

Διπλωματική Εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
Με ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Τσατταλιός Ιωάννης

Επιβλέπων: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης

Βόλος 2017

©2017 Ιωάννης Τσατταλιός

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

Εγκρίθηκε από τα μέλη της τριμελούς επιτροπής

Πρώτος Εξεταστής
(επιβλέπων)

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Αράβας Νικόλαος
Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα και κύρια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα και Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη για το ενδιαφέρον του γύρω από το θέμα της διπλωματικής εργασίας, τις συμβουλές και την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπο μου.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κ.κ. Νικόλαο Αράβα και Γρ. Χαϊδεμενόπουλο, καθώς και το Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών και το Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος που μου παραχώρησαν την άδεια για τη χρησιμοποίηση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Ακόμη, οφείλω ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτωρ Πέτρο Χριστοδούλου για την καθοδήγηση, τις συμβουλές του και τον χρόνο που αφιέρωσε για την διεξαγωγή μέρους των πειραμάτων.

Πέρα από τη βοήθεια των παραπάνω ανθρώπων η επιτυχής κατάληξη της προσπάθειάς μου θα ήταν πολύ δύσκολη χωρίς τη σημαντικότερη οικονομική υποστήριξη του Κοινοφελούς Ιδρύματος «Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης». Χάρη στην υποτροφία που έλαβα για πέντε χρόνια στάθηκε δυνατή η ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου.

Ευχαριστίες αρμόζουν και στους φίλους μου Χάρη, Παναγιώτη, Τάσο, Γιάννη, Κωνσταντίνο και Γιάννη, για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια και τη στήριξη που μου χάρισαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου. Τους γονείς μου Γιώργο και Ολυμπία για όλα όσα μου έχουν προσφέρει.

Περίληψη

Στην εργασία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής θερμοκρασίας M_s^σ σε χάλυβες TRIP. Πραγματοποιήθηκε προετοιμασία των διαλυμάτων θερμοκρασιών και σχεδιασμός της κυψέλης ψύξης που τοποθετήθηκε το δοκίμιο εφελκυσμού για την φόρτιση-αποφόρτιση του στην πλαστική περιοχή σύμφωνα με την τεχνική SS-VT-TT. Στην συνέχεια προσδιορίστηκε η θερμοκρασία M_s^σ χάλυβα TRIP που περιέχει αλουμίνιο και διερευνήθηκε η επίδραση των παραμέτρων της θερμικής κατεργασίας στην τιμή της θερμοκρασίας M_s^σ . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χαρακτηριστική τιμή της M_s^σ εξαρτάται από την θερμική κατεργασία και επηρεάζει την μικροδομή του υλικού.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
1.2 Οι χάλυβες TRIP στην αυτοκινητοβιομηχανία	13
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	15
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	16
2.1 Χάλυβες TRIP.....	16
2.2 Η μικροδομή των χαλύβων TRIP.....	17
2.3 Θερμική κατεργασία χάλυβα TRIP	18
2.4 Φαινόμενο TRIP	21
2.5 Χημικό δυναμικό μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.....	23
2.6 Πλαστικότητα μετασχηματισμού	24
Κεφάλαιο 3 Πειραματική διαδικασία.....	26
3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή κυψέλης	26
3.2 Μελέτη και προετοιμασία διαλυμάτων ψύξης.....	27
3.3 Καταγραφή παραμορφώσεων.....	28
3.4 Δοκιμές εφελκυσμού	30
3.5 Θερμικές κατεργασίες χάλυβα TRIP 700.....	31
Κεφάλαιο 4 Πειραματικά αποτελέσματα.....	32
4.1 Μετρήσεις τιμών θερμοκρασίας	32
4.1.1 Πείραμα με διάλυμα 100% αιθυλενογλυκόλη.....	32
4.1.2 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης	33
4.1.3 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης	34
4.1.4 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης	35
4.1.5 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης.....	36
4.1.6 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-νερού με την προσθήκη αλατιού	38
4.1.7 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος βενζίνης-ξηρού πάγου	39
4.1.8 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης σε μεγαλύτερο όγκο	41
4.1.9 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-νερού	42

4.2 Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού	43
4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση οπτικού επιμηκυνσιομέτρου-επιμηκυνσιομέτρου επαφής.....	43
4.2.2 Επίδραση μηχανουργικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες	44
4.2.3 Επίδραση θερμικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες	45
4.2.4 Αποτελέσματα πειραμάτων με την μέθοδο SS-VT-TT σε χάλυβα TRIP 700	46
4.2.5 Αποτελέσματα πειραμάτων φορτίσεων-αποφορτίσεων σε χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία Α.....	52
4.2.6 Αποτελέσματα πειραμάτων φορτίσεων-αποφορτίσεων σε χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία Β.....	58
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	67
Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία	68

