογίζεται απο τον εξής τύπο [19]:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.12)$$

Σε αντίθετη περίπτωση όταν το σώμα παραμορφωνεται στο επίπεδο και ισχυει γραμμική ελαστική θεωρία θραύσης η εξίσωση για το μήκος της πλαστικής ζώνης r_p είναι[19]:

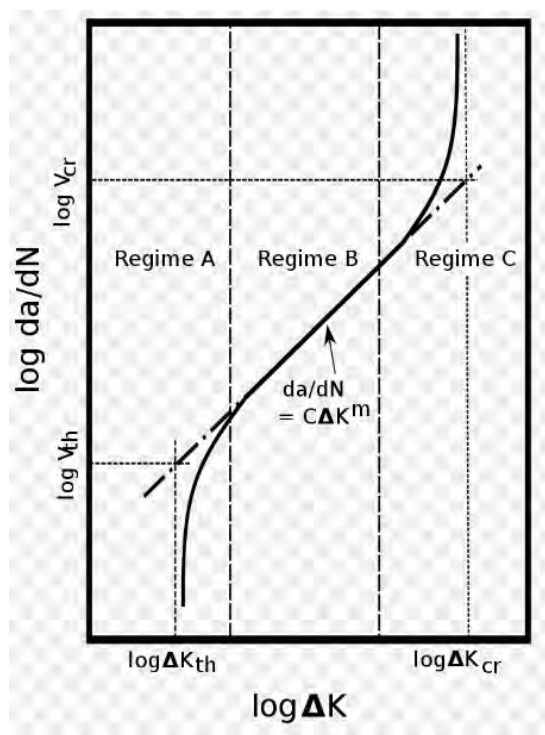
$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.13)$$

3.5 Ρυθμός διάδοσης ρηγμάτωσης

Κατά την κόπωση μιας μηχανικής κατασκευής ενδέχεται να σχηματιστεί μικρορωγμή κάτω υπο την υποβολή τάσεων, η οποία με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται σε μέγεθος μέχρι να αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή όπου η κατασκευή θα υποστεί ακαριαία θραύση. Στην φιλοσοφία σχεδιασμού με ανοχή στην βλάβη απαιτείται η μελέτη ως προς τον ρυθμό διάδοσης ρωγμής έτσι ώστε να προσδιορισθεί το κρίσιμο μήκος ρωγμής για το οποίο προκύπτει ανεξέλεγκτη διάδοσή της και να γίνει έγκαιρα παρέμβαση για να αποφευχθεί ένα τέτοιο σενάριο. Για τον υπολογισμό του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής $\left(\frac{da}{dN}\right)$ έχουν βρεθεί πολλά εμπειρικά μοντέλα στην προσπάθεια να εξηγηθεί η βλάβη που δέχεται το σώμα εξαιτίας της κόπωσης με το πέρασμα του χρόνου, με το πιο ευρέως διαδεδομένο αυτό του Paris-Erdogan [20], όπου λαμβάνει χώρα για λόγο τάσεων $R=0$. Ο ρυθμός εξέλιξης ρωγμής περιγράφεται εμπειρικά από την εξίσωση:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3.14)$$

Όπου C, m ιδιότητες του υλικού.



Διάγραμμα 3.4: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής προς συντελεστή έντασης τάσεως [21].

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (Διάγραμμα 3.4) η καμπύλη χωρίζεται σε τρεις περιοχές (A,B,C) [22]. Για την περιοχή A όταν ο συντελεστής έντασης τάσεως ΔK παίρνει μικρές τιμές η διάδοση της ρωγμής γίνεται με γοργό ρυθμό στην περίπτωση όμως που το ΔK είναι μικρότερο από το κατώφλι του συντελεστή έντασης τάσεως ΔK_{th} (threshold stress intensity factor) η ρηγμάτωση δεν έχει την

απαραίτητη ενέργεια έτσι ώστε σε επεκταθεί. Σε αυτήν την περιοχή σημαντική επίδραση έχει το περιβάλλον καθώς σε συνθήκες διάβρωσης η ρωγμή σχηματίζεται και επεκτείνεται σε σημεία όπου υπάρχουν ασυνέχειες του υλικού, η μικροδομή του υλικού καθυστερεί την εξέλιξη της ρωγμής στα υλικά όπου έχουν μεγάλη πυκνότητα γραμμοαταξιών και μεγάλο μέγεθος κόκκων. Όσο αυξάνεται η τιμή του ΔK η κλίση του διαγράμματος τείνει να σταθεροποιηθεί για ένα εύρος τιμών, αυτή είναι η περιοχή B και ισχύουν όλα τα μοντέλα που αναφέραμε παραπάνω με το πιο κοινό να είναι αυτό του Paris-Erdogan. Σε αυτήν την περιοχή το περιβάλλον και η μικροδομή δεν επιδρούν τόσο στο υλικό σε αντίθεση με τις ιδιότητες του (συντελεστές C,m). Για να υπολογίσουμε των αριθμό των κύκλων φόρτισης (περιοχή B) μπορούμε να πάρουμε την σχέση 3.19 και αφού ολοκληρώθει καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\Delta N = \frac{\alpha_f^{1-\frac{m}{2}} - \alpha_0^{1-\frac{m}{2}}}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m (1 - m/2)} \quad , \quad m \neq 2 \quad (3.15)$$

$$\Delta N = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_f}{\alpha_0}\right)}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^2} \quad , \quad m = 2 \quad (3.16)$$

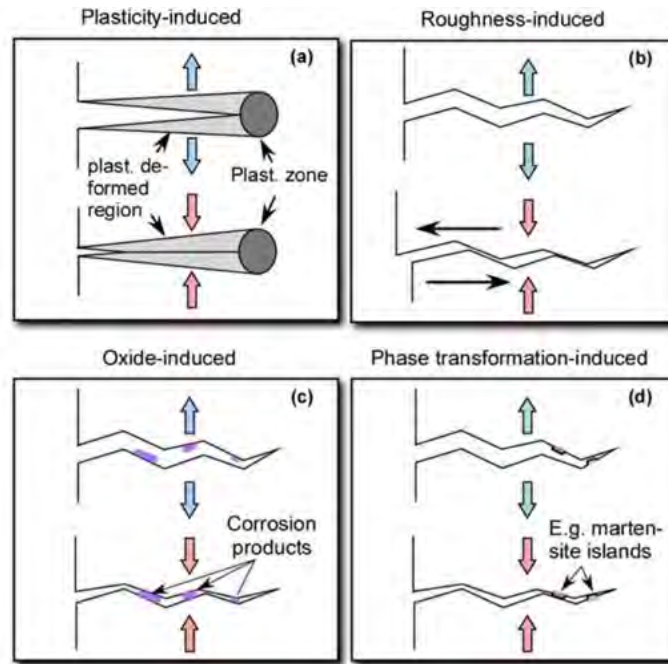
Όπου α_0 είναι το αρχικό μήκος της περιοχής B, α_f είναι το τελικό μήκος και υπολογίζεται από την σχέση 3.9 για $K=K_{\max}$ και $\sigma=\sigma_{\max}$. Ο διορθωτικός συντελεστής Y εξαρτάται σημαντικά από το μήκος ρωγμής α αλλά λόγω απλούστευσης στην ολοκλήρωση της εξίσωσης 3.14 γίνεται η υπόθεση ότι η Y είναι ανεξάρτητη του μήκους ρωγμής α με την παρουσία μιας απόκλισης, για τον υπολογισμό της Y χρησιμοποιείται η αρχική τιμή α_0 . Για υψηλές τιμές ΔK η ρωγμή επεκτείνεται με μεγάλο ρυθμό μέχρι την τελική θραύση.

3.6 Μηχανισμός κλεισίματος ρωγμής (Crack Closure)

Κατά την διάρκεια της κυκλικής φόρτισης ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής επηρεάζεται από διαφόρους μηχανισμούς που συμβάλουν στο πρόωρο κλείσιμο των επιφανειών της, επιβραδύνοντας τον ρυθμό διάδοσης ρωγμής. Οι δύο βασικότερες κατηγορίες μηχανισμών είναι [23] :

- Εγγενείς μηχανισμοί (intrinsic mechanisms): Ενεργούν μπροστά από την αιχμή της ρωγμής και είναι ανεξάρτητοι από το μήκος της ρωγμής καθώς και από την γεωμετρία του δοκιμίου. Στην πλαστική ζώνη εξαιτίας της συσσώρευσης γραμμοαταξιών και της αποκόλλησης των διεπιφανειών δημιουργούνται μικρορωγμές ή και κενά, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται ο σχηματισμός νέων επιφανειών.
- Εξωγενείς μηχανισμοί (extrinsic mechanisms): Ενεργούν συνήθως πίσω από την αιχμή και οδηγούν στην επιβράδυνση του ρυθμού εξέλιξη την ρωγμής εξαιτίας (**Εικόνα 3.4**):
 - a) Φαινομένων διακλάδωσης ή απόκλισης της ρωγμής από το αρχικό επίπεδο εξέλιξης.
 - b) Παραμένουσες τάσεις, μετασχηματισμός φάσεων.

- c) Οξείδωση των ελεύθερων επιφανειών, τραχύτητα από την εξέλιξη της θραύσης στο μονοπάτι που αναπτύσσεται η ρωγμή, πλαστικότητα στο άκρο της ρωγμής.



Εικόνα 3.4:Εξωγενείς μηχανισμοί που επιδρούν στο δοκίμιο κατά την διάρκεια της κόπωσης.

α)Τοπική πλαστικότητα δοκίμιου, β)Τραχύτητα κατά το κλείσιμο της ρωγμής,

γ) Οξείδωση λόγω έκθεσης στην ατμόσφαιρα και δ) Τοπικός μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη.

