

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΕΡΒΟ-ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ TRIP**

υπό

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ ΑΡΓΥΡΙΟΥ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας
2009

© 2009 Χαράλαμπος Αργυρίου

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Λέκτορα κ. Αλέξη Κερμανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του, για την παροχή επιστημονικών γνώσεων, για την υπομονή που υπέδειξε και τις πολύτιμες ώρες που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω ακόμη ευχαριστίες στον κ. Νικόλαο Χολέβα για την άμεση αντιμετώπιση, κατανόηση και επίλυση των όποιων τεχνικών προβλημάτων ανέκυπταν κατά την χρήση του Η/Υ.

Επίσης στην κυρία Άννα Ζερβάκη και τον κύριο Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την ευγενική υπόδειξη του τρόπου λειτουργίας του σκληρομέτρου και του στερεοσκοπίου. Ευχαριστώ τους φίλους(ες) μου Κωνσταντίνο, Βαγγέλη, Σπύρο, Σάββα, Κώστα, Νικόλα, Θέμη, Όλγα, Θανάση, Ηλία, Ντίνα, Βίκη, Μιχάλη, Ζωή, Αφροδίτη, Θεόφιλο, Ιωάννα και Στέλιο για την ηθική υποστήριξή τους όποτε χρειάστηκε και τις αλησμόνητες στιγμές που μοιραστήκαμε ως φοιτητές στον Βόλο. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Σωτήριο και Μαρίνα Αργυρίου και την αδερφή μου, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου.

Χαράλαμπος Αργυρίου

ΣΕΡΒΟ-ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ TRIP

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΑΡΓΥΡΙΟΥ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2009

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης, Λέκτορας Μηχανικής Συμπεριφοράς
Μεταλλικών Υλικών

Περίληψη

Κατά την εργασία αυτή γίνεται αναφορά στην επιστήμη της Μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών και στην αναγκαιότητα των πειραματικών μελετών με την βοήθεια μηχανικών δοκιμών. Στην συνέχεια, αφού παρατίθεται η θεωρία των κυριότερων μηχανικών δοκιμών, παρουσιάζεται εκτενώς ο τρόπος λειτουργίας του σερβο-υδραυλικού συστήματος μηχανικών δοκιμών γενικής χρήσης της Instron, για την πραγματοποίηση πειραμάτων κόπωσης και εφελκυσμού. Έπειτα ακολουθεί σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου γίνεται γνωριμία με τους χάλυβες γενικότερα και πιο ειδικά τους TRIP χάλυβες. Τα υλικά αυτά (χάλυβες TRIP και χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης), αποτελούν τα υλικά των δοκιμών, τα οποία υπεβλήθησαν σε μηχανικές δοκιμές.

Τέλος, κατόπιν μίας επισταμένης περιγραφής της πειραματικής μεθόδου, η οποία ακολουθήθηκε σε κάθε πείραμα, ακολουθεί αναλυτική παράθεση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν και άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και την μηχανική τους συμπεριφορά εν γένει. Χαρακτηριστική είναι η επαλήθευση της θεωρίας των TRIP χάλυβων σχετικά με την ιδιαίτερα αυξημένη ολκιμότητά τους σε συνδυασμό με μεγάλη μηχανική αντοχή, που παρουσιάζουν σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες και εν προκειμένω τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο βασικές ενότητες. Η πρώτη αφορά στην περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή πειραμάτων μηχανικών δοκιμών, ενώ η δεύτερη στην ερευνητική δραστηριότητα που αναπτύχθηκε.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικά

1.1 Εισαγωγή.....	09
1.2 Μηχανική συμπεριφορά υλικών.....	10
1.3 Μηχανικές δοκιμές.....	10
1.4 Σκοπός της εργασίας.....	10

Κεφάλαιο 2 Μηχανικές δοκιμές

2.1 Η δοκιμή εφελκυσμού.....	11
2.2 Η δοκιμή σκληρότητας (σκληρομέτρηση).....	13
2.3 Κόπωση υλικών.....	14
2.3.1 Η δοκιμή της κόπωσης.....	17

Κεφάλαιο 3 Περιγραφή σερβο-υδραυλικού συστήματος μηχανικών δοκιμών γενικής χρήσης

3.1 Πλαίσιο φόρτισης.....	20
3.1.1 Γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά πλαισίου φόρτισης.....	23
3.1.2 Δυναμοκυψέλη.....	25
3.1.3 Υδραυλικές αρπάγες και σιαγόνες.....	26
3.1.4 Επιμηκυνσιόμετρο-Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	27
3.2 Μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος.....	28
3.3 Ηλεκτρονική μονάδα και λογισμικό λειτουργίας.....	30
3.3.1 Βασική κονσόλα λειτουργίας.....	30
3.3.2 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος Bluehill2.....	33
3.3.3 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος SAX.....	39

Κεφάλαιο 4 Χάλυβες

4.1 Γενικά.....	41
4.2 Μετασχηματισμοί φάσεων - μαρτενσιτικός μετασχηματισμός.....	42
4.3 Πλαστικότητα μετασχηματισμού.....	43
4.4 Τrip χάλυβες.....	44
4.4.1 Θερμική κατεργασία χαλύβων TRIP.....	45

Κεφάλαιο 5 Πειραματική διαδικασία

5.1 Υλικά δοκιμών.....	48
5.2 Προετοιμασία δοκιμών.....	51
5.3 Σχεδιασμός πειραμάτων.....	53
5.4 Διασφάλιση εγκυρότητας πειραμάτων.....	54
5.4.1 Διακρίβωση αισθητήρων.....	55
5.5 Μεθοδολογίες.....	56

Κεφάλαιο 6 Πειραματικά αποτελέσματα

6.1 Δοκιμές σκληρομέτρησης.....	58
6.2 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού.....	60
6.3 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης.....	64
6.4 Συμπεράσματα.....	68
6.4.1 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα TRIP 700.....	68
6.4.2 Συγκρίσεις μηχανικών ιδιοτήτων.....	69
6.4.3 Μηχανική συμπεριφορά υλικών σε κόπωση.....	69
6.5 Γενικά συμπεράσματα.....	77

Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφία.....

Κατάλογος Εικόνων

Εικ. 3-1: Σύστημα ελέγχου μηχανικών δοκιμών κλειστού βρόχου (H/Y-κονσόλας-πλαισίου φόρτισης).....	19
Εικ. 3-2: Μηχανή εφελκυσμού της Instron (βάση και πλαίσιο φόρτισης).....	20
Εικ. 3-3: Τα βασικά μέρη του συστήματος μηχανικών δοκιμών.....	21
Εικ. 3-4: Η δυναμοκυψέλη του συστήματος μηχανικών δοκιμών της Instron.....	25
Εικ. 3-5: (α): Δυναμοκυψέλη, αρπάγες και σιαγόνες (β): Χειριστήρια ελέγχου θέσης εμβόλου και σύσφιξης άνω και κάτω σιαγόνων.....	26
Εικ. 3-6: Δοκιμή με τοποθέτηση επιμηκυσιομέτρου.....	27
Εικ. 3-7: Μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος Instron (πρόσθια όψη).....	28
Εικ. 3-8: Μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος Instron (όψη από πίσω).....	29
Εικ. 3-9: H/Y και ηλεκτρονική μονάδα συστήματος.....	30
Εικ. 3-10: Επιλογή ορίων ασφαλείας.....	31
Εικ. 3-11: Ενεργοποίηση ορίων ασφαλείας.....	31
Εικ. 3-12: Επιλογή τάσης ασφαλείας για την προστασία του δοκιμίου κατά την τοποθέτηση του στο σύστημα.....	32
Εικ. 3-13: Επιλογή μεθόδου για τον σχεδιασμό του παρόντος πειράματος εφελκυσμού.....	33
Εικ. 3-14: Επιλογή μεθόδου για την εκτέλεση του πειράματος του εφελκυσμού.....	33
Εικ. 3-15: Ορισμός της γεωμετρίας και των διαστάσεων του δοκιμίου στον εφελκυσμό.....	34
Εικ. 3-16: Επιλογή του τρόπου ελέγχου του πειράματος του εφελκυσμού.....	34
Εικ. 3-17: Ορισμός του κριτηρίου λήξης του πειράματος του εφελκυσμού.....	35
Εικ. 3-18: Ορισμός συχνότητας δειγματοληψίας.....	35
Εικ. 3-19: Επιλογή του επιμηκυσιομέτρου, ως του οργάνου καταγραφής της παραμόρφωσης.....	36
Εικ. 3-20: Επιλογή της μεταβλητής του X άξονα στο διάγραμμα.....	36
Εικ. 3-21: Επιλογή της μεταβλητής του Y άξονα στο διάγραμμα.....	37
Εικ. 3-22: Επιλογή εξαγωγής των δεδομένων.....	37
Εικ. 3-23: Επαναφορά στο βήμα 1 για επιλογή της μεθόδου προς εκτέλεση.....	38
Εικ. 3-24: Επιλογή του ονόματος του πειράματος και της θέσης αποθήκευσής του.....	38
Εικ. 3-25: Θέση εκκίνησης, τερματισμού και αποθήκευσης του πειράματος.....	39
Εικ. 3-26: Κονσόλα διαχείρισης αποτελεσμάτων πειράματος κόπωσης.....	39
Εικ. 3-26: Σχεδιασμός πειράματος κόπωσης.....	40
Εικ. 4-1: Η τυπική μορφή ενός TRIP χάλυβα όπου διακρίνονται ο φερρίτης ο μπαινίτης και ο παραμένων ωστενίτης.....	46
Εικ. 6-1: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1 (εφελκυσμός-κάτοψη).....	70
Εικ. 6-2: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1 (εφελκυσμός-επιφάνεια θραύσης).....	71
Εικ. 6-3: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (εφελκυσμός-κάτοψη).....	71
Εικ. 6-4: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (εφελκυσμός-επιφάνεια θραύσης).....	72
Εικ. 6-5: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (κόπωση-κάτοψη).....	72
Εικ. 6-6: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (κόπωση-επιφάνεια θραύσης).....	73
Εικ. 6-7: Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (κόπωση-επιφάνεια θραύσης σε μεγέθυνση).....	73
Εικ. 6-8: Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (εφελκυσμός-κάτοψη).....	74
Εικ. 6-9: Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (εφελκυσμός-επιφάνεια θραύσης).....	74
Εικ. 6-10: Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (κόπωση-κάτοψη).....	75
Εικ. 6-11: Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (κόπωση-επιφάνεια θραύσης).....	75
Εικ. 6-12: Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (κόπωση-επιφάνεια θραύσης σε μεγέθυνση).....	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίν. 5-1: Χημική Σύσταση χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης (κατά βάρος%).....	48
Πίν. 5-2: Αρχική χημική Σύσταση χάλυβα TRIP 700 (κατά βάρος %).....	49
Πίν. 5-3: Παράμετροι θερμικής κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στον χάλυβα TRIP 700.....	49
Πίν. 5-4: Ποσοστά Φάσεων από Μεταλλογραφία μετά τις Θερμικές Κατεργασίες.....	51

Πίν. 5-5: Πειράματα εφελκυσμού δοκιμίων TRIP 700 χάλυβα χωρίς ταυτοποίηση (μια εκ των θερμικών κατεργασιών 1,2,3).....	53
Πίν. 5-6: Πειράματα εφελκυσμού χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης	53
Πίν. 5-7: Πειράματα κόπωσης TRIP 700 χάλυβα θερμικής κατεργασίας 2.....	54
Πίν. 5-8: Πειράματα κόπωσης TRIP 700 χάλυβα θερμικής κατεργασίας 3.....	54
Πίν. 5-9: Πειράματα κόπωσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	54
Πίν 6-1: Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων σε Wickers, οι μέσες τιμές και οι τυπικές τους αποκλίσεις.....	58
Πίν. 6-2: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 1 χάλυβα TRIP 700.....	60
Πίν. 6-3: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 2 χάλυβα TRIP 700.....	61
Πίν. 6-4: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 3 χάλυβα TRIP 700.....	61
Πίν. 6-5: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 1 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	62
Πίν. 6-6: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 2 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	62
Πίν. 6-7: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 3 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	63
Πίν. 6-8: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 4 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	63
Πίν. 6-9: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 5 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	64
Πίν. 6.10: Συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2.....	64
Πίν. 6.11: Συνάρτηση παρεμβολής S-N χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2.....	65
Πίν. 6.12: Συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3.....	65
Πίν. 6.13: Συνάρτηση παρεμβολής χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3.....	66
Πίν. 6.14: Συνθήκες κόπωσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	66
Πίν. 6.15: Συνάρτηση παρεμβολής S-N χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	67
Πίν. 6.16: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1,2 και 3 (περελθόντα πειράματα).....	68

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγρ. 2-1: Καμπύλη ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης και ορισμός του ορίου διαρροής, της συμβατικής τάσης ροής, της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού και της παραμόρφωσης θραύσης.....	12
Διάγρ. 2-2: Καμπύλη 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.....	15
Διάγρ. 2-3: Ταχύτητα αναπτύξεως της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK	16
Διάγρ. 2-4: Κυκλικές φορτίσεις: (α) $R=-1$, $\sigma_m=0$ (β) $R=0$, $\sigma_m>0$, (γ) $0<R<1$, $\sigma_m>0$	18
Διάγρ. 2-5: Το πλάτος της τάσεως σε συνάρτηση με την διάρκεια ζωής για χάλυβα και αλουμίνιο (καμπύλη S-N).....	18
Διάγρ. 4-1: Σχηματική παράσταση μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υποβοηθούμενου από την τάση (α) και προκαλούμενου από την παραμόρφωση (β). Κάτω από την M_s^σ η αρχική πλαστική διαρροή προκαλείται από την πλαστικότητα μετασχηματισμού (TRIP), ενώ πάνω από την M_s^σ από ολισθηση αταξιών στη μητρική φάση.....	44
Διάγρ. 4-2: Τα στάδια της θερμικής κατεργασίας των TRIP χαλύβων.....	46
Διάγρ. 4-3: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβες HSLA, DP και TRIP.....	47
Διάγρ. 4-4: Συγκριτικό διάγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων (συνολική επιμήκυνση σε συνάρτηση με την μέγιστη αντοχή εφελκυσμού) για χάλυβες HSLA, DP και TRIP που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	47
Διάγρ. 5-1: Θερμική κατεργασία 1, που αντιστοιχεί στους 280° C και χρόνο γήρανσης 120 sec.....	49
Διάγρ. 5-2: Θερμική κατεργασία 2, που αντιστοιχεί στους 400° C και χρόνο γήρανσης 420 sec.....	50
Διάγρ. 5-3: Θερμική κατεργασία 3, που αντιστοιχεί στους 460° C και χρόνο γήρανσης 120 sec.....	50

Διάγρ. 6-1: Μικροσκληρομέτρηση (Σύγκριση με Θ.Κ. 2).....	59
Διάγρ. 6-2: Μικροσκληρομέτρηση (Σύγκριση με Θ.Κ. 3).....	59
Διάγρ. 6-3: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 1 χάλυβα TRIP 700.....	60
Διάγρ. 6-4: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 2 χάλυβα TRIP 700.....	61
Διάγρ. 6-5: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 2 χάλυβα TRIP 700.....	61
Διάγρ. 6-6: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 1 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	62
Διάγρ. 6-7: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 2 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	62
Διάγρ. 6-8: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 3 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	63
Διάγρ. 6-9: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 4 χάλυβα χαμηλής Κραμάτωσης.....	63
Διάγρ. 6-10: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 5 χάλυβα χαμηλής Κραμάτωσης.....	64
Διάγρ. 6-11: Καμπύλη S-N χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2.....	65
Διάγρ. 6-12: Καμπύλη S-N χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3.....	66
Διάγρ. 6-13: Καμπύλη S-N χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.....	67
Διάγρ. 6-14: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1,2 και 3 (παρελθόντα πειράματα).....	68

Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 2-1: Η δοκιμή σκληρότητας.....	13
Σχ. 2-2: Προώθηση ρήγματος σε υλικό χωρίς προϋπάρχοντα ρήγματα, κάτω από συνθήκες κόπωσης χαμηλής συχνότητας.....	16
Σχ. 3-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλαισίου φόρτισης.....	23
Σχ. 5-1: Γεωμετρία δοκιμίων εφελκυσμού κατά ASTM E-8M.....	52
Σχ. 5-2: Γεωμετρία δοκιμίων κόπωσης κατά ASTM E-466.....	52

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Η σύγχρονη ζωή είναι συνυφασμένη με την εκτεταμένη χρήση τεχνολογικών υλικών, που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές, μηχανές, συσκευές και προϊόντα. Οι βασικές κατηγορίες των τεχνολογικών υλικών είναι τα μέταλλα και τα κράματα, τα πολυμερή, τα κεραμικά και άλλα σύνθετα υλικά. Τα κριτήρια με τα οποία γίνεται επιλογή ενός υλικού προς χρήση εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ειδικότερα στις μηχανολογικές κατασκευές βασικά κριτήρια επιλογής υλικών αποτελούν η μηχανική συμπεριφορά του υλικού σε μηχανικά φορτία σε συνδυασμό με χαμηλό κόστος παραγωγής. Αυτό με την σειρά του προϋποθέτει μια βαθεία κατανόηση των ιδιοτήτων του κάθε υλικού, προκειμένου να μας γίνει γνωστό το πεδίο και ο τρόπος εφαρμογής τους, ζήτημα το οποίο ήρθε να αντιμετωπίσει η επιστημονική και τεχνολογική ανάπτυξη της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών.

1.2 Μηχανική συμπεριφορά υλικών

Με τον όρο μηχανική συμπεριφορά των υλικών γίνεται αναφορά στον τομέα εκείνο της Μηχανικής, που ασχολείται με την απόκριση των υλικών σε μηχανικά φορτία, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνθήκες λειτουργίας και περιβάλλοντος. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών, ως αποτίμηση της συμπεριφοράς τους υπό την επίδραση φορτίων, δεν είναι αντικείμενο που μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί μεμονωμένα. Πρόκειται για ένα συνδυασμό γνώσεων και μεθόδων από διαφορετικούς κλάδους της επιστήμης του μηχανικού, όπως για παράδειγμα η αντοχή υλικών, η τεχνολογία των υλικών και η φυσική μεταλλουργία, καθώς και για ένα συνδυασμό διαφορετικών προσεγγίσεων στο θέμα της συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών κάτω από την επίδραση δυνάμεων. Από την μία πλευρά υπάρχει η προσέγγιση της κλασικής αντοχής των υλικών, η οποία βρίσκει εφαρμογή στις θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας, όπου το μέταλλο θεωρείται σαν ένα ομογενές συνεχές μέσο, του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια με τη χρήση μερικών μόνο σταθερών, δηλαδή ιδιοτήτων του υλικού. Η προσέγγιση αυτή, η οποία είναι θεμελιώδης και ο βασικός άξονας της παρούσας εργασίας, αποτελεί την επιστημονική βάση για τον υπολογισμό και τη διαστασιολόγηση δομικών στοιχείων, κατασκευών και στοιχείων μηχανών, καθώς και το εφαλτήριο μετάβασης με αμελητέες ποιοτικές διαφορές από την μικροκλίμακα στην πραγματική κλίμακα. Συνεπώς, με βάση την παραπάνω θεώρηση, παρακάμπτεται η αδυναμία να εξετασθούν πειραματικά ολόκληρες μηχανολογικές κατασκευές, λόγω του περιορισμένου μεγέθους δοκιμών που δέχεται μια πειραματική διάταξη, και εξάγονται συμπεράσματα για ολόκληρη την κατασκευή εξετάζοντας μόνο τα δομικά της μέρη, ή τμήματα αυτών.

Για την χρήση ενός υλικού σαν δομικό στοιχείο μιας κατασκευής ή σαν εξάρτημα μιας μηχανής, είναι απολύτως απαραίτητο για τον μηχανικό να γνωρίζει τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής του υλικού, οι οποίες, 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. Οι χαρακτηριστικές τιμές των υλικών, οι οποίες όταν ξεπεραστούν

οδηγούν σε "αστοχία", προσδιορίζονται με βάση εργαστηριακές μηχανικές δοκιμές σε δείγματα υλικού περιορισμένης κλίμακας. Η γνώση τους αποτελεί βασικό παράγοντα για τον σχεδιασμό κατασκευαστικών στοιχείων με στόχο την αποφυγή αστοχιών, που μπορεί να συνδυάζονται με καταστροφικές συνέπειες, όπως απώλεια ανθρωπίνων ζωών. [1]

1.3 Μηχανικές δοκιμές

Η απόκτηση βασικών δεδομένων σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και η πραγματοποίηση μετρήσεων για τον έλεγχο της αντοχής τους, μπορούν να υλοποιηθούν με ένα σχετικά περιορισμένο αριθμό τυποποιημένων μηχανικών πειραματικών δοκιμών. Η πιο γνωστή δοκιμή που χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε στατικές συνθήκες είναι η δοκιμή εφελκυσμού, ενώ συχνά χρησιμοποιούνται οι δοκιμές κάμψης στρέψης και θλίψης. Για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς υλικών χρησιμοποιείται η δοκιμή κρούσης, ή άλλου τύπου δοκιμές με χαρακτηριστικό την υψηλή ταχύτητα παραμόρφωσης των δοκιμίων. Στις μηχανολογικές κατασκευές ιδιαίτερης σημασίας είναι η συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών οφείλεται σε μηχανισμούς κόπωσης. Για την περίπτωση αυτή, υλικά ελέγχονται στο εργαστήριο σε πειράματα κόπωσης για την εκτίμηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους, προτού χρησιμοποιηθούν σε πραγματική κατασκευή. Γίνεται κατά αυτόν τον τρόπο αντιληπτή η χρησιμότητα των πειραματικών δοκιμών και την καθοριστική συμβολή τους στην διερεύνηση και αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών.

1.4 Σκοπός της εργασίας

Οι μηχανικές δοκιμές σε εργαστηριακό επίπεδο πραγματοποιούνται με την χρήση ειδικών σερβο-ηλεκτρικών ή σερβο-υδραυλικών συστημάτων που φέρουν πλαίσιο φόρτισης, έμβολο επιβολής φορτίων και ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου που επικοινωνεί με το σύστημα φόρτισης μέσω H/Y. Πρόκειται για υψηλής τεχνολογίας συστήματα που μπορούν να παρακολουθούν την παραμόρφωση του υλικού υπό την επιβολή μηχανικών φορτίων με πολύ μεγάλη ακρίβεια, και απαιτούν εξειδικευμένους χρήστες για την λειτουργία τους.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η οποία χωρίζεται σε δύο μέρη, πραγματοποιήθηκε:

I) Η εγκατάσταση, εκμάθηση και περιγραφή λειτουργίας σερβο-υδραυλικού συστήματος για την διεξαγωγή μηχανικών δοκιμών σε τεχνολογικά υλικά.

II) Η χρήση του εν λόγω συστήματος στην μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς χαλύβων τύπου TRIP και την σύγκρισή της με την συμπεριφορά χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, σε συνθήκες εφελκυσμού και κόπωσης.

Κεφάλαιο 2

Μηχανικές δοκιμές

2.1 Η δοκιμή εφελκυσμού

Η πλαστική συμπεριφορά ενός υλικού μπορεί να μετρηθεί με την δοκιμή εφελκυσμού (tensile test). Οι μηχανές εφελκυσμού αποτελούν πλέον βασικό εξοπλισμό των εργαστηρίων, που ασχολούνται με υλικά και μηχανικές δοκιμές. Οι μηχανές εφελκυσμού παράγουν την καμπύλη φορτίου – επιμήκυνσης (F-u), η οποία μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή μετατρέπεται σε καμπύλη ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις $\sigma_n = F/A_0$ και $\epsilon_n = \Delta l/l_0$. Μία τυπική καμπύλη $\sigma_n - \epsilon_n$ φαίνεται στο διάγραμμα 2-1, που ακολουθεί.

Οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες που μετρώνται με την δοκιμή εφελκυσμού, είναι οι εξής:

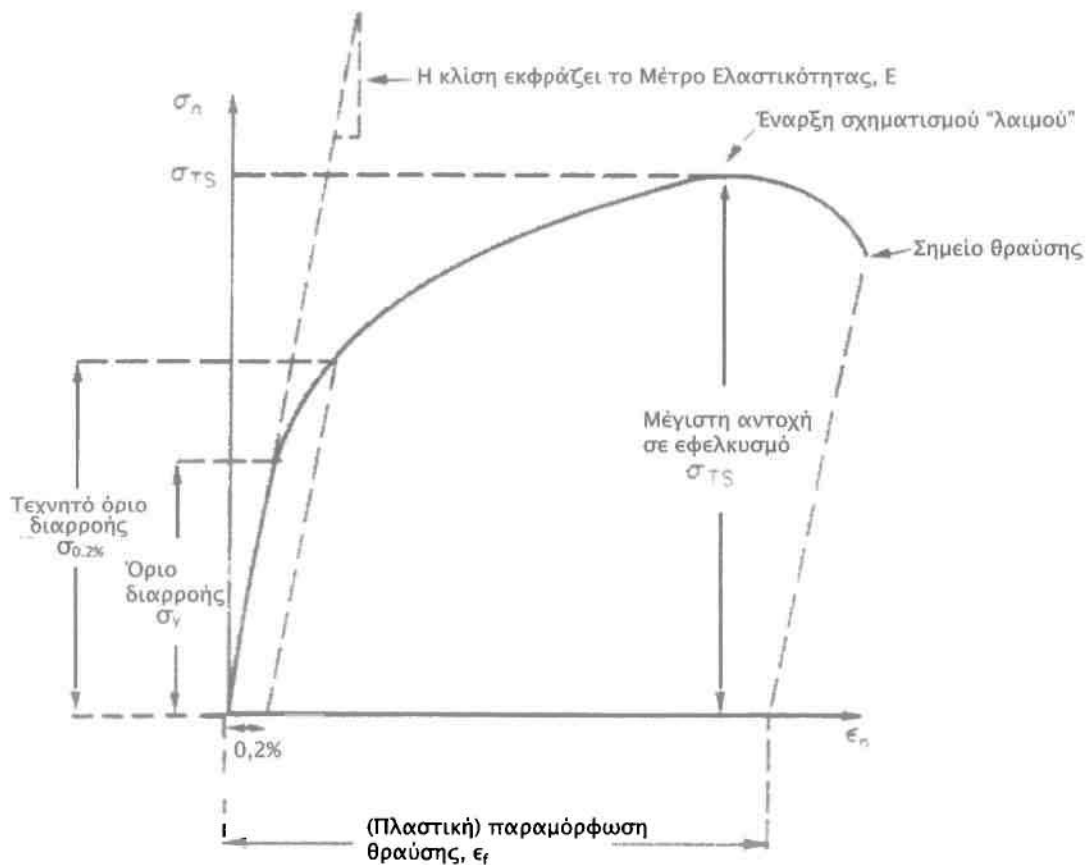
- **Μέτρο ελαστικότητας E:** Εκφράζει την αντίσταση ενός υλικού στην ελαστική παραμόρφωση και υπολογίζεται από την κλίση του διαγράμματος $\sigma_n - \epsilon_n$ στην ελαστική-γραμμική περιοχή. Συνδέει την ελαστική παραμόρφωση με την τάση, μέσω του νόμου του Hooke $\sigma = \epsilon \cdot E$
- **Όριο ροής (yield-strength), σ_y :** Ορίζει την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτό σημαίνει ότι μόλις ξεπεραστεί αυτή η τάση, το υλικό υφίσταται μόνιμη πλαστική παραμόρφωση.
- **Συμβατική τάση ροής (proof-stress), $\sigma_{n 0.1\%}$ ή $\sigma_{n 0.2\%}$:** Επειδή σε πολλά υλικά το όριο ροής δεν είναι ευδιάκριτο, θεωρείται συμβατικά ότι το υλικό αρχίζει να ρέει πλαστικά στην τάση εκείνη, όπου η παραμόρφωση ισούται με 0.1% (ή 0,2% ή 0.5%, ανάλογα με την προδιαγραφή).

Σημείωση: Η συμβατική τάση ροής απαντάται στην βιβλιογραφία και ως τεχνητό όριο διαρροής του υλικού και εντοπίζεται γεωμετρικά χαράζοντας από το σημείο του άξονα των παραμορφώσεων 0.1% , 0,2% ή 0.5% παράλληλη στο ευθύγραμμο τμήμα στην αρχή του διαγράμματος που αντιστοιχεί στην ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Εάν το τμήμα αυτό είναι πολύ μικρό, σε περίπτωση δηλαδή όπου το υλικό δεν παρουσιάζει σαφή ελαστική περιοχή, για την εύρεση του τεχνητού ορίου διαρροής, χαράζουμε την εφαπτομένη στην αρχή του διαγράμματος και φέρουμε παράλληλη προς αυτή. Η τεταγμένη του σημείου όπου η παράλληλη ευθεία που χαράσσουμε τμήσει το διάγραμμα δίνει την τιμή του τεχνητού ορίου διαρροής που ζητάμε.

- **Όριο θραύσης ή αντογή εφελκυσμού (ultimate tensile strength), σ_{UTS} ή UTS:** Είναι η τάση στο μέγιστο σημείο της καμπύλης $\sigma_n - \epsilon_n$, και οριοθετεί την έναρξη του λαιμού στο δοκίμιο.
- **Παραμόρφωση θραύσης ϵ_f .** Μετά την τελική θραύση του δοκιμίου, τα δύο κομμάτια ενώνονται και μετράται το συνολικό μήκος. Η παραμόρφωση

θραύσης ϵ_f ισούται με $(l-l_0)/l_0$ και εκφράζει την ολκιμότητα (ductility) του υλικού, καθώς δίνει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης πριν από την θραύση.

- **Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης $U_{1,0}$:** Εκφράζει την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου του υλικού κατά την ελαστο-πλαστική παραμόρφωση του και αντιστοιχεί στο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη σ_n - ϵ_n .



Διάγρ. 2-1: Καμπύλη ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης και ορισμός του ορίου διαρροής, της συμβατικής τάσης ροής, της μέγιστης αντοχής εφέλκυσμού και της παραμόρφωσης θραύσης [4]

Οι μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζουν πολύ μεγάλο εύρος από υλικό σε υλικό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα κεραμικά υλικά που έχουν πολύ υψηλό όριο ροής. Σε μία δοκιμή εφέλκυσμού, τα κεραμικά υλικά σπάνε προτού προλάβουν να παραμορφωθούν πλαστικά, γεγονός που οφείλεται στο ότι είναι ψαθυρά (brittle) υλικά. Για τον λόγο αυτό, δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί το όριο ροής των κεραμικών μέσω της δοκιμής εφέλκυσμού. Συνήθως αυτό γίνεται με την δοκιμή θλίψης ή την σκληρομέτρηση.

Τα καθαρά μέταλλα είναι πολύ μαλακά και όλκιμα (ductile) υλικά. Η πλαστική περιοχή τους εκτείνεται σε αρκετά μεγάλες τιμές παραμόρφωσης. Μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα και κατά την διάρκεια της διαμόρφωσης ισχυροποιούνται με την διαδικασία της εργοσκληρυνσης. Επίσης, η αντοχή τους μπορεί να αυξηθεί πολύ μέσω κραμάτωσης (alloying), με την προσθήκη δηλαδή στην δομή τους και άλλων μεταλλικών ή μη μεταλλικών στοιχείων.

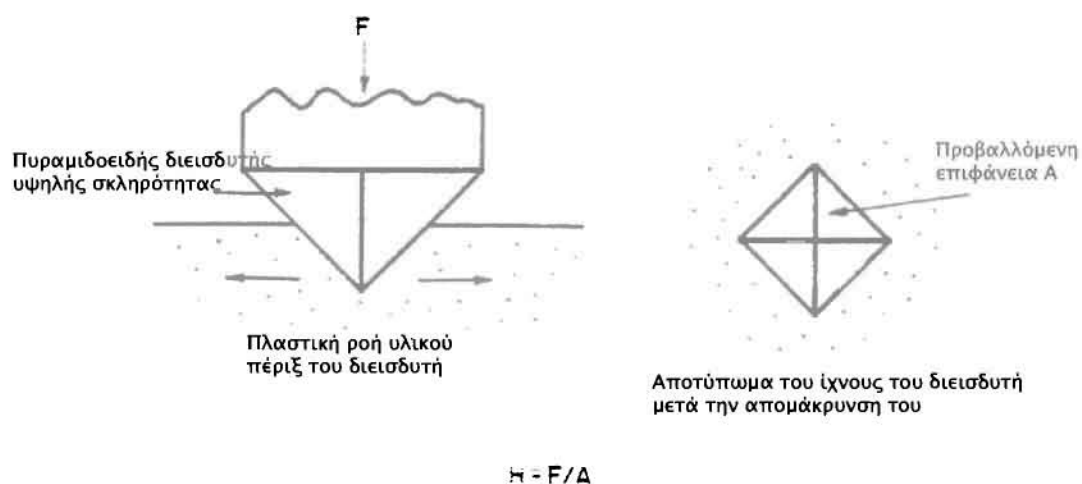
Τα πολυμερή υλικά γενικά, έχουν πολύ χαμηλότερο όριο ροής από τα μέταλλα. Ωστόσο, μπορούν και αυτά να ισχυροποιηθούν, κατασκευάζοντας σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ίνες γραφίτη ή γυαλιού. Για παράδειγμα το GFRP έχει αντοχή παραπλήσια αυτής του αλουμινίου, ενώ το CFRP έχει ακόμα μεγαλύτερη μηχανική αντοχή.