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αντοχή εφελκυσμού και ολική επιμήκυνση των χαλύβων TRIP σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες χαλύβων υψηλής αντοχής.....	13
Εικόνα 2: Σύγκριση της αντοχής σε εφελκυσμό των χαλύβων HSLA, DP, TRIP.	14
Εικόνα 3: Η δομή του σώματος ενός αυτοκινήτου, η σχέση αντοχής των μετάλλων σε θραύση που χρησιμοποιούνται καθώς και το ποσοστό.....	17
Εικόνα 4: Διάγραμμα θερμικών κατεργασιών χαλύβων TRIP.....	19
Εικόνα 5: Διαδικασία παραγωγής ενός τυπικού χάλυβα TRIP θερμής ελάσεως.....	20
Εικόνα 6: Παραμόρφωση πλέγματος και αντιστοιχία που προτείνεται για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό από το FCC→BCC (BCT).	22
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση (α) μετατόπισης του πλέγματος (b) τυχαίων μετατοπίσεων.	22
Εικόνα 8: Διάγραμμα ελεύθερης ενέργειας σε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.	23
Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση μεταξύ Stress-assisted και Strain-induced μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.	25
Εικόνα 10: Κυψέλη με ενσωματωμένο δοκίμιο εφελκυσμού.....	27
Εικόνα 11: Κυψέλη με ενσωματωμένο δοκίμιο εφελκυσμού.....	27
Εικόνα 12: Διαλύματα για επίτευξη θερμοκρασιών.	28
Εικόνα 13: Ακριβής αναλογία διαλυμάτων.	28

Εικόνα 14: Δοκίμιο εφελκυσμού τοποθετημένο πάνω στην μηχανή εφελκυσμού με ενσωματωμένη την κυψέλη.	29
Εικόνα 15: Πειραματική διάταξη.	29
Εικόνα 16: Λογισμικό καταγραφής παραμόρφωσης της Limes.	29
Εικόνα 17: Σχέδιο δοκιμίων εφελκυσμού.	30
Εικόνα 18: Θερμικές κατεργασίες που ακολουθήθηκαν.	31

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μέσος όρος γραμμαρίων ξηρού πάγου.	27
Πίνακας 2: Χημική σύσταση χάλυβα TRIP 700 VOESTALPINE.	31
Πίνακας 3: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με διάλυμα 100% αιθυλενογλυκόλης.	32
Πίνακας 4: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{Eth.Glyc.})/(V_{EtOH} + V_{Eth.Glyc.}) = 0.96$	33
Πίνακας 5: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{Eth.Glyc.})/(V_{EtOH} + V_{Eth.Glyc.}) = 0.89$	34
Πίνακας 6: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{Eth.Glyc.})/(V_{EtOH} + V_{Eth.Glyc.}) = 0.828$	35
Πίνακας 7: Μέση πυκνότητα πάγου.	36
Πίνακας 8: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης 1:1.	36
Πίνακας 9: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης 0.5:1.	37
Πίνακας 10: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης 0.7:1.	37
Πίνακας 11: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-κορεσμένου σε αλάτι νερού.	38
Πίνακας 12: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος βενζίνης-ξηρού πάγου.	39
Πίνακας 13: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος βενζίνης-ξηρού πάγου.	41
Πίνακας 14: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{Eth.Glyc.})/(V_{EtOH} + V_{Eth.Glyc.}) = 0.96$	42
Πίνακας 15: Μηχανικές ιδιότητες Trip 700, Heat treatment A και Heat treatment B.	45

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	32
Διάγραμμα 2: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	33
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	34
Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	35
Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	37
Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	38
Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	40
Διάγραμμα 8: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	41
Διάγραμμα 9: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.....	42
Διάγραμμα 10: Σύγκριση αποτελεσμάτων συμβατικού επιμηκυνσιομέτρου-οπτικού επιμηκυνσιομέτρου σε πείραμα εφελκυσμού.....	43
Διάγραμμα 11: Σύγκριση καμπύλης εφελκυσμού δοκιμίων ,που κόπηκαν με laser, με την reference καμπύλη εφελκυσμού του υλικού.....	44
Διάγραμμα 12: Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού TRIP 700, TRIP 700 Treatment A, TRIP 700 Treatment B.	45
Διάγραμμα 13: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 18°C.	46
Διάγραμμα 14: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 11.5°C.	47
Διάγραμμα 15: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 9.3°C.	47
Διάγραμμα 16: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 3.1°C.	48
Διάγραμμα 17: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -3°C.	48
Διάγραμμα 18: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -4.5°C.	49
Διάγραμμα 19: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -7°C.	49