Το μοντέλο Elber's λαμβάνει υπόψιν τους παράγοντες που συμβάλουν στο πρόωρο κλείσιμο των επιφανειών της επιβραδύνοντας τον ρυθμό διάδοσης ρωγμής εξαιτίας της μείωσης του ωφέλιμου συντελεστή έντασης τάσεως ΔK_{eff} . Η σχέση που εκφράζει το μοντέλο Elber's είναι [20]:

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta K_{eff})^P \quad (3.14)$$

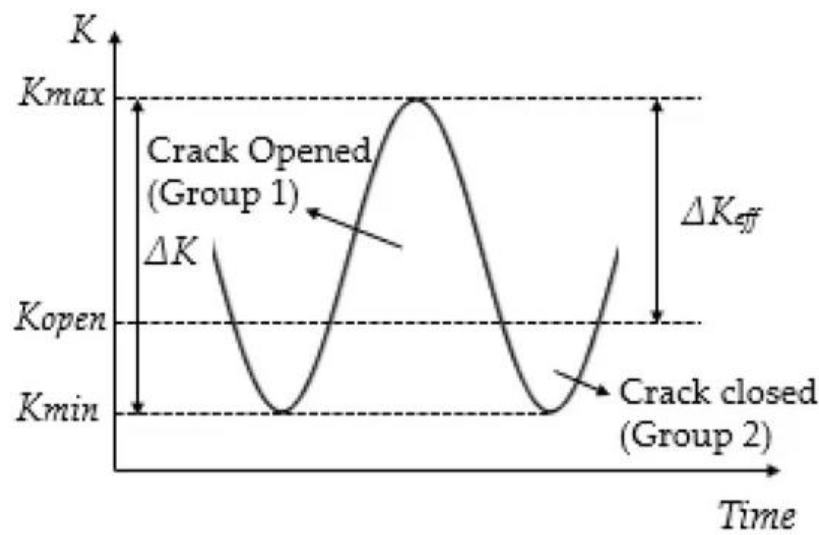
$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U\Delta K \quad (3.15)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (3.16)$$

Όπου K_{op} είναι ο συντελεστής έντασης τάσεως που απαιτείται έτσι ώστε να ανοίξει η ρωγμή και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 3.9 για $\sigma_{op}(P_{op})$. Η τιμή U είναι ο λόγος κλεισίματος του Elber και εξαρτάται από την παράμετρο R . Οί συντελεστές D, P είναι σταθερές του υλικού.

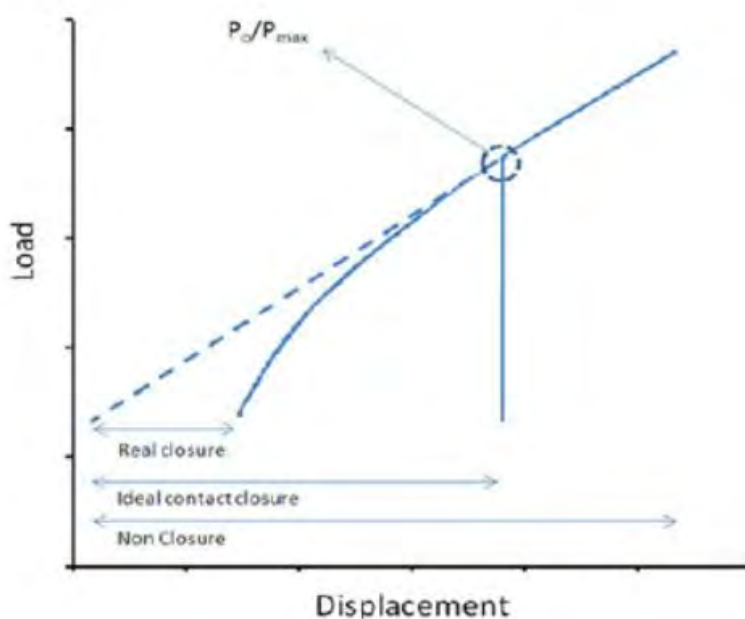
Από τα παραπάνω που αναφέραμε κατανοούμε οι μηχανισμοί αυτοί αυξάνουν την απαιτούμενη δύναμη P_{op} και συνεπώς του συντελεστή έντασης τάσεων K_{op} (**Διάγραμμα 3.5**). Για τιμες φορτίων κάτω από την τιμή P_{op} η ρωγμή δεν έχει την απαραίτητη ενέργεια έτσι ώστε να διαδοθεί. Αντιθέτως όταν ο αποτελεσματικός συντελεστής έντασης τάσεων $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ αποκτάει θετικές τιμές τότε το δοκίμιο είναι σε θέση να υπερνικήσει τους εξωγενείς μηχανισμούς και συνεπώς να αυξηθεί το μήκος της ρωγμής.

Εν ολίγοις το μέγεθος της τιμής ΔK_{eff} καθορίζει τον ρυθμό ανάπτυξης της ρωγμής, όπου για χαμηλές τιμές η διάδοση επιβραδύνεται και για υψηλές επιταχύνεται.



Διάγραμμα 3.5: Μεταβολή του συντελεστή έντασης τάσεως K συναρτήση του χρόνου.

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης δύναμης P_{op} μπορούμε να απευθυνθούμε στην ελαστική τεχνική ενδοτικότητας (compliance technique). Με την καταγραφή ενός ικανοποιητικού αριθμού δεδομένων της μετατόπισης των χείλων του ρήγματος και της δύναμης κατά την διάρκεια της φόρτισης (**Διάγραμμα 3.1**) σε έναν πλήρη κύκλο στην συνέχεια γίνεται η αναπαραστάση του **Διαγράμματος 3.6** όπου η δύναμη P_{op} να βρίσκεται στην θέση όπου η κλίση ξεκινάει να λαμβάνει σταθερές τιμές[24].



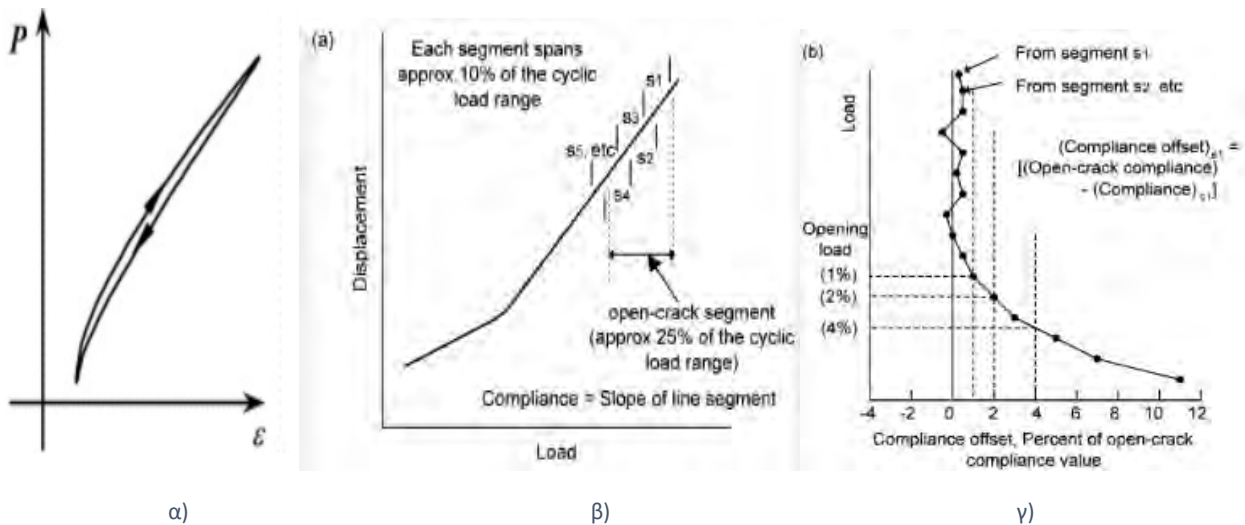
Διάγραμμα 3.6: Εφαρμοζόμενο φορτίο συνάρτηση της μετατόπισης που λαμβάνουμε από το επιμηκυνσιόμετρο.

Μια άλλη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της P_{op} είναι η μέθοδος αντιστάθμισης ενδοτικότητας (compliance offset method) [25] για την οποία αφού ληφθούν όλα τα δεδομένα (φόρτισης και εκφόρτισης) για έναν πλήρη κύκλο όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 3.7α** εφαρμόζεται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων από το 90% της μέγιστης δύναμης έως ένα εύρος 25% της δύναμης (**Διάγραμμα 3.7β**) με σκοπό να βρεθεί η κλίση της καμπύλης κατά την αποφόρτιση, η τιμή αυτή ονομάζεται open-crack compliance και παραμένει σταθερή καθόλη την διαδικασία.

Μετάπειτα γίνεται διαχωρισμός της καμπύλης φόρτισης από το 95% της μέγιστης δύναμης, σε ίσα τμήματα εύρους 10% μεταξύ τους, θα πρέπει η αρχή του επόμενου τμήματος να βρίσκεται σε απόσταση 5% από την αρχή και το τέλος του προηγούμενου. Έπειτα υπολογίζεται η μέση τιμή της δύναμης καθώς και η κλίση για κάθε τμήμα μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Οι κλίσεις των τμημάτων ονομάζονται compliance. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία με την χρήση της εξίσωσης 3.17 γίνεται αναπαράγωγή των μέσων τιμών των δυνάμεων κάθε τμήματος με την αντίστοιχη τιμή compliance offset (Διάγραμμα 3.7γ), συνήθως η P_{op} υπολογίζεται για 2% compliance offset.

Η ολόκληρη διαδικασία αποσκοπεί στην εύρεση της θέσης όπου υπάρχει απόκλιση (compliance offset) μεταξύ της τιμής open-crack compliance από την compliance και δίνεται από την σχέση:

$$\text{compliance offset} = \frac{(\text{open} - \text{crack compliance}) - (\text{compliance})}{(\text{open} - \text{crack compliance})} * 100 \quad (3,17)$$



Διάγραμμα 3.7: α) Εφαρμοζόμενο φορτίο συνάρτηση της μετατόπισης για φόρτιση και αποφόρτιση, β) Οπτική απεικόνιση διάσπασης τμημάτων για την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων του διαγράμματος μετατόπισης συναρτήση δυνάμεως, γ) Διάγραμμα δύναμης με ποσοστό αντιστάθμισης συμμόρφωσης offset.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Στόχοι πειραματικής μελέτης

Ο στόχος της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας είναι η διεξαγωγή συμπερασμάτων και συγκρίσεων της επίδρασης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ως προς την κυκλική κόπωση. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται μεταξύ δοκιμών αναφοράς (Reference) και δοκιμών που παραμορφώθηκαν πλαστικά με 4%,8% και 12% επιμήκυνση στα οποία η μαρτενσιτική φάση αυξάνεται αντίστοιχα εξαιτίας του μετασχηματισμού. Η πλαστική παραμόρφωση καθώς και η κοπή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στην εκπόνηση προγενέστερης διπλωματικής εργασίας όπου προσδιορίστηκε και ο ποσοστιαίος μετασχηματισμός για κάθε δοκίμιο όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.1** [26].