2.2 Η δοκιμή σκληρότητας (σκληρομέτρηση)

Η σκληρότητα ενός υλικού εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό, όταν κάποιο άλλο υλικό τείνει να διεισδύσει στην μάζα του. Έχει ιδιαίτερη σημασία σε μηχανολογικές εφαρμογές, όπου μηχανολογικά εξαρτήματα έρχονται σε επαφή.

Κατά την δοκιμή σκληρότητας ή σκληρομέτρηση (hardness test), ένας διεισδυτής (indenter) από διαμάντι, ή από πολύ σκληρό χαλύβδινο σφαιρίδιο, πιέζεται επάνω στην μεταλλική επιφάνεια, της οποίας μετράται η σκληρότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-1. Όσο πιο βαθιά μέσα στο υλικό διεισδύει ο διεισδυτής, τόσο πιο μαλακό είναι αυτό και παρουσιάζει μικρό όριο ροής. Η σκληρότητα H , ορίζεται ως ο λόγος του επιβαλλόμενου φορτίου δια την προβαλλόμενη επιφάνεια του διεισδυτή.

Υπάρχουν διάφορες κλίμακες μέτρησης της σκληρότητας, ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο διεισδυτής, το σχήμα του, καθώς επίσης και το επιτρεπόμενο εύρος φορτίων που μπορεί να ασκήσει ο διεισδυτής στο προς σκληρομέτρηση υλικό. Οι πιο γνωστές και χρησιμοποιούμενες από αυτές είναι η κλίμακα Vickers, η κλίμακα Brinell και οι κλίμακες Rockwell A, B και C.



Σχ. 2-1: Η δοκιμή σκληρότητας [4]

Η σκληρότητα έχει άμεση σχέση με το όριο ροής ενός υλικού. Μία προσεγγιστική σχέση, που συνδέει το όριο ροής με την σκληρότητα, είναι η εξής: $H=3\sigma_y$

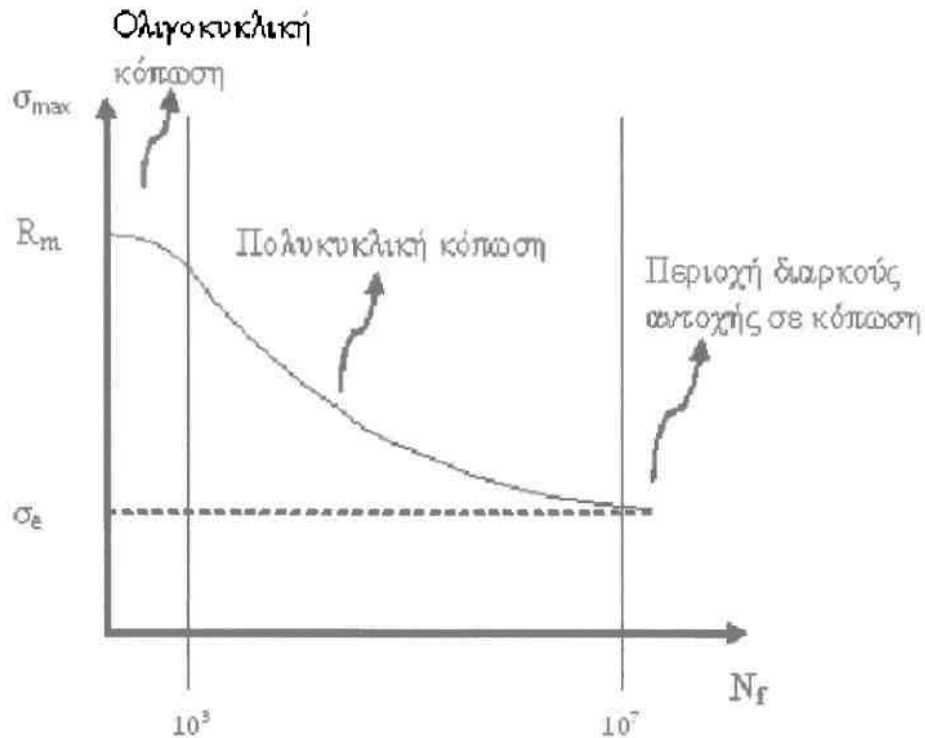
Η δοκιμή σκληρότητας είναι ένας πολύ καλός και γρήγορος τρόπος για την μέτρηση του ορίου ροής σε κεραμικά υλικά, καθώς και ένας απλός και φθηνός τρόπος για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο του σ_y σε άλλα υλικά.

2.3 Κόπωση υλικών

Ένα μεταλλικό κατασκευαστικό στοιχείο, που υποβάλλεται σε στατική ή μονοτονική φόρτιση, μπορεί να είναι ασφαλές, όσον αφορά την θραύση, όταν η φόρτιση (τάση) δεν υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής του υλικού. Όταν όμως το ίδιο κατασκευαστικό στοιχείο υποβληθεί σε κυκλική φόρτιση, τότε μπορεί να αστοχήσει σε τιμές του φορτίου πολύ χαμηλότερες από αυτές που απαιτούνται για θραύση από στατικά φορτία. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι η αστοχία οφείλεται σε κόπωση (fatigue) του μετάλλου. 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 μιας μέγιστης και μιας 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 μιας κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την τοπική, προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται συνήθως 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, στη κόπωση η συνθήκη ικανοποιείται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Ενώ στην στατική φόρτιση η αστοχία από θραύση είναι ακαριαία, στην κόπωση η αστοχία απαιτεί χρόνο, έως ότου η ρωγμή αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος. Έτσι, στην κόπωση μιλάμε για *διάρκεια ζωής* (fatigue life) του υλικού. Την διάρκεια ζωής δεν την 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 ή σχηματισμό της ρωγμής. Η δεύτερη φάση αποτελείται από τους κύκλους N_p , που απαιτούνται για την ανάπτυξη ή διάδοση της ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος. Η διάρκεια ζωής είναι επομένως $N_f = N_i + N_p$. Στο σημείο αυτό είναι καλό να διακρίνουμε δύο μεθοδολογίες που αφορούν την ανάλυση και τον σχεδιασμό για την διαχείριση της κόπωσης στις κατασκευές. Σε μεγάλες, σύνθετες κατασκευές, καθώς και σε συγκολλητές κατασκευές, δεχόμαστε ότι προϋπάρχουν ρωγμές με μήκος τουλάχιστον ίσο με το όριο ανίχνευσης των μη καταστρεπτικών μεθόδων (NDT) που χρησιμοποιούμε. 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 μικρά κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών (άξονες, οδοντώσεις, έδρανα κύλισης κ.λ.π.), 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 80% της διάρκειας ζωής, ενώ σε διαβρωμένα δοκίμια, ή σε δοκίμια που έχουν επιφανειακές εγκοπές και γενικότερα σημεία συγκεντρώσεως των τάσεων, το N_i μπορεί να είναι μόλις το 10% της διάρκειας ζωής.

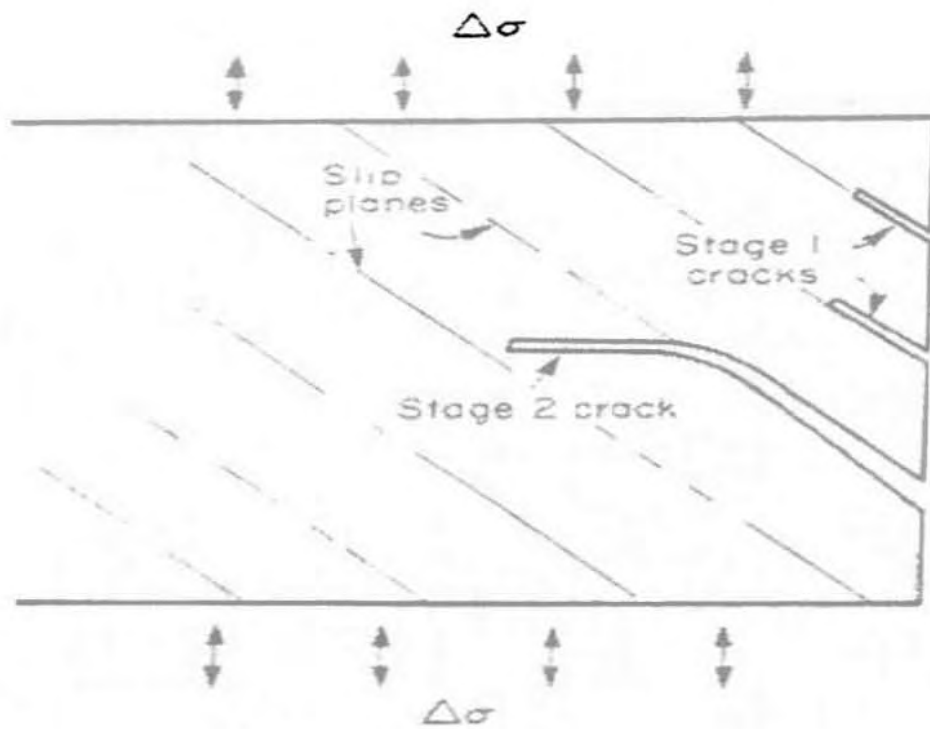
Στην κόπωση χωρίς προϋπάρχουσες ρωγμές συναντάμε δύο περιοχές, την πολυκυκλική (High Cycle Fatigue) και την ολιγοκυκλική κόπωση (Low Cycle Fatigue). Η πρώτη αφορά αρκετά χαμηλές καταπονήσεις, έτσι ώστε η διάρκεια ζωής να υπερβαίνει τους 10^3 με 10^4 κύκλους. Στην περίπτωση αυτή οι κυκλικές τάσεις προκαλούν κυρίως ελαστικές παραμορφώσεις.



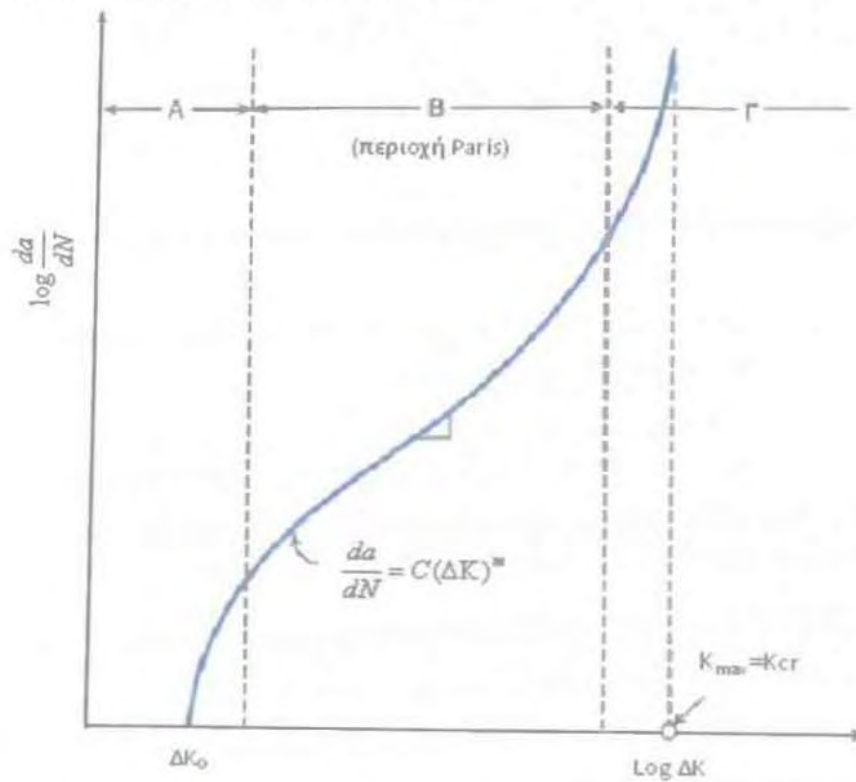
Διάγρ. 2-2: Διάγραμμα μέγιστης τάσης σ_{max} σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης N_f , όπου διακρίνονται οι περιοχές ολιγοκυκλικής κόπωσης, πολυκυκλικής κόπωσης και διαρκούς αντοχής σε κόπωση

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 (που κατά την διάρκεια ζωής υποβάλλονται σε περιορισμένο αριθμό κυκλικών παραμορφώσεων που σχετίζονται με την εκκίνηση και σβήσιμο του αντιδραστήρα) και πολλά σκαπτικά και χωματουργικά μηχανήματα, τα οποία περιστασιακά υπόκεινται σε υπερφορτίσεις που είναι δυνατόν να προκαλέσουν πλαστικές παραμορφώσεις.



Σχ. 2-2: Προώθηση ρήγματος σε υλικό χωρίς προϋπάρχοντα ρήγματα, κάτω από συνθήκες κόπωσης χαμηλής συχνότητας [4]



διάγρ. 2-3: Ταχύτητα αναπτύξεως της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων ΔK [4]

Στην μηχανολογία συναντάμε διάφορους τύπους κόπωσης. Η μηχανική κόπωση, ή απλά κόπωση αφορά την συμπεριφορά του υλικού όταν αυτό υποβάλλεται σε κυκλικές μηχανικές τάσεις ή παραμορφώσεις. Όταν η κυκλική φόρτιση επιβάλλεται ενώ ταυτόχρονα το υλικό εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες, τότε έχουμε συνδυασμό ερπυσμού - κόπωσης (creep-fatigue). Όταν μαζί με τα μηχανικά φορτία αυξομειώνεται και η θερμοκρασία, τότε έχουμε την θερμομηχανική κόπωση (thermomechanical fatigue). Όταν η κυκλική φόρτιση πραγματοποιείται με ταυτόχρονη έκθεση του υλικού σε διαβρωτικό περιβάλλον, έχουμε τον συνδυασμό κόπωσης - διάβρωσης (corrosion-fatigue). Κυκλική φόρτιση με ταυτόχρονη ολίσθηση ή κύλιση μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών προκαλεί κόπωση επαφής - ολίσθησης (sliding contact fatigue), ή κόπωση επαφής κύλισης (rolling contact fatigue) αντίστοιχα. Τέλος η κυκλική φόρτιση με σχετική παλινδρομική κίνηση και τριβή ολίσθησης μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών προκαλεί κόπωση με εκτριβή (fretting fatigue). Οι περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές αστοχούν με έναν από τους παραπάνω τύπους κόπωσης.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα επικεντρωθούμε στον βασικό και πιο διαδεδομένο τύπο κόπωσης, την μηχανική κόπωση, και μάλιστα υπό την παραδοχή ότι δεν υπάρχουν προϋπάρχουσες ρωγμές στο υλικό.

2.3.1 Η δοκιμή της κόπωσης

Για την εφαρμογή της κάτωθι μεθοδολογίας κάνουμε δύο βασικές υποθέσεις:

- Ότι δεν προϋπάρχουν ρωγμές στο υλικό
- Ότι η διάρκεια ζωής δίδεται από την σχέση $N_f = N_i + N_p$

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

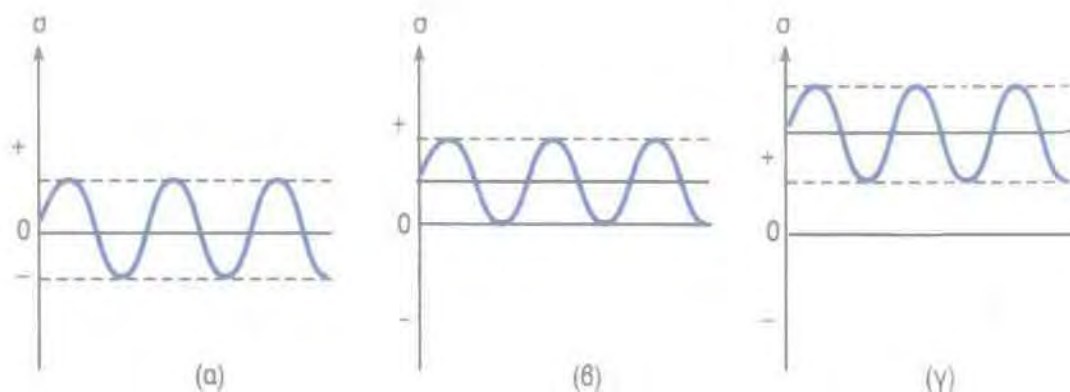
$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

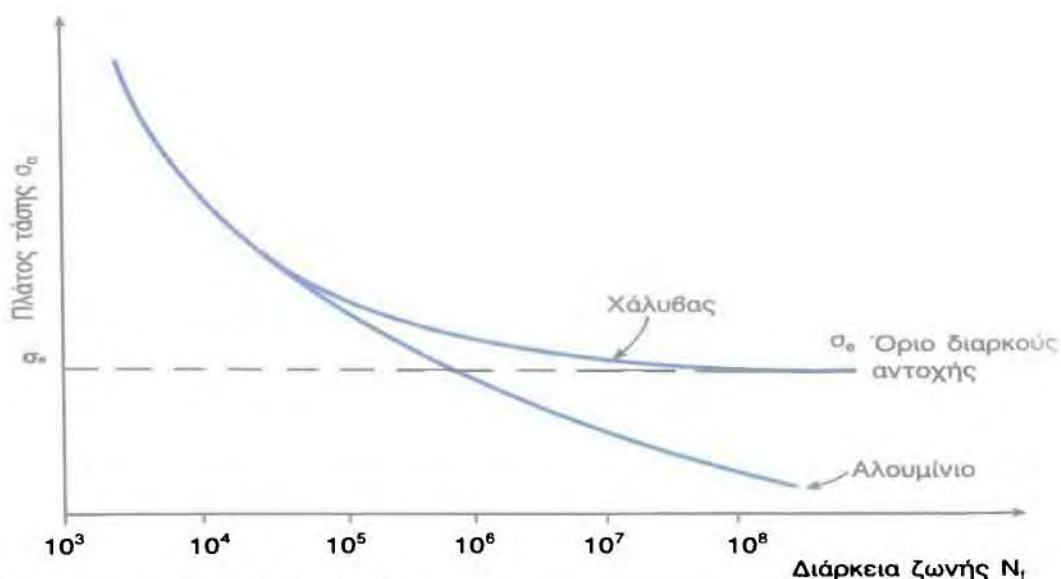
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Με σ_{\max} , σ_{\min} συμβολίζουμε την μέγιστη και την ελάχιστη τάση του κύκλου αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται κυκλικές φορτίσεις για διάφορες τιμές του R .



Διάγρ. 2-4: Κυκλικές φορτίσεις: (α) $R=-1$, $\sigma_m=0$ (β) $R=0$, $\sigma_m>0$, (γ) $0<R<1$, $\sigma_m>0$

Στην περίπτωση κυκλικής φόρτισης με πλήρη αναστροφή της τάσης, με $\sigma_m=0$ και χαμηλές τιμές του πλάτους τάσεως σ_a , η διάρκεια ζωής υπερβαίνει τους 10^3 με 10^4 κύκλους (πολυκυκλική κόπωση). Η εξάρτηση της διάρκειας ζωής από την επιβαλλόμενη τάση σ_a φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου απεικονίζεται το πλάτος τάσης σ_a σε συνάρτηση με την διάρκεια ζωής για σταθερή μέση τάση. Εναλλακτικά η απεικόνιση μπορεί να γίνει με την εξάρτηση του σ_{max} με το N_f για σταθερό λόγο τάσεων R . Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται και διαγράμματα S-N, ή καμπύλες Woehler. Από τα διαγράμματα αυτά προσδιορίζεται το όριο διαρκούς αντοχής σ_e (endurance limit), το οποίο αντιστοιχεί στο πλάτος της κυκλικής τάσης κάτω από το οποίο το υλικό εμφανίζει ουσιαστικά άπειρη διάρκεια ζωής. Το όριο διαρκούς αντοχής είναι διακριτό σε πολλούς χάλυβες, όμως δεν εμφανίζεται σε χάλυβες υψηλής αντοχής και σε μη σιδηρούχα κράματα, όπως π.χ. τα κράματα αλουμινίου. Στις περιπτώσεις αυτές ορίζεται το συμβατικό όριο διαρκούς αντοχής, που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση που αντέχει το υλικό χωρίς να αστοχήσει για 10^7 κύκλους κόπωσης.



Διάγρ. 2-5: Το πλάτος της τάσεως σε συνάρτηση με την διάρκεια ζωής για χάλυβα και αλουμίνιο (καμπύλη S-N) [2]

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή σερβο-υδραυλικού συστήματος μηχανικών δοκιμών γενικής χρήσης

Το σύστημα μηχανικών δοκιμών γενικής χρήσης αποτελείται από τρία μέρη: i) Το πλαίσιο φόρτισης, (εικ. 3-2), ii) την υδραυλική αντλία (εικ. 3-7 και εικ. 3-8) και iii) την ηλεκτρονική μονάδα (εικ. 3-9).

Η λειτουργία της μηχανής βασίζεται στην μέθοδο του κλειστού βρόχου, όπου η ηλεκτρονική μονάδα (controller) αποτελεί τον δίαυλο επικοινωνίας ανάμεσα στο λογισμικό που υπάρχει στον Η/Υ και το έμβολο επιβολής φόρτισης. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι εντολές που δίνει ο χρήστης, μέσω του λογισμικού,



Εικ. 3-1: Σύστημα ελέγχου μηχανικών δοκιμών κλειστού βρόχου (Η/Υ-κονσόλας-πλαισίου φόρτισης)

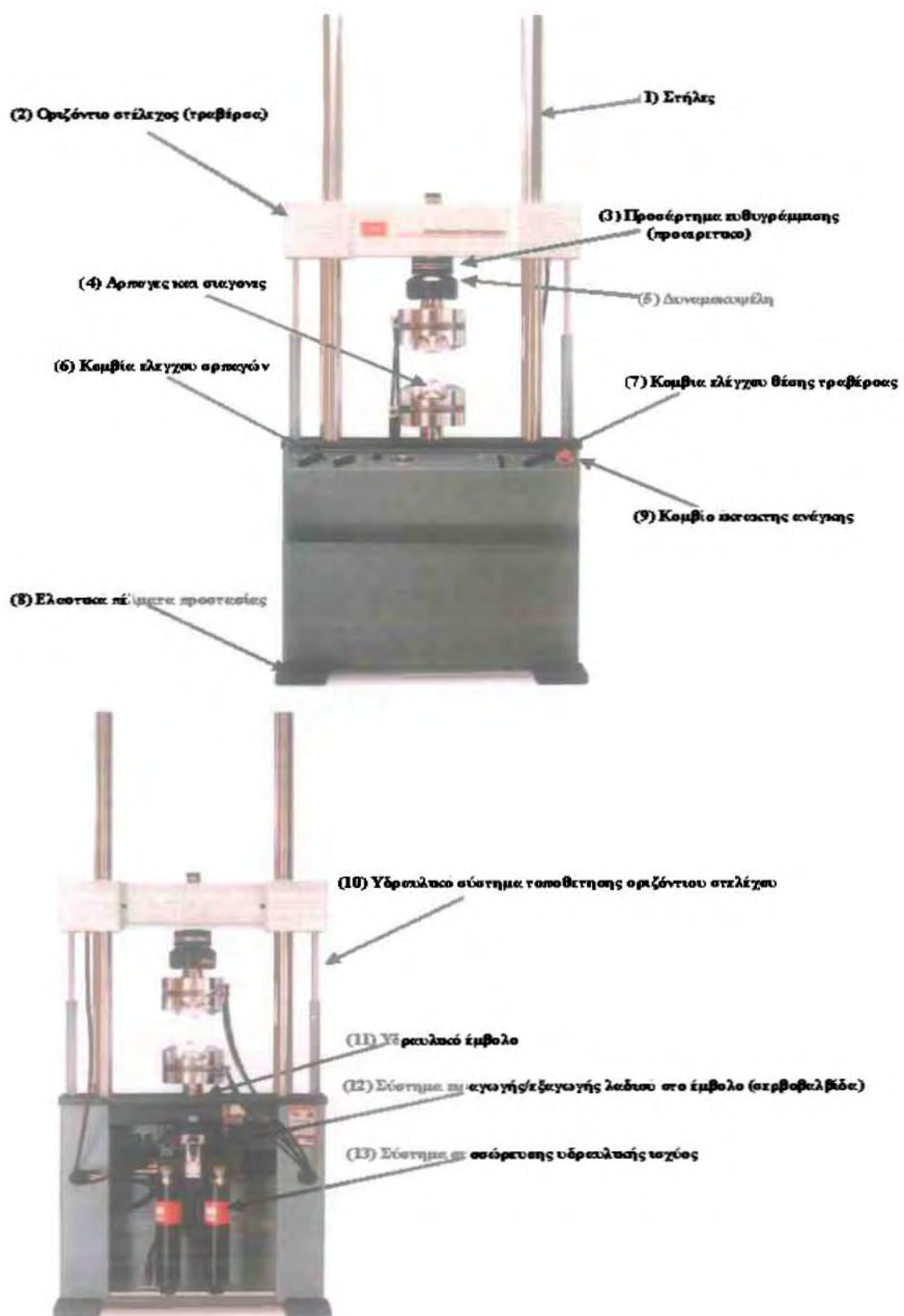
για την εκτέλεση κίνησης του εμβόλου, μεταφέρονται σαν σήμα ηλεκτρικό, μέσω της ηλεκτρονικής μονάδας στο έμβολο. Η αντλία δίνει την δυνατότητα στο έμβολο να κινηθεί κατά βούληση του χρήστη, χρήσει της υδραυλικής ισχύος πεπιεσμένου λαδιού.

3.1 Πλαίσιο φόρτισης

Το πλαίσιο φόρτισης της μηχανής φαίνεται στην εικ. 3-2. Αποτελείται από δύο κινητές κατακόρυφες στήλες που εδράζονται πάνω στην βάση του πλαισίου. Ενσωματωμένο στην βάση του πλαισίου είναι το έμβολο φόρτισης, και προσαρτημένο πάνω στην άκρη του 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 μεγίστης δυνατότητας καταγραφής δύναμης 100 KN. Στην επόμενη παράγραφο με την βοήθεια της εικ. 3-3 περιγράφονται τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν το πλαίσιο της μηχανής και γίνεται επεξήγηση της χρησιμότητάς τους.



Εικ. 3-2: Μηχανή εφελκυσμού της Instron (βάση και πλαίσιο φόρτισης)



Εικ. 3-3: Τα βασικά μέρη του συστήματος μηχανικών δοκιμών [7]

(1) Στήλες:

Είναι κατασκευασμένες από ισχυρό επιχρωμιωμένο χάλυβα υψηλής σκληρότητας. Είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες με το πλαίσιο της μηχανής και μπορούν να μετακινηθούν με την βοήθεια ειδικού κομβίου (7) για τον καθορισμό της επιθυμητής απόστασης μεταξύ των αρπαγών του συστήματος. Παρέχουν την δυνατότητα ακριβούς κατεργασίας, όπου απαιτείται το φορτίο να διατηρείται ευθυγραμμισμένο καθ' όλο το μήκος των δοκιμίων.

(2) Οριζόντιο στέλεχος (τραβέρσα):

Πάνω του εδράζεται η αρπάγη της μηχανής και η δυναμοκυψέλη. Μέσω της κίνησης των στηλών το οριζόντιο στέλεχος μετατοπίζεται κατάλληλα για την προσαρμογή δοκιμίων στον ελεύθερο χώρο μεταξύ των αρπαγών.

(4) Αρπάγες και σιαγόνες:

Οι αρπάγες επιτρέπουν, μέσω υδραυλικής πίεσης που ασκείται στις σιαγόνες, την σωστή και σταθερή τοποθέτηση των δοκιμίων στην μηχανή. Ανάλογα με τον τύπο σιαγόνων που χρησιμοποιείται επιτρέπεται η τοποθέτηση στην μηχανή διαφορετικών τύπων δοκιμίων, διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών (π.χ. ελασμάτων, κυλινδρικών δοκιμίων κ.λ.π.)

(5) Δυναμοκυψέλη:

Παρέχει την δυνατότητα ακριβούς καταγραφής του φορτίου κατά την διάρκεια της μηχανικής δοκιμής, τόσο σε στατικές, όσο και σε δυναμικές καταπονήσεις.

(6) Κομβία ελέγχου αρπαγών:

Χρησιμοποιούνται για τον υδραυλικό έλεγχο των αρπαγών και των σιαγόνων.

(7) Κομβία ελέγχου θέσης τραβέρσας:

Επιτρέπουν τον υδραυλικό έλεγχο της θέσης της τραβέρσας και το κλειδώμα της στην επιθυμητή θέση εργασίας. Το κομβίον έκτακτης ανάγκης διακόπτει ανά πάσα στιγμή την υδραυλική ισχύ του συστήματος και τερματίζει ακαριαία την τρέχουσα εργασία.

(8) Ελαστικά πέλματα προστασίας:

Λειτουργούν ως μέσο απόσβεσης των κραδασμών που δημιουργούνται κατά την δυναμική απόκριση του εμβόλου.

(10) Υδραυλικό σύστημα τοποθέτησης οριζόντιου στελέχους:

Επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη τοποθέτηση της τραβέρσας, ενώ έχει την δυνατότητα να την κλειδώνει και να την ξεκλειδώνει.

(11) Υδραυλικό έμβολο:

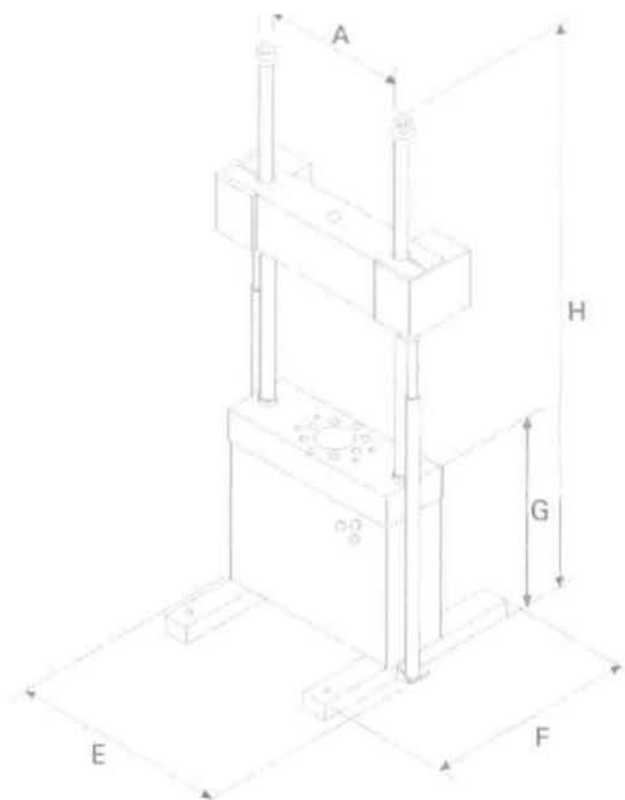
Το υδραυλικό έμβολο είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένο και τοποθετημένο μέσα στην βάση του πλαισίου φόρτισης, διαθέτει υψηλή ακαμψία και είναι το μέσο επιβολής φόρτισης στο υπό μελέτη δοκίμιο, που προσαρμόζεται μεταξύ των αρπαγών. Φέρει ομοαξονικά ενσωματωμένο αισθητήρα μετατόπισης υψηλής ακρίβειας, για την καταγραφή της μετατόπισής του.

(12) Σύστημα εισαγωγής/εξαγωγής υδραυλικής ισχύος στο έμβολο (υδραυλικός κατανεμητής):

Ο υδραυλικός κατανεμητής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής του λαδιού και την ακριβή μετατόπιση του εμβόλου φόρτισης. Είναι τοποθετημένος στο έμβολο, για να επιτυγχάνεται υψηλότερη δυνατή απόκριση του τελευταίου και ακριβέστεροι έλεγχοι στις δοκιμές. Συνεργάζεται με δύο στενά συνδεδεμένους συσσωρευτές υδραυλικής ισχύος, οι οποίοι εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις της υδραυλικής πίεσης στο σύστημα.