Διάγραμμα 40: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -3°C.	61
Διάγραμμα 41: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -4.6°C.	62
Διάγραμμα 42: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -6.5°C.	62
Διάγραμμα 43: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -8°C.	63
Διάγραμμα 44: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -10°C.	63
Διάγραμμα 45: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -15°C.	64
Διάγραμμα 46: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -20°C.	64
Διάγραμμα 47: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -22°C.	65
Διάγραμμα 48: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -27°C.	65

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

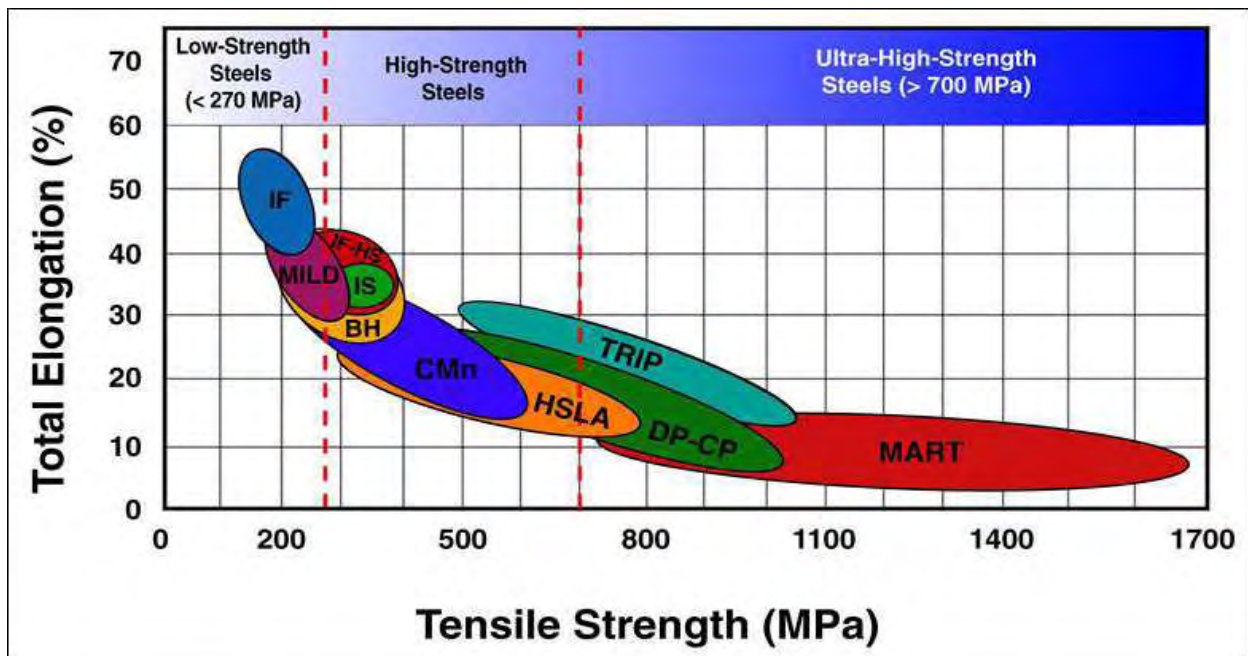
Η ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων χαλύβων TRIP χάλυβες, αυξάνεται συνεχώς, με γνώμονα τον άριστο συνδυασμό της αντοχής και της ολκιμότητας που διαθέτουν. Οι αξιοσημείωτες μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών συνδέονται με την συμπεριφορά της σύνθετης μικροδομής τους, που προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των πλαστικών παραμορφώσεων των φάσεων και του μετασχηματισμού της φάσης του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Η εξήγηση του μηχανισμού του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού εξαιτίας της ελεύθερης ενέργειας, που προκαλείται από μεταβολές της θερμοκρασίας έχει περιγραφεί στις εργασίες Nishiyama, 1971, Wayman και Bhadeshia, 1996. Ως κριτήριο της σταθερότητας του παραμένοντα ωστενίτη υιοθετήθηκε από τους Olson και Brandt η χαρακτηριστική θερμοκρασία M_s^0 κατά την οποία ενεργοποιείται ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Οι μηχανισμοί που προσδίδουν σταθερότητα στον ωστενίτη, σύμφωνα με την εργασία του κ. Χαϊδεμενόπουλου, εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- Τη χημική σύσταση των νησίδων του ωστενίτη
- Το μέγεθος κόκκων του ωστενίτη
- Το όριο διαρροής του διεσπαρμένου υπολειπόμενου ωστενίτη