Μόνιμη Πλαστική Παραμόρφωση (%)	Αρχικό ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη [26] (%)	Τελικό ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη [26] (%)	Ποσοστό μετασχηματισμού ωστενίτη [26](%)
0	15.8	15.8	-
4	15.8	12.8	18.99
8	15.8	10.4	34.18
12	15.8	9.05	42.72

Πίνακας 4.1: Ποσοστά παραμένουτος ωστενίτη για κάθε ποσοστού προέντασης

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Αντοχής των Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα κόπωσης ήταν η Instron 8801 (**Εικόνα 4.1**), όπου με εφαρμογή κατάλληλου λογισμικού καταγράφονται τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του μήκους της ρωγμής.



Εικόνα 4.1:Μηχανή Instron 8801

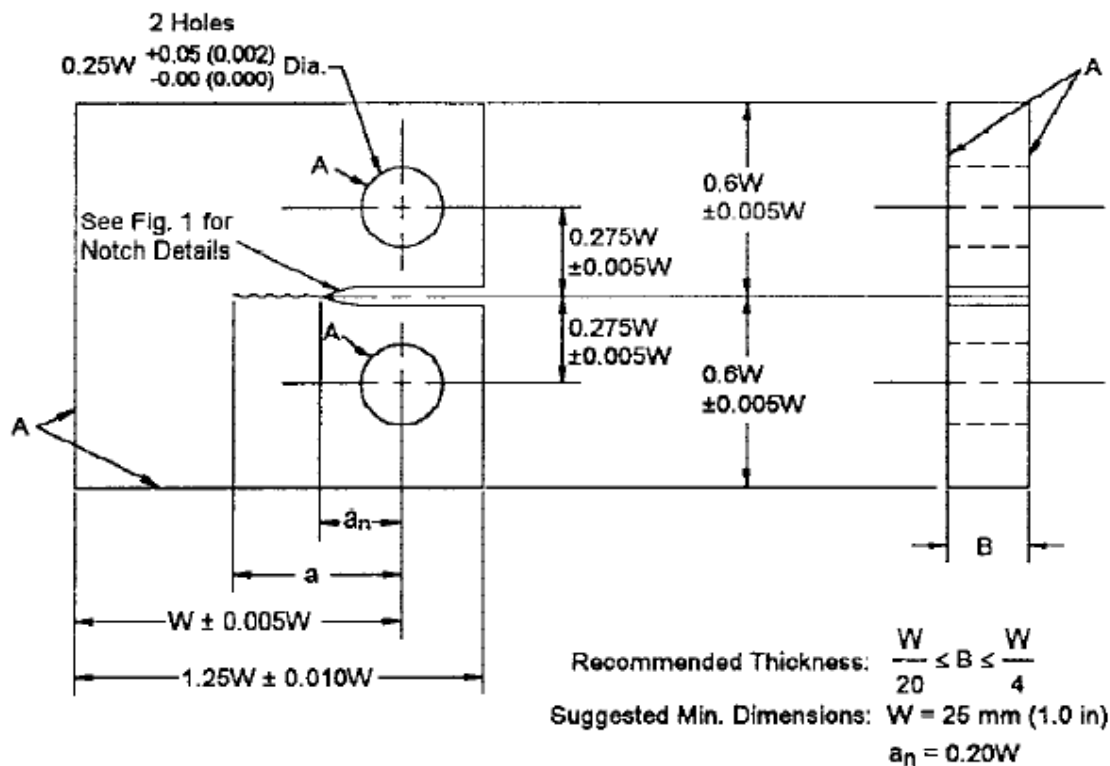
4.2 Διαδικασία πειραμάτων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε για τις προδιαγραφές ASTM E647-00 International [27]

4.2.1 Διαστασιολόγηση και υπολογισμός διαφόρων παραμέτρων για την έναρξη του πειράματος

Τα πρώτα βασικά βήματα της διαδικασίας χωρίζονται σε τρία στάδια, διαστασιολόγηση των δοκιμών, εύρεση της δύναμης ΔP όπου θα γίνονται τα πειράματα και τελευταίο στάδιο ο υπολογισμός της συχνότητας f .

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας ήταν ο έλεγχος ανοχών των διαστάσεων των δοκιμών με γεωμετρία C(T) «COMPACT TENSION» όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.2**, καθώς οι διαστάσεις παίζουν καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα των πειραμάτων, στην κατάταξη τους «επίπεδη τάση ή παραμόρφωση» και κυρίως στην εγκυρότητα τους.

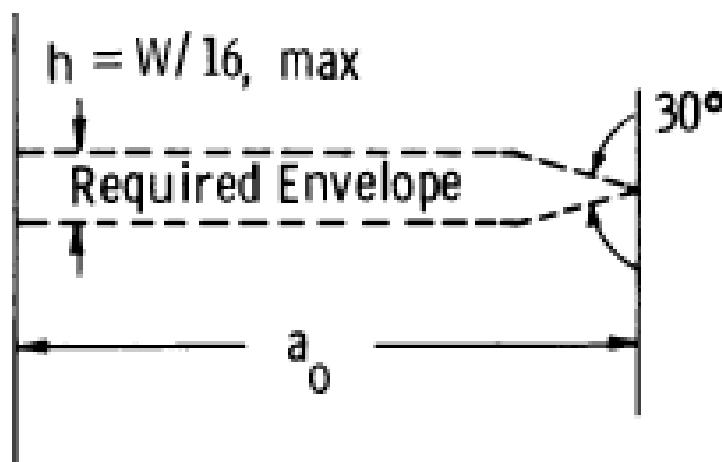


Εικόνα 4.2: Διαστάσεις δοκιμίου C(T) σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM E 647 – 00.

Έπειτα θα πρέπει να υπολογιστεί την τιμή pre-crack $a_{pre-crack}$, καθώς απο την τιμή αυτή μέχρι την τιμή όπου ισχύει η συνθήκη γραμμικής ελαστικής θεωρίας θράσεως κατασκευάζεται το διάγραμμα για την γραμμική περιοχή Paris-Erdogan. Η $a_{pre-crack}$ με βάση τον κανονισμό είναι η μέγιστη τιμή από τα παρακάτω δεδομένα:

$$\max(0.1B, h, 1 \text{ mm}) \quad (4.1)$$

Με h να είναι η πραγματική απόσταση των εγκοπών (**Εικόνα 4.3**)



Εικόνα 4.3: Διαστάσεις εγκοπής ($h=W/16$ είναι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της εγκοπής που ορίζει ο κανονισμός).

Ο παρακάτω πίνακας παρέχει τα δεδομένα του δοκιμίου με βάση την διαστασιολόγηση αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών [26] που απαιτούνται κατά την πειραματική διαδικασία δηλαδή τον υπολογισμό του μήκους ρωγμής a καθώς και του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK :

Δοκίμια	W (mm)	B (mm)	h (mm)	a_n (mm)	$a_{pre-crack}$ (mm)	σ_0 ή σ_y (MPa)	E (GPa)
A1_Ref	39	1.5	2.2	8	10.2	515	210
A2_Ref	39	1.5	2.2	7	10.2	515	210
B1_Ref	39	1.5	2.2	8	10.2	515	210
B1_Ref	39	1.5	2.2	8	10.2	515	210
A1_4%Pre-Strain	40	1.5	2.2	8	10.2	705	210
A2_4%Pre-Strain	40	1.4	2.2	8	10.2	705	210
A1_8%Pre-Strain	39.5	1.45	2.2	8	10.2	791.4	210
A2_8%Pre-Strain	40	1.45	2.2	8	10.2	791.4	210
A1_12%Pre-Strain	40	1.4	2.2	8	10.2	797.085	210
A2_12%Pre-Strain	40	1.4	2.2	8	10.2	797.085	210

Πίνακας 4.2: Διαστάσεις και μηχανικές ιδιότητες δοκιμών Trip.

Δεύτερο βασικό βήμα είναι ο υπολογισμός του εύρους της δύναμης $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$, η οποία εφαρμόζεται για όλα τα δοκίμια. Ο υπολογισμός γίνεται με επίλυση ως προς ΔP της παρακάτω εξίσωσης βάση του κανονισμού:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} (0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4) \quad (4.2)$$

Με $\alpha = a/W$, a να είναι το μήκος της ρωγμής και W η απόσταση από το κέντρο των οπών μέχρι το άκρο του δοκιμίου. Η παραπάνω σχέση ισχύει για τιμές $\alpha \geq 0.2$.

Η τιμή ΔP βρέθηκε από τις διαστάσεις του δοκιμίου A1_Ref σε υπολογιστικό φύλλο έπειτα από διάφορες τιμές ΔK . Η τιμή που υπολογίστηκε ισοδυναμεί με $\Delta P = 1 \text{ kN}$ για $\Delta K = 17.828 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ και $a = 10.2 \text{ mm}$. Ο λόγος τάσεων R ελήφθηκε ίσος με 0.1.

Για την συχνότητα f , επιλέχθηκε τιμή $f = 10 \text{ Hz}$.

4.2.2 Εξισώσεις του κανονισμού ASTM E647-00 για τα διαγράμματα Paris-Erdogan

Ο υπολογισμός του μήκους της ρωγμής a και η εύρεση του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK έγινε σε υπολογιστικό φύλλο, καθώς διευκόλυνε αρκετά στον υπολογισμό των πράξεων, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που λήφθηκαν από την Instron 8801.

Τα δεδομένα που απαιτούνται, είναι η δύναμη $P_{\max}$, αλλά και η παραμόρφωση $v_{\max}$ που καταγράφει το επιμηκυνσιόμετρο (extensometer) **Εικόνα 4.4**.



Εικόνα 4.4: Τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρο για την καταγραφή παραμόρφωσης $v_{\max}$.

Στην συνέχεια με τα δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω και στις ιδιότητες του υλικού (**Πίνακας 4.1**) είναι εύκολο να υπολογιστεί η αδιάστατη τιμή u_x , καθώς με την χρήση μιας επιπρόσθετης εξίσωσης υπολογίζεται το μήκος της ρωγμής a .

$$u_x = \left\{ \left[\frac{E v_{\max} B}{P_{\max}} \right]^{1/2} + 1 \right\}^{-1} \quad (4.3)$$

$$\alpha = a/W = C_0 + C_1 u_x + C_2 u_x^2 + C_3 u_x^3 + C_4 u_x^4 + C_5 u_x^5 \quad (4.4)$$

Με Ε το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και C_i οι συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται απο την θέση καταγραφής του επιμηκυνσιόμετρου.