3.1.1 Γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά πλαισίου φόρτισης

Στο σχήμα 3-1 φαίνονται τα τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος δοκιμών γενικής χρήσης της Instron, που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας εργασίας



A: Απόσταση στηλών (mm)	644
H: Ύψος πλαισίου (mm)	3650
E: Πλάτος πλαισίου (mm)	1060
G: Ύψος βάσης (mm)	910
F: Μήκος πλαισίου (mm)	1120

Σχ. 3-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλαισίου φόρτισης [8]

Το αξονικό, σερβοϋδραυλικό πλαίσιο μέγιστης δυναμικής φόρτισης ± 100 KN, διαθέτει υψηλή ακαμψία, ευθυγράμμιση μεγάλης ακρίβειας, σταθερή κάτω βάση και ρυθμιζόμενο εγκάρσιο στέλεχος (τραβέρσα), στο οποίο εδράζεται η άνω υδραυλική αρπάγη. Ακόμη, περιλαμβάνει υδραυλικό σύστημα ανύψωσης, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση της θέσης της τραβέρσας και η σταθεροποίησή της με υδραυλικούς σφινγκήρες. Η μετακίνηση και το κλείδωμα της τραβέρσας γίνεται μέσω υδραυλικού μηχανισμού που ενεργοποιείται από ενσωματωμένο στην βάση του πλαισίου πίνακα ελέγχου, ο οποίος διαθέτει χειριστήριο κινδύνου για την άμεση παύση της λειτουργίας της μηχανής σε περιπτώσεις ανάγκης.

Το πλαίσιο φόρτισης καταλαμβάνει μικρό εργαστηριακό χώρο και δέχεται συμπληρωματικά εξαρτήματα χωρίς να υφίσταται ανάγκη μετατροπών, ενώ εδράζεται σε αντικραδασμικές βάσεις.

Το υδραυλικό έμβολο επιβολής φορτίων εδράζεται στην βάση του πλαισίου και έχει ενσωματωμένο μετρητή μετατόπισης υψηλής ακρίβειας με συνολική διαδρομή 150 mm (± 75 mm) και εγγυημένη δυνατότητα επιβολής δυναμικών φορτίων ± 100 KN. Επίσης, είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένο με το κέντρο στήριξης εξαρτημάτων δοκιμής της τραβέρσας. Η διάταξη ολίσθησης του εμβόλου είναι τέτοια, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τριβές και οι απώλειες υδραυλικής πίεσης κατά τη διεξαγωγή δοκιμών. Για την κίνηση του εμβόλου, σύμφωνα με μία προεπιλεγμένη κυματομορφή δοκιμών, απαιτείται κατάλληλη ρύθμιση της ροής του λαδιού που φθάνει μέσω της αντλίας του συστήματος στο έμβολο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ειδικής σερβοβαλβίδας προσαρτημένης στην βάση του εμβόλου. (Βλ. εικ. 3-3 (12)).

Η σερβοβαλβίδα του συστήματος επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια ελέγχου υδραυλικής ροής και σωστή απόκριση των προγραμματιζόμενων φορτίσεων. Είναι τοποθετημένη σε υδραυλικό κατανεμητή ο οποίος επιτρέπει την προσθήκη δεύτερης σερβοβαλβίδας, χωρίς καμία τροποποίηση, εξασφαλίζοντας παράλληλα την αποφυγή ταλαντώσεων. Ο υδραυλικός κατανεμητής εξασφαλίζει επίσης την εξομάλυνση της δυναμικής απόδοσης του συστήματος και την ήσυχη λειτουργία της μηχανής.

3.1.2 Δυναμοκυψέλη

Η δυναμοκυψέλη του συστήματος μηχανικών δοκιμών είναι όργανο υψηλής ακρίβειας και ευαισθησίας, για την μέτρηση των ασκουμένων φορτίων στα δοκίμια, τα οποία μελετώνται στην μηχανή. Είναι προσαρμοσμένη στο επάνω οριζόντιο στέλεχος του πλαισίου (βλ εικ 3-3 (5) και εικ 3-4), στην κορυφή της πάνω αρπάγης. Καλύπτει περιοχή φορτίσεων ± 100 KN με δυνατότητα να αντέχει σε υπερφορτίσεις της τάξης του 150%. Επίσης είναι διακριβωμένη σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM E4 και EN ISO 7500-1 σε τουλάχιστον δύο επίπεδα του εύρους μέτρησης (συμπεριλαμβανομένου του 100%).



Εικ. 3-4: Η δυναμοκυψέλη του συστήματος μηχανικών δοκιμών της Instron

3.1.3 Υδραυλικές αρπάγες και σιαγόνες

Οι υδραυλικές αρπάγες περιλαμβάνουν ένα σετ σιαγόνων για επίπεδα και ένα σετ για κυλινδρικά δοκίμια. Οι αρπάγες είναι κατασκευασμένες να αντέχουν σε δυναμικές καταπονήσεις ± 100 KN και σε στατικά φορτία έως 120 KN. Η σύσφιξη των σιαγόνων των αρπαγών γίνεται με την βοήθεια υδραυλικής πίεσης, μέσω χειριστηρίου ελέγχου σύσφιξης, που είναι ενσωματωμένο στο πλαίσιο φόρτισης.



(α)



(β)

Εικ. 3-5: (α): Δυναμοκουψέλη, αρπάγες και σιαγόνες (β): Χειριστήρια ελέγχου θέσης εμβόλου και σύσφιξης άνω και κάτω σιαγόνων

3.1.4 Επιμηκυνσιόμετρο - τεχνικά χαρακτηριστικά

Το επιμηκυνσιόμετρο παραμορφώσεων αποτελεί επιπλέον εξοπλισμό του συστήματος μηχανικών δοκιμών και χρησιμοποιείται για την μέτρηση παραμορφώσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος του δοκιμίου. Αποτελείται από δύο ακίδες που προσαρμίζονται στην επιφάνεια του δοκιμίου και "ακολουθούν" την παραμόρφωσή του. Η χρήση του επιμηκυνσιόμετρου παρέχει την δυνατότητα μέτρησης της παραμόρφωσης ανά πάσα στιγμή κατά την διάρκεια μιας δυναμικής μηχανικής δοκιμής.



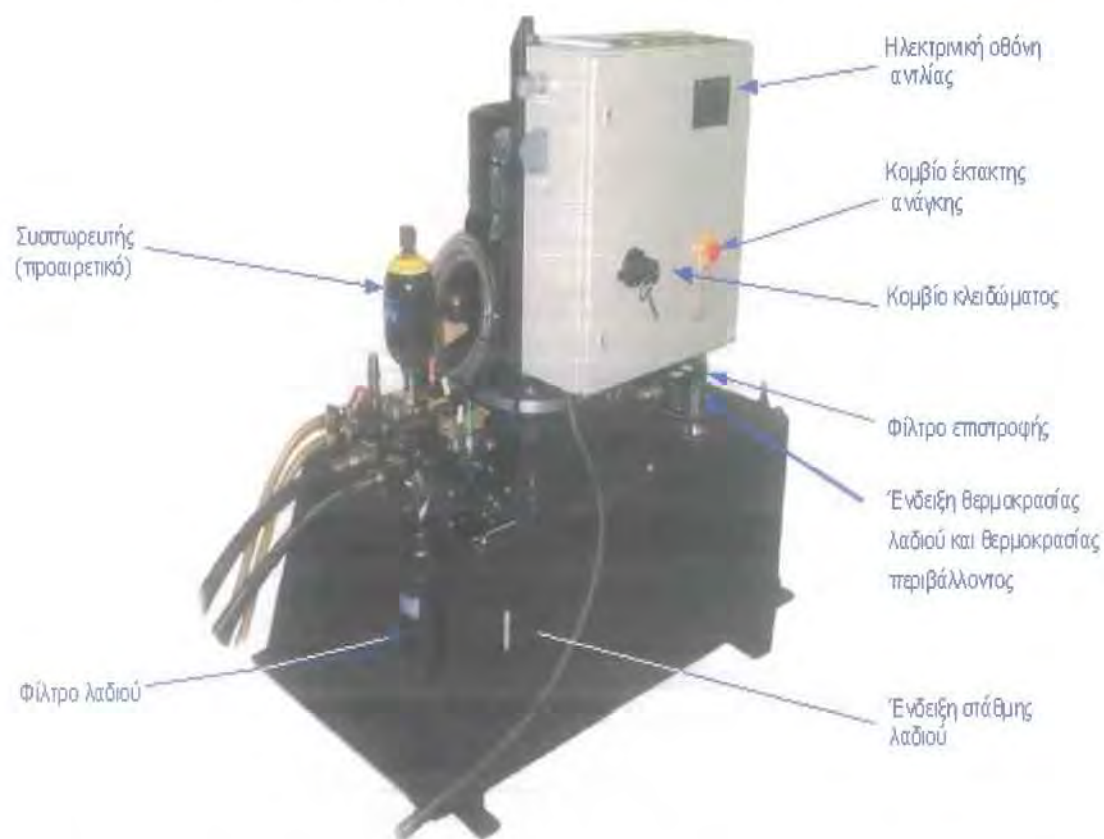
Εικ. 3-6: Δοκιμή με τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρου

Τα επιμηκυνσιόμετρα, είναι βασικής περιοχής μέτρησης 25-50 mm με δυνατότητα προσαρμογής σε επίπεδα ή κυλινδρικά δοκίμια. Επίσης είναι υψηλής ακρίβειας, τύπου γέφυρας και σχεδιασμένο με τρόπο που να καλύπτει παραμορφώσεις της τάξεως του 50% σε εφελκυσμό και 10% σε θλίψη ή και μεγαλύτερες. Επιπρόσθετα, είναι διακριβωμένα σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM E-83 και EN 10002-4. [7]

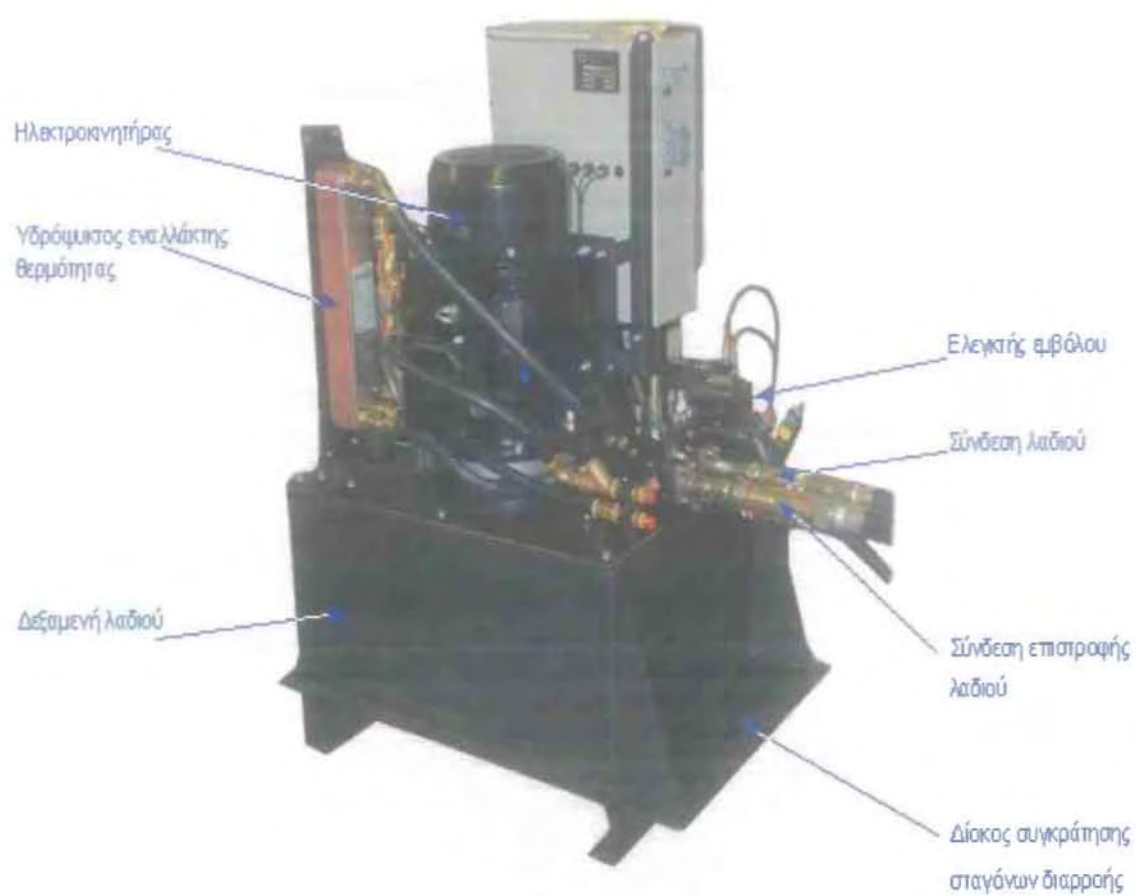
3.2 Μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος

Η μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος παρέχει υδραυλική ισχύ, μέσω της αντλίας, χρήσει πεπιεσμένου λαδιού, για την μετατόπιση του εμβόλου και για την λειτουργία των αρπαγών. Περιλαμβάνει ηλεκτρικό εκκινητή (μίζα), ενώ διατίθεται με κομβία λειτουργίας και ελέγχου του συστήματος. Η βάση της μονάδας είναι δεξαμενή χωρητικότητας 131 lt. Στην κανονική της λειτουργία η αντλία στέλνει το λάδι από την δεξαμενή στο έμβολο με πίεση της τάξης των 3000 psi (206.84 bar), ένδειξη που αναγράφεται στην ηλεκτρονική οθόνη της αντλίας. Η ψύξη του λαδιού επιτυγχάνεται μέσω της ροής νερού με την βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας (εικ 3-8 (β)). Στο επάνω μέρος της δεξαμενής είναι τοποθετημένα ειδικά όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας και της στάθμης του λαδιού. Η θερμοκρασία λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 39 °C, ενώ η στάθμη να μην πέφτει κάτω από τα 2/3 της στάθμης της δεξαμενής όταν είναι πλήρης.

Για την ελαχιστοποίηση του επιπέδου του θορύβου που προκαλεί η μηχανή, έχουν τοποθετηθεί τα υδραυλικά μέρη της και οι υδρόψυκτοι κινητήρες που διαθέτει, μέσα στο ρεζερβουάρ της, ενώ τα υλικά, που έχουν χρησιμοποιηθεί στο εσωτερικό της, είναι ειδικά, ώστε να απορροφούν τον ήχο και να αποτρέπουν κάθε είδους διαρροή.



Εικ. 3-7: Μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος Instron (πρόσθια όψη) [08]



(β)

Εικ. 3-8: Μονάδα παροχής υδραυλικής ισχύος Instron (όψη από πίσω) [8]

3.3 Ηλεκτρονική μονάδα και λογισμικό λειτουργίας

Το τρίτο βασικό τμήμα του συστήματος μηχανικών δοκιμών αποτελείται από την ηλεκτρονική μονάδα και το λογισμικό λειτουργίας της μηχανής (εικ. 3-9). Η ηλεκτρονική μονάδα αποτελεί τον δίαυλο επικοινωνίας ανάμεσα στο μηχανολογικό εξοπλισμό του συστήματος (αντλία, πλαίσιο) και το λογισμικό λειτουργίας. Ουσιαστικά παίζει τον ρόλο του ρυθμιστή των ηλεκτρονικών σημάτων που μεταφέρονται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στο μηχανικό σύστημα (αντλία, σερβοβαλβίδα), μέσω ενός λογισμικού λειτουργίας, για την απόκριση του εμβόλου στις εντολές του χρήστη κατά την διάρκεια μηχανικών δοκιμών. Το λογισμικό λειτουργίας περιλαμβάνει i) την βασική κονσόλα ii) το λογισμικό Bluehill για την διεξαγωγή δοκιμών εφελκυσμού και iii) το λογισμικό SAX για την διεξαγωγή δοκιμών κόπωσης.



Εικ. 3-9: Η/Υ και ηλεκτρονική μονάδα συστήματος

3.3.1 Βασική κονσόλα λειτουργίας

Η βασική κονσόλα είναι το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των αισθητηρίων φορτίου, μετατόπισης και παραμόρφωσης της μηχανής.

Στο επάνω μέρος της κονσόλας εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο οι τιμές των αισθητηρίων φορτίου, μετατόπισης και παραμόρφωσης (position, load, strain). Ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει στο αριστερό μέρος της οθόνης τις επιλογές position, load ή strain για την ρύθμιση των παραμέτρων, όπως α) ενεργοποίηση ελέγχου μηχανής, μέσω κάποιου αισθητηρίου, β) εισαγωγή δικλίδων ασφαλείας για την ασφάλεια του συστήματος (primary limits) κατά την διάρκεια δοκιμών και γ) την ρύθμιση παραμέτρων διακρίβωσης των αισθητηρίων (calibration). Στην επόμενη

παράγραφο και στις εικόνες 3-10 έως 3-12 παρατίθενται χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης της κεντρικής κονσόλας για την περίπτωση επιβολής ορίων ασφαλείας:

Στην κονσόλα επιλέγεται position και έπειτα primary limits



Εικ. 3-10: Επιλογή ορίων ασφαλείας

Τίθεται ανώτατο και κατώτατο όριο θέσης εμβόλου και επιλέγουμε Arm all limits in this test group



Εικ. 3-11: Ενεργοποίηση ορίων ασφαλείας

Τίθεται άνω όριο επιβολής δύναμης στο δοκίμιο κατά την τοποθέτησή του στην μηχανή



Εικ. 3-12: Επιλογή τάσης ασφαλείας για την προστασία του δοκιμίου κατά την τοποθέτησή του στο σύστημα

Αντίστοιχα για την επιβολή ορίων στους αισθητήρες του φορτίου και της παραμόρφωσης πρέπει ο χρήστης να ενεργοποιήσει της επιλογές load ή strain. Για την ενεργοποίηση ελέγχου της μηχανής, μέσω κάποιου αισθητηρίου, ή την αλλαγή των παραμέτρων διακρίβωσης, ο χρήστης χρησιμοποιεί την επιλογή control ή calibration (εικ. 3-9) από την κονσόλα αντίστοιχα.

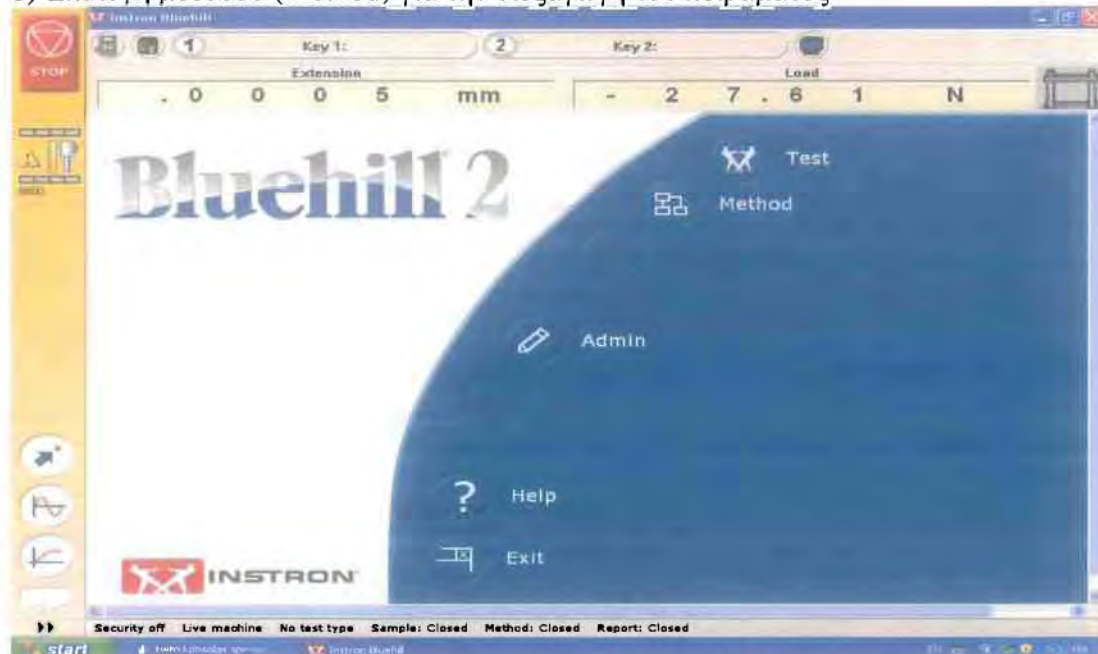
Η κεντρική κονσόλα δίνει επιπλέον την δυνατότητα εφαρμογής κάποιων βασικών κυματομορφών κίνησης του εμβόλου (ημι-στατικές ή δυναμικές), μέσω επιλογών που εμφανίζονται στο κάτω αριστερό μέρος της οθόνης.

Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζονται τα βασικά βήματα, που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης, για την λειτουργία των προγραμμάτων Bluehill2 και SAX για την διεξαγωγή δοκιμών εφελκυσμού και κόπωσης και αντίστοιχα.

3.3.2 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος Bluehill2

Για την διεξαγωγή της δοκιμής εφελκυσμού με χρήση του προγράμματος Bluehill2 ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1) Επιλογή μεθόδου (Method) για την διεξαγωγή του πειράματος



Εικ. 3-13: Επιλογή μεθόδου για τον σχεδιασμό του παρόντος πειράματος εφελκυσμού

2) Επιλογή νέας μεθόδου ή ήδη υπάρχουσας μεθόδου με τον ορισμό του ονόματός της και την θέση αποθήκευσης



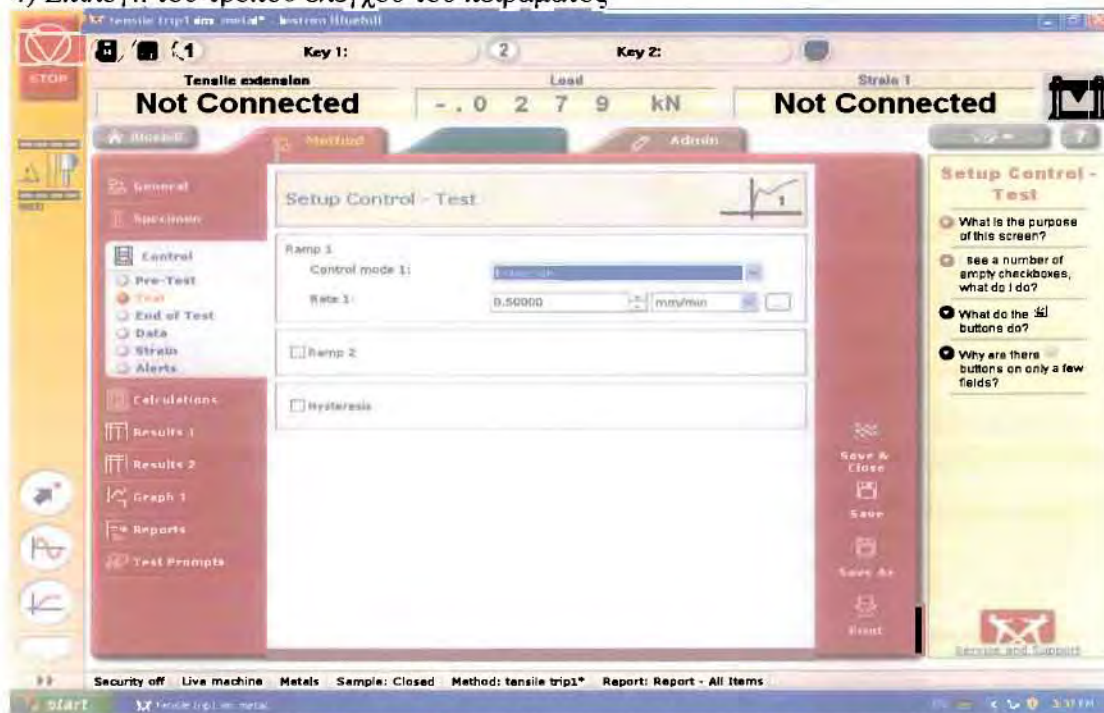
Εικ. 3-14: Επιλογή μεθόδου για την εκτέλεση του πειράματος του εφελκυσμού

3) Ορισμός της γεωμετρίας του δοκιμίου με την επιλογή Geometry και κατόπιν ορισμός των διαστάσεών του



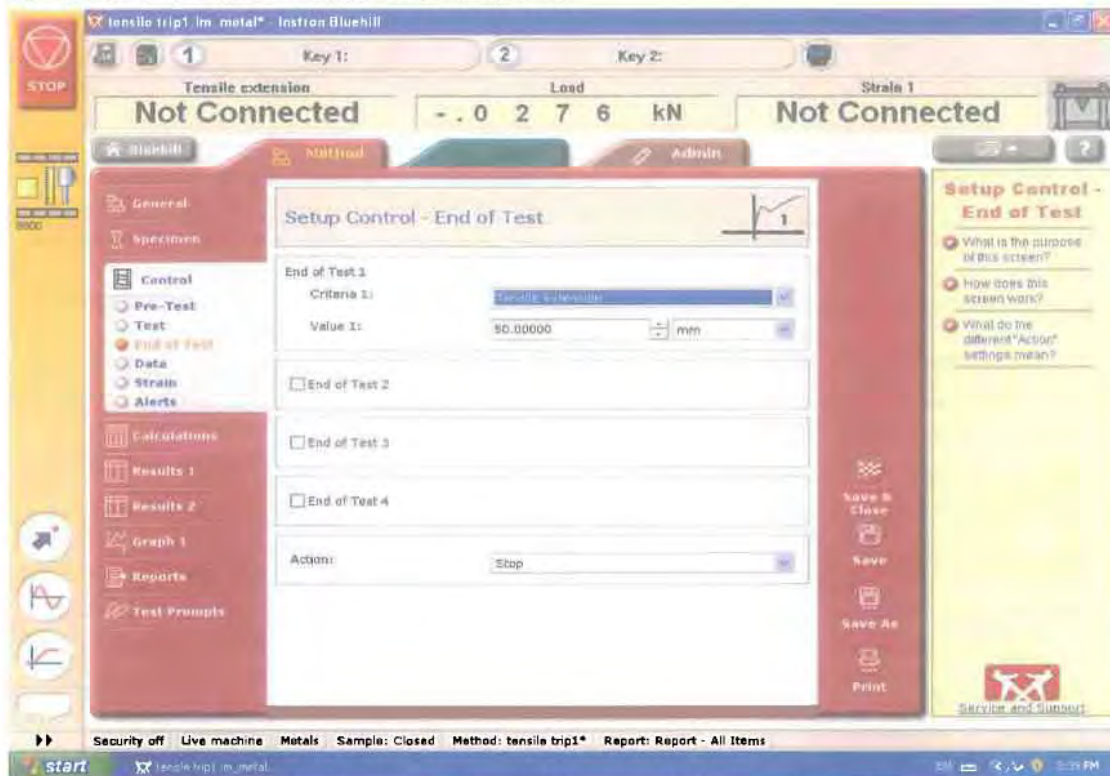
Εικ. 3-15: Ορισμός της γεωμετρίας και των διαστάσεων του δοκιμίου στον εφελκυσμό

4) Επιλογή του τρόπου ελέγχου του πειράματος



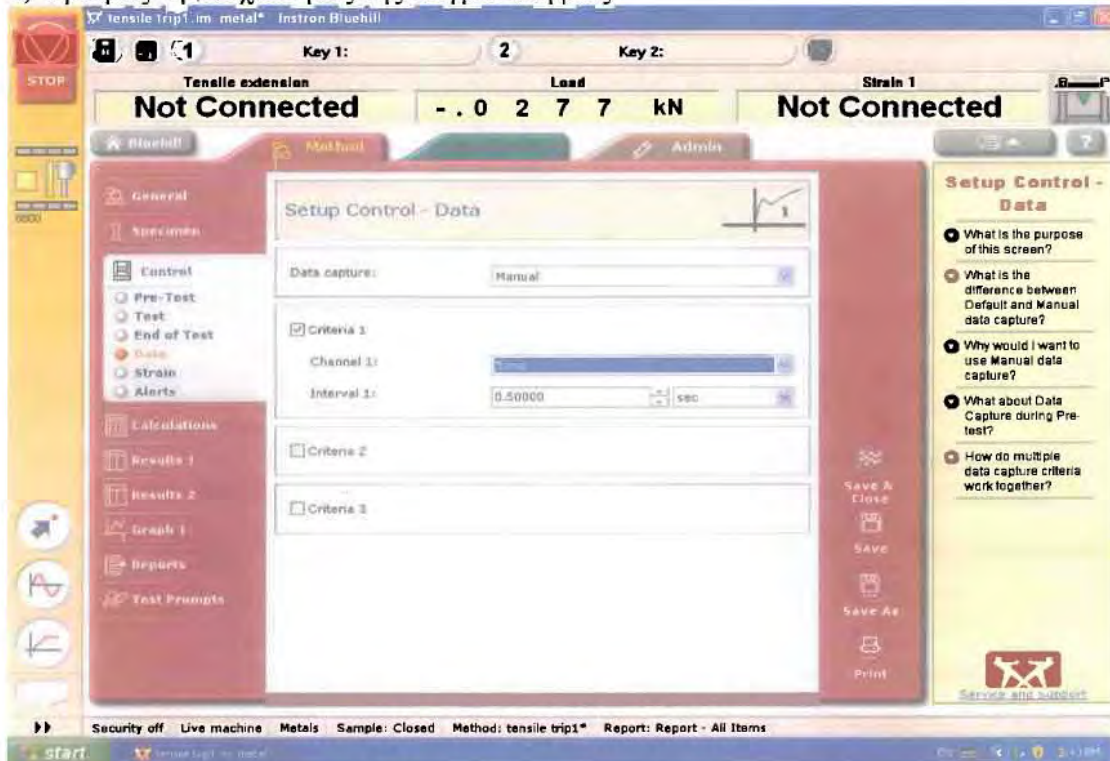
Εικ. 3-16: Επιλογή του τρόπου ελέγχου του πειράματος του εφελκυσμού

5) Ορισμός κριτηρίου λήξης του πειράματος



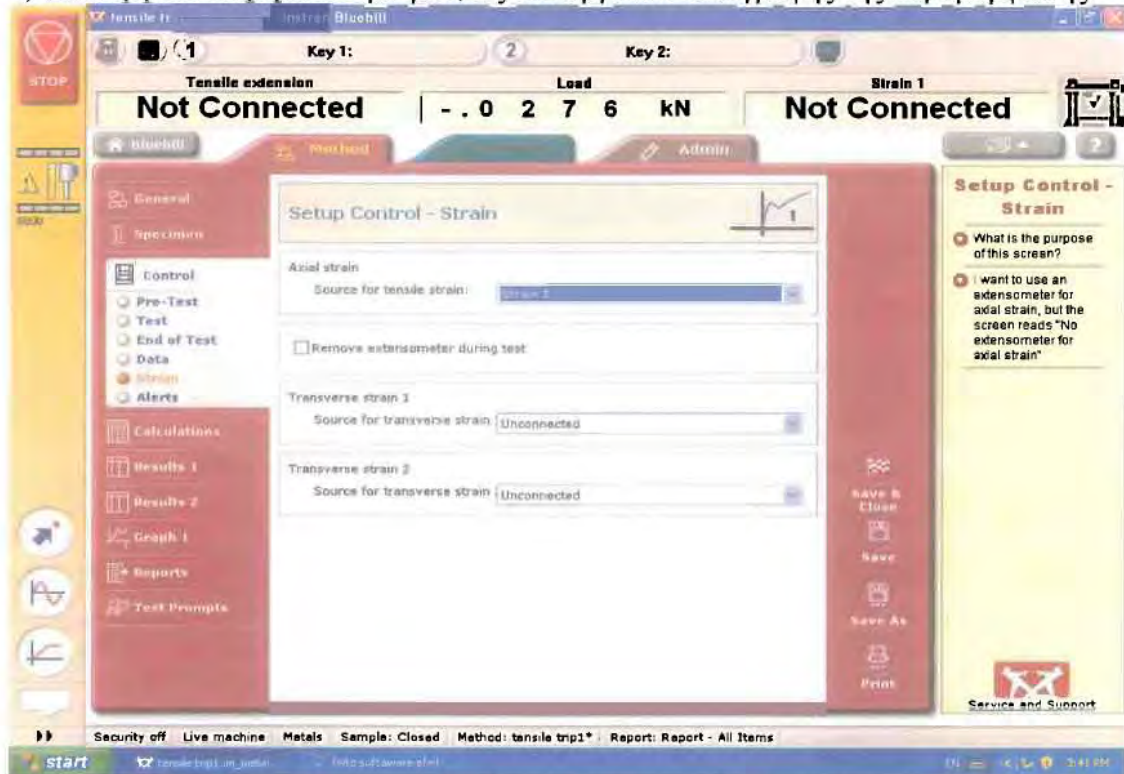
Εικ. 3-17: Ορισμός κριτηρίου λήξης του πειράματος του εφελκυσμού