Ο υπολογισμός των σταθερών C_i του μοντέλου Paris-Erdogan γίνεται με την χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων σε όλα τα στοιχεία da/dN που λάμβανουν χώρα σε ένα εύρος ΔK το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 15 και 50 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Ο υπολογισμός αυτός απαιτεί την σχεδίαση των διαγραμμάτων του μοντέλου Paris-Erdogan όπου γίνεται με την χρήση των παρακάτω εξισώσεων όπου μπορούμε να υπολογίζουμε τον ρυθμό εξέλιξης της ρωγμής με τον συντελεστή έντασης τάσεων για όλα τα δεδομένα απο το pre-cracking μέχρι τον κύκλο όπου σταματάει να ικανοποιείται η συνθήκη γραμμικής ελαστικής θεωρίας θραύσης (Εξίσωση 3.22 για $K=K_{\max}$):

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (4.5)$$

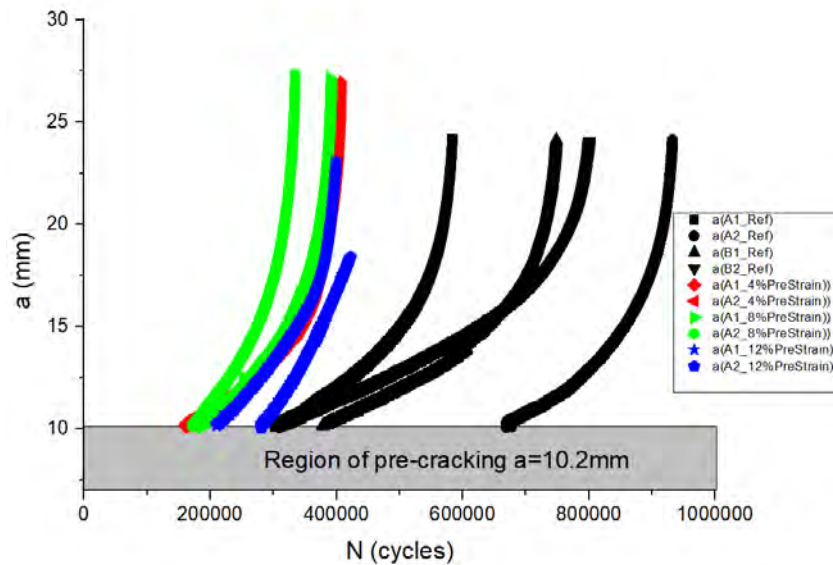
$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + a_{avg})}{(1 - a_{avg})^{3/2}} (0.886 + 4.64a_{avg} - 13.32a_{avg}^2 + 14.72a_{avg}^3 - 5.6a_{avg}^4) \quad (4.6)$$

$$a_{avg} = \frac{a_{avg}}{W} \mu \varepsilon a_{avg} = \frac{a_{i+1} + a_i}{2} \quad (4.7)$$

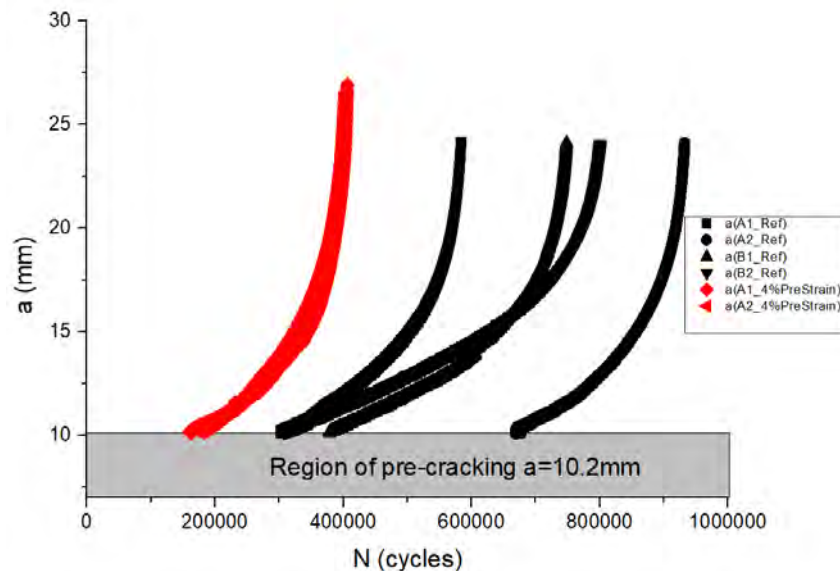
4.3 Αποτελέσματα πειραμάτων

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την μελέτη του χάλυβα Trip 700

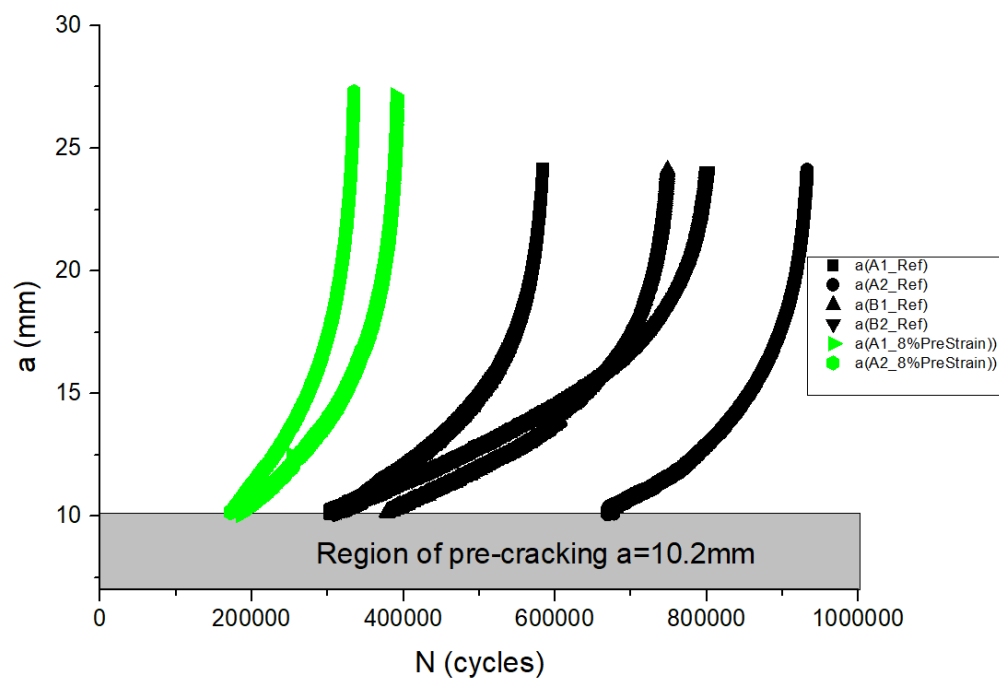
Αφού γίνει ολοκλήρωση τις διαδικασίας που αναφέρθηκε παραπάνω και γίνουν οι απαραίτητες πράξεις σε υπολογιστικό φύλλο, λήφθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 4.1-4.5).



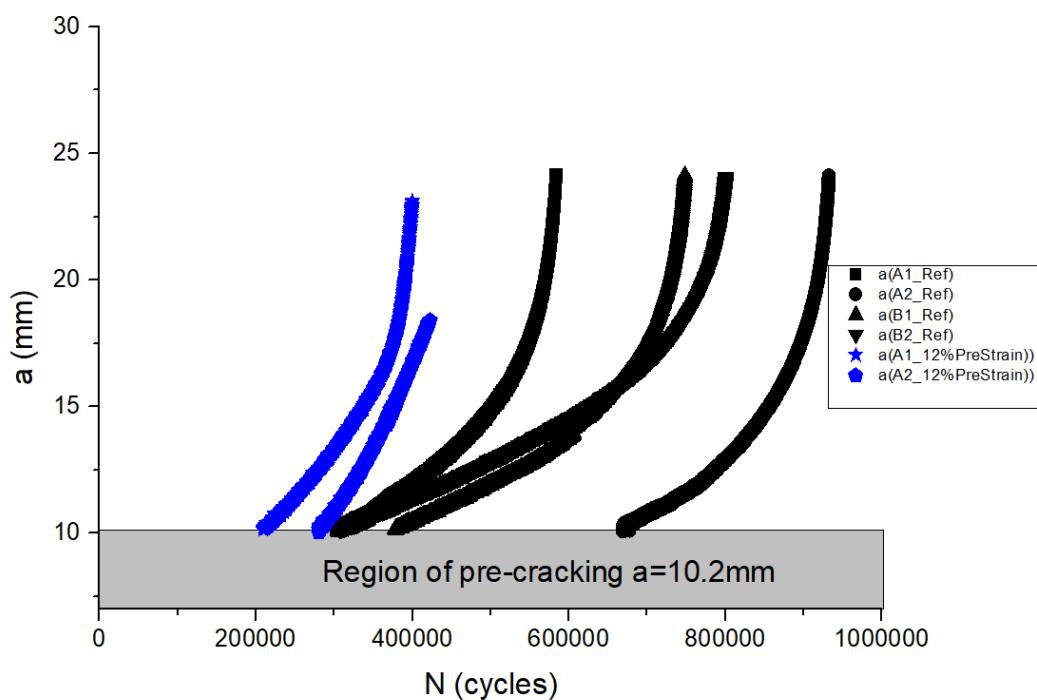
Διάγραμμα 4.1: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων όλων των δοκιμών



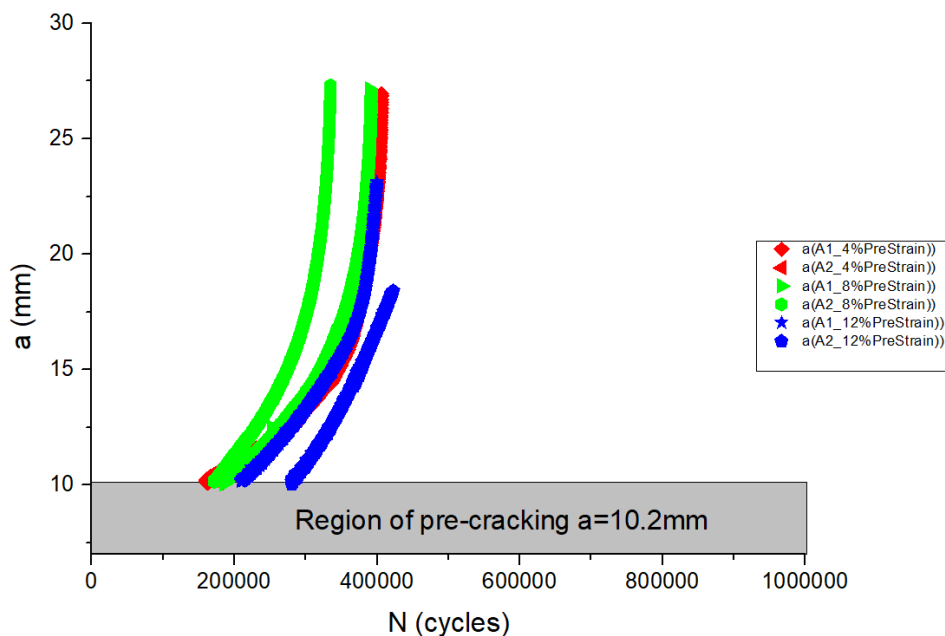
Διάγραμμα 4.2: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων των δοκιμών αναφοράς (Reference) και με μόνιμη παραμόρφωση 4%



Διάγραμμα 4.3: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων των δοκίμιων αναφοράς (Reference) και με μόνιμη παραμόρφωση 8%



Διάγραμμα 4.4: Μήκος ρωγμής με αριθμό κύκλων των δοκίμιων αναφοράς (Reference) και με μόνιμη παραμόρφωση 12%



Διάγραμμα 4.5: Μήκος ρωγμής a με αριθμό κύκλων N όλων των δοκίμιων με μόνιμη παραμόρφωση

Στο **Διάγραμμα 4.1** μια πρώτη παρατήρηση σχετικά με τις καμπύλες μήκους ρωγμής με αριθμό κύκλων είναι η παρουσία αποκλίσεων διαφόρων ευρών μεταξύ δοκιμών με ίδιο ποσοστό προέντασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια των πειραμάτων γινόταν συνεχές διακοπές ρεύματος με αποτέλεσμα το δοκίμιο να ήταν σε τυχαίες εφελκυστικές δυνάμεις οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα καθώς μεταβάλλεται ο λόγος τάσεων $R=1$. Φυσικά έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις για την συνοχή των διαγραμμάτων μήκους ρωγμής με αριθμό κύκλων και την λήψη αποτελεσμάτων αλλά ενδέχονται τυχόν σφάλματα στα αποτελέσματα.

Επίσης γινόταν σκόπιμη παύση (για όλα τα δοκίμια πέραν από τα A2_4%PreStrain, A2_8%PreStrain και A1_12%PreStrain) με σκοπό την αντιγραφή τις επιφάνειας θραύσεως της ρωγμής για την αποτίμηση της περιοχής B του **Διαγράμματος 3.4** με την χρήση μικροσκοπίου και κατάλληλου λογισμικού. Η διαδικασία έγινε με λήψη ρεπλικών (Transcopy Replica Foil) κατά την διάρκεια των παύσεων σε τυχαίο εύρος κύκλων σε εφελκυστικό φορτίο $P'_{\max}$ μικρότερο της $P_{\max}$ όπου εφαρμόζεται στο δοκίμιο κατά την κυκλική φόρτιση, η διαδικασία διαρκεί αρκετά λεπτά για την λήψη της μεταλλογραφικής επιφάνειας με συνέπεια επηρεάζει τα αποτελέσματα, εξαιτίας της παραμονής του δοκιμίου σε στατικό φορτίο $P'_{\max} = P'_{\min}$. Αυτό όμως δεν είναι σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας και γι'αυτό δεν θα γίνει περαιτέρω ανάπτυξη σχετικά με την δειγματοληψίας των ρεπλικών.

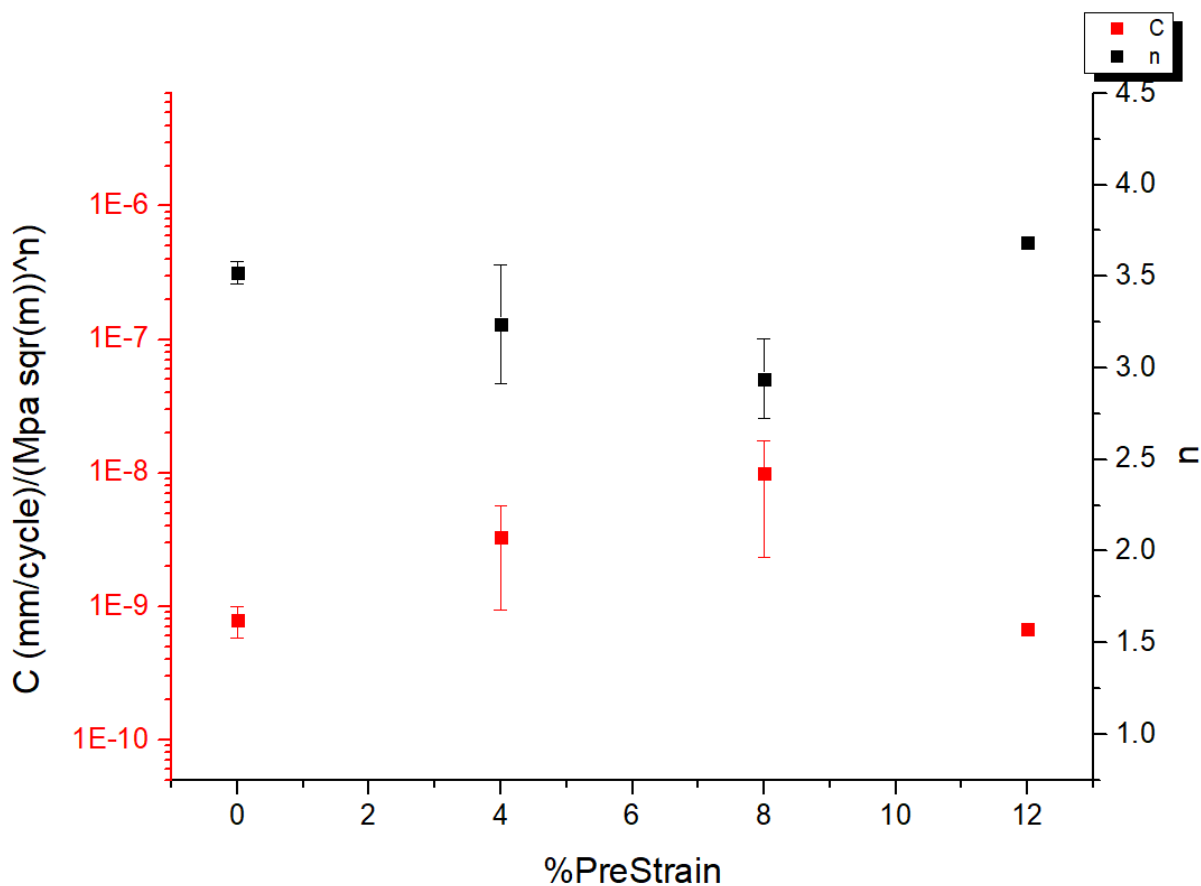
Μια δεύτερη όμως παρατήρηση σχετίζεται στην διάρκεια που απαιτείται για να αναπτυχθεί η ρωγμή από τα 10.2mm έως το μήκος όπου σταματάει να ικανοποιείται το L_{efm} , είναι εμφανές ότι τα δοκίμια που υπέστησαν προένταση παρουσιάζουν επιτάχυνση της ανάπτυξης ρηγματώσεως συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς «Reference». Αυτή η παρατήρηση φαίνεται έντονα στο **Διάγραμμα 4.6** και στα παρακάτω διαγράμματα (**Διαγράμματα 4.7-4.12**).

Δοκίμια	$C \left(\frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^n} \right)$	n
A1_Ref	$9.074 * 10^{-10}$	3,534
A2_Ref	$9.993 * 10^{-10}$	3,517
B1_Ref	$5.771 * 10^{-10}$	3,582
B2_Ref	$6.431 * 10^{-10}$	3,437
A1_4%PreStrain	$1.624 * 10^{-9}$	3,468
A2_4%PreStrain	$4.931 * 10^{-9}$	3,008
A1_8%PreStrain	$4.515 * 10^{-9}$	3,094
A2_8%PreStrain	$1.517 * 10^{-8}$	2,786
A1_12%PreStrain	$6.765 * 10^{-10}$	3,683
A2_12%PreStrain	$4.952 * 10^{-7}$	1,579

Πίνακας 4.3: Συντελεστές C και n για την γραμμική περιοχή Paris-Erdogan

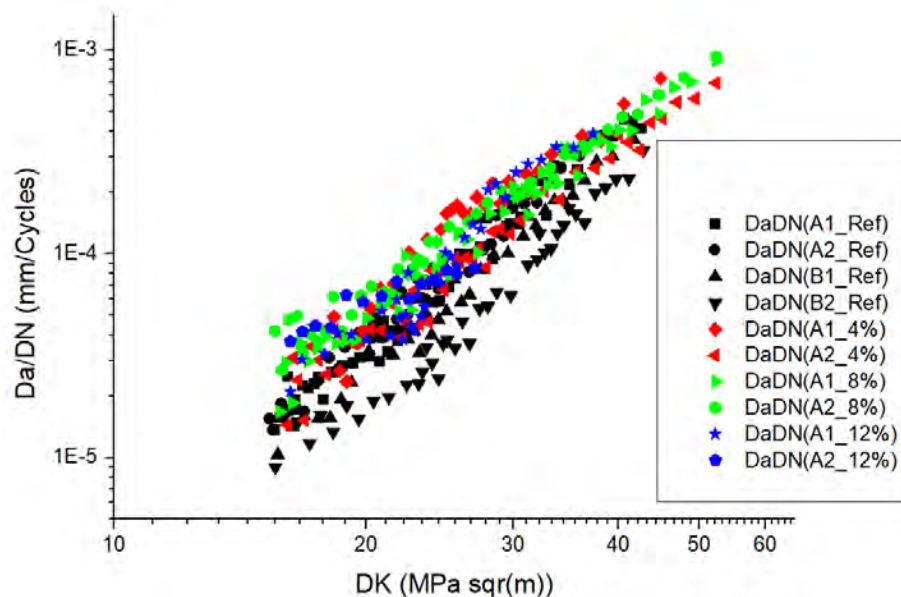
Ποσοστό προέντασης	$C \left(\frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^n} \right)$	n
Reference	$7.817 * 10^{-10}$	3.518
4%PreStrain	$3.278 * 10^{-9}$	3.238
8%PreStrain	$9.833 * 10^{-9}$	2.940
12%PreStrain	$6.765 * 10^{-10}$	3,683