6) Ορισμός της συχνότητας της δειγματοληψίας



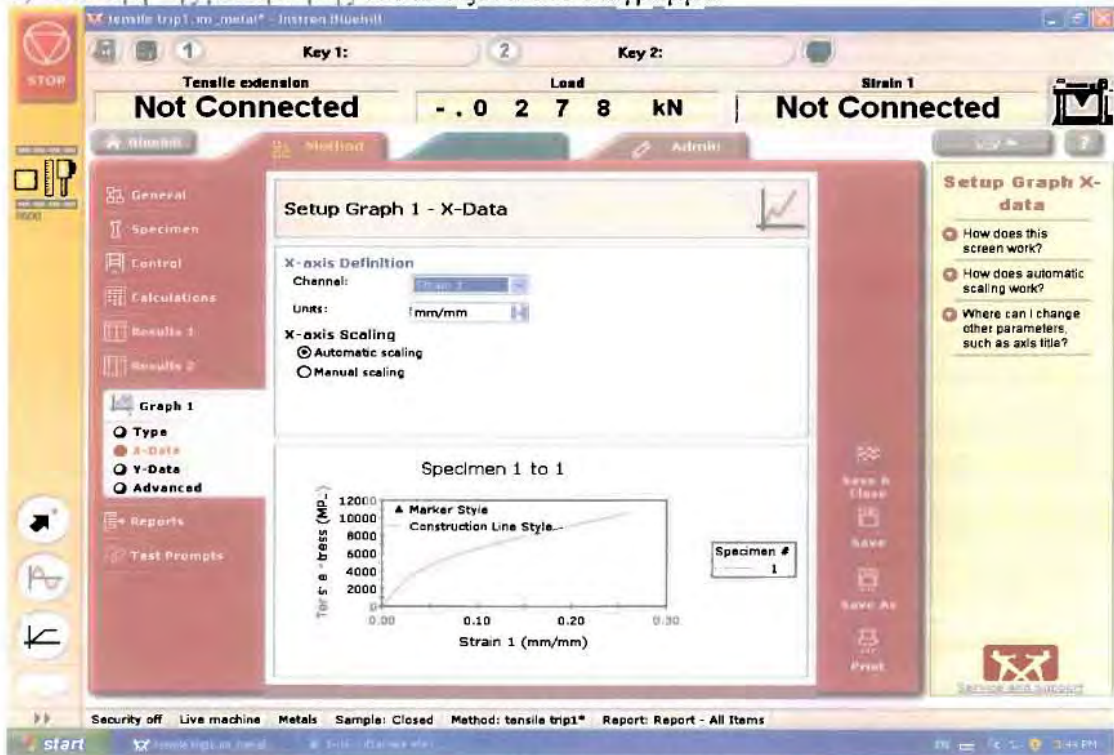
Εικ. 3-18: Ορισμός συχνότητας δειγματοληψίας

7) Επιλογή του επιμηκνσιομέτρου, ως του οργάνου καταγραφής της παραμόρφωσης



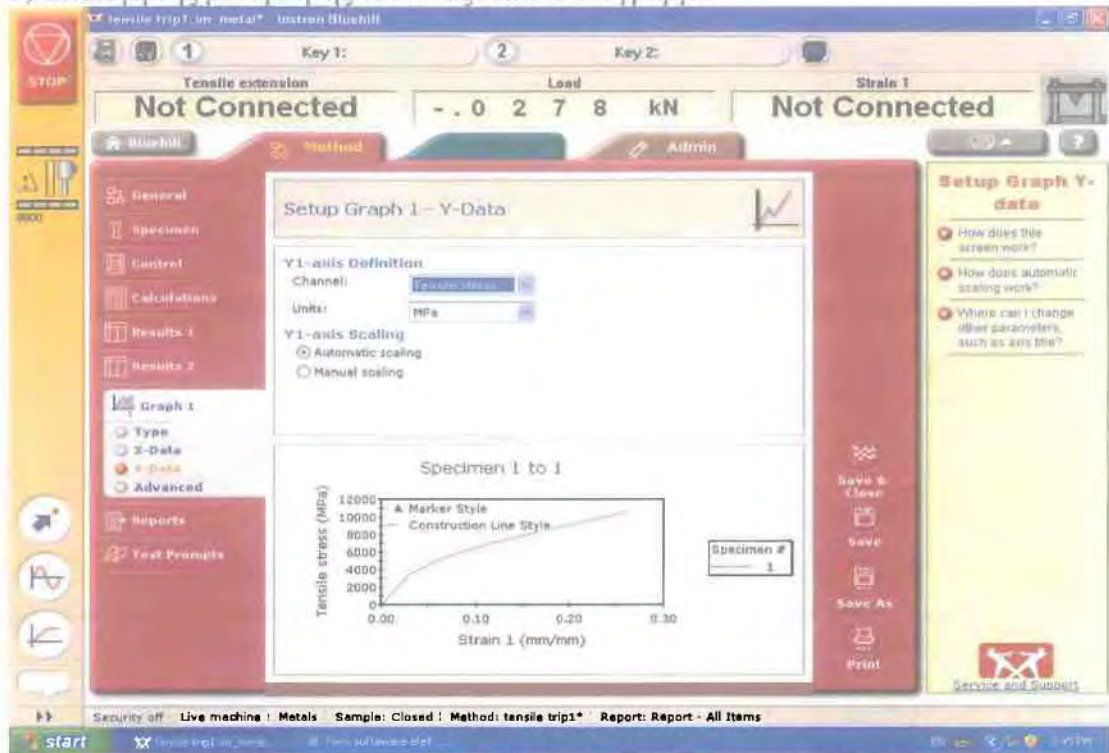
Εικ. 3-19: Επιλογή του επιμηκνσιομέτρου, ως του οργάνου καταγραφής της παραμόρφωσης

8) Επιλογή της μεταβλητής του X άξονα στο διάγραμμα



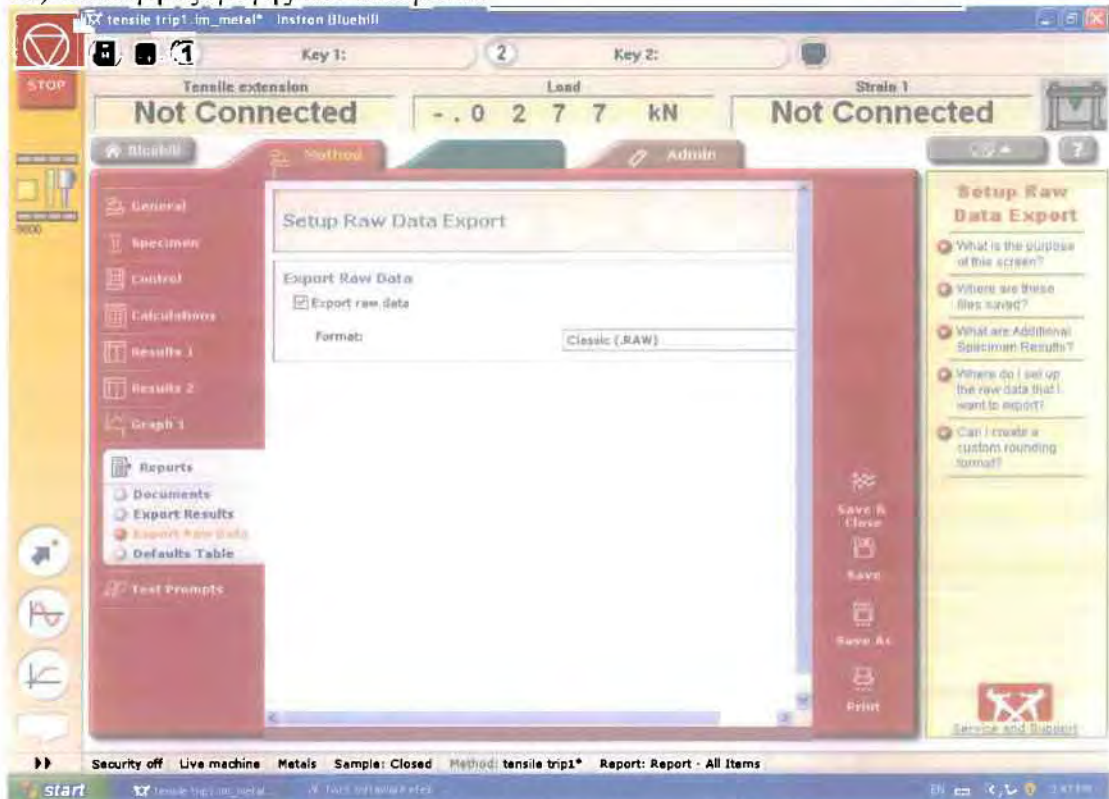
Εικ. 3-20: Επιλογή της μεταβλητής του X άξονα στο διάγραμμα

9) Επιλογή της μεταβλητής του Y άξονα στο διάγραμμα



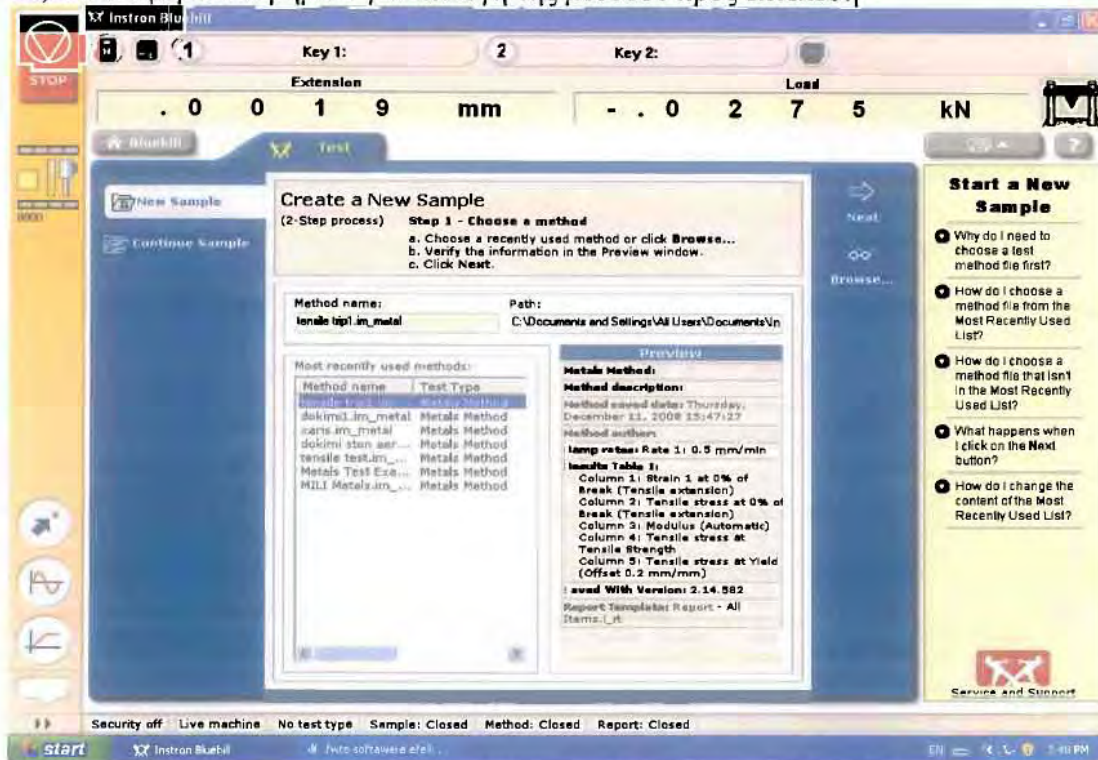
Εικ. 3-2: Επιλογή της μεταβλητής του Y άξονα στο διάγραμμα

10) Επιλογή εξαγωγής των δεδομένων



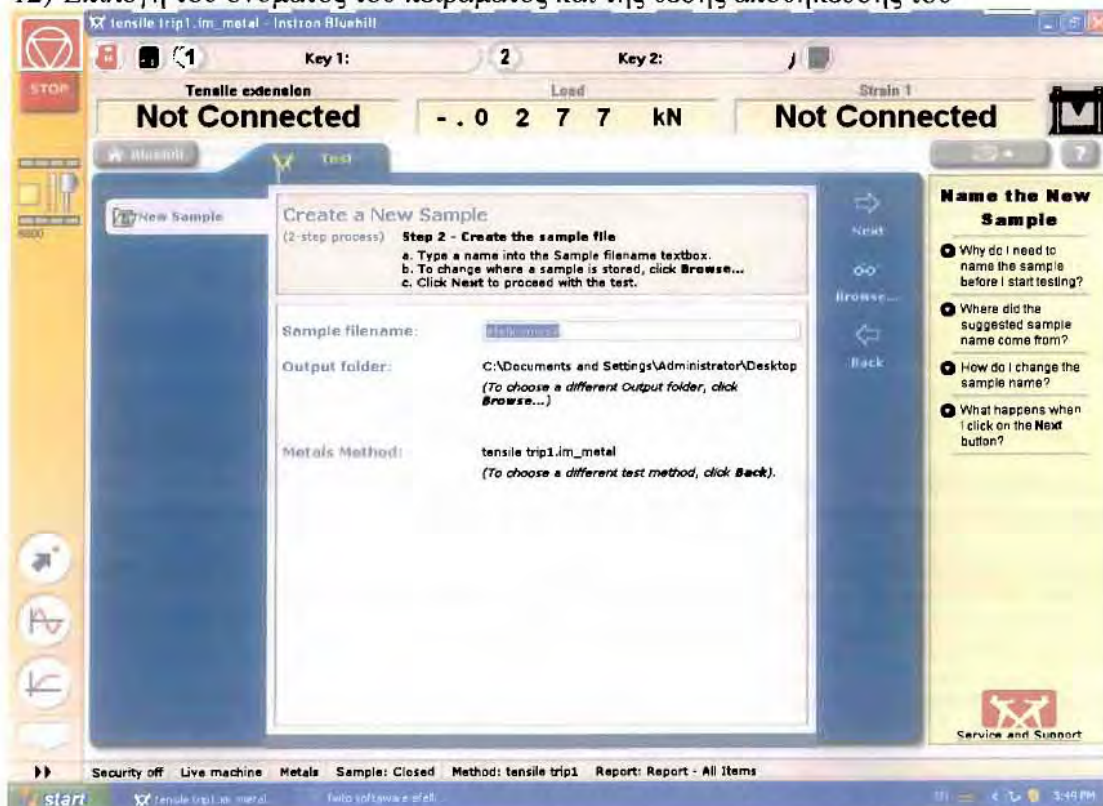
Εικ. 3-22: Επιλογή εξαγωγής των δεδομένων

11) Επαναφορά στο βήμα 1 για επιλογή της μεθόδου προς εκτέλεση



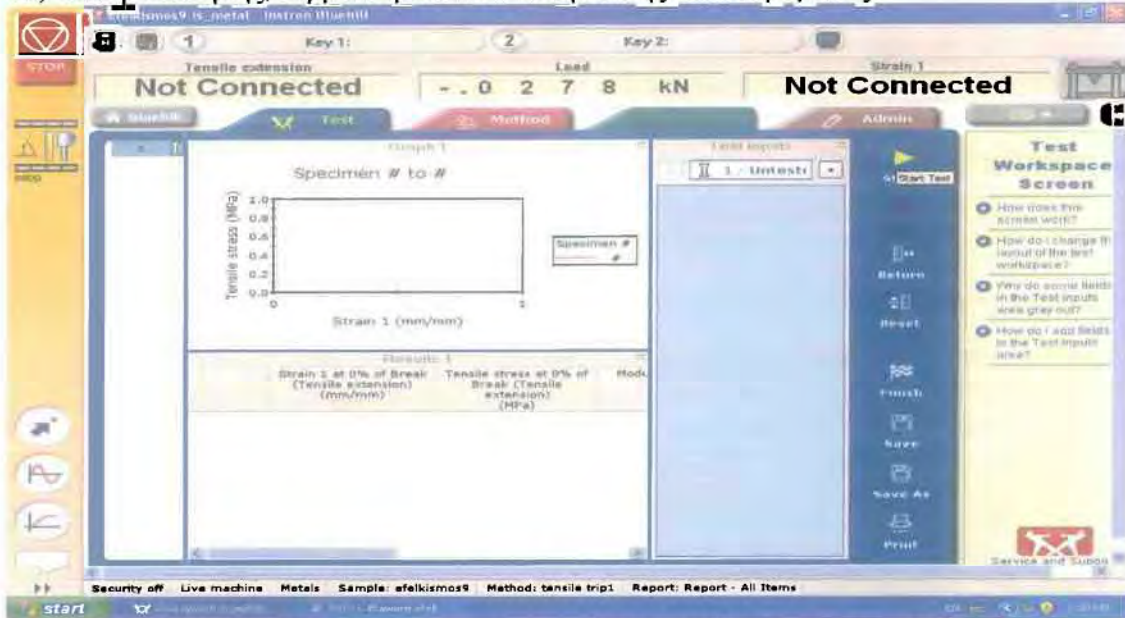
Εικ. 3-23: Επαναφορά στο βήμα 1 για επιλογή της μεθόδου προς εκτέλεση

12) Επιλογή του ονόματος του πειράματος και της θέσης αποθήκευσής του



Εικ. 3-24: Επιλογή του ονόματος του πειράματος και της θέσης αποθήκευσής του

13) Θέση εκκίνησης, τερματισμού και αποθήκευσης του πειράματος



Εικ. 3-25: Θέση εκκίνησης, τερματισμού και αποθήκευσης του πειράματος

3.3.3 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος SAX

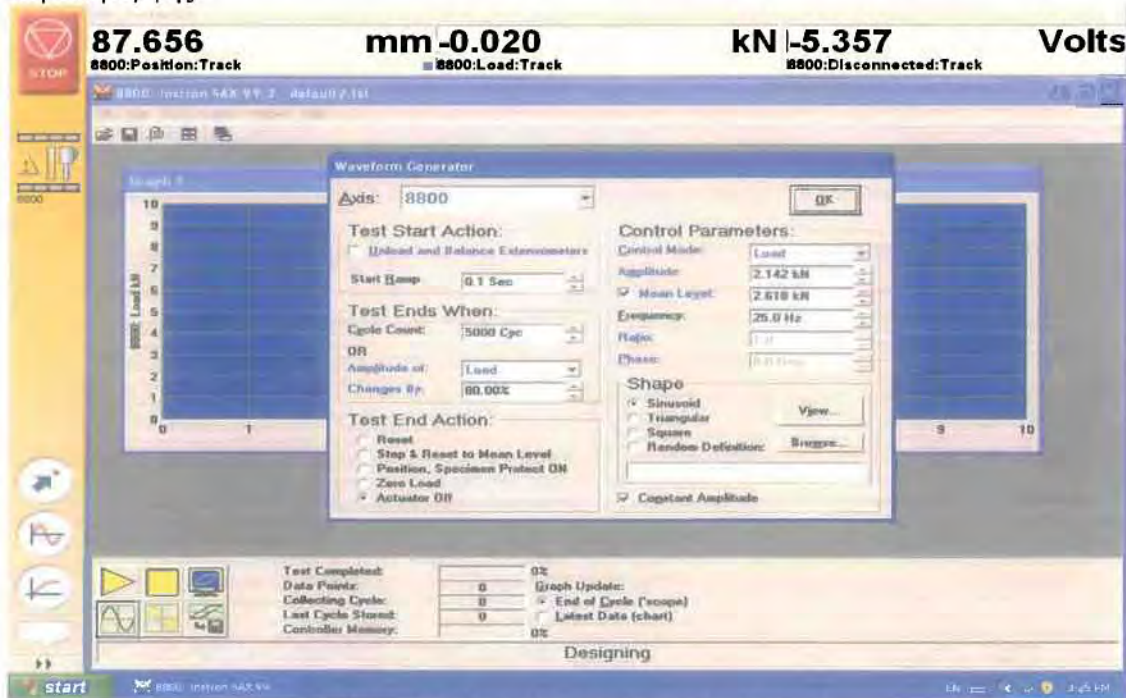
Για την διεξαγωγή πειραμάτων κόπωσης, μέσω του προγράμματος SAX ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1) Ορισμός συχνότητας δειγματοληψίας, των μεταβλητών προς καταγραφή, του τρόπου εξαγωγής τους και της θέσης αποθήκευσής τους. Επίσης δίνεται η δυνατότητα επιλογής τύπου του διαγράμματος (γραμμικό ή λογαριθμικό) και του αριθμού των κύκλων για τους οποίους θα καταγράφονται μετρήσεις



Εικ. 3-26: Κοσόλα διαχείρισης αποτελεσμάτων πειράματος κόπωσης

2) Ορισμός του χρόνου, στον οποίο επιτυγχάνεται το αρχικό φορτίο, του κριτηρίου λήξης του πειράματος, της ενέργειας που επιθυμούμε να πραγματοποιήσει το σύστημα κατά την λήξη του πειράματος, των φορτίων, της συχνότητας και του τύπου της κυματομορφής



Εικ. 3-27: Σχεδιασμός πειράματος κόπωσης

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη τεχνολογικών χαλύβων TRIP και χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, σε συνθήκες κόπωσης και εφελκυσμού, για την εξαγωγή των καμπυλών S-N και την αποτίμηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων αντίστοιχα, στην μηχανή δοκιμών γενικής χρήσης που περιγράφηκε στο παρόν κεφάλαιο. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Bluehill2 και SAX, όπως αυτά περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Πριν την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και παρουσίασης των αποτελεσμάτων, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνολογικών χαλύβων με ειδικότερη αναφορά στους χάλυβες TRIP και τις εφαρμογές τους.

Κεφάλαιο 4

Χάλυβες

4.1 Γενικά

Ο χάλυβας είναι το σημαντικότερο και πιο διαδεδομένο υλικό των μηχανολογικών κατασκευών. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό 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.

Αναφερόμενοι στους χάλυβες, εννοούμε τα κράματα του Fe, στα οποία περιέχεται C σε ποσοστό 0,8 - 2% (στην πράξη από 1,7 - 1,8%) και άλλα μεταλλικά, όπως π.χ. V, W, Ni, Cr και μη μεταλλικά στοιχεία, κατάλληλα για να προσδώσουν στο κράμα ειδικές ιδιότητες. Ο Fe σχηματίζει στερεά διαλύματα παρεμβολής και αντικατάστασης. Ο C είναι το σημαντικότερο στοιχείο παρεμβολής, αφού επηρεάζει τόσο την θερμοδυναμική και κινητική των μετασχηματισμών, όσο και τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων. Τα κραματικά στοιχεία αντικατάστασης συμπεριφέρονται ως σταθεροποιητές της ωστενιτικής ή της φερριτικής φάσης, ή σχηματίζουν καρβίδια. Επίσης επηρεάζουν την κινητική των μετασχηματισμών, αφού απαιτείται η διάχυσή τους για την πραγματοποίηση ενός μετασχηματισμού. Η μεγαλύτερη ποικιλία μικροδομών στους χάλυβες σχηματίζεται κατά τον μετασχηματισμό του ωστενίτη, όταν αυτός ψύχεται.

Έτσι, ανάλογα με τη θερμοκρασία μετασχηματισμού ή το ρυθμό ψύξης είναι δυνατόν να σχηματιστεί προευτηκτοειδής φερρίτης, περλίτης, μπαινίτης ή μαρτενσίτης. Τέλος άλλα στοιχεία βρίσκονται ως προσμίξεις ακαθαρσιών (αρσενικό, θείο, φωσφόρος). Οι προσμίξεις αυτές δεν υπερβαίνουν συνήθως το 1%. Οι χάλυβες διακρίνονται σε χάλυβες άνθρακα αν περιέχουν μόνο σίδηρο και άνθρακα και σε ειδικούς χάλυβες, όταν περιέχουν και πρόσθετα στοιχεία. Οι χάλυβες άνθρακα χαρακτηρίζονται από τις μηχανικές ιδιότητές τους και από το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα. Έτσι, τους διακρίνουμε σε υποευτηκτοειδείς (<0,8% C), ευτηκτοειδείς (0,8% C) και υπereυτηκτοειδείς (0,8 - 2% C). Με βάση την σκληρότητά τους μπορούμε να τους διακρίνουμε σε εξαιρετικά μαλακούς (C έως 0,15%), μαλακούς (από 0,15 - 0,25% C), ημιμαλακούς και ημίσκληρους (από 0,25 - 0,50% C), σκληρούς (από 0,50 - 0,70% C) και εξαιρετικά σκληρούς (άνω του 0,70% C). Οι μαλακοί χάλυβες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή λαμαρινών, καρφιών κλπ., οι ημίσκληροι σε σιδηροδρομικές και διάφορες μεταλλικές κατασκευές και οι σκληροί σε εξαρτήματα κινητήρων, κοπίδια εργαλειομηχανών και στην κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

Οι ιδιότητες των χαλύβων εξαρτώνται από τη χημική τους σύνθεση και από τις μεθόδους παρασκευής τους. Ο ανοξείδωτος π.χ. χάλυβας, που έχει τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε χημική προσβολή, περιέχει περισσότερο του 10% Cr και συχνά Ni (ένα τυπικό κράμα είναι το 18/8, δηλαδή 18% Cr και 8% Ni). Ο σκληρός χάλυβας για την κατασκευή κοπιδιών περιέχει 10 - 19% W, 2-5% Cr και άλλα πρόσθετα στοιχεία.

Αν οι αναλογίες αυτές αλλάξουν, έχουμε χάλυβες ημιταχείς, ταχείς και εξαιρετικά ταχείς. Αν αυξηθεί η περιεκτικότητα σε W (19 - 21%) και Co (8 - 15%) έχουμε τους υπερταχείς χάλυβες.

Άλλοι χαρακτηριστικοί τύποι ειδικών χαλύβων είναι αυτοί που, εκτός από τον σίδηρο και τον άνθρακα, περιέχουν ένα μόνο στοιχείο, το οποίο τους προσδίδει

ιδιαίτερες ιδιότητες π.χ. Cr (ανοξειδωτος και αρκετά σκληρός), χάλυβες Si ή Mg (αρκετά ελαστικοί) και Mo (ανθεκτικοί στη θερμότητα). [5], [6]

Σημαντική παράμετρος των χαλύβων είναι η εμβαπτότητά τους, η ευκολία δηλαδή σχηματισμού μαρτενσίτη κατά την βαφή. Η βαφή είναι μία θερμική κατεργασία στην οποία μπορούν να υποβληθούν χάλυβες με μέση ή υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Κατά την βαφή γίνεται απότομη ψύξη του χάλυβα, που θερμάνθηκε πάνω από το κρίσιμο σημείο, μέσα σε νερό, λάδι ή άλλες ουσίες ικανές να του αφαιρέσουν ταχύτητα τη θερμότητά του. Επειδή ο μαρτενσίτης που προκύπτει από την βαφή είναι σκληρός, αλλά και ταυτόχρονα ψαθυρός, την βαφή ακολουθεί μία θερμική κατεργασία, που ονομάζεται επαναφορά. Με αυτήν προσδίδεται στον χάλυβα ολκιμότητα έναντι μικρής σχετικά μείωσης της σκληρότητας. Σε χάλυβες που περιέχουν σημαντικό ποσοστό καρβιδιογόνων στοιχείων, η δευτερογενής σκλήρυνση κατά την επαναφορά επιφέρει ένα βέλτιστο συνδυασμό σκληρότητας και δυσθραυστότητας.

Η διαμόρφωση της δομής και των ιδιοτήτων των χαλύβων πραγματοποιείται με τις θερμικές κατεργασίες. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους κατεργαζόμαστε θερμικά τους χάλυβες συνοψίζονται παρακάτω:

- Για χαλάρωση των παραμενουσών τάσεων, που προέρχονται από άλλες θερμικές ή μηχανικές κατεργασίες και συγκολλήσεις.
- Για ομογενοποίηση, ώστε να πετύχουμε ομοιομορφία στην κατανομή των κραματικών στοιχείων στην μικροδομή.
- Για να μαλακώσει το υλικό και να αποκτήσει πλαστικότητα για περεταίρω μηχανική κατεργασία διαμόρφωσης.
- Για αύξηση της δυσθραυστότητας, ώστε να μπορεί το υλικό να αντέχει σε κρουστικές φορτίσεις.
- Για αύξηση της σκληρότητας και του ορίου διαρροής, ώστε το υλικό να αντέχει σε υψηλά μηχανικά φορτία.
- Για τροποποίηση της επιφάνειας με ή χωρίς προσθήκη κραματικών στοιχείων, ώστε να βελτιωθεί η αντοχή στην φθορά, στην κόπωση και την διάβρωση.

Οι κυριότερες θερμικές κατεργασίες αφορούν την ανόπτηση (πλήρης και ισόθερμη ανόπτηση, αποτατική ανόπτηση, εξομάλυνση), ή την ισχυροποίηση (βαφή και επαναφορά). Με τις επιφανειακές κατεργασίες επηρεάζεται μόνον η επιφάνεια ενός μηχανολογικού στοιχείου. Οι σημαντικότερες επιφανειακές θερμικές κατεργασίες είναι η επιφανειακή σκλήρυνση, η ενανθράκωση και η εναζώτωση. [3]

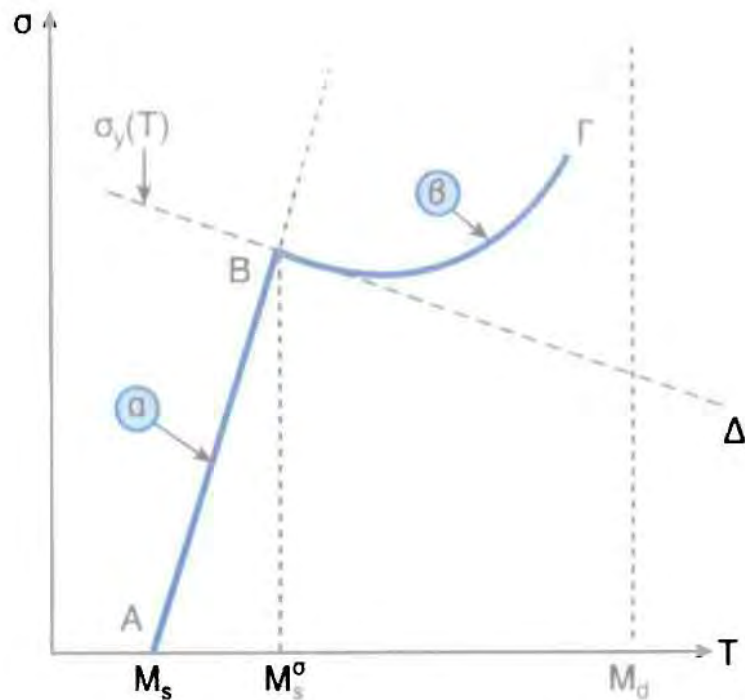
4.2 Μετασχηματισμοί φάσεων-μαρτενσιτικός μετασχηματισμός

Τα περισσότερα κράματα υφίστανται κάποιο μετασχηματισμό φάσεων είτε κατά τη θερμική είτε κατά τη μηχανική τους κατεργασία. Οι μετασχηματισμοί των φάσεων διαμορφώνουν την δομή των μεταλλικών κραμάτων. Ανάλογα με το αν απαιτείται ή όχι διάχυση, για την πραγματοποίηση ενός μετασχηματισμού, τους μετασχηματισμούς τους διακρίνουμε σε διαχυτικούς και σε μη διαχυτικούς. Η κινητική των μετασχηματισμών και η μορφολογία της νέας φάσεως εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, τη θερμοδυναμική κινούσα δύναμη, την διεπιφανειακή ενέργεια και την ενέργεια παραμόρφωσης. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι ένας μη διαχυτικός μετατοπιστικός μετασχηματισμός. Η ενέργεια παραμόρφωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού προέρχεται κυρίως από διατμητικές παραμορφώσεις και επιδρά σημαντικά στην

κινητική και την μορφολογία του μετασχηματισμού. Η πυρήνωση (σχηματισμός πυρήνων νέας φάσης) του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι ετερογενής και ξεκινά με το σχηματισμό δομικών σφαλμάτων σε προϋπάρχουσες ατέλειες της δομής, όπως π.χ. συστοιχίες αταξιών σε σύνορα κόκκων. Τα χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού έχουν θεμελιώδη σημασία για μια σειρά μεταλλουργικών τεχνολογιών, όπως π.χ. η τεχνολογία χαλύβων υπερυψηλής αντοχής, η πλαστικότητα μετασχηματισμού, η ψευδοελαστικότητα και τα κράματα με μνήμη σχήματος. Από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν χάλυβες που παρουσιάζουν πλαστικότητα μετασχηματισμού (TRansformation - Induced Plasticity, TRIP), μιας και συνιστά την βασική παράμετρο που καθορίζει την ξεχωριστή μηχανική συμπεριφορά των TRIP χαλύβων. [2]

4.3 Πλαστικότητα μετασχηματισμού

Λόγω του διατμητικού χαρακτήρα των παραμορφώσεων, που συνοδεύουν τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, συμβαίνουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις, όταν εφαρμόζονται εξωτερικές μηχανικές τάσεις. Οι μηχανικές επιδράσεις (με την μορφή μηχανικής τάσης, ή παραμόρφωσης) στο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό αποτυπώνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Υπό μηδενική, εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά σε προϋπάρχουσες θέσεις πυρήνωσης κατά την ψύξη στη θερμοκρασία M_s . Είναι όμως δυνατόν να προκληθεί πυρήνωση σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της M_s με την επιβολή μηχανικής τάσης κάτω από το όριο διαρροής σ_y της μητρικής φάσης. Η μαρτενσιτική πυρήνωση χαρακτηρίζεται τότε ως υποβοηθούμενη από την τάση (stress-assisted nucleation). Η μηχανική τάση δημιουργεί μια μηχανική κινούσα δύναμη ΔG_σ που προστίθεται στη χημική κινούσα δύναμη ΔG_{ch} και έτσι συνεισφέρει στην κρίσιμη κινούσα δύναμη, που απαιτείται για πυρήνωση σε θερμοκρασίες $T > M_s$. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία πάνω από την M_s , τόσο μεγαλύτερη η μηχανική τάση, που απαιτείται για την πυρήνωση του μαρτενσίτη. Η θερμοκρασιακή εξάρτηση της τάσης φαίνεται από την γραμμή AB. Στη θερμοκρασία M_s^σ η τάση φθάνει το όριο διαρροής της μητρικής φάσης σ_y , του οποίου η θερμοκρασιακή εξάρτηση φαίνεται από την γραμμή ΒΔ. Λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, σχηματίζονται νέες και δυναμικότερες θέσεις πυρήνωσης. Για τον λόγο αυτό η τάση, που απαιτείται για μαρτενσιτική πυρήνωση, δεν ακολουθεί την προέκταση της AB, αλλά την ΒΓ και η μαρτενσιτική πυρήνωση χαρακτηρίζεται ως προκαλούμενη από την παραμόρφωση (strain-induced nucleation). Πάνω από τη θερμοκρασία M_d η χημική κινούσα δύναμη είναι πλέον τόσο μικρή, που δεν είναι δυνατόν να προκληθεί μαρτενσιτική πυρήνωση, όσο μεγάλη και αν είναι η τάση ή η παραμόρφωση. Η μαρτενσιτική παραμόρφωση μορφής συνεισφέρει στον κυρίαρχο μηχανισμό παραμόρφωσης, που είναι η ολίσθηση γραμμοαταξιών. Η συνεισφορά αυτή χαρακτηρίζεται ως πλαστικότητα μετασχηματισμού (TRansformation-Induced Plasticity, TRIP), δηλαδή η πλαστικότητα που προκύπτει από τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Με άλλα λόγια, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός λειτουργεί ως μηχανισμός παραμόρφωσης, όπως η ολίσθηση αταξιών και οι μηχανικές διδυμίες. Η επίδραση TRIP επηρεάζει την καταστατική συμπεριφορά σ-ε του υλικού, με σημαντικές επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες, κυριότερες των οποίων είναι η αύξηση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας και της διαμορφωσιμότητας του κράματος. Για την αξιοποίηση της πλαστικότητας μετασχηματισμού έχουν αναπτυχθεί οι χάλυβες TRIP. [2]



Διάγρ. 4-1: Σχηματική παράσταση μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υποβοηθούμενου από την τάση (α) και προκαλούμενου από την παραμόρφωση (β). Κάτω από την M_s^σ αρχική πλαστική διαρροή προκαλείται από την πλαστικότητα μετασχηματισμού (TRIP), ενώ πάνω από την M_s^σ από ολίσθηση αταξιών στη μητρική φάση [2]

4.4 Trip χάλυβες

Οι πολυφασικοί χάλυβες TRIP είναι μιας νέας γενιάς χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, που παρουσιάζουν συνδυασμό αυξημένης αντοχής και ελατότητας, ικανοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας για χάλυβα καλής διαμορφωσιμότητας και υψηλής αντοχής. Οι χάλυβες TRIP είναι ιδιαίτερος σύνθετα υλικά με εν δυνάμει μεταβλητό όγκο κλασμάτων των επιμέρους φάσεων. Η συνολική παραμόρφωση που παρουσιάζουν υπό την επίδραση φορτίων, θεωρείται ότι είναι το άθροισμα της ελαστικής, της πλαστικής και της παραμόρφωσης που προκαλείται κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Οι χάλυβες αυτοί 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. Το τριαξονικό τασικό πεδίο μπροστά από την αιχμή μιας ρωγμής, προκαλεί μαρτενσιτικό μετασχηματισμό του ωστενίτη και η πλαστικότητα μετασχηματισμού οδηγεί σε αύξηση της δυσθραυστότητας. Η δεύτερη κατηγορία χαλύβων TRIP διακρίνεται κυρίως για την εξαιρετική διαμορφωσιμότητα, μιας και το φαινόμενο TRIP συνοδεύεται από σταθεροποίηση της πλαστικής ροής, με συνέπεια την αύξηση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης. Οι χάλυβες που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία αποτελούνται συνήθως από φερρίτη, μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Η ωστενιτική φάση βρίσκεται υπό μορφή διασποράς σωματιδίων στον χάλυβα. Κατά την ψυχρή διαμόρφωση των χαλύβων αυτών, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη.