Πίνακας 4.4: Μέση τιμή συντελεστών C και n

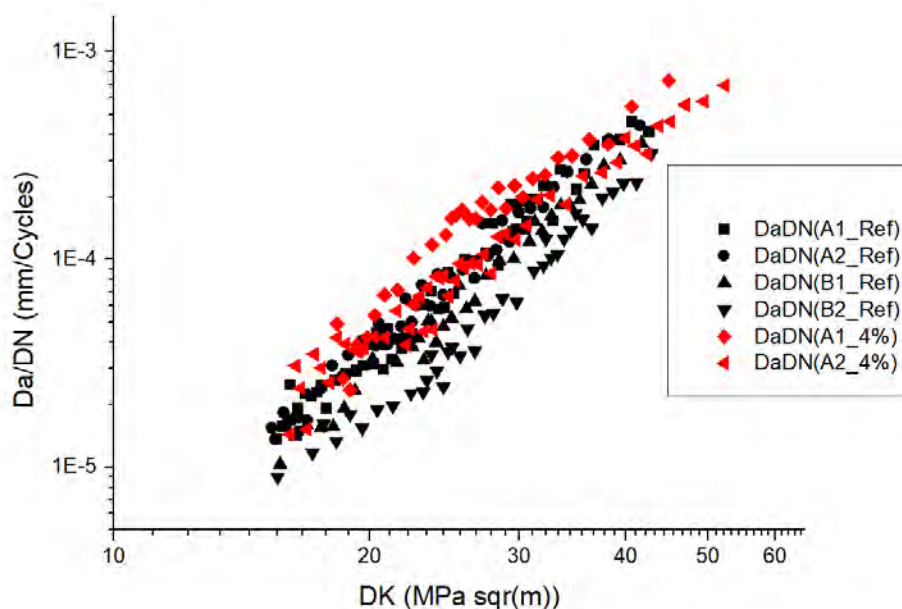


Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση των μέσων τιμών των συντελεστών C, n για κάθε ποσοστό προέντασης

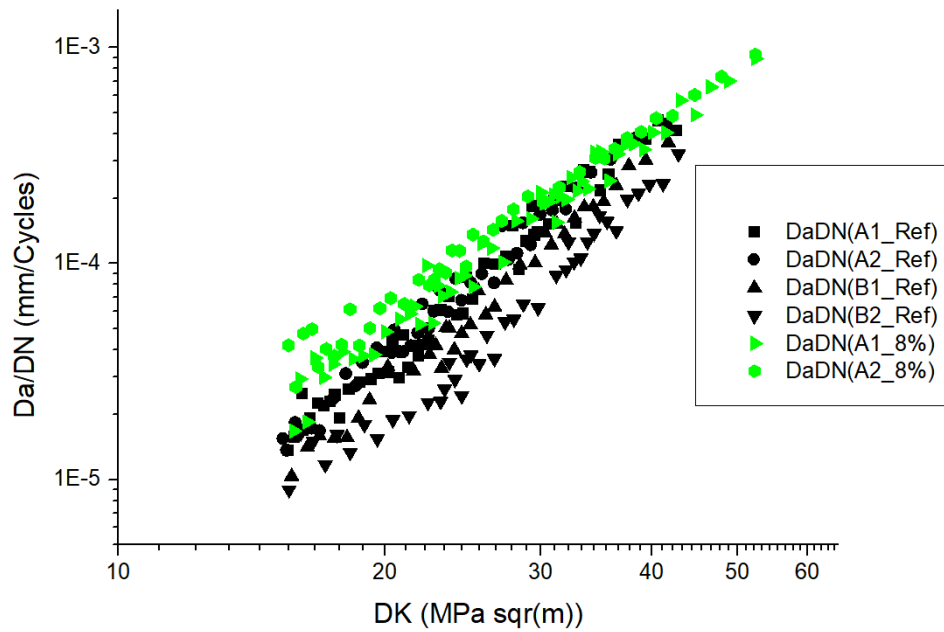
Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς μειώνεται το ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη, τα δοκίμια καταναλώνουν λιγότερη μηχανική ενέργεια για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό που λαμβάνει χώρα στην πλαστική περιοχή της αιχμής, με αποτέλεσμα η ενέργεια αυτή να επιδράει στην θραύση της μικροδομής είτε από τα όρια των κόκκων είτε μέσα από αυτά. Επίσης λόγω της ψαθυρότητας της μαρτενσιτικής μικροδομής δημιουργούνται δευτερεύουσες μικρορωγμές στην πλαστική ζώνη οι οποίες τείνουν να συνενωθούν με την κύρια [28] επιταχύνοντας τον ρυθμό διάδοσης.



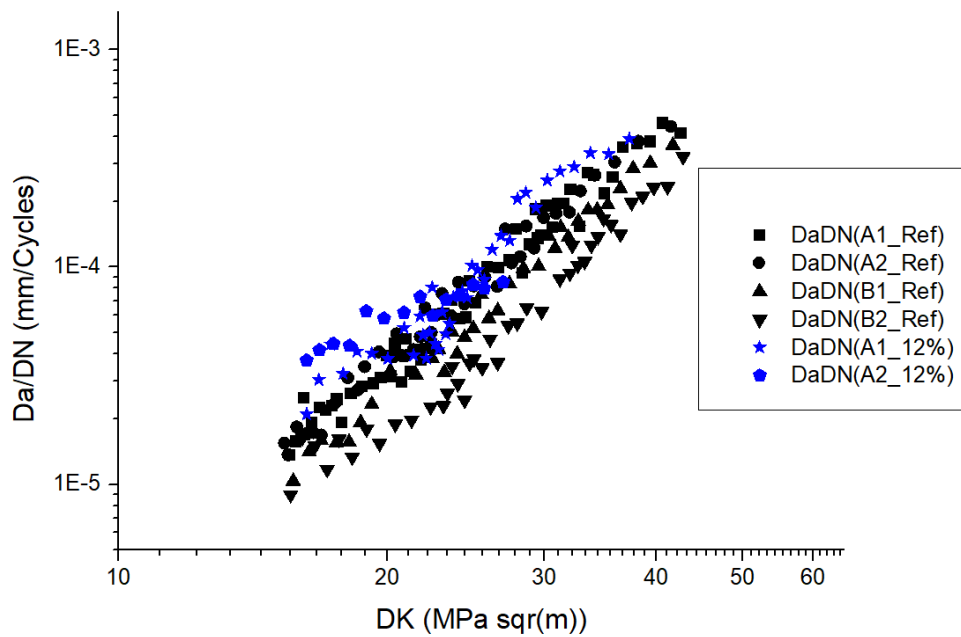
Διάγραμμα 4.7: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης τάσης όλων των δοκιμών



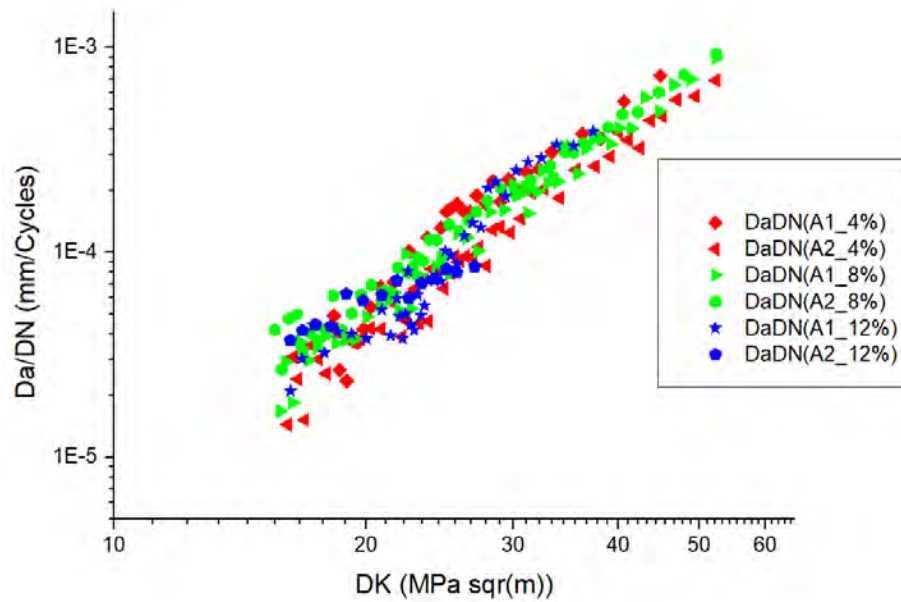
Διάγραμμα 4.8: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης δοκιμών αναφοράς και με μόνιμη παραμόρφωση 4%



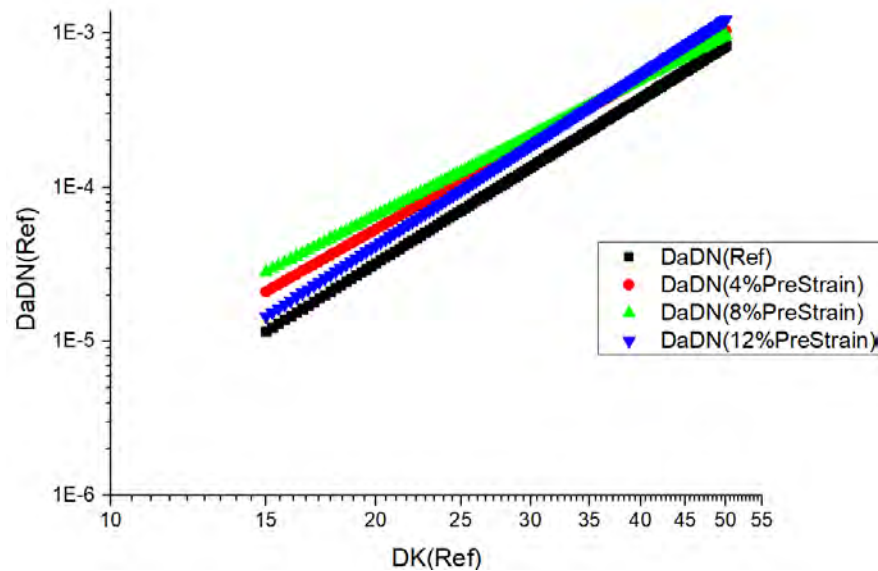
Διάγραμμα 4.9: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης δοκιμίων αναφοράς και με μόνιμη παραμόρφωση 8%