Ο μετασχηματισμός συνοδεύεται από αύξηση της διαμορφωσιμότητας.

Στην παραγωγή, η ψυχρή διαμόρφωση ελασμάτων ψυχρής ή θερμής έλασης, είναι ένα τυπικό βήμα, κυρίως στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Οι συμβατικοί χάλυβες υψηλής αντοχής (HSS) χρησιμοποιούνται κατά παράδοση στη βιομηχανία αυτή και σε αυτούς περιλαμβάνονται ποιότητες C-Mn, χάλυβες διπλής φάσεως (DP) και ποιότητες μικροκραμάτωσης υψηλής αντοχής (HSLA). Οι χάλυβες αυτοί παράγονται από ποικίλους συνδυασμούς διεργασιών και θερμικών κατεργασιών, ανάλογα με την χημική τους σύσταση και είναι κατάλληλοι για πολλές εφαρμογές που απαιτούν υψηλή διαμορφωσιμότητα, ειδικά για εφαρμογές, όπου η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται σε επίπεδα πάνω από 500 MPa. Σήμερα, πολλοί παραγωγοί χάλυβα προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα ποιότητας χάλυβα, με όρια διαρροής που κυμαίνονται από 250 MPa έως 550 MPa και μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό που κυμαίνεται από 340 MPa έως 590 MPa.

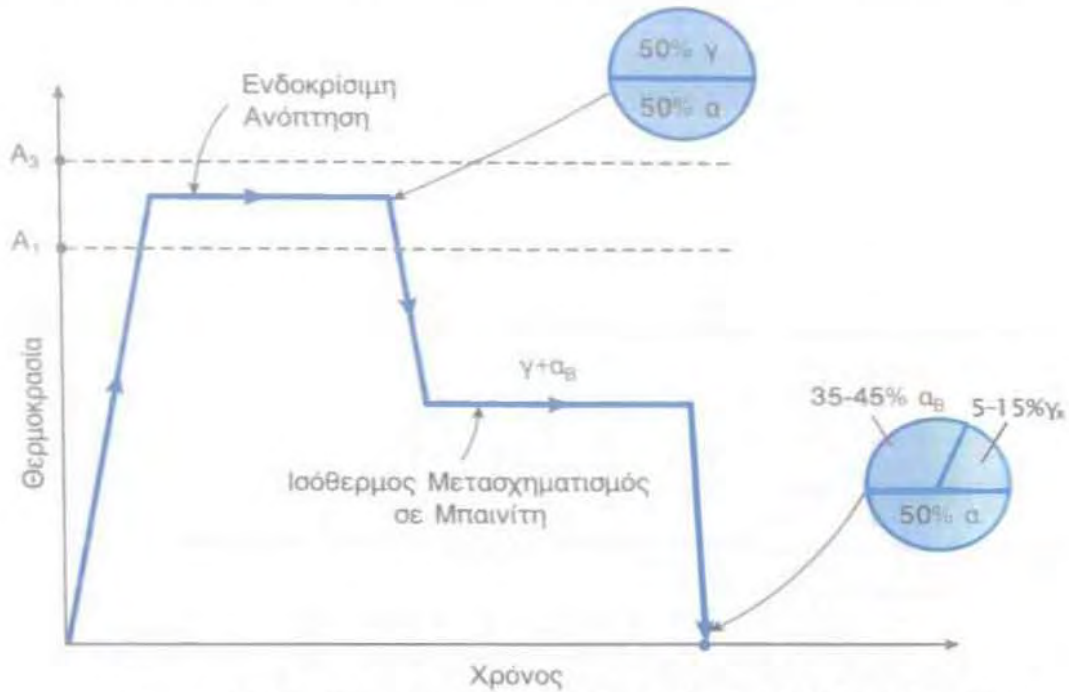
Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη των χαλύβων κατά την τελευταία δεκαετία μας έχει δείξει ότι οι TRIP χάλυβες κατά την διαμόρφωσή τους σε ελάσματα, συνιστούν μια νέα κατηγορία ελασμάτων ή χαλυβοφύλλων, χάρη στην υψηλή τους αντοχή και την ιδιαίτερος αυξημένη διαμορφωσιμότητά τους. Ακριβώς λόγω της αυξημένης τους διαμορφωσιμότητας, οι TRIP χάλυβες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν πιο περίπλοκα και εξειδικευμένα μηχανολογικά στοιχεία σε σχέση με τους άλλους χάλυβες υψηλής αντοχής και έτσι να επιτρέψουν στους μηχανικούς της αυτοκινητοβιομηχανίας μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιασμό μηχανολογικών εξαρτημάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση του βάρους των οχημάτων, της δυσκαμψίας και της εν γένει μηχανικής συμπεριφοράς των πλαισίων τους.

Οι άριστες μηχανικές ιδιότητες των TRIP χαλύβων προκύπτουν από τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό που παρουσιάζει ο μετασταθής εναπομένον ωστενίτης, υποβοηθούμενο από εξωτερικές τάσεις που δέχεται το υλικό, ή από πλαστική παραμόρφωση.

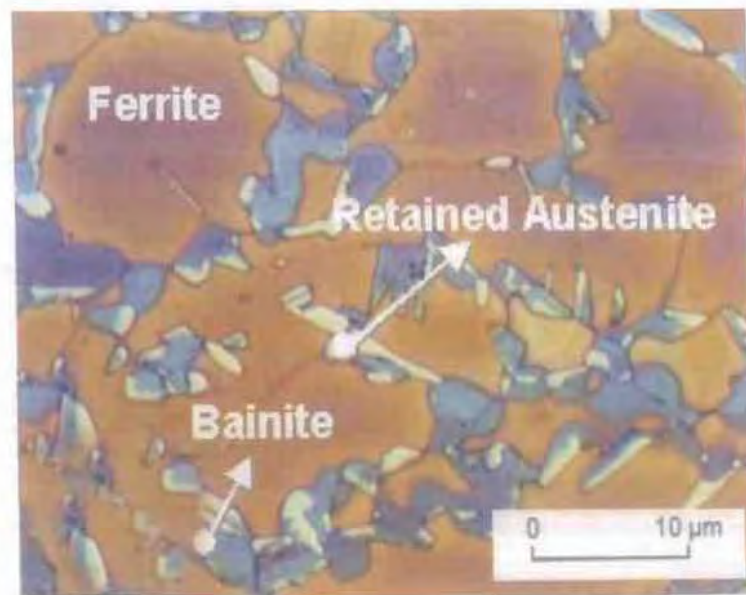
4.4.1 Θερμική κατεργασία χαλύβων TRIP

Σχετικά με την κατεργασία για την διαμόρφωση της μικροδομής των χαλύβων TRIP, η σημαντικότερη προϋπόθεση είναι η διατήρηση διασποράς ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου. Τα στάδια της θερμικής κατεργασίας φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Η αρχική μικροδομή ενός χάλυβα TRIP με τυπική σύσταση Fe - 0.2C - 1Mn - 1Si είναι φερριτοπερλιτική. 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 (π.χ. 400°C) για τον ισόθερμο μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μπαινίτη. Λόγω της σχετικά υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο (Si), αποτρέπεται ο σχηματισμός σεμεντίτη κατά την διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού. Έτσι ο άνθρακας που αποβάλλεται από τον μπαινίτη περιέχεται 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 δεν μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη κατά την ψύξη του χάλυβα σε θερμοκρασία δωματίου, διότι όπως έχουμε προαναφέρει έχει σταθεροποιηθεί από τον άνθρακα. Είναι αυτός ο παραμένων ωστενίτης, που κατά

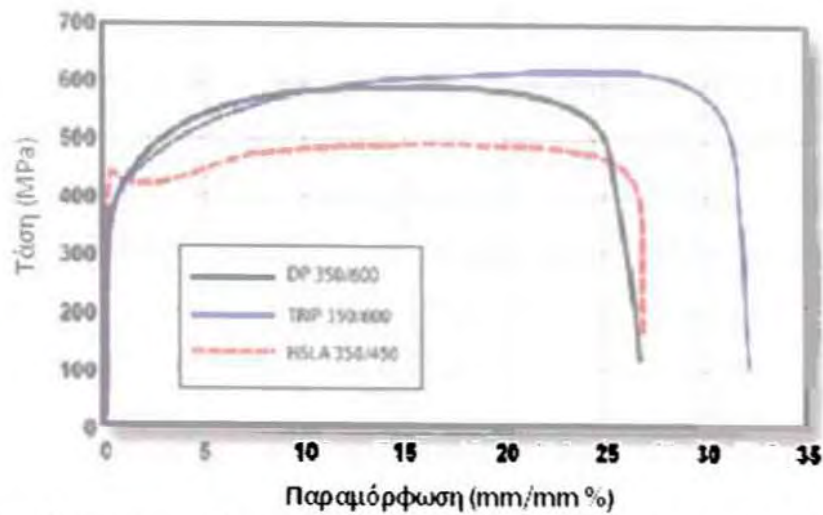
την ψυχρή διαμόρφωση του χάλυβα εμφανίζει το φαινόμενο TRIP και οδηγεί σε αύξηση της διαμορφωσιμότητας.



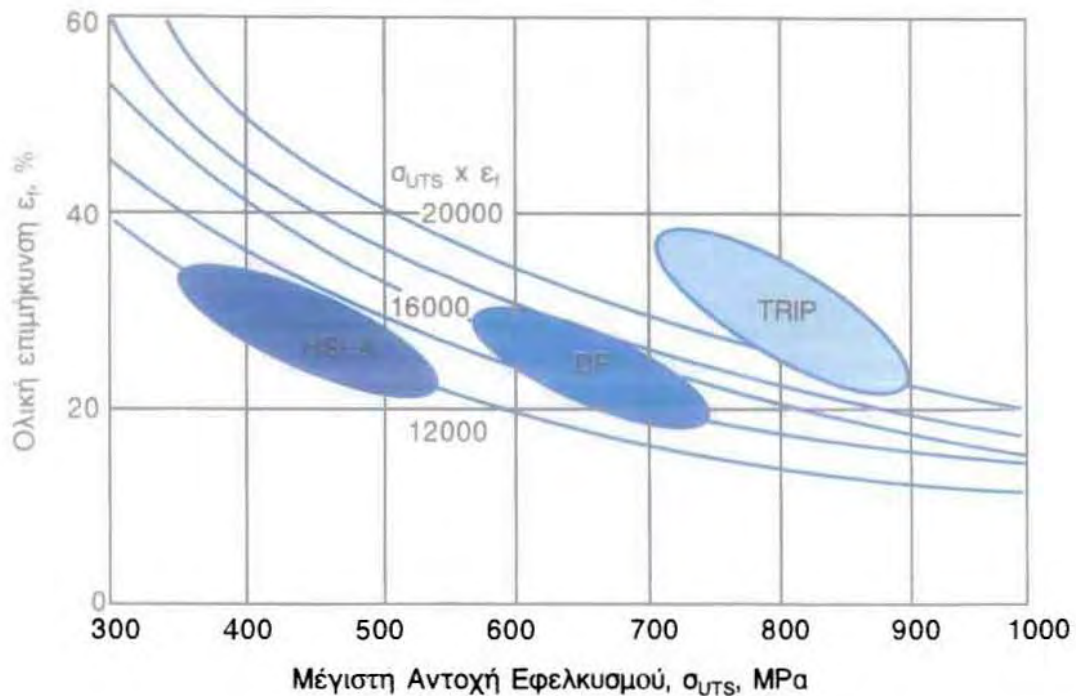
Διάγρ. 4-2: Τα στάδια της θερμικής κατεργασίας των TRIP χάλυβων [2]



Εικ. 4-1: Η τυπική μορφή ενός TRIP χάλυβα όπου διακρίνονται ο φερρίτης ο μπαινίτης και ο παραμένων ωστενίτης [14]



Διάγρ. 4-3: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβες HSLA, DP και TRIP [14]



Διάγρ. 4-4: Συγκριτικό διάγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων (συνολική επιμήκυνση σε συνάρτηση με την μέγιστη αντοχή εφελκυσμού) για χάλυβες HSLA, DP και TRIP που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία [2]

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι οι χάλυβες TRIP εμφανίζουν καλύτερα χαρακτηριστικά μηχανικής συμπεριφοράς από τους άλλους χάλυβες, και πιο συγκεκριμένα ένα καλύτερο συνδυασμό αντοχής και διαμορφωσιμότητας.

Κεφάλαιο 5

Πειραματική διαδικασία

5.1 Υλικά δοκιμών

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μηχανικών δοκιμών ήταν ελάσματα από χάλυβα ψυχρής έλασης TRIP 700, τα οποία είχαν υποβληθεί σε τρεις διαφορετικές θερμικές κατεργασίες. Κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψαν τρία υλικά χάλυβα TRIP 700 με διαφορετικές ιδιότητες.

Ο χάλυβας TRIP 700, που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, υποβλήθηκε στις θερμικές κατεργασίες 1,2,3, που φαίνονται στα διαγράμματα 5-1, 5-2 και 5-3. Η διαφορά στην θερμική κατεργασία έχει να κάνει με την θερμοκρασία ισόθερμου μπαινιτικού μετασχηματισμού του χάλυβα που ακολουθεί την ψύξη από τους 890 °C (θερμοκρασία διαλυτοποίησης). Στην θερμική κατεργασία 1 η κατεργασία γήρανσης ήταν 120 δευτερόλεπτα σε 280° C. Η χαμηλή θερμοκρασία που επιλέχθηκε για την εν λόγω κατεργασία είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία διφασικού χάλυβα λόγω του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε μαρτενσίτη κατά την ψύξη. Στην θερμική κατεργασία 2 η κατεργασία γήρανσης ήταν 420 δευτερόλεπτα σε 400° C και στην θερμική κατεργασία 3 η κατεργασία γήρανσης ήταν 120 δευτερόλεπτα σε 460° C. Για τις δύο αυτές θερμικές κατεργασίες η θερμοκρασία ήταν αρκετή για την παραγωγή χάλυβα TRIP με ποσοστά παραμένοντα ωστενίτη που δίνονται στην επόμενη παράγραφο.

Από το υλικό TRIP 700 ψυχρής έλασης παρελήφθησαν συνολικά 16 δοκίμια, εκ των οποίων, 3 δοκίμια ήταν κατεργασίας 2 και 6 δοκίμια κατεργασίας 3. Επιπλέον παρελήφθησαν 7 δοκίμια, στα οποία δεν είχε γίνει ταυτοποίηση σε ποια θερμική κατεργασία ανήκουν. Από υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα εφελκυσμού ελήφθησαν οι τιμές αντοχής για τους χάλυβες στις 3 θερμικές κατεργασίες. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μικροσκληρομέτρησης στα 7 δοκίμια "αγνώστου ταυτότητας" προκειμένου να εξετασθεί εάν από τις τιμές σκληρότητας και τα όρια διαρροής τους μπορεί να εξακριβωθεί σε ποια θερμική κατεργασία εκ των 1,2,3 ανήκουν.

Εκτός των χαλύβων TRIP 700 με διαφορετική θερμική κατεργασία, στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε πειραματικά και χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης, χωρίς θερμική κατεργασία, προκειμένου να εξαχθούν συγκριτικά συμπεράσματα σε σχέση με τους χάλυβες TRIP. Από τον συγκεκριμένο χάλυβα κατασκευάστηκαν 5 δοκίμια εφελκυσμού και 10 δοκίμια κόπωσης.

Παρακάτω παρατίθενται οι χημικές συστάσεις του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης και του χάλυβα TRIP 700 πριν υποβληθεί σε θερμική κατεργασία.

Πίν. 5-1: Χημική σύσταση χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης (κατά βάρος %)

C	Mn	Al
0.22	1.68	1.49

Πίν. 5-2: Αρχική χημική σύσταση χάλυβα TRIP 700 (κατά βάρος %)

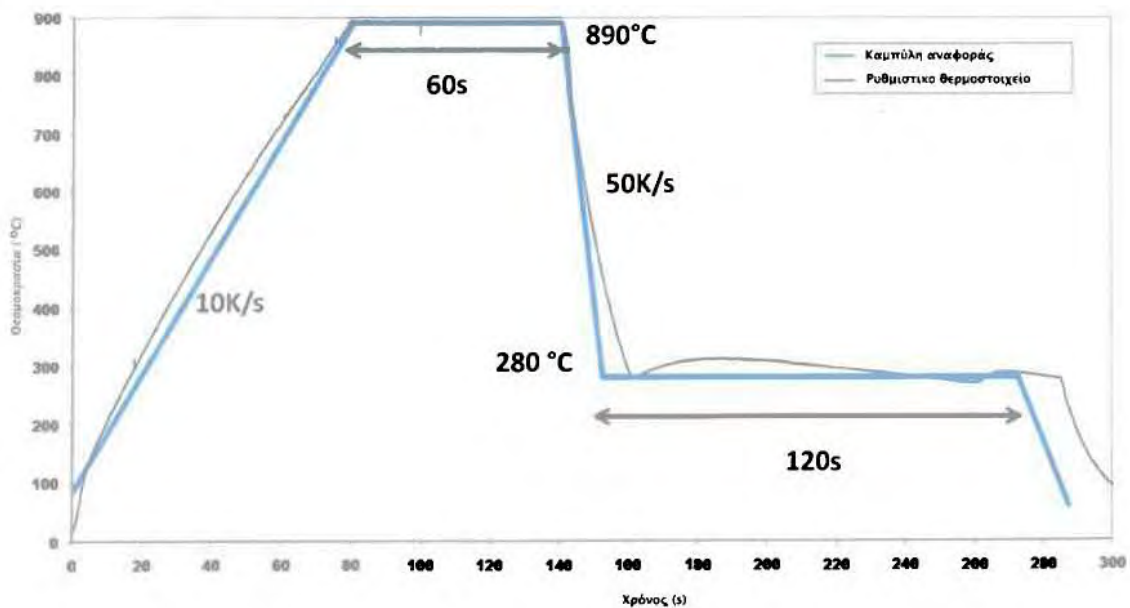
C	Al	Mn	Si	P	S
0.20	1.33	1.58	0.04	0.016	<0.001

Πίν. 5-3: Παράμετροι θερμικής κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στον χάλυβα TRIP 700

Δείγμα	Θέρμανση			Εδνοκρίσιμη απόπτηση		Ψύξη			I.M.M.*		Τελική ψύξη		
	Ti (°C)	Tf (°C)	Ρυθμός (K/s)	T (°C)	Χρόνος (s)	Ti (°C)	Tf (°C)	Ρυθμός (K/s)	T (°C)	Χρόνος (s)	Ti (°C)	Tf (°C)	Ρυθμός (K/s)
No 1	25	890	10	890	60	890	280	50	280	120	280	60	15
No 2	25	890	10	890	60	890	400	50	400	420	400	60	15
No 3	25	890	10	890	60	890	460	50	460	120	460	60	15

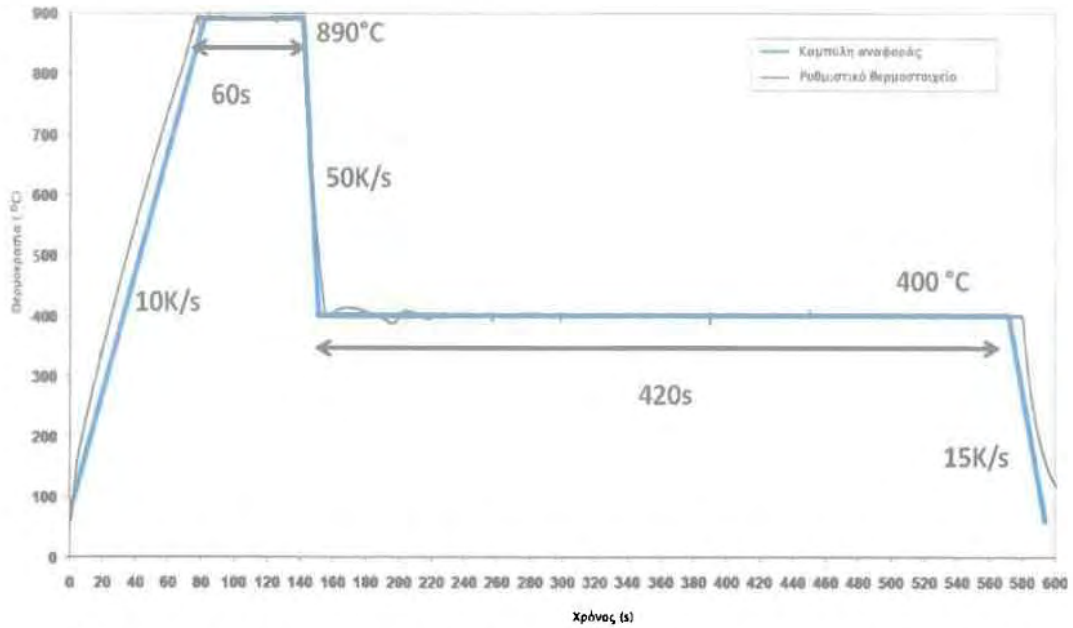
* Ισόθερος Μπαινιτικός Μετασχηματισμός

1^η θερμική κατεργασία 280°C 120 sec



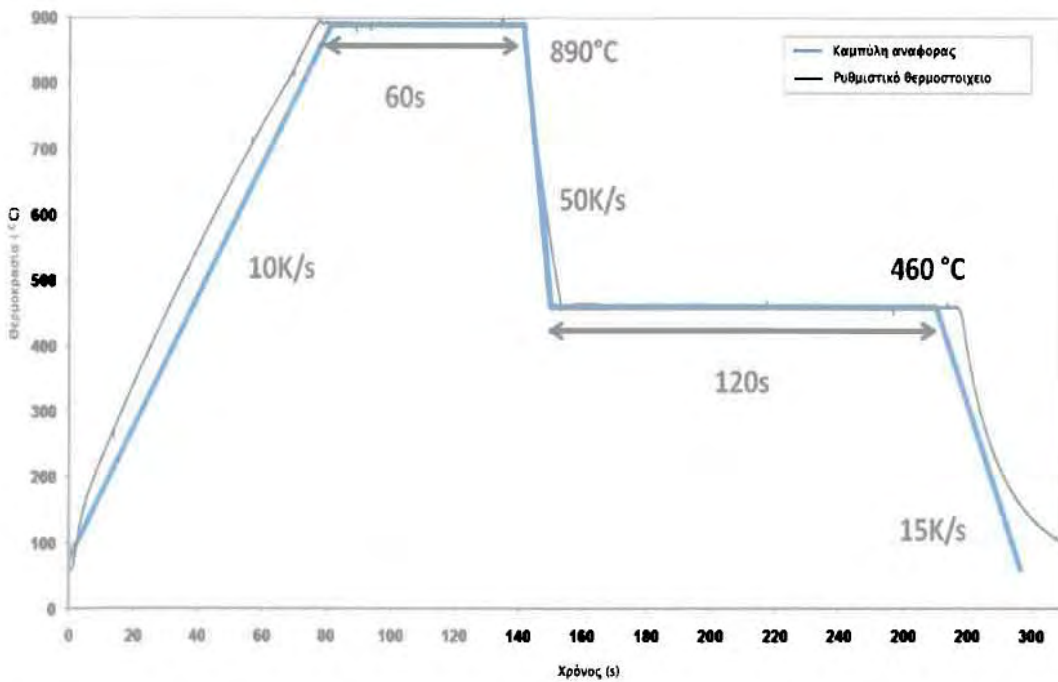
Διάγρ. 5-1: Θερμική κατεργασία 1, που αντιστοιχεί στους 280° C και χρόνο γήρανσης 120 sec

2^η θερμική κατεργασία 400°C 420 sec



Διάγρ. 5-2: Θερμική κατεργασία 2, που αντιστοιχεί στους 400° C και χρόνο γήρανσης 420 sec

3^η θερμική κατεργασία 460°C 120 sec



Διάγρ. 5-3: Θερμική κατεργασία 3, που αντιστοιχεί στους 460° C και χρόνο γήρανσης 120 sec

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα ποσοστά φάσεων για τα υλικά που προκύπτουν από τις θερμικές κατεργασίες 1,2 και 3 μετά το πέρας της θερμικών κατεργασιών.

Πίν. 5-4: Ποσοστά φάσεων από μεταλλογραφία μετά τις θερμικές κατεργασίες

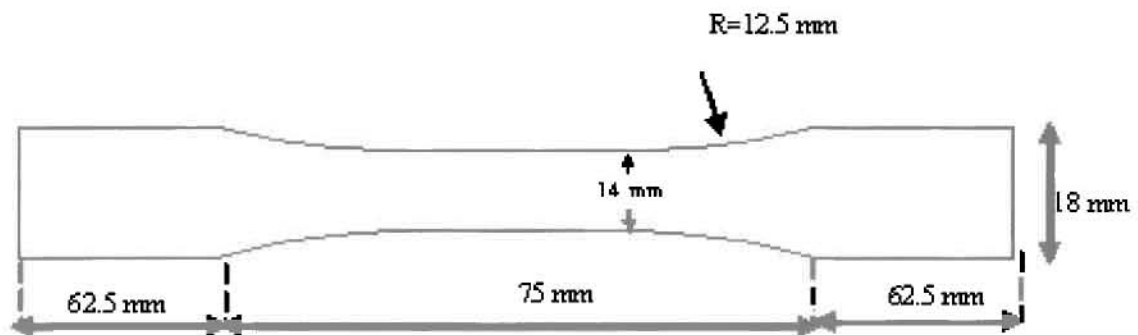
<i>Υλικό</i>	<i>Περλίτης %</i>	<i>Φερρίτης %</i>	<i>Μαρτενσίτης %</i>	<i>Παραμένοντας Ωστενίτης %</i>	<i>Μπαινίτης %</i>
<i>Αρχικό</i>	<i>22</i>	<i>78</i>			
<i>1</i>		<i>84</i>	<i>14</i>	<i>0</i>	
<i>2</i>		<i>87</i>		<i>13</i>	
<i>3</i>		<i>86</i>		<i>14</i>	

5.2 Προετοιμασία δοκιμίων

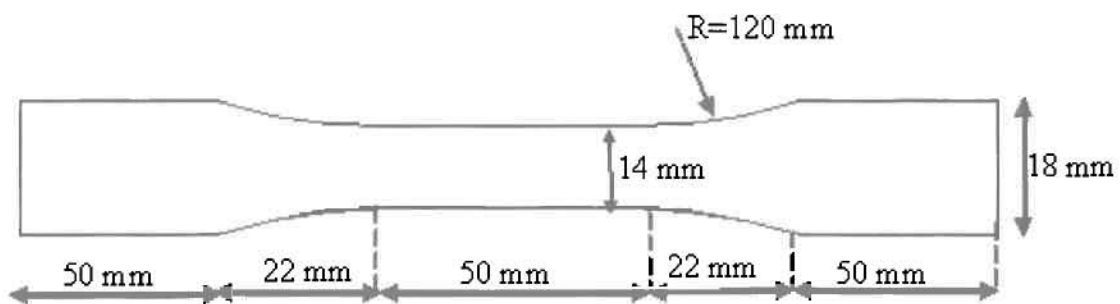
Τα δοκίμια του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης κόπηκαν και επεξεργάστηκαν μηχανουργικά κατά την προδιαγραφή ASTM E 8M – 01^{e2} για μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού [11] και με την προδιαγραφή ASTM E-466 για πειράματα κόπωσης. [10] Τα δοκίμια από χάλυβα TRIP 700 για δοκιμές εφελκυσμού και κόπωσης, παρελήφθησαν έτοιμα, κομμένα και επεξεργασμένα μηχανουργικά, με βάση το πρότυπο κόπωσης του γερμανικού οργανισμού S.E.P. 1240: Testing and documentation guideline for the experimental determination of mechanical properties of steel sheets for CAE-calculations. [12]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές εφελκυσμού του χάλυβα TRIP 700 πραγματοποιήθηκαν εν γνώσει μας με δοκίμια που έχουν κοπεί και κατεργαστεί με βάση το πρότυπο κόπωσης S.E.P. 1240, διότι παραλάβαμε και διαθέταμε μόνο τέτοια δοκίμια, καθώς ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε την διεξαγωγή πειραμάτων κόπωσης και μόνο. Το γεγονός αυτό, με βάση τις διαφορές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που διακρίνονται μεταξύ των δοκιμίων κόπωσης και εφελκυσμού, αναμένεται να προκαλέσει αμελητέες διαφορές στην αποτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και εν γένει στην εγκυρότητα των πειραμάτων.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM E 8M και ASTM E-466 (κόπωσης και εφελκυσμού αντίστοιχα) φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχ. 5-1: Γεωμετρία δοκιμίων εφελκυσμού κατά ASTM E-8M



Σχ. 5-2: Γεωμετρία δοκιμίων κόπωσης κατά ASTM E-466

Τα δοκίμια τόσο προτού τοποθετηθούν στην μηχανή μηχανικών δοκιμών ελέγχθηκαν προσεκτικά, ως προς τις διαστάσεις τους, έτσι ώστε να εξακριβωθεί ότι τηρούν τις ανοχές που ορίζει η εκάστοτε προδιαγραφή, ανάλογα με την μηχανική δοκιμή που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε. Εάν τα δοκίμια δεν τηρούν τις προδιαγραφές κρίνονται ακατάλληλα για μηχανικές δοκιμές και αποσύρονται. Κατά την μέτρηση καταγράφονται το πάχος και το πλάτος της περιοχής μειωμένης διατομής (Σχ. 5-1 και Σχ. 5-2). Ως πλάτος της περιοχής στένωσης θεωρείται η τιμή που προκύπτει από τον υπολογισμό της μέσης τιμής τριών ή τεσσάρων γειτονικών μετρήσεων στο μέσο περίπου του μήκους αναφοράς. Κατά τον ίδιο τρόπο θεωρείται και υπολογίζεται το πάχος του δοκιμίου εντός της ίδιας περιοχής. Οι τιμές αυτές εισάγονται ως δεδομένα στο λογισμικό του εφελκυσμού για τον αυτόματο υπολογισμό της επιφάνειας της διατομής και εν συνεχεία της τάσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο σε πραγματικό χρόνο.

5.3 Σχεδιασμός πειραμάτων

Τα πειράματα εφελκυσμού και κόπωσης πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα μηχανικών δοκιμών γενικής χρήσης της Instron.

Στους πίνακες 5-5 και 5-6 δίνονται οι παράμετροι των δοκιμών εφελκυσμού για τους χάλυβες TRIP 700 και τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, που εισήχθησαν στην μηχανή για την διεξαγωγή των δοκιμών εφελκυσμού.

Πίν. 5-5: Πειράματα εφελκυσμού δοκιμών TRIP 700 χάλυβα χωρίς ταυτοποίηση (μια εκ των θερμικών κατεργασιών 1,2,3)

Υλικό	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700
Δοκίμιο	Δοκιμαστικό	1	2	3
Πλάτος (mm)	12,5	12,5	12,5	12,5
Πάχος (mm)	0,8	0,8	0,8	0,8
Πρόωση εμβόλου (mm/min)	2	2	2	2
Συχνότητα δειγματοληψίας (μετρ/s)	1/5	1/5	1/0,5	1/0,5

Πίν. 5-6: Πειράματα εφελκυσμού χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Υλικό						
Δοκίμιο	Δοκιμαστικό	1	2	3	4	5
Πλάτος (mm)	12,5	12,3	12,3	12,3	12,35	12,35
Πάχος (mm)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Πρόωση εμβόλου (mm/min)	2	2	0,5	0,5	0,5	0,5
Συχνότητα δειγματοληψίας (μετρ/s)	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5

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. Δεδομένου του γεγονότος ότι στους χάλυβες TRIP λαμβάνει χώρα μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, κατά την διάρκεια πλαστικής παραμόρφωσης, το φαινόμενο αναμένεται να επηρεάσει την μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν και δοκιμές κόπωσης σε μέγιστες τάσεις κοντά στο όριο διαρροής του υλικού προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του φαινομένου. Για τον λόγο αυτόν η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων κόπωσης ήταν η ακόλουθη:

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 $R_{p0.2}$. Στην συνέχεια, σε επόμενα δοκίμια η τάση μειωνόταν προοδευτικά μέχρι να προσδιοριστεί το εύρος για το οποίο δεν υπήρχε αστοχία για 10^7 κύκλους φόρτισης. Η τάση αυτή αντιστοιχεί στο συμβατικό όριο κόπωσης του υλικού. Για τα υλικά στα οποία δεν υπήρχε ικανός αριθμός δοκιμών, χρησιμοποιήθηκαν τιμές τάσεων κόπωσης μόνο στην περιοχή του ορίου διαρροής και χαμηλές τάσεις για τον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης.

Στους πίνακες 5-7, 5-8 και 5-9 παρουσιάζονται οι παράμετροι των πειραμάτων κόπωσης.

Πίν. 5-7: Πειράματα κόπωσης TRIP 700 χάλυβα θερμικής κατεργασίας 2

Υλικό	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700
Θερμική κατεργασία	2	2	2
Δοκίμιο	1	2	3
Πλάτος (mm)	12,5	12,5	12,5
Πάχος (mm)	0,8	0,8	0,8
F _m (KN)	1,925	2,959	2,84064
F ₀ (KN)	1,575	2,421	2,32416
Συχνότητα κύκλων φόρτισης (Hz)	25	25	25
Συχνότητα δειγματοληψίας (KHz)	0.1	0.1	0.1

Πίν. 5-8: Πειράματα κόπωσης TRIP 700 χάλυβα θερμικής κατεργασίας 3

Υλικό	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700	TRIP 700
Θερμική κατεργασία	3	3	3	3	3	3
Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6
Πλάτος (mm)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Πάχος (mm)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F _m (KN)	2,563	2,673	2,618	2,618	2,585	2,673
F ₀ (KN)	2,097	2,187	2,142	2,142	2,115	2,187
Συχνότητα κύκλων φόρτισης (Hz)	30	25	25	25	25	25
Συχνότητα δειγματοληψίας (KHz)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Πίν. 5-9: Πειράματα κόπωσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Υλικό	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.	χαλ. χ.κ.
Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Πλάτος (mm)	14,1	13,9	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1
Πάχος (mm)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F _m (KN)	5,9246	5,9323	5,83165	5,5836	4,9632	4,9632	3,7224	4,0326	3,8775	4,0326
F ₀ (KN)	4,8474	4,8537	4,77135	4,5684	4,0608	4,0608	3,0456	3,2994	3,1725	3,2994
Συχνότητα κύκλων φόρτισης (Hz)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Συχνότητα δειγματοληψίας (KHz)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

5.4 Διασφάλιση εγκυρότητας πειραμάτων

Τα δοκίμια κατά την τοποθέτησή τους στην μηχανή μηχανικών δοκιμών, όπως ορίζουν τόσο οι προδιαγραφές μηχανικών δοκιμών κόπωσης, όσο και του εφελκυσμού, πρέπει να είναι πλήρως ευθυγραμμισμένα με τον άξονα μετατόπισης του υδραυλικού εμβόλου, έτσι ώστε να ασκούνται σε αυτά φορτία επί του άξονα συμμετρίας τους και μόνο. Σε αντίθετη περίπτωση ενδέχεται να προκύψουν ανεπιθύμητες ροπές επί του δοκιμίου, οι οποίες θα μας οδηγήσουν σε μη αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα. Για την επίτευξη της σωστής ευθυγράμμισης των δοκιμίων μετρήθηκε σε καθένα από αυτά το πλάτος των δύο "αυτιών" τους και χαραχτηκε ένα ευθύγραμμο τμήμα, έτσι ώστε να ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Με βάση το ευθύγραμμο τμήμα αυτό και με γνωστά και χαραγμένα στις σιαγόνες τα μέση των παχών τους, τοποθετήθηκε κάθε δοκίμιο στις τελευταίες με τρόπο που να διέρχεται το ευθύγραμμο τμήμα από τα δύο μέση.

Κατά την τοποθέτηση των δοκιμών στις σιαγόνες των αρπαγών του συστήματος μηχανικών δοκιμών σημαντική είναι η διασφάλιση ότι τα δοκίμια αυτά δεν θα δεχθούν κάποια θλιπτική, εφελκυστική, στρεπτική ή άλλου είδους καταπόνηση πριν την έναρξη του πειράματος. Αυτό επιτυγχάνεται από το λογισμικό της μηχανής ενεργοποιώντας την επιλογή “Specimen protect”, που παρέχει η κονσόλα του λειτουργικού της Instron. Το τελευταίο πρακτικά σημαίνει ότι τοποθετείται το δοκίμιο στην κάτω αρπάγη, ανυψώνεται το έμβολο στην επιθυμητή θέση και έπειτα αμέσως πριν την σύσφιξη του και στην πάνω αρπάγη, ο χρήστης ενεργοποιεί την παραπάνω επιλογή, θέτοντας ως άνω όριο επιβολής τάσης 0,2 KN. Η τάση αυτή έχει επιλεγεί, έτσι ώστε να παρέχει, τόσο σταθερή τοποθέτηση του δοκιμίου κατά την διάρκεια των πειραμάτων (μη ολίσθηση δοκιμίου), όσο και να μην προκαλεί οποιουδήποτε είδους προφόρτιση ή καταπόνηση. Έτσι διατηρούνται τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών εντός των ανοχών που ορίζουν οι προδιαγραφές και εξασφαλίζουμε την διεξαγωγή σωστών και έγκυρων μηχανικών δοκιμών.

Για τον έλεγχο της ασφάλειας του συστήματος μηχανικών δοκιμών και της προστασίας των δοκιμών, που έχουν τοποθετηθεί σε αυτό, απαραίτητη είναι η ενεργοποίηση οριακών τιμών/δικλιδών ασφαλείας στην θέση του εμβόλου και την το φορτίο που μεταφέρεται στο δοκίμιο. Το σύστημα αναγνωρίζει τις κρίσιμες οριακές τιμές που έχουν εισαχθεί στο λογισμικό και προκαλεί διακοπή του πειράματος σε περίπτωση που τα όρια αυτά υπερβληθούν. Κατά τον τρόπο αυτόν αποφεύγεται ανάλογα με το κριτήριο οριακής τιμής θέσης, τάσης ή του συνδυασμού τους οποιαδήποτε ανεπιθύμητη υπέρβαση αυτών των τιμών, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά στο σύστημα ή στο δοκίμιο, π.χ. θραύση του δοκιμίου, ή κάποια ανεπιθύμητη επίδραση στο πείραμα, καθιστώντας το άκυρο.

5.4.1 Διακρίβωση αισθητήρων συστήματος

Έναρξη λογισμικού-πειραμάτων

Κατά την έναρξη του εκάστοτε λογισμικού κόπωσης ή εφελκυσμού πρέπει πάντα να γίνεται διακρίβωση (καλιμπράρισμα) του αισθητηρίου οργάνου της δυναμοκυψέλης και του επιμηκυνσιομέτρου.

Κατά τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι κατά την διάρκεια των πειραμάτων τα δεδομένα που θα καταγράφει το σύστημα θα προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τις πραγματικές τιμές του πειράματος. Εκτός της διαδικασίας αυτής, κατά τον εφελκυσμό κυρίως, αλλά και την κόπωση, είναι χρήσιμο, ακριβώς πριν την έναρξη των πειραμάτων και αφού έχει τοποθετηθεί το δοκίμιο στο σύστημα, να μηδενίζεται το φορτίο στο έμβολο της μηχανής. Κατά τον τρόπο αυτό το διάγραμμα σ-ε (τάσης - παραμόρφωσης) στον εφελκυσμό εκκινεί από την αρχή των αξόνων αποφεύγοντας θλιπτικές ή εφελκυστικές προφορτίσεις, αποτιμώντας την συμπεριφορά του υλικού σε όλο το φάσμα των τάσεων που δέχεται.

Ειδικά για τα πειράματα του εφελκυσμού, όπου είθισται η χρήση επιμηκυνσιομέτρου, είναι αναγκαίο κατ' αρχάς να διασφαλίζεται η σωστή ευθυγράμμιση του τελευταίου, έτσι ώστε το επίπεδο συμμετρίας του να ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Επίσης θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι είναι τοποθετημένο, έτσι ώστε οι απολήξεις των βραχιόνων του να ταυτίζονται με τα όρια του μήκους αναφοράς του δοκιμίου. Τέλος θα πρέπει αμέσως πριν την έναρξη του πειράματος, όπου γίνεται χρήση

επιμηκνσιομέτρου να μηδενίζεται η ένδειξή του. Έτσι το όργανο κατά την έναρξη του πειράματος (μηδενική μετατόπιση) θα δείχνει πράγματι μηδενική μετατόπιση.

Έλεγχος-λήξη πειραμάτων

Ο έλεγχος του πειράματος του εφελκυσμού πραγματοποιείται με την εισαγωγή στο λογισμικό του επιθυμητού διαστήματος που θα διανύσει το υδραυλικό έμβολο, ξεκινώντας από την αρχική του θέση, έως ότου σταματήσει. Το διάστημα αυτό επιλέγεται με γνώμονα την εκτιμώμενη μέγιστη επιμήκνση του υλικού, έτσι ώστε να την υπερβαίνει, προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι το δοκίμιο θα αστοχήσει σε θραύση αρκετά προτού διανυθεί το διάστημα. Για την προστασία του επιμηκνσιομέτρου είναι σημαντικό να τερματίζουμε το πείραμα αμέσως μετά την θραύση του δοκιμίου και να το αφαιρούμε. Έτσι αποφεύγουμε τυχόν καταστροφή του επιμηκνσιομέτρου κατά την υπερέκταση των βραχιόνων του.

Ο έλεγχος του πειράματος της κόπωσης πραγματοποιείται με την εισαγωγή του αριθμού κύκλων φόρτισης που θα υποβληθεί το δοκίμιο μας, σε συνδυασμό με την εισαγωγή κριτηρίου που αφορά την απότομη μεταβολή του φορτίου κατά ένα ποσοστό μεγάλο, π.χ. 80%, και έχει ως αποτέλεσμα την διακοπή της λειτουργίας της μηχανής και τερματισμού του πειράματος.

Έτσι διασφαλίζεται ότι η μηχανή θα διακόψει την λειτουργία της, είτε το δοκίμιο διαφύγει την θραύση στους κύκλους φόρτισης που έχουμε ορίσει, είτε αστοχήσει. [8]

5.5 Μεθοδολογίες

Αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά για τα πειράματα του εφελκυσμού, προκειμένου να προσομοιωθούν στατικές συνθήκες καταπόνησης, όπως υπαγορεύει η θεωρία για την διεξαγωγή σωστών πειραμάτων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιλογή κατά το δυνατόν μικρών ταχυτήτων μετατόπισης του εμβόλου. Κατά τα πειράματα του εφελκυσμού, τα τεχνητά όρια διαρροής των υλικών ($R_{p0.2}$) και οι παραμορφώσεις θραύσης A_{50} , έχουν υπολογιστεί με την μεθοδολογία που έχει παρουσιάσει στην παράγραφο 3.1, χρήσει του ειδικού λογισμικού Origin.

Όσον αφορά τα πειράματα κόπωσης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις, όπου χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ακρίβεια των φορτίων, ελέγχοντας τις τιμές των δεδομένων που εγγράφει το πρόγραμμα και μελετώντας τις καμπύλες ακριβείας φορτίων - συχνότητας που δίνει ο κατασκευαστής.

Κατά τα πειράματα της κόπωσης οι καμπύλες παρεμβολής (καμπύλες S-N) των σημείων $\sigma_{max}-N_f$ έχουν χαραχθεί χρήσει του ειδικού λογισμικού Origin και με βάση την μεθοδολογία που ορίζει η βιβλιογραφία, ως ακολούθως:

1. Ορίζεται στο πρόγραμμα ως συνάρτηση παρεμβολής των πειραματικών σημείων την παρακάτω συνάρτηση Weibull τεσσάρων σταθερών.

$$\sigma_{max} = C_1 + \frac{C_2 - C_1}{e^{\log(N/C_3)^{C_4}}}$$

2. Τίθεται C_1 ίσο με το όριο κόπωσης (σ_e), C_2 ίσο με την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (σ_{UTS}) και C_3, C_4 ελεύθερες μεταβλητές με αρχική τιμή 1.

3. Επιλέγεται ο τρόπος εκτέλεσης επαναλήψεων από το πρόγραμμα για τον υπολογισμό των τιμών C_3 και C_4 , που οδηγούν στην βέλτιστη καμπύλη παρεμβολής.

Τα πειράματα των σκληρομετρήσεων, τόσο στους TRIP 700 χάλυβες με άγνωστη θερμική κατεργασία (μια εκ των 1,2 ή 3), όσο και αυτούς ΘΚ2 και ΘΚ3, έχουν πραγματοποιηθεί με εντελώς τυχαίο τρόπο, λαμβάνοντας 10 μετρήσεις καθ' όλο το μήκος τους και κατά τυχαία πλευρά. Κατ' αυτόν τον τρόπο ελήφθησαν μετρήσεις σε όλα τα δοκίμια με άγνωστη κατεργασία και σε δύο ακόμα τυχαία επιλεγμένα δοκίμια, ένα ΘΚ2 και ένα ΘΚ3.

Κεφάλαιο 6

Πειραματικά αποτελέσματα

6.1 Δοκιμές σκληρομέτρησης

Για την ταυτοποίηση των 7 δοκιμίων χάλυβα TRIP 700 που παρελήφθησαν, μη ταυτοποιημένης θερμικής κατεργασίας (μία εκ των Θ.Κ. 1, 2 ή 3), που αντιστοιχεί σε κάθε δοκίμιο (ΔΟΚ1 έως ΔΟΚ7), υπεβλήθησαν μαζί με αυτά των Θ.Κ. 3 και Θ.Κ. 2 σε μη καταστροφικό έλεγχο και συγκεκριμένα σε δοκιμές σκληρομετρήσεων. Οι σκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μικροσκληρόμετρο του εργαστηρίου υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, όπως ορίζει η προδιαγραφή ASTM E92-82(2003) [13].

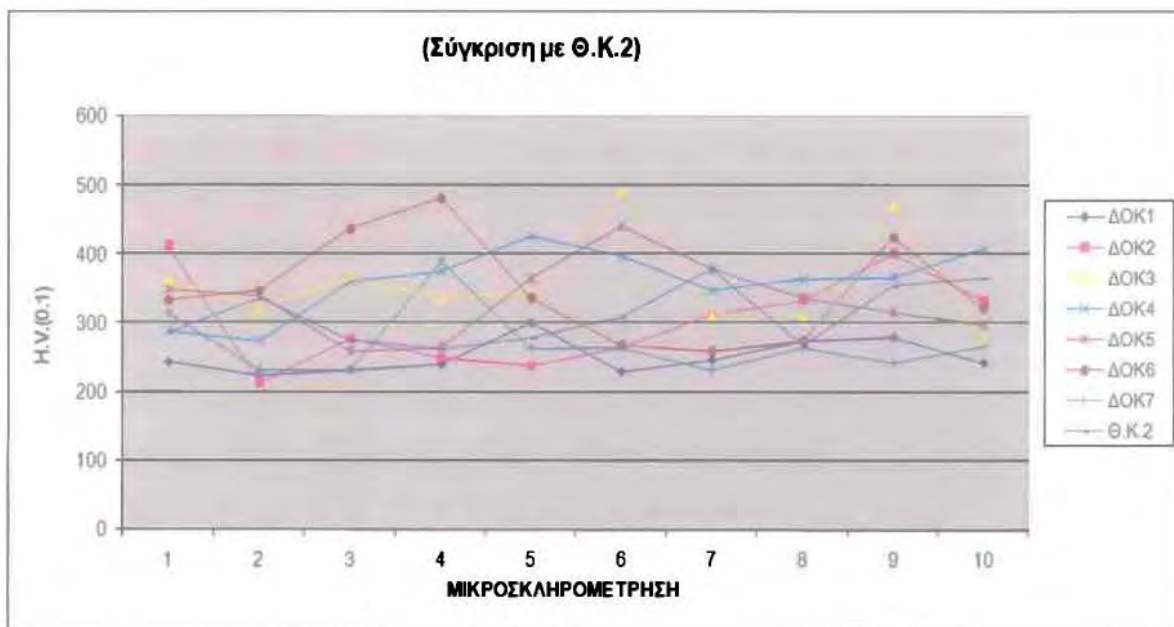
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων σε Vickers, οι μέσες τιμές και οι τυπικές τους αποκλίσεις.

Πίν 6-1: Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων σε Vickers, οι μέσες τιμές τους και οι τυπικές τους αποκλίσεις

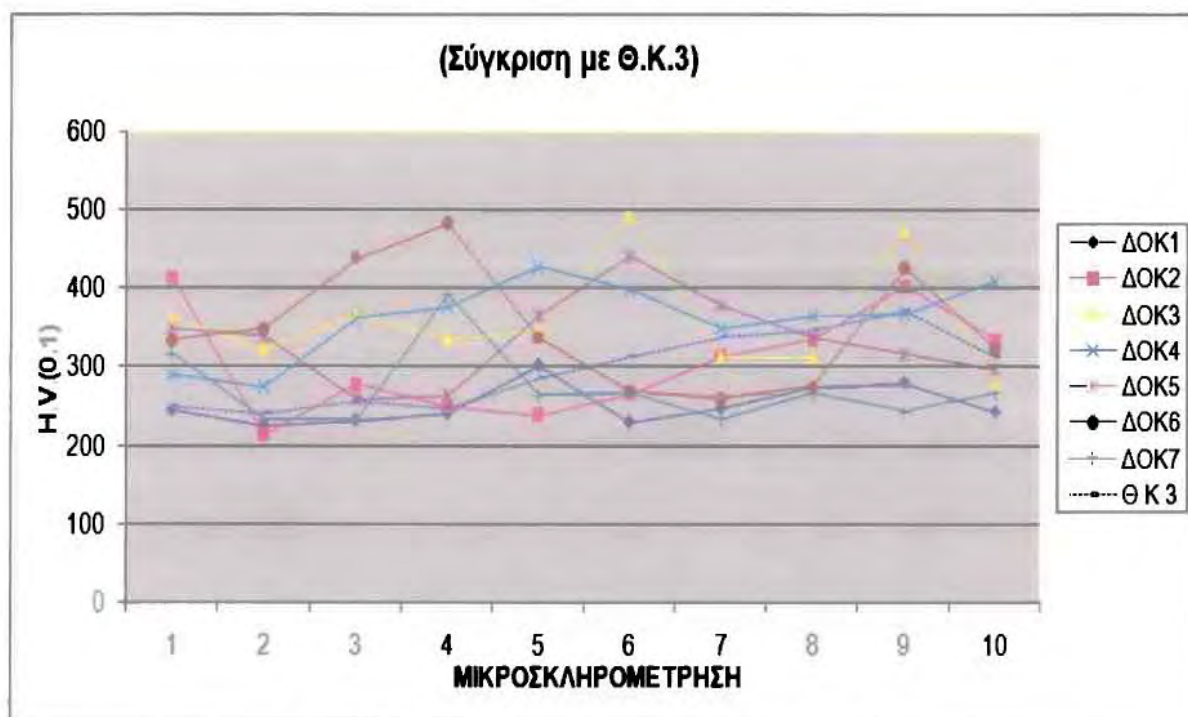
Τιμές μικροσκληρότητας σε Vickers								
ΔΟΚ1	ΔΟΚ2	ΔΟΚ3	ΔΟΚ4	ΔΟΚ5	ΔΟΚ6	ΔΟΚ7	Θ.Κ.3	Θ.Κ.2
244.7	413.4	362.3	289.8	349.8	334.5	315.7	249.6	286
225	213.9	321.4	275	339.7	348.1	232.5	240.9	335.6
232.6	277.8	366.8	361.3	259.2	438.3	232.7	257.3	274.3
240.9	250.1	336.4	376.4	264.6	482.7	390.9	248.6	262.3
302	239.3	344.1	427	365.8	337.8	264.1	286.1	278.8
230.4	266.5	493.7	397.1	441.7	268.9	266.2	313.1	309.3
247.7	312.9	313.4	348.4	378.8	259.8	233	336.9	378.5
273.9	334.4	312.2	364.4	337.4	274.8	265.5	347.2	267.3
280.2	402.3	473.7	367.4	317	426.2	243.2	371.1	353.8
243.6	334.4	279.1	409.1	298.1	322.8	267.2	313	366.3
M.T.1	M.T.2	M.T.3	M.T.4	M.T.5	M.T.6	M.T.7	M.T.	M.T.
252.1	304.5	360.31	361.59	335.21	349.39	271.1	296.38	311.22
T.A.1	T.A.2	T.A.3	T.A.4	T.A.5	T.A.6	T.A.7	T.A.	T.A.
24.9716	67.3781	70.0435	48.1702	54.6563	76.5287	49.0525	46.6019	43.8987

Σημείωση: Στον πίνακα δεν φαίνεται η Θ.Κ.1, καθώς το υλικό που προέκυψε από την κατεργασία αυτή θεωρήθηκε ακατάλληλο για τις εφαρμογές που είχε αρχικά σχεδιαστεί και έτσι δεν παραλάβαμε ταυτοποιημένης θερμικής κατεργασίας δοκίμια από το υλικό αυτό.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι παραπάνω μετρήσεις μικροσκληρότητας με τρόπο που να είναι άμεσα συγκρίσιμες με την ΘΚ2 και την ΘΚ3.



Διάγρ. 6-1: Μικροσκληρομετρήσεις-σύγκριση με Θ.Κ. 2



Διάγρ. 6-2: Μικροσκληρομετρήσεις-σύγκριση με Θ.Κ. 3

Από τα διαγράμματα 6-1 και 6-2 και από τον πίνακα 6-1 προκύπτει ότι τα δοκίμια παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλη διασπορά στις τιμές της σκληρότητά τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής σκληρότητας των διαφορετικών φάσεων που εμπεριέχονται στα υλικά αυτά. Η διασπορά αυτή ήταν αποτρεπτική για την ασφαλή

κατάταξη τους σε μία από τις θερμικές κατεργασίες 2 ή 3 και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν σε καταστρεπτικό έλεγχο εφελκυσμού προκειμένου να ταυτοποιηθούν.

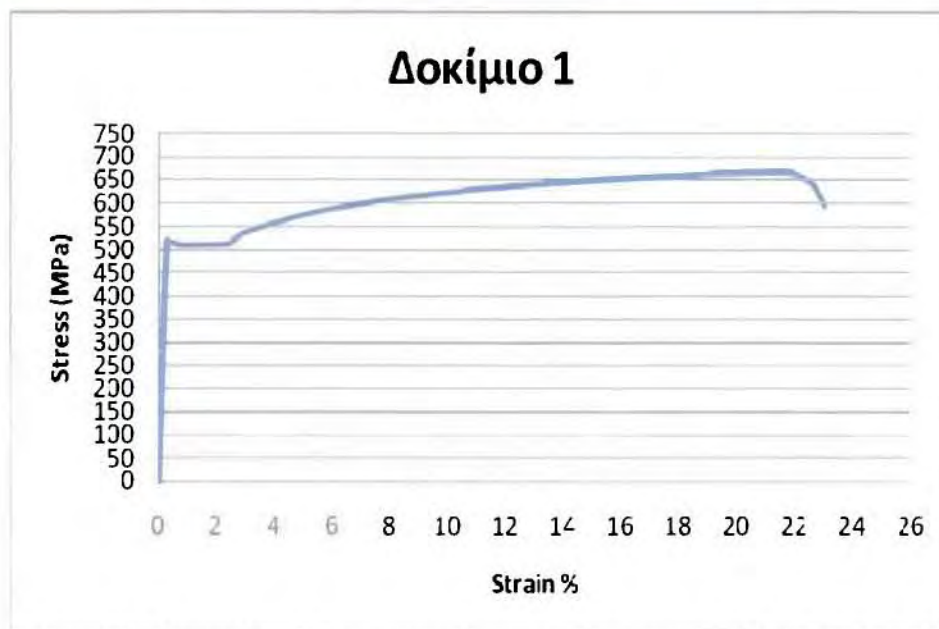
6.2 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Στους πίνακες 6-2 έως 6-9 παρατίθενται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών που αποτιμήθηκαν και στα διαγράμματα 6-3 έως 6-10 τα διαγράμματα σ-ε (τάσης- παραμόρφωσης) που χαράχθηκαν.