Διάγραμμα 4.10: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης δοκιμίων αναφοράς και με μόνιμη παραμόρφωση 12%



Διάγραμμα 4.11: Ρυθμός διάδοσης ρωγμής ως προς συντελεστή έντασης τάσης όλων δοκιμίων με προένταση



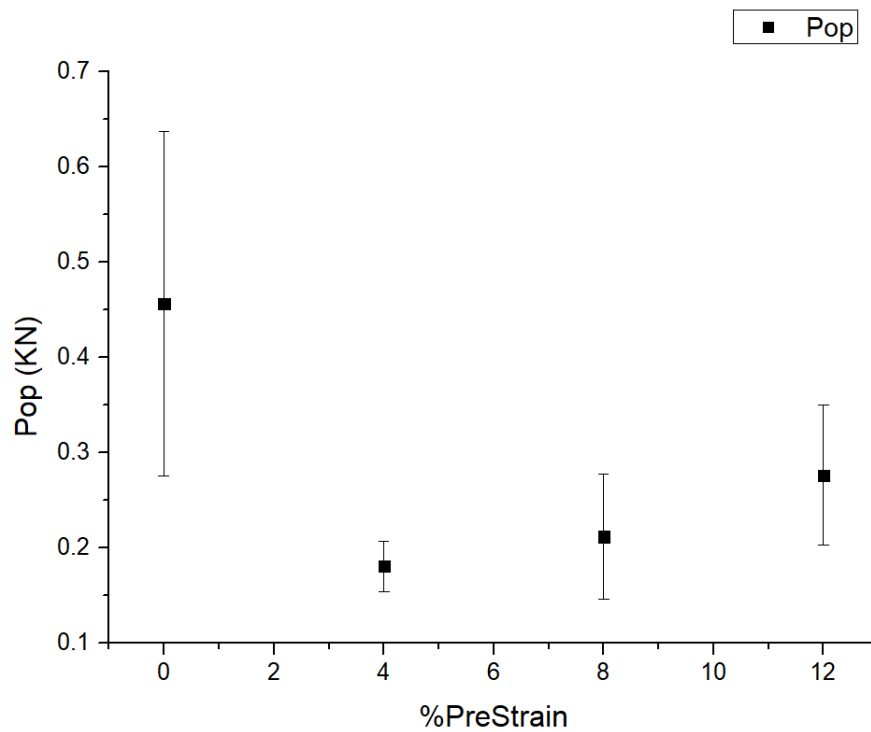
Διάγραμμα 4.12: Μέσες τιμές αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με συντελεστή έντασης τάσεων όλων των δοκιμίων

Απο το **Διάγραμμα 4.12** φαίνεται οτι τα δοκίμια αναφοράς έχουν τον μικρότερο ρυθμό εξέλιξης ρωγμής σε όλο το εύρος του DK , εάν όμως συγκρίνουμε τα δοκίμια που είχαν υποστεί μόνιμη πλαστική παραμόρφωση μεταξύ τους, παρατηρούμε οτι τα δοκίμια με 4% πλαστική παραμόρφωση έχουν μικρότερο ρυθμό εξέλιξης μέχρι την τιμή DK ίση με $35 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ενώ για μεγαλύτερες τιμές τα δοκίμια με 8 % πλαστική παραμόρφωση λαμβάνουν τον μικρότερο ρυθμό εξέλιξης.

Για την δύναμη κλεισίματος της ρωγμής λαβαμε υπόψιν 250 δεδομένα σε έναν μόνο κύκλο όπου το μήκος της ρωγμής είναι προσεγγιστικά 10.2mm για το κάθε δοκίμιο. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (**Διάγραμματα 4.13-4.17**), τα αποτελέσματα για 2% offset δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

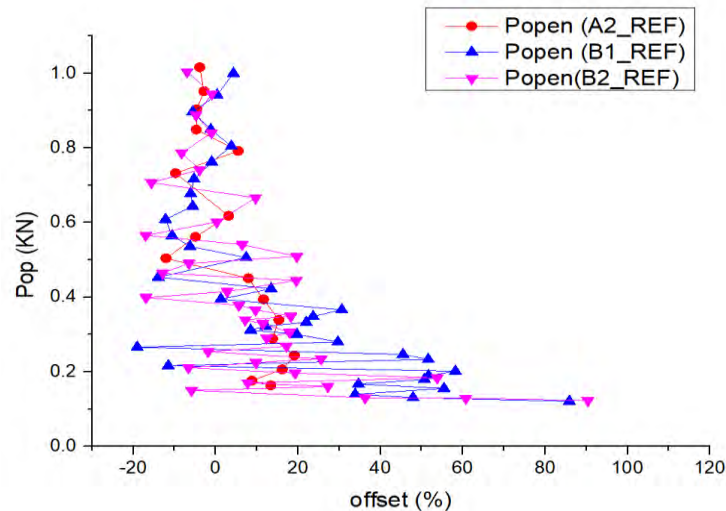
Δοκίμια	P_{op}
A2_Ref	0.545
B1_Ref	0.576
B2_Ref	0.248
A1_4%PreStrain	0.162
A2_4%PreStrain	0.199
A1_8%PreStrain	0.165
A2_8%PreStrain	0.258
A1_12%PreStrain	0.328
A2_12%PreStrain	0.224

Πίνακας 4.5: Δύναμη P_{op} για 2% offset

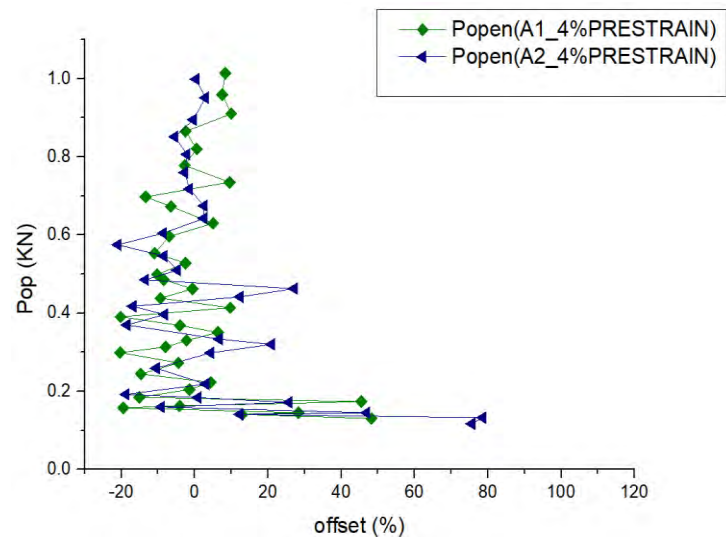


Διάγραμμα 4.13: Μέση τιμή δύναμης P_{op} για κάθε ποσοστό προέντασης

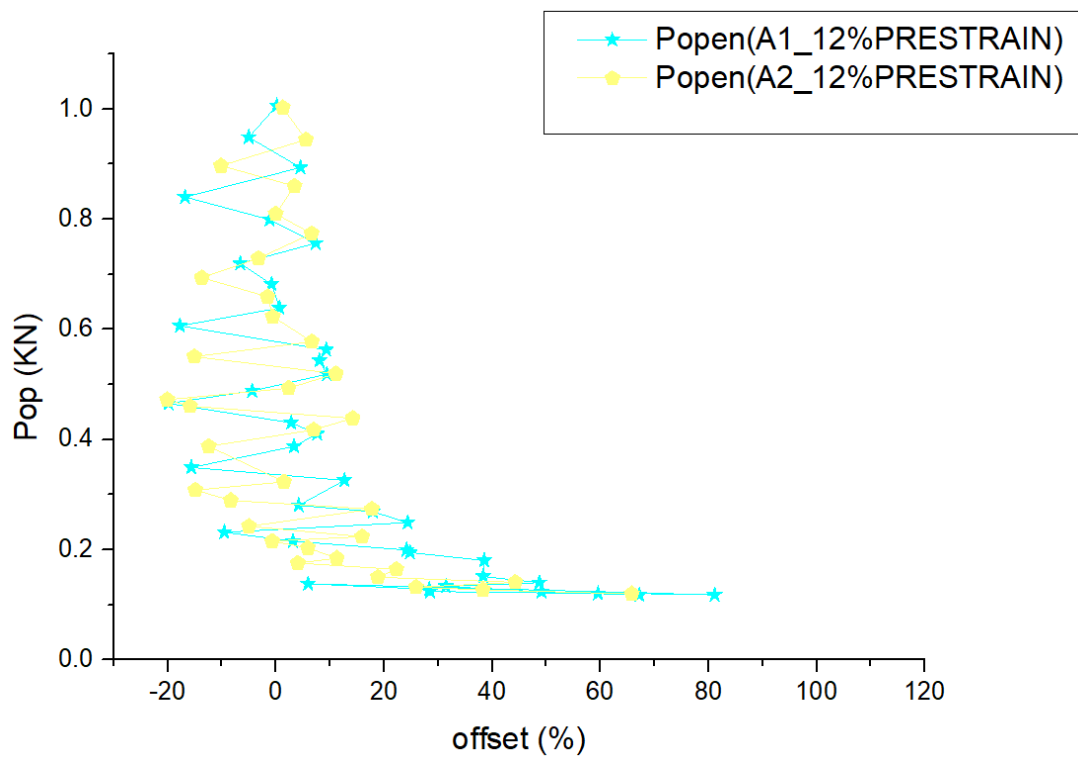
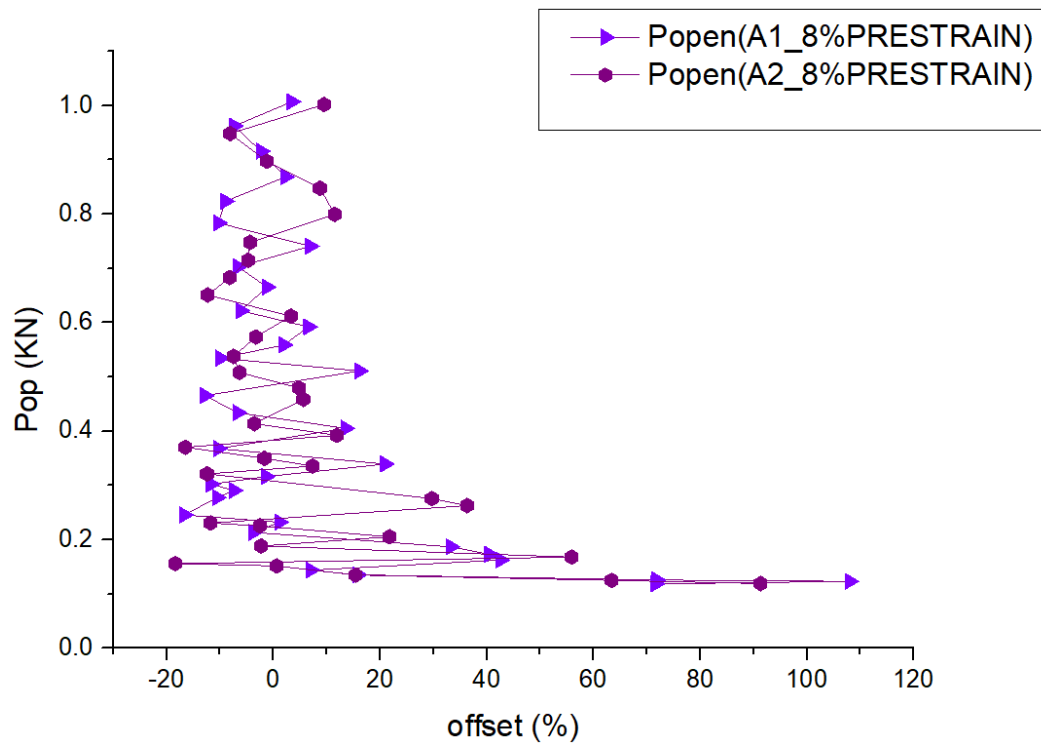
Ο υπολογισμός της δύναμης κλεισίματος ρωγμής επαληθεύει τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων του μοντέλου Paris-Erdogan της παρούσας εργασίας καθώς με βάση το **Διάγραμμα 4.12**, παρατηρείται ότι η παρουσία πλαστική παραμόρφωση μειώνει σημαντικά την δύναμη P_{op} συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς. Επίσης εάν παρατηρηθούν μόνο τα δοκίμια με πλαστική παραμόρφωση παρατηρείται η αύξηση της δύναμης P_{op} καθώς αυξάνεται η πλαστική παραμόρφωση, το γεγονός αυτό θα μπορούσε να συσχετίζεται με την αύξηση του ποσοστού του μαρτενσίτη που οφείλεται στο φαινόμενο *Trig* καθώς και άλλων παραγόντων, αυτές όμως οι υπόθεσεις απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση από μελλοντικές εργασίες.