Χάλυβας TRIP 700 μη ταυτοποιημένης θερμικής κατεργασίας

Πίν. 6-2: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 1 χάλυβα TRIP 700

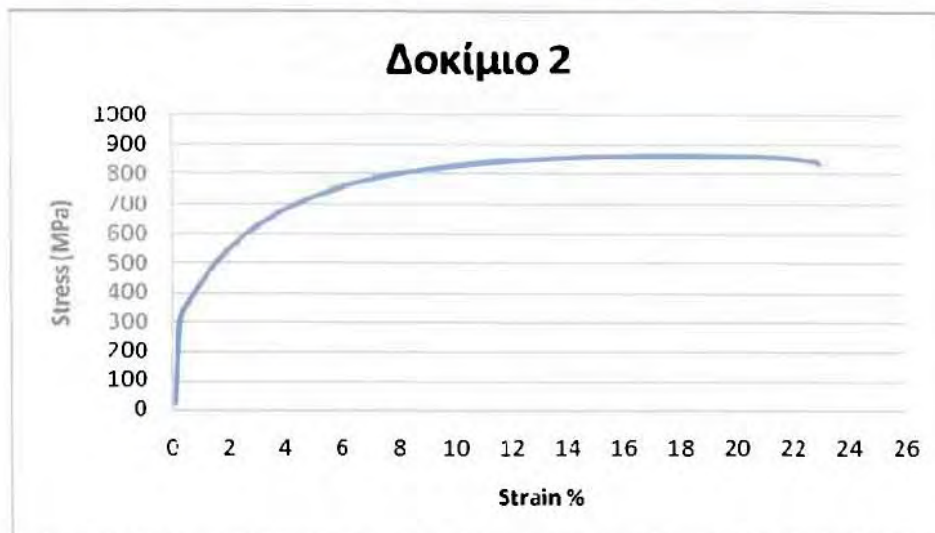
Δοκίμιο 1	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	668,5424
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	515,0736
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	22,67



Διάγρ. 6-3: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 1 χάλυβα TRIP 700

Πίν. 6-3: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 2 χάλυβα TRIP 700

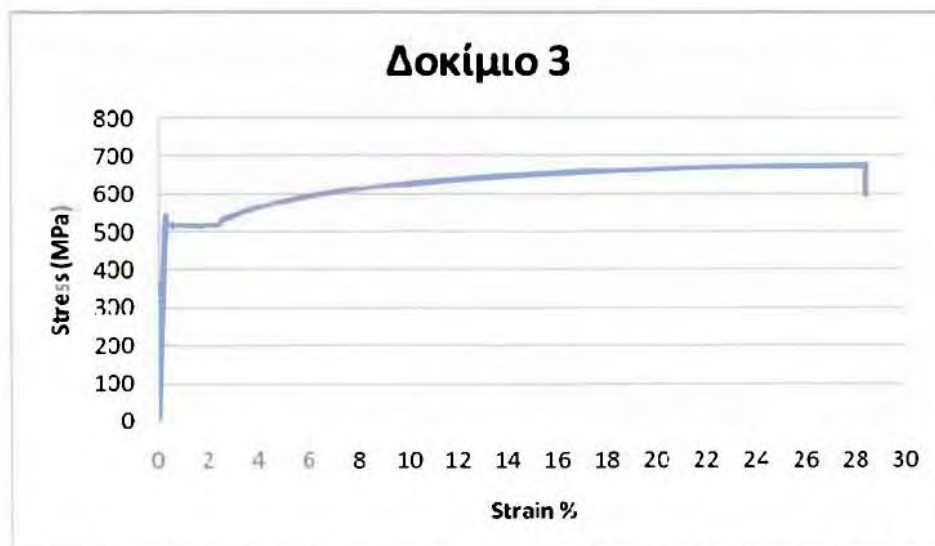
Δοκίμιο 2	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	861,7389
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	319,6357
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	22,77



Διάγρ. 6-4: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 2 χάλυβα TRIP 700

Πίν. 6-4: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 3 χάλυβα TRIP 700

Δοκίμιο 3	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	675,8964
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	518,5378
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	28,326

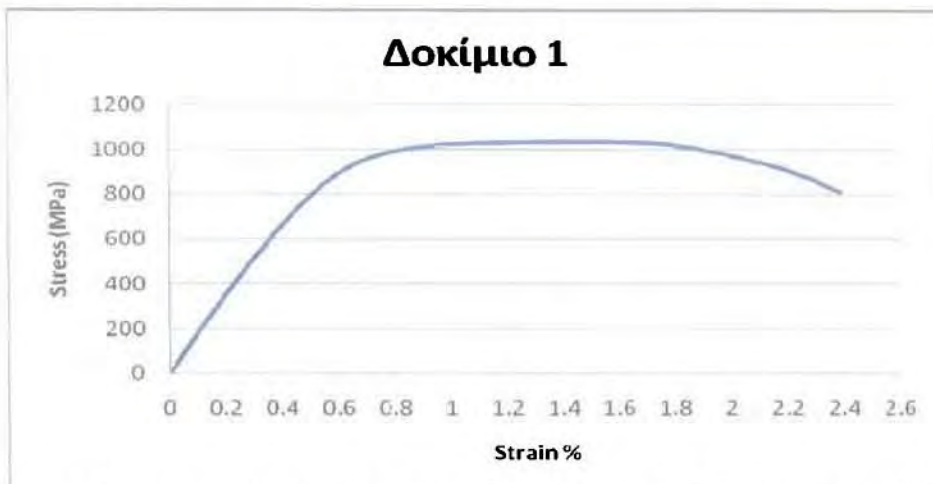


Διάγρ. 6-5: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 2 χάλυβα TRIP 700

Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης

Πίν. 6-5: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 1 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

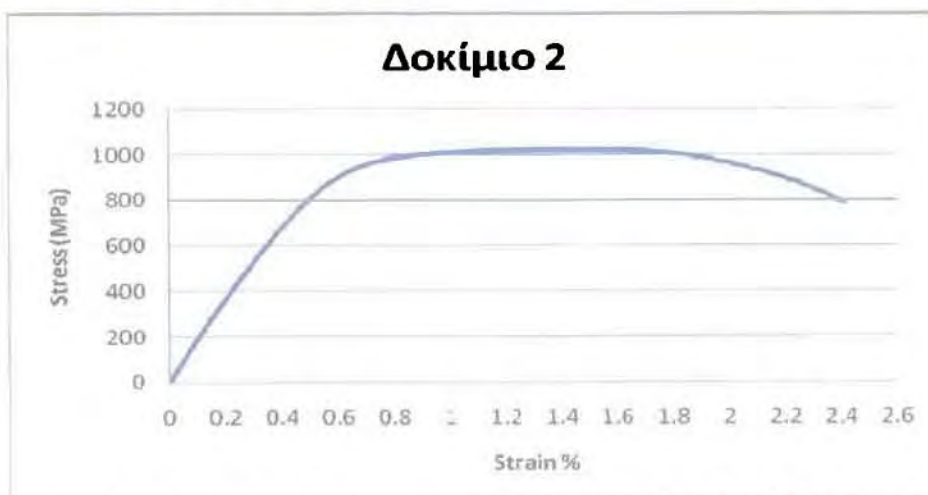
Δοκίμιο 1	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	1033,862
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	967,30
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	1,947



Διάγρ. 6-6: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 1 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Πίν. 6-6: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 2 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

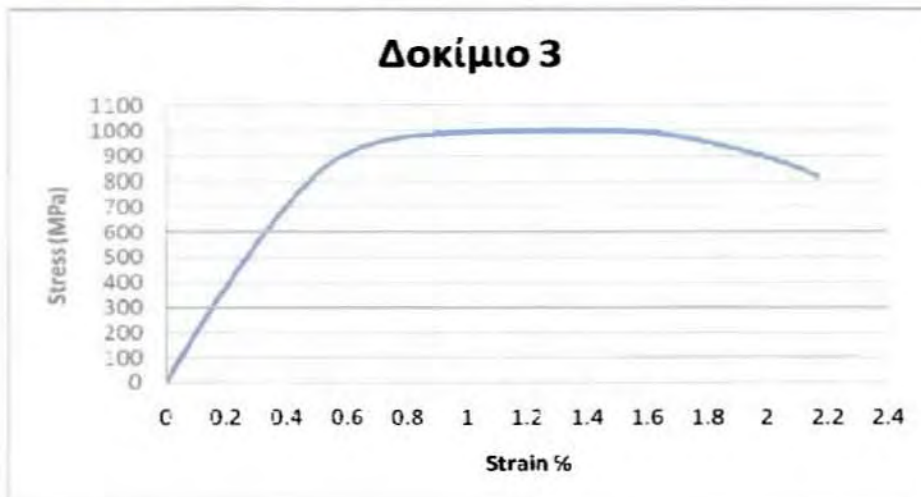
Δοκίμιο 2	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	1020,381
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	957,79
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	1,986



Διάγρ. 6-7: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 2 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Πίν. 6-7: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 3 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

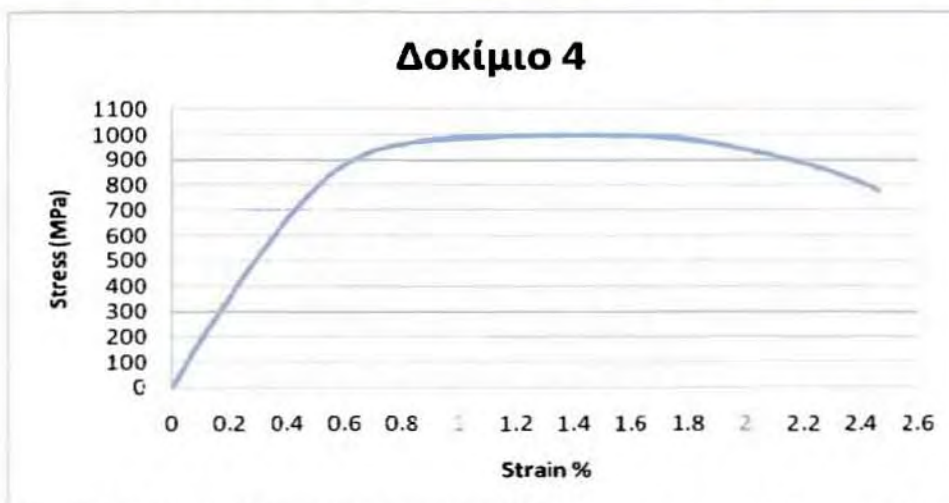
Δοκίμιο 3	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	1000,718
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	941,24
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	1,762



Διάγρ. 6-8: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 3 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Πίν. 6-8: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 4 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

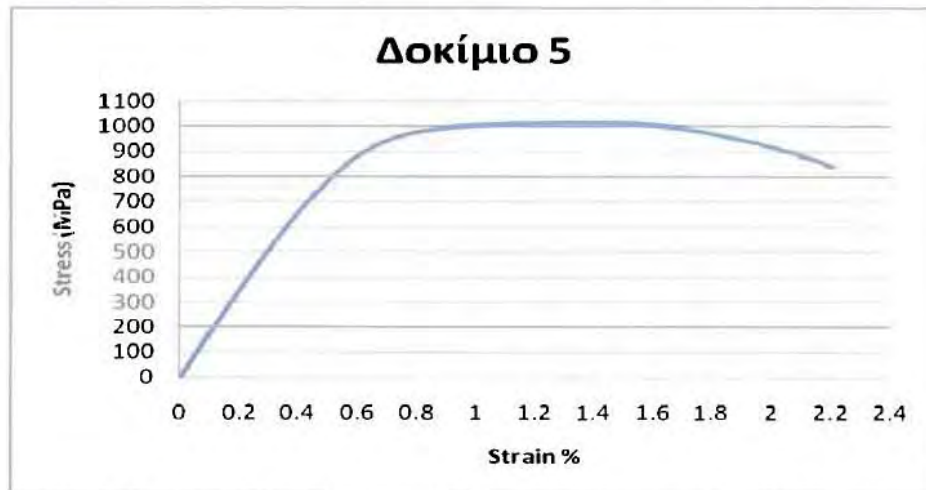
Δοκίμιο 4	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	998,961
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	944,076
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	2,017



Διάγρ. 6-9: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 4 χάλυβα χαμηλής Κραμάτωσης

Πίν. 6-9: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίου 5 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Δοκίμιο 5	
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, R_m (MPa)	1017,334
Τεχνητό όριο διαρροής, $R_{p0.2}$ (MPa)	962,1094
Παραμόρφωση θραύσης A_{50} (mm/mm%)	1,718



Διάγρ. 6-10: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου 5 χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

6.3 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης

Στους πίνακες 6-10, 6-12 και 6-14 παρατίθενται οι παράμετροι των δοκιμών κόπωσης και συγκεκριμένα τα φορτία, οι τάσεις, η συχνότητα και ο λόγος R και ο αριθμός των κύκλων έως την θραύση για το κάθε δοκίμιο. Στα διαγράμματα 6-11, 6-12 και 6-13 παρατίθενται οι καμπύλες S-N που χαράχθηκαν και στους πίνακες 6-11, 6-13 και 6-15 οι συναρτήσεις παρεμβολής και οι τιμές των μεταβλητών και των σταθερών τους.

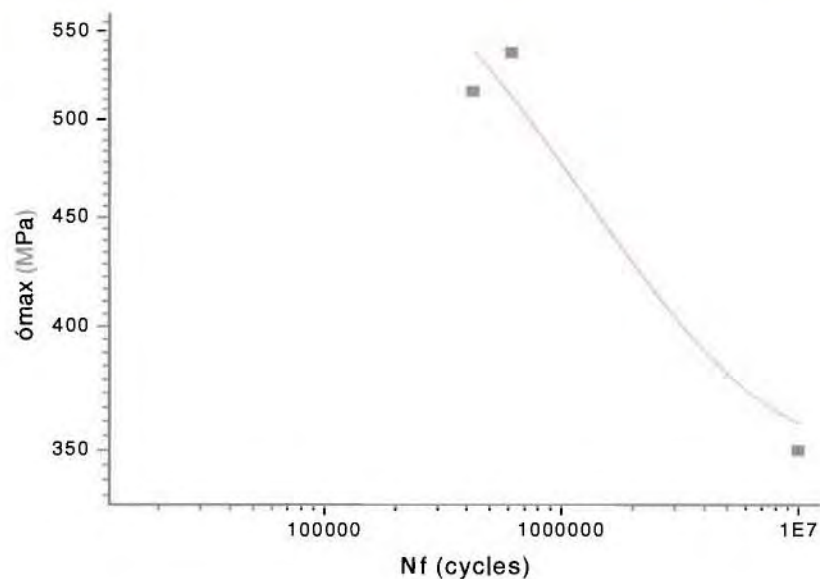
Δοκίμια χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2

Πίν. 6.10: συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2

σ_{max} (MPa)	350	538	516,48
σ_{min} (MPa)	35	53,8	51,648
σ_{mean} (MPa)	192,5	295,9	284,064
σ_o (MPa)	157,5	242,1	232,416
F_{max} (KN)	3,5	5,38	5,1648
F_{min} (KN)	0,35	0,538	0,51648
F_{mean} (KN)	1,925	2,959	2,84064
F_o (KN)	1,575	2,421	2,32416
R	0,1	0,1	0,1
Συχνότητα κύκλων φόρτισης	25	25	25
Αριθμός κύκλων μέχρι την θραύση	άντεξε 10.000.000	619.557	425.519

Πίν. 6.11: Συνάρτηση παρεμβολής χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2

Equation	s=C1+(C2-C1)/exp(((log(N))/C3)^C4)		
Adj. R-Square	0.87586		
		Value	Standard Error
σ _{max}	C1	350	0
σ _{max}	C2	689	0
σ _{max}	C3	13.85161	0.49256
σ _{max}	C4	8.18692	4.70676



Διάγρ. 6-11: Καμπύλη S-N χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2

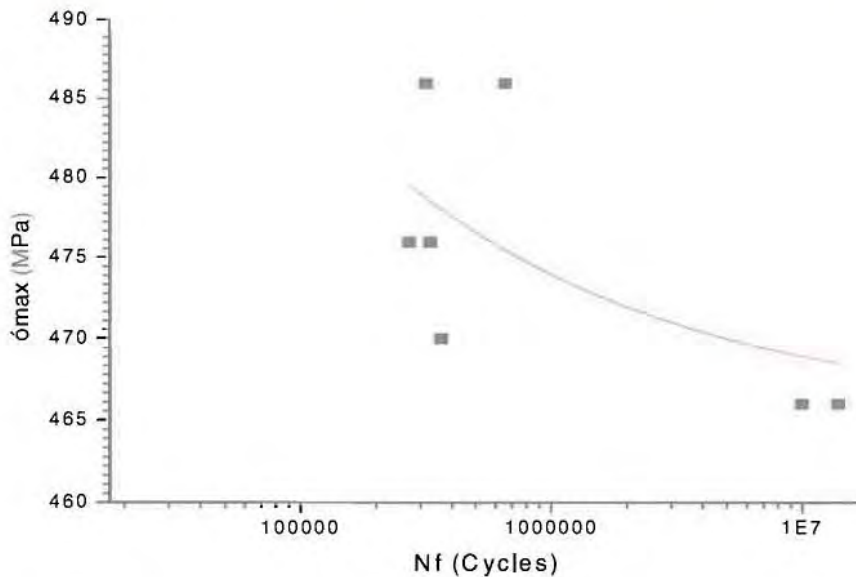
Δοκίμια χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3

Πίν. 6.12: συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3

Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6
σ _{max} (MPa)	466	486	476	476	470	486
σ _{min} (MPa)	46,6	48,6	47,6	47,6	47	48,6
σ _{mean} (MPa)	256,3	267,3	261,8	261,8	258,5	267,3
σ _o (MPa)	209,7	218,7	214,2	214,2	211,5	218,7
F _{max} (KN)	4,66	4,860	4,76	4,76	4,7	4,86
F _{min} (KN)	0,466	0,486	0,476	0,476	0,47	0,486
F _{mean} (KN)	2,563	2,673	2,618	2,618	2,585	2,673
F _o (KN)	2,097	2,187	2,142	2,142	2,115	2,187
R	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Συχνότητα κύκλων φόρτισης (Hz)	30	25	25	25	25	25
Αριθμός κύκλων μέχρι την θραύση	άντεξε 10.000.000	315.863	270.617	329.038	363.192	658.908

Πίν. 6-13: Συνάρτηση παρεμβολής χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3

Equation	s=C1+(C2-C1)/exp(((log(N))/C3)^C4)		
Adj. R-Square	0.26984		
		Value	Standard Error
σ _{max}	C1	466	0
σ _{max}	C2	780	0
σ _{max}	C3	6.02156	4.68112
σ _{max}	C4	1.56579	1.6169



Διάγρ. 6-12: Καμπύλη S-N χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 3

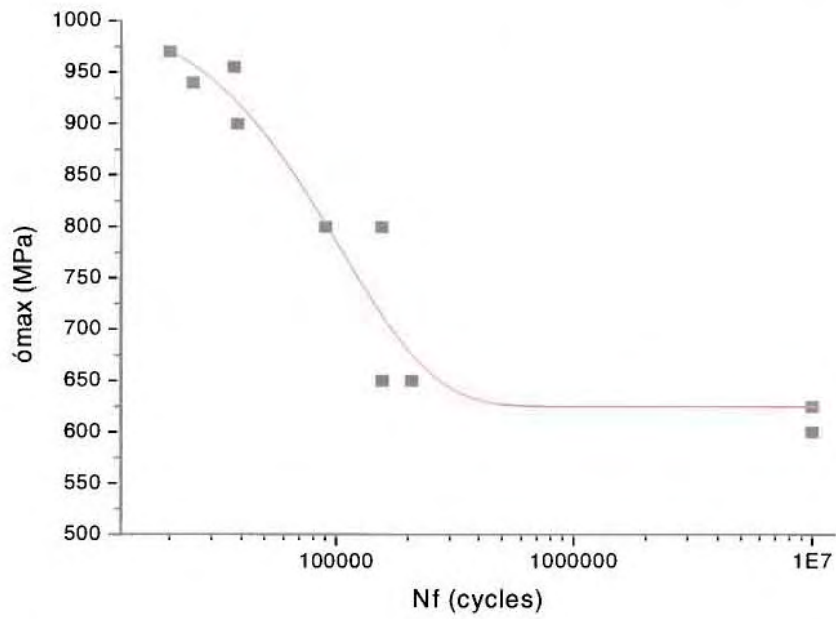
Δοκίμια χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Πίν. 6.14: Συνθήκες κόπωσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ _{max} (MPa)	955	970	940	900	800	800	600	650	625	650
σ _{min} (MPa)	95,5	97	94	90	80	80	60	65	62,5	65
σ _{mean} (MPa)	525,25	533,5	517	495	440	440	330	357,5	343,75	357,5
σ _o (MPa)	429,75	436,5	423	405	360	360	270	292,5	281,25	292,5
F _{max} (KN)	10,772	10,786	10,603	10,152	9,024	9,024	6,768	7,332	7,050	7,332
F _{min} (KN)	1,0772	1,0786	1,0603	1,0152	0,9024	0,9024	0,6768	0,7332	0,705	0,7332
F _{mean} (KN)	5,9246	5,9323	5,83165	5,5836	4,9632	4,9632	3,7224	4,0326	3,8775	4,0326
F _o (KN)	4,8474	4,8537	4,77135	4,5684	4,0608	4,0608	3,0456	3,2994	3,1725	3,2994
R	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Συχνότητα κύκλων φόρτισης	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Αριθμός κύκλων μέχρι την θραύση	36.965	19.976	24.893	38.314	154.454	89.584	άντεξε	155.512	άντεξε	204.164

Πίν. 6.15: Συνάρτηση παρεμβολής χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

Equation	$s=C1+(C2-C1)/\exp(((\log(N))/C3)^{C4})$		
Adj. R-Square	0.91822		
		Value	Standard Error
σ_{max}	C1	625	0
σ_{max}	C2	1014.2512	0
σ_{max}	C3	11.60743	0.1281
σ_{max}	C4	13.49613	2.55686



Διάγρ. 6-13: Καμπύλη S-N χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης

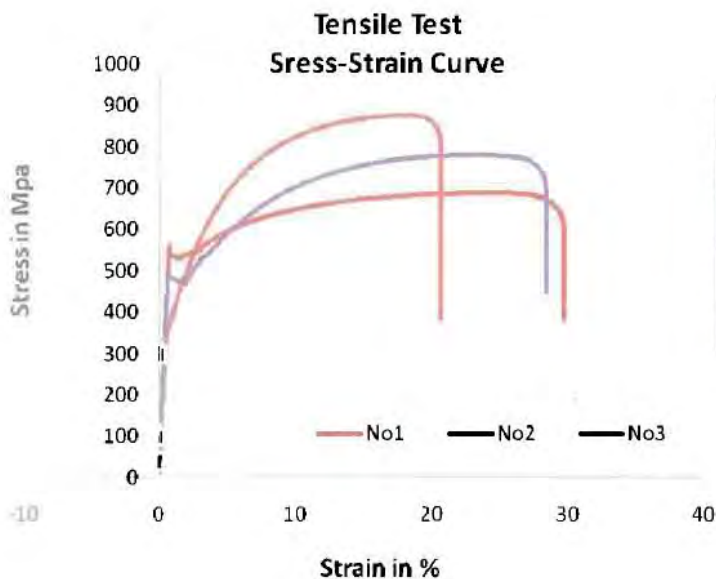
6.4 Συμπεράσματα

6.4.1 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα TRIP 700

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού δοκιμών χάλυβα TRIP 700 (Θ.Κ. 1, 2, 3), που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο INSTITUT FÜR ESENHÜTTEKUNDE του πανεπιστημίου RWTH του Aachen, για την σύγκριση και ταυτοποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των δοκιμών 1, 2 και 3 του εφελκυσμού, τα οποία δεν έχουν ταυτοποιηθεί.

Δοκιμή εφελκυσμού κατά το παρελθόν

Οι διαστάσεις του δοκιμίου και η δοκιμή εφελκυσμού προσδιορίστηκαν από την προδιαγραφή EN 10002.



Πίν. 6.16: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1,2 και 3

Θερμική κατεργασία	Rp 0,2 (Mpa)	Rm (Mpa)	A50 (%)
No1	351	875	20.5
No2	538	689	32
No3	482	780	28.3

Διάγρ. 6-14: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1,2 και 3

Συγκρίνοντας τις μηχανικές ιδιότητες των τριών δοκιμών χωρίς ταυτοποίηση με αυτά των υλικών με θερμική κατεργασία 1, 2 και 3 καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Το δοκίμιο 1 έχει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό $R_m=668,5424$ MPa, τεχνητό όριο διαρροής $R_{p0.2}=515,0736$ MPa και παραμόρφωση θραύσης $A_{50}=22,67\%$. Οι ιδιότητες αντοχής του είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες του υλικού της θερμικής κατεργασίας 2, εντούτοις η παραμόρφωση θραύσης του αποκλίνει σημαντικά. Έτσι δεν μπορούμε να αποφανθούμε με ασφάλεια για την θερμική κατεργασία στην οποία εμπίπτει το δοκίμιο αυτό.

Το δοκίμιο 2 έχει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό $R_m=861,7389$ MPa, τεχνητό όριο διαρροής $R_{p0,2}=319,6357$ MPa και παραμόρφωση θραύσης $A_{50}=22,77\%$. Συνεπώς οι ιδιότητες αυτές είναι πολύ κοντά στα χαρακτηριστικά του υλικού της θερμικής κατεργασίας 1.

Το δοκίμιο 3 παρουσιάζει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό $R_m=675,8964$ MPa, τεχνητό όριο διαρροής $R_{p0,2}=518,537$ MPa και παραμόρφωση θραύσης $A_{50}=28,32\%$, χαρακτηριστικά, τα οποία προσεγγίζουν τα αντίστοιχα του υλικού της θερμικής κατεργασίας 2.

6.4.2 Συγκρίσεις μηχανικών ιδιοτήτων

Συγκρίνοντας τις μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών που αποτιμήθηκαν από τα πειράματα εφελκυσμού, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

Οι TRIP χάλυβες παρουσιάζουν γενικά πολύ πιο όλκιμη συμπεριφορά. Οι παραμορφώσεις θραύσεως A_{50} παρουσιάζονται ακολούθως εξαιρετικά μεγάλες, σε σχέση με τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης και γενικότερα, με τιμές που κυμαίνονται στα πειράματά μας από 22,67 έως 28,32 % (πρβλ για τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης οι τιμές της παραμόρφωσης θραύσης A_{50} κυμαίνονται από 1,71 έως 2,01%). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την ιδιαίτερα μεγάλη όλκιμότητα των TRIP χάλυβων και φανερώνει τον ρόλο του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού στην παραμόρφωση τους υπό την επιβολή τάσεων. Σημαντική διαφορά διακρίνεται ακόμα στον σχηματισμό του λαιμού και την ελαστική περιοχή των υλικών. Οι TRIP χάλυβες παρουσιάζουν χαρακτηριστική περιοχή λαιμού και εμφανίζουν πολύ σαφέστερη ελαστική - γραμμική περιοχή. Αντίθετα ο χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά με κύριο χαρακτηριστικό την απουσία σχηματισμού λαιμού. Όσον αφορά τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες των υλικών, ο χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό R_m και μεγαλύτερο τεχνητό όριο διαρροής $R_{p0,2}$. Παρ' όλα αυτά, αν συνυπολογίσει κανείς τις μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών, διαπιστώνει εύκολα πως ο TRIP 700 χάλυβας παρουσιάζει καλύτερο συνδυασμό αντοχής και διαμορφωσιμότητας. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν υπολογιστούν τα γινόμενα $R_m \times A_{50}$ για κάθε υλικό.

6.4.3 Μηχανική συμπεριφορά υλικών σε κόπωση

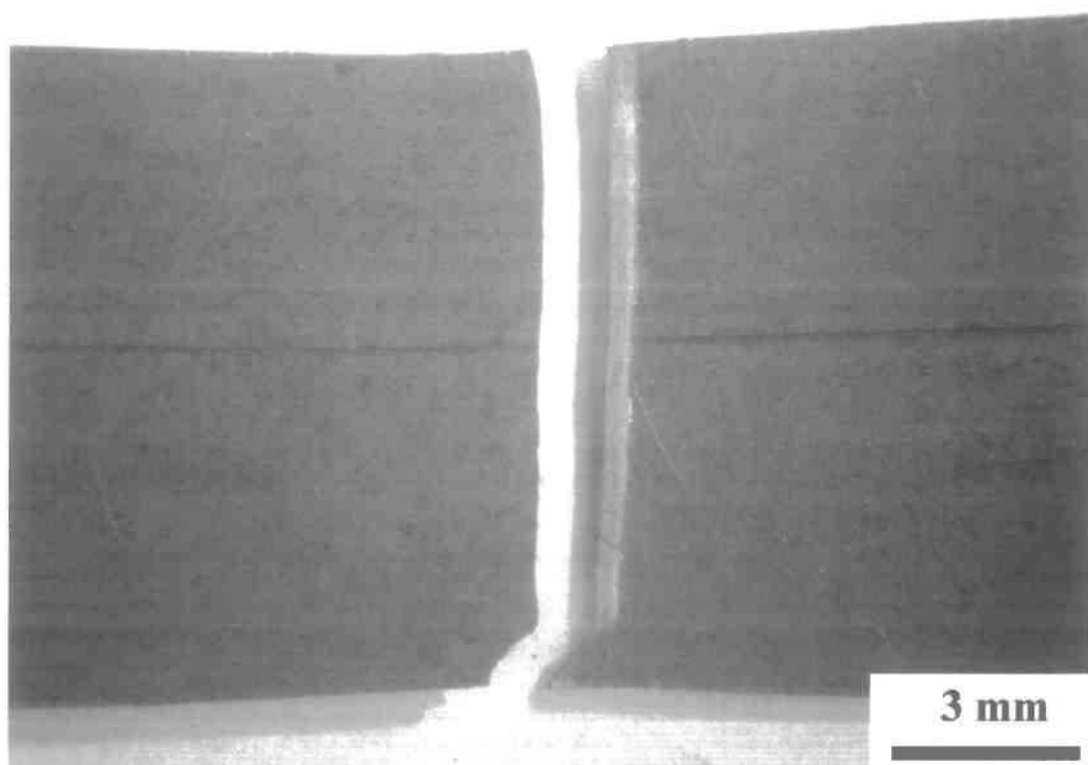
Όσον αφορά τον χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 και θερμικής κατεργασίας 3, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τα υλικά αυτά δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τα όρια κόπωσής τους (δεν κατέστη εφικτό να προσδιοριστεί με ακρίβεια το όριο κόπωσής τους), καθότι ο αριθμός δειγμάτων που ελήφθησαν ήταν μικρός. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων βασίζεται στις υπάρχουσες μετρήσεις, που λόγω έλλειψης ικανού αριθμού δειγμάτων, ενδέχεται να εμπεριέχει κάποια αβεβαιότητα. Έτσι τα όρια κόπωσης προσδιορίστηκαν βάσει ορισμού (οι μεγαλύτερες δηλαδή τάσεις για τις οποίες τα δοκίμια άντεξαν 10^7 κύκλους φόρτισης χωρίς να αστοχήσουν). Συνεπώς τα δοκίμια από TRIP χάλυβα των θερμικών κατεργασιών 2 ($\sigma_e=350$ MPa) και 3 ($\sigma_e=466$ MPa), παρουσίασαν αμφότερα χαμηλότερα όρια κόπωσης από αυτά του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης ($\sigma_e=625$ MPa).

Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, που προκύπτει από τις δοκιμές κόπωσης, αφορά την συμπεριφορά των χάλυβων TRIP 700 σε υψηλές τάσεις. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα S-N (διαγράμματα 6-11 και 6-12), όταν η μέγιστη τάση κόπωσης γίνεται

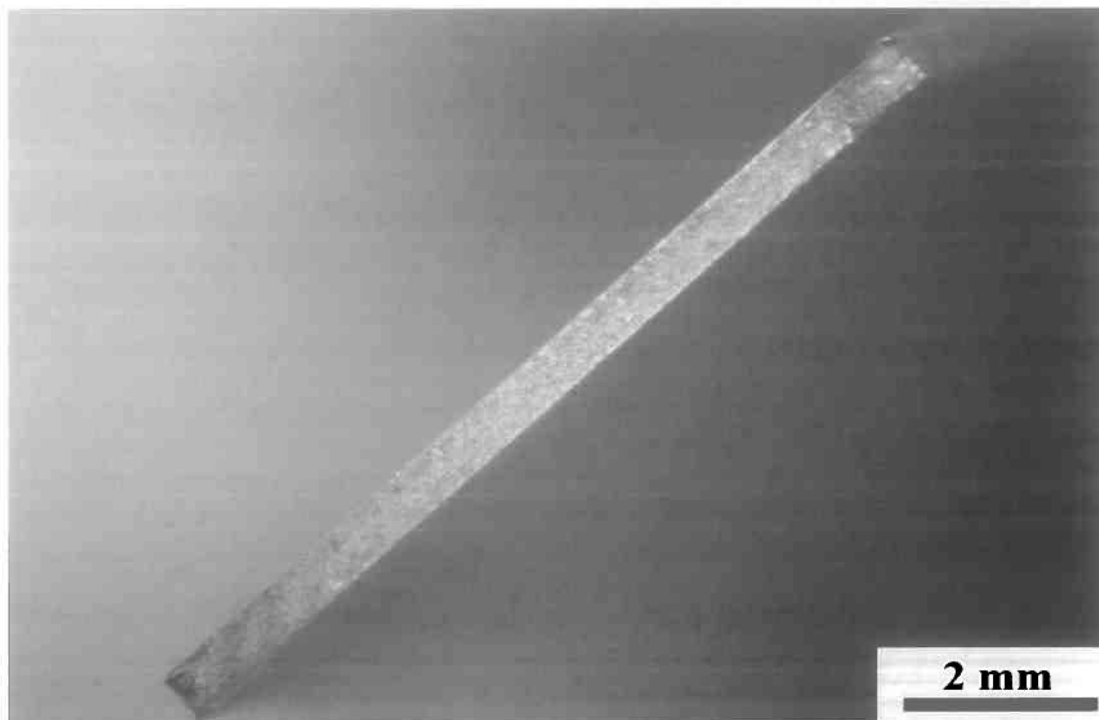
ίση με το όριο διαρροής του υλικού, παρατηρείται, σε αντίθεση με το αναμενόμενο, μια αύξηση της αντίστασης του υλικού στην βλάβη κόπωσης. Παρατηρείται δηλαδή μία αύξηση της διάρκειας ζωής συγκριτικά με τάσεις που βρίσκονται λίγο κάτω από το όριο διαρροής του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή αποκλίνει σημαντικά από την αναμενόμενη συμπεριφορά μεταλλικών κραμάτων που σε επίπεδα τάσεων κοντά στο όριο διαρροής υπόκεινται σε πλαστικές παραμορφώσεις (συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης), με αποτέλεσμα να έχουν μικρή διάρκεια ζωής. Το αίτιο μπορεί να αναζητηθεί ενδεχομένως στη φύση των χαλύβων TRIP, οι οποίοι, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε συνθήκες πλαστικής παραμόρφωσης παρουσιάζουν μαρτενσιτικό μετασχηματισμό με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντοχή τους. Για την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων σε σχέση με την συμπεριφορά κόπωσης των χαλύβων TRIP χρειάζεται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση.

Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες επιφανειών θραύσης των δοκιμών ανά υλικό, από τις δοκιμές κόπωσης και εφελκυσμού, όπως ελήφθησαν από το στερεοσκόπιο. Οι φωτογραφίες αυτές περιλαμβάνουν κατόψεις των δοκιμών και όψεις των επιφανειών θραύσης από πάνω, για να φαίνεται σε κάθε περίπτωση το είδος της επιφάνειας, ο σχηματισμός, η διάδοση και η διεύθυνση της ρωγμής καθ' όλο το μήκος και το πλάτος της επιφάνειας θραύσης.

Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1 (δοκίμιο2-εφελκυσμός)

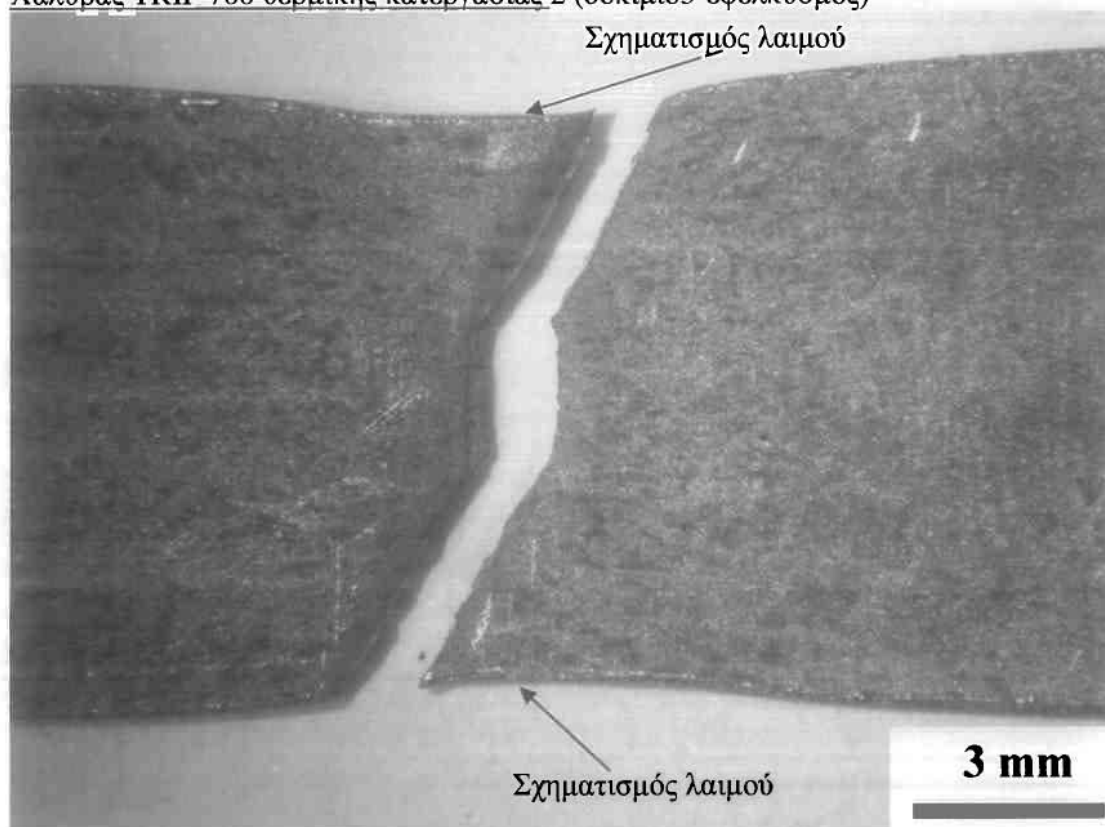


Εικ. 6-1: Κάτοψη χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1 (δοκίμιο2-εφελκυσμός)

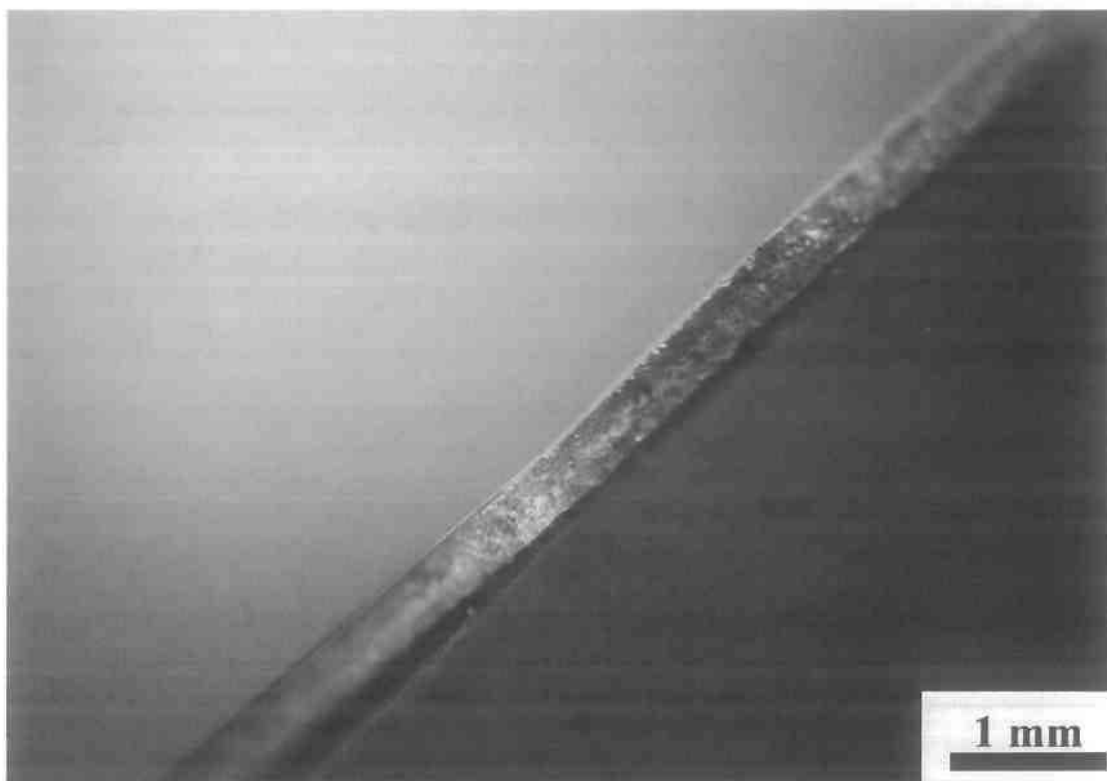


Εικ. 6-2: Επιφάνεια θραύσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 1 (δοκίμιο2-εφελκυσμός)

Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (δοκίμιο3-εφελκυσμός)

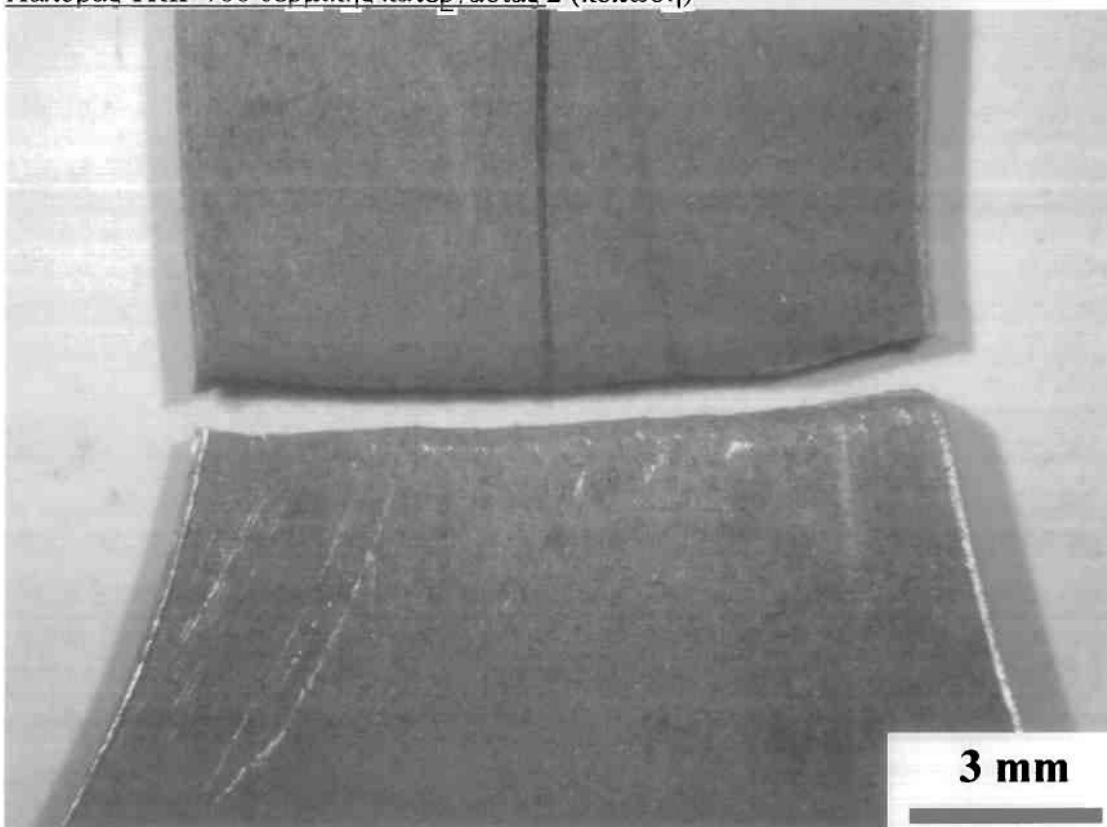


Εικ. 6-3: Κάτοψη χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (δοκίμιο3-εφελκυσμός)

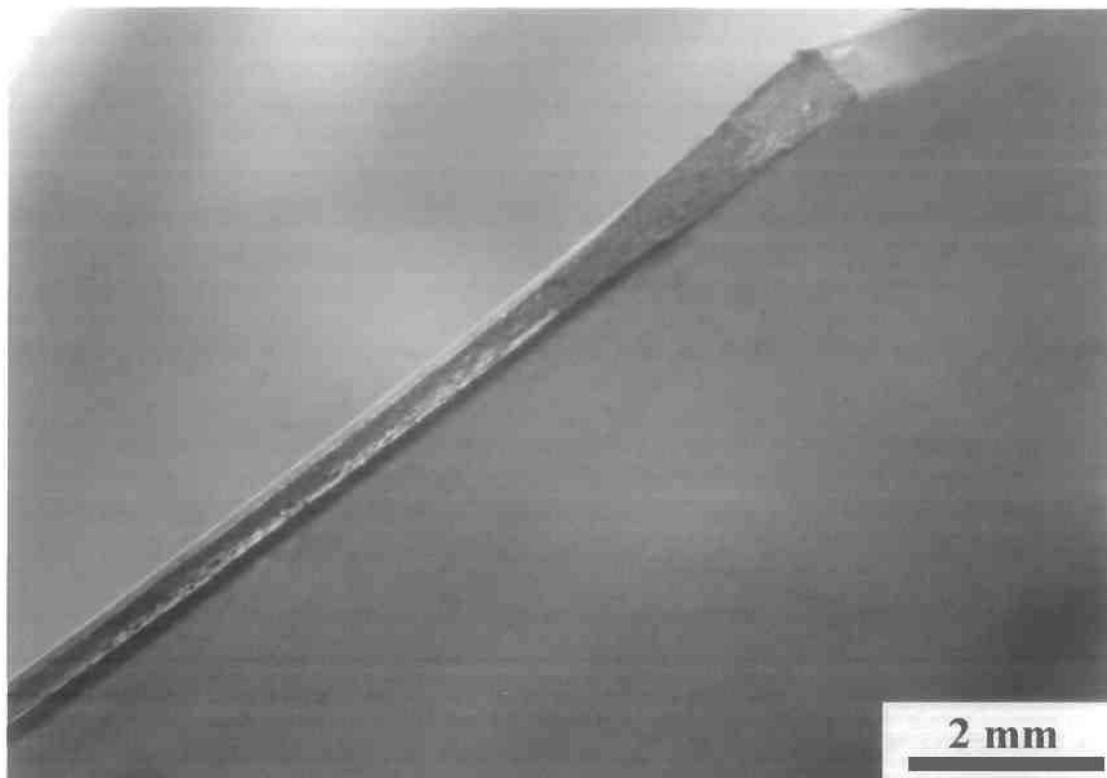


Εικ. 6-4: Επιφάνεια θραύσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (δοκίμιο 3-εφελκυσμός)

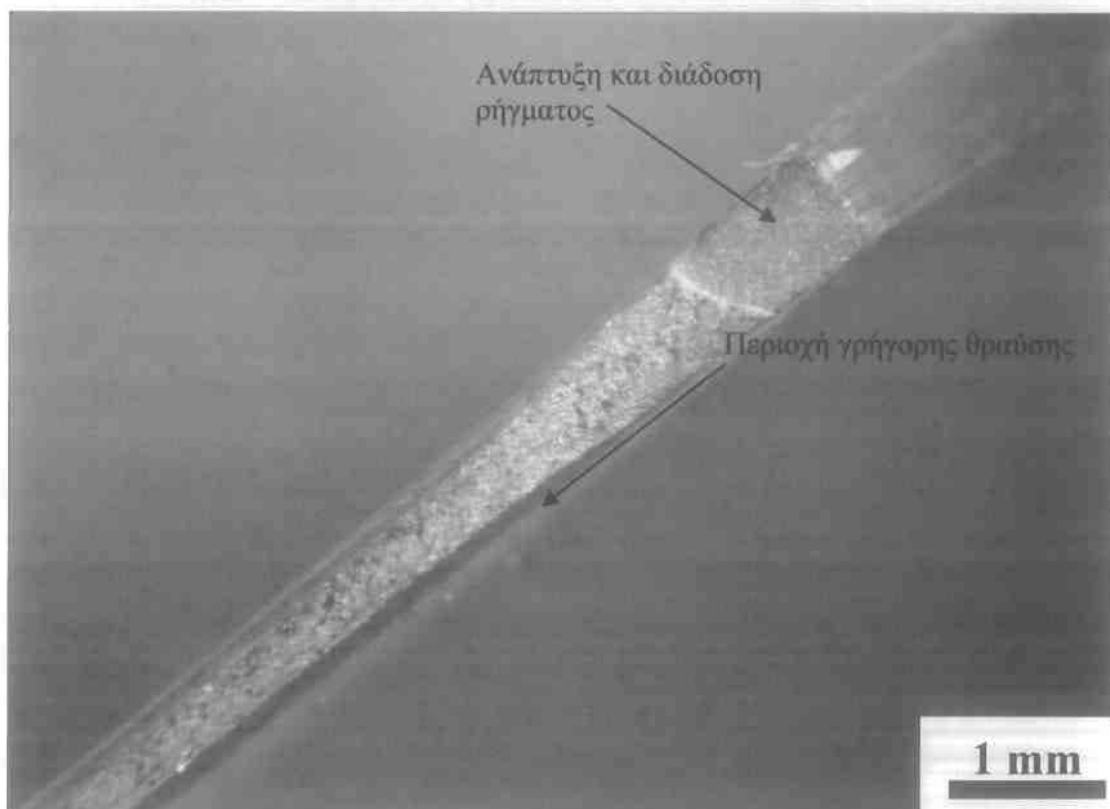
Χάλυβας TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (κόπωση)



Εικ. 6-5: Κάτοψη χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (κόπωση)

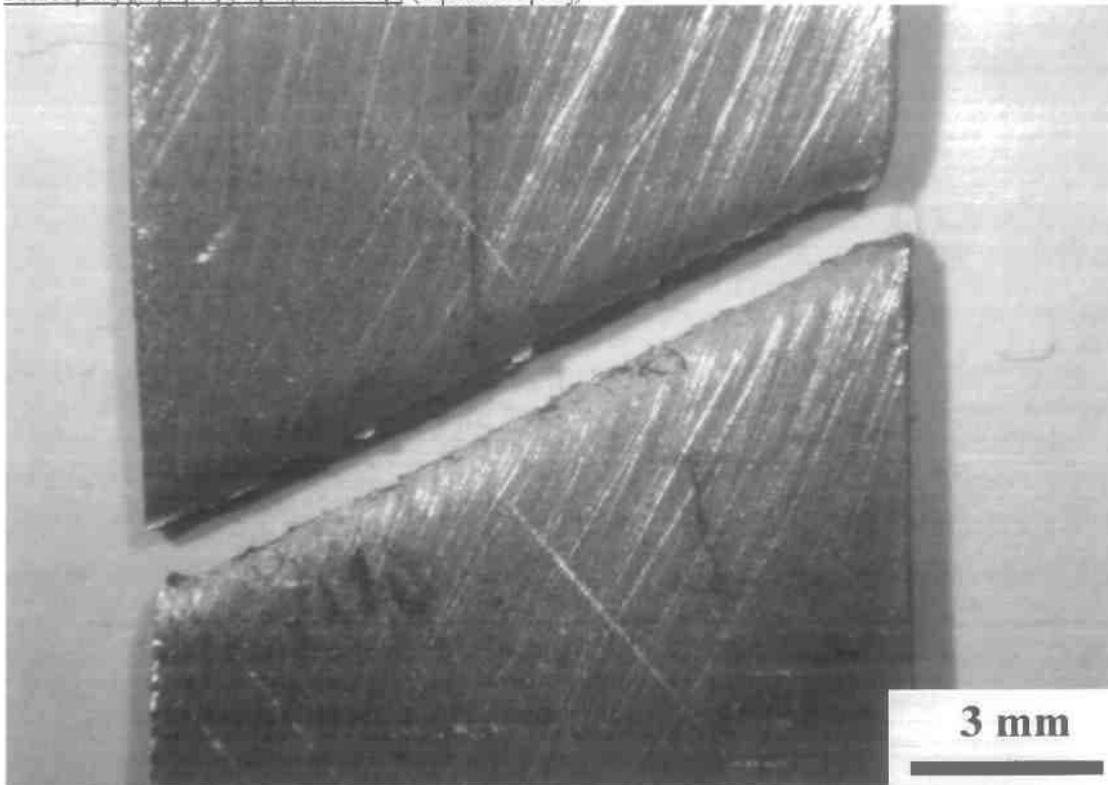


Εικ. 6-6: επιφάνεια θραύσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 (κόπωση)

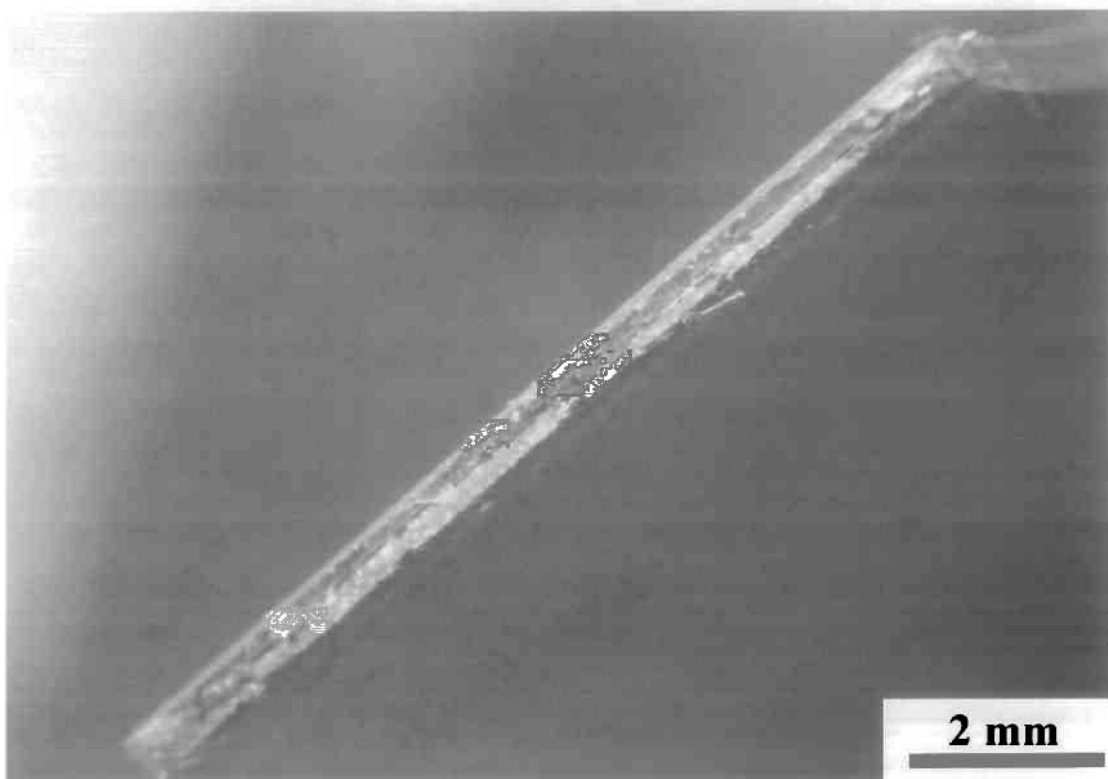


Εικ. 6-7: Επιφάνεια θραύσης χάλυβα TRIP 700 θερμικής κατεργασίας 2 σε μεγέθυνση (κόπωση)

Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (εφελκυσμός)

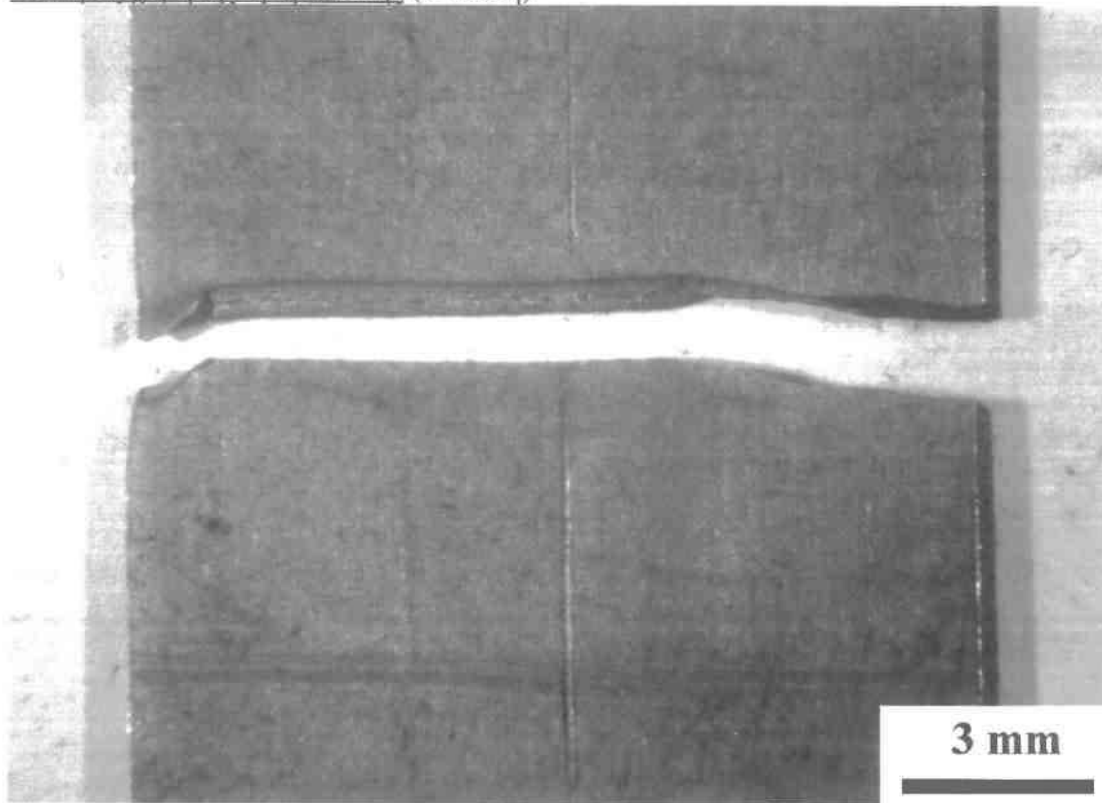


Εικ. 6-8: Κάτοψη χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης (εφελκυσμός)

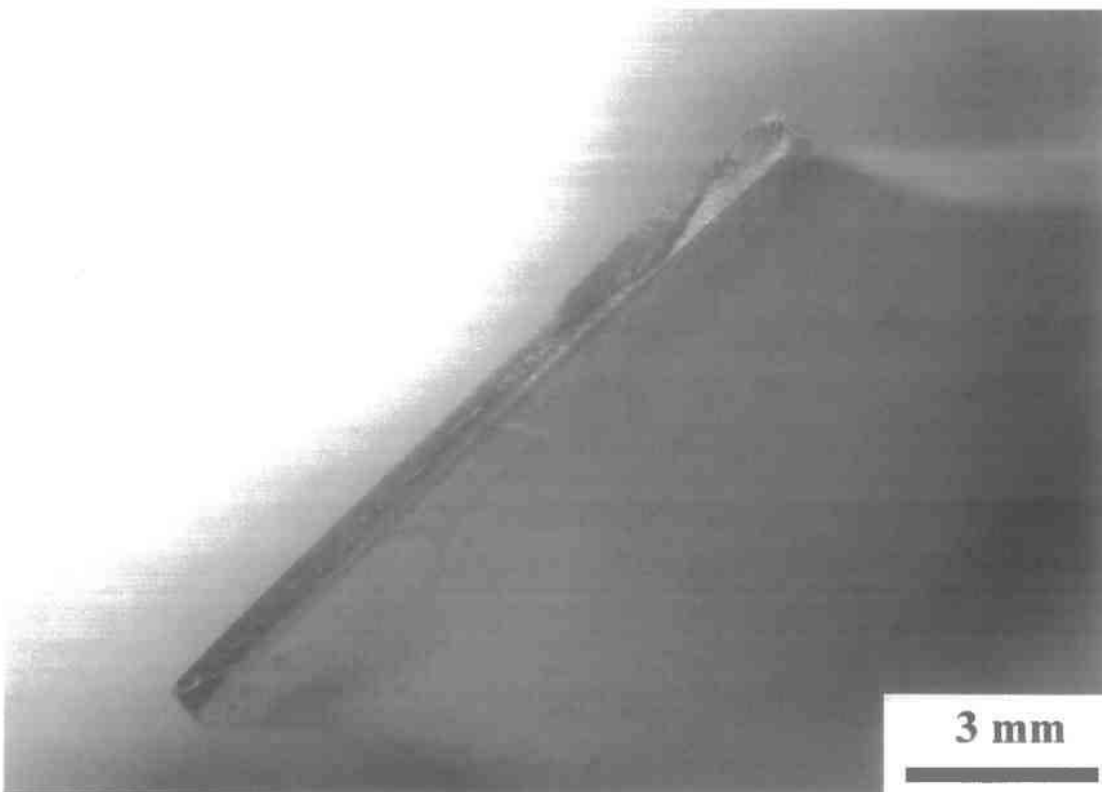


Εικ. 6-9: Επιφάνεια θραύσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης (εφελκυσμός)

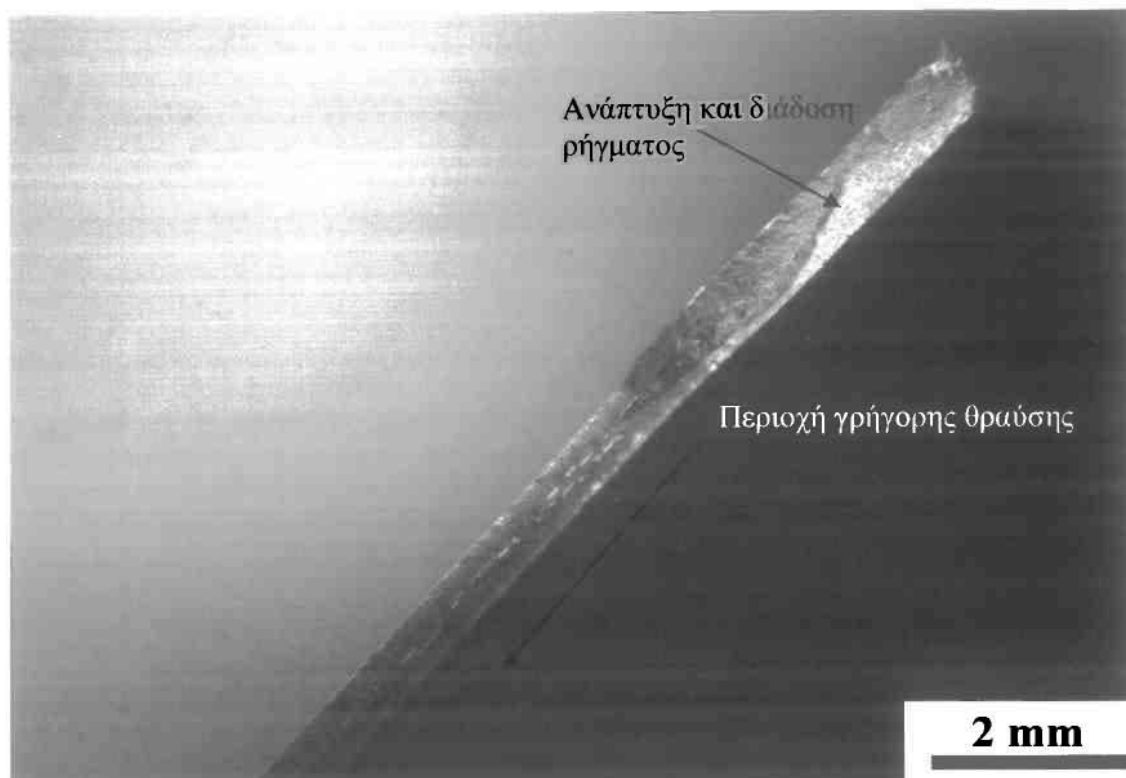
Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (κόπωση)



Εικ. 6-10: άτοψη χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης (κόπωση)



Εικ. 6-11: Επιφάνεια θραύσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης (κόπωση)



Εικ. 6-12: Επιφάνεια θραύσης χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης σε μεγέθυνση (κόπωση)

Παρατήρηση επιφανειών θραύσης

Σχετικά με τους χάλυβες TRIP 700 με θερμική κατεργασία 1 και 2 παρατηρείται σημαντική παραμόρφωση (λαιμός) στην περιοχή θραύσης, που υποδηλώνει την όλκιμη συμπεριφορά κατά τον εφελκυσμό (εικ. 6-3). Παράλληλα εξετάζοντας την επιφάνεια θραύσης παρατηρείται σχηματισμός χειλών από διάτμηση (sheer lips), που είναι ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της όλκιμης συμπεριφοράς. Στην εικόνα 6-8 αναπαρίσταται η περιοχή θραύσης του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, που παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιοχή λαιμού. Ο τύπος θραύσης (σε διάτμηση) εικ. 6-8 σχετίζεται με τον μεγάλο λόγο πλάτους/πάχους που προκαλεί τέτοιου είδους αστοχίες σε λεπτά ελάσματα κατά τον εφελκυσμό. [9]

Από τις επιφάνειες θραύσης των δοκιμών κόπωσης χαρακτηριστικές είναι οι εικόνες 6-7 και 6-12, όπου φαίνονται οι περιοχές εκκίνησης και εξέλιξης της ρωγμής, καθώς και οι περιοχές γρήγορης θραύσης. Στα δοκίμια κόπωσης η επιφάνεια θραύσης είναι όπως αναμένεται κάθετη στα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία.

6.4 Γενικά συμπεράσματα

Κατά την πειραματική μελέτη της παρούσας εργασίας μπορούν να συναχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Όσον αφορά στα πειράματα του εφελκυσμού και στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, επαληθεύτηκε ο καλύτερος συνδυασμός αντοχής και ολκιμότητας των χαλύβων TRIP σε σχέση με τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης. Εντούτοις αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη παραμόρφωση θραύσης A_{50} , που παρουσίασαν οι χάλυβες TRIP, σε σχέση με την αντίστοιχη του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης, παρότι οι τιμές του ορίου διαρροής τους $R_{p0.2}$ και μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό R_m ήταν μικρότερες των αντίστοιχων του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.

Όσον αφορά στα πειράματα της κόπωσης, πρέπει να αναφερθεί πως οι χάλυβες TRIP παρουσίασαν μικρότερα όρια κόπωσης από τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης.

Ιδιαίτερης προσοχής χρίζει η συμπεριφορά κόπωσης των χαλύβων TRIP, οι οποίοι παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές στην διάρκεια ζωής τους σε μικρό εύρος τάσεων σ_{max} σε αντίθεση με τον χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης. Επίσης αξιοσημείωτο είναι το παράδοξο της συμπεριφοράς των εν λόγω χαλύβων στην κόπωση, όπου για τιμές τάσης κοντά στο όριο διαρροής, το υλικό φαίνεται να αυξάνει την αντοχή του όταν αυξάνονται οι τάσεις, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι παίζει σημαντικό ρόλο ο μετασχηματισμός του παραμένοντα ωστενίτη του υλικού σε μαρτενσίτη. Σχετικά με το φαινόμενο αυτό και τον ρόλο που διαδραματίζει στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού, θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα παραπάνω αποτελούν ενδείξεις που προέκυψαν από μια πρώτη σειρά πειραμάτων με χρήση μικρού αριθμού δοκιμίων. Για την περεταίρω μελέτη του φαινομένου απαιτείται επιπλέον πειραματική διερεύνηση.

Κεφάλαιο 7

Βιβλιογραφία

1. Αν. Ι. Κατσαμάς, Γρ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, “Μηχανική συμπεριφορά υλικών”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2005
2. Γρ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, “Φυσική Μεταλλουργία”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2007
3. Γρ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, “Φυσική Μεταλλουργία Θεμελιώδεις Αρχές”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2000
4. Γρ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Αν.Ι. Κατσαμάς “Εισαγωγή στην τεχνολογία υλικών”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2003
5. Κ. Κονοφάγου, “Μεταλλογνωσία”, Τόμος 1, “Τα μέταλλα”, Αθήνα 1964
6. Ηλεκτρονική Εγκυκλοπαίδεια Δομή, 2006
7. MTS 810 & 858 Material Testing Systems manual, ιστοσελίδα: www.mts.com
8. Instron FastTrack™ 8800 Servohydraulic Test Systems manual, ιστοσελίδα: www.Instron.com
9. “ASM Metals Handbook volume 11 – Failure analysis and Prevention”, Eds. William T.Becker and Roch T.Shipley, 2002
10. ASTM E466-82, “Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”, *Annual Book of ASTM Standards, Metals –Test Methods and Analytical Procedures*, Section 3, Vol. 03.01, Metals-Mechanical Testing; Elevated Low-Temperature Tests, Metallography, 1994
11. ASTM E8M, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, *Annual Book of ASTM Standards, Metals –Test Methods and Analytical Procedures*, Section 3, Vol. 03.01, Metals-Mechanical Testing, 2001
12. S.E.P 1240 “Testing and Documentation Guideline for the Experimental Determination of Mechanical Properties of Steel Sheets for CAE-Calculations” 1st Edition, 2006
13. ASTM E92-82(2003) 2nd Edition, “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”, ASTM International, 2003
14. Σελίδες του διαδικτύου:
<http://steel.keytometals.com>