Διάγραμμα 4.14: Δύναμη κλεισίματος ρωγμής συναρτήση του ποσοστού συμμόρφωσης (offset) δοκιμίων αναφοράς



Διάγραμμα 4.15: Δύναμη κλεισίματος ρωγμής συναρτήση του ποσοστού συμμόρφωσης (offset) δοκιμίων με προένταση 4%



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :Συμπεράσματα-Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε πειραματικά η επίδραση του ποσοστού πλαστικής παραμόρφωσης του χάλυβα TRIP 700 στον ρυθμό διάδοσης ρωγμής. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- ❖ Η πλαστική παραμόρφωση επιταχύνει το ρυθμό διάδοσης της ρωγμής σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, κάτι που επιβιβιώνεται με τις σταθερές C_n του μοντέλου Paris-Erdogan.
- ❖ Η δύναμη κλεισίματος ρωγμής P_{op} μειώνεται σημαντικά με την πλαστική παραμόρφωση των δοκιμίων, αλλά αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού της αρχικής πλαστικής παραμόρφωσης.
- ❖ Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός που λαμβάνει χώρα στην αιχμή της ρωγμής κατά την πλαστική παραμόρφωση αναμένεται να συνεισφέρει στην δύναμη P_{op} .

5.2 Προτάσεις

Κατά την μελέτη της πειραματικής διαδικασίας του χάλυβα Trip 700 προέκυψαν διάφορα ερωτήματα τα οποία δεν ήταν δυνατό να μελετηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και τα οποία θα μπορέσουν να αποτελέσουν στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου TRIP στον ρυθμό εξέλιξης της ρωγμής. Με βάση αυτά, προτείνονται τα εξής για μελλοντική έρευνα:

- ❖ Μελέτη της συνεισφοράς του ποσοστού προέντασης ως προς την κόπωση για δοκίμια με μεγαλύτερο ποσοστό C καθώς θα συμβάλει στην σταθεροποίηση της ωστενιτικής φάσης και συνεπώς στην επιβολή μεγαλύτερων εφελκυστικών δυνάμεων για την έναρξη του φαινομένου Trip.
- ❖ Πειραματική μελέτη για μεγαλύτερο πάχος δοκιμίου με σκοπό το δοκίμιο να υποκειται σε επίπεδη παραμόρφωση.
- ❖ Μελέτη ως προς την κόπωση με μεγαλύτερο ποσοστό Mn καθώς θα μειωθεί περαιτέρω η θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού M_s και συνεπώς θα αυξηθεί το ποσοστό του παραμένον ωστενίτη.
- ❖ Μελέτη του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής για προένταση πάνω απο 12%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Βιβλιογραφία

- [1] Phuoc Quy Phong Nguyen, (2019) Research on Fabrication of TRIP Steel with High Durability, Figure1, <https://www.semanticscholar.org/paper/Research-on-Fabrication-of-TRIP-Steel-with-High-Nguyen/b453d91eaa15c41f5c6dcaa12b628694fde238fd> , (25/2/2024)
- [2] H. Hotz, B. Kirsch, Jan C. Aurich. (2020) Impact of the thermomechanical load on subsurface phase transformations during cryogenic turning of metastable austenitic steels. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 879.
- [3] Wolfgang Bleck,Xiaofei Guo,Yan Ma. (2017) The TRIP Effect and Its Application in Cold Formable Sheet Steels, *Steel Research International*, 88 (10), 5.
- [4] (2019) Hot rolled steel vs cold rolled steel – what’s the difference?, Structural Steel Fabricators, <https://www.steelo.co.uk/blog/2019/03/26/hot-vs-cold-rolled-steel-whats-difference/> , (7/9/2023).
- [5] RUIXIAN ZHU. (2013) *MICROSTRUCTURE DESIGN OF LOW ALLOY TRANSFORMATION-INDUCED PLASTICITY ASSISTED STEELS*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Texas A&M
- [6] Alexis Guzmán, Alberto Monsalve. (2022) Effect of Bainitic Isothermal Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a CMnSiAl TRIP Steel. *MDPI, Metals*, 12 (4), 7.
- [7] G. Kostorz. Diffusionless Transformations. *Phase Transformations in Materials*, Eric Lifshin, Dierk Raabe, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 587, 2001.
- [8] Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος. Μετασχηματισμός φάσεων. *Φυσική μεταλλουργία*, Αφροδίτη Χατζημπεκιάρη, Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 342-343, 2007.
- [9] Transformation Induced Plasticity (TRIP), WorldAutoSteel, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/> , (29/7/2023).
- [10] (2020) What’s TRIP Steel?, SHAANXI SHEW-E IRON & STEEL CO. , LTD, <https://www.shew-esteelpipe.com/news/what-s-trip-steel-33463704.html> , (2/9/2023).
- [11] Sen Lin, Annika Borgenstam, Andreas Stark, Peter Hedström. (2022) Effect of Si on bainitic transformation kinetics in steels explained by carbon partitioning, carbide formation, dislocation densities, and thermodynamic conditions. *Materials Characterization*, 185, 2.
- [12] Di WU, Zhuang LI, Hui-sheng LÜ. (2008) Effect of Controlled Cooling After Hot Rolling on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 15 (2), 68.
- [13] J. Platl, H. Leitner, C. Turk, R. Schnitzer. (2020) Determination of Martensite Start Temperature of High-Speed Steels Based on Thermodynamic Calculations. *Steel Research International*, 91 (8), 2.
- [14] C. J. Christopher ,M. N. James , E. A. Patterson , K. F. Tee. (2008) Towards a new model of crack tip stress fields. *International Journal of Fracture*, 148, 364.
- [15] Štefan Hajdu. (2014) The Investigation of the Stress State near the Crack Tip of Central Cracks through Numerical Analysis. *Procedia Engineering*, 69, 484.

- [16] JWO PAN, SHIH-HUANG LIN. FRACTURE MECHANICS and FATIGUE CRACK PROPAGATION. *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 263-264, 2005.
- [17] T.L. Anderson. Elastic-Plastic Fracture Mechanics. *Fracture Mechanics Fundamentals And Applications*, 3rd Ed, Taylor & Francis Group, 103, 2005
- [18] (2001) Fracture Toughness, Total Materia - The world's most comprehensive materials, (<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=46>, ανακτήθηκε 25/2/2024)
- [19] F. McBagonluri, W. Soboyejo. Mechanical Properties: Fatigue. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, Franco Bassani, Gerald L. Liedl and Peter Wyder, Elsevier Ltd, 295-296, 2005.
- [20] (2023) Paris' law , Wikipedia, (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crack_propagation_curve_Paris%27_law.pdf , 25/2/2024
- [21] K. Tanaka. Cyclic Loading and Fatigue. *Comprehensive Structural Integrity*, I. Milne, R.O. Ritchie and B. Karimloo, Elsevier Science Ltd, 97, 2003.
- [22] R. Phipps, A. Hohenwarter. (2017) Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40 (4), 3-14.
- [23] D.F. Martelo, M.D. Chapetti. (2015) Analysis of the Importance of the Crack Closure in the Driving Force for the Fatigue Crack Growth in Metastable Austenitic Stainless Steels. *Procedia Materials Science*, 9, 388.
- [24] Youn-Il Chung, Ji-Ho Song. (2009) Improvement of ASTM compliance offset method for precise determination of crack opening load. *International Journal of Fatigue*, 31 (5), 810.
- [26] Παπαϊωάννου Κρυσταλλία. (2018) Πειραματική μελέτη επίδρασης προϋπάρχουσας παραμόρφωσης στη συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής του χάλυβα TRIP 700, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [27] Standard, A., E647-00. *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*, 2000
- [28] Xiaogang Wang, Chenghuan Liu, Binhan Sun, Dirk Ponge, Chao Jiang ,Dierk Raabe. (2022) The dual role of martensitic transformation in fatigue crack growth, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 119 (9), 4.