Ανάλογα με τα κραματικά στοιχεία και την ποσότητα που περιέχονται στον ωστενίτη, υπάρχει μεταβολή της χημικής συνεισφοράς στην κινητήρα δύναμη για μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Το μέγεθος των σωματιδίων του ωστενίτη επηρεάζει την πιθανότητα να βρεθεί μια θέση πυρήνωσης από την οποία θα ξεκινήσει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Η εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υλικό επηρεάζει την πορεία του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Δηλαδή, επειδή ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός συνοδεύεται από διόγκωση του πλέγματος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ανάλογα με την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υλικό (εφελκυσμός, θλίψη κλπ.) ο μετασχηματισμός να ευνοείται ή να εμποδίζεται από τις μηχανικές τάσεις. Επίσης στην εργασία (κ. Χαϊδεμενόπουλος και κ. Παπαδημητρίου) μελέτησαν τη σχέση του ποσοστού του παραμένοντος ωστενίτη με τις μηχανικές ιδιότητες, σε χαμηλά κραματωμένους χάλυβες TRIP [1,2,3].

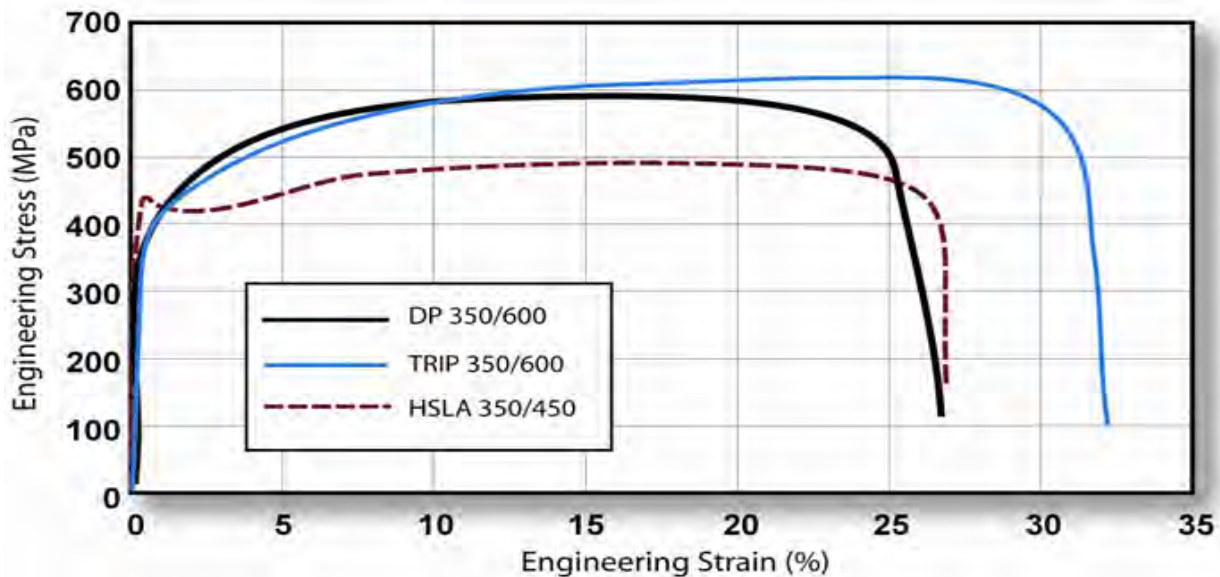
1.2 Οι χάλυβες TRIP στην αυτοκινητοβιομηχανία

Τα τελευταία χρόνια τα αυτοκίνητα παίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ζωή μας με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάγκη μείωσης του κόστους παραγωγής τους. Ταυτόχρονα επιζητούνται λύσεις με σκοπό τη μείωση του κόστους των καυσίμων και τη βελτίωση της ασφάλειας. Η αυτοκινητοβιομηχανία σήμερα δραστηριοποιείται μέσα σε ένα πλαίσιο περιορισμών, όπως χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων καθώς και ανάπτυξη ελαφρότερων οχημάτων. Έτσι προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης προηγμένων υλικών με υψηλή αντοχή, διαμορφωσιμότητα και λογικό κόστος παραγωγής. Οι χάλυβουργίες, τα τελευταία 20 χρόνια έχουν δημιουργήσει νέες κατηγορίες χάλυβων, όπως οι χάλυβες υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης (HSLA) καθώς και οι χάλυβες υψηλής αντοχής χωρίς στοιχεία παρεμβολής (Interstitial Free High Strength Steels, IF-HS) και οι διφασικοί χάλυβες (Dual-Phase Steels, DP). Η παγκόσμια βιομηχανία αυτοκινήτων, από το 2000, έχει εισάγει σημαντικές βελτιώσεις στους χάλυβες και ειδικότερα με την εφαρμογή των προηγμένων χάλυβων υψηλής αντοχής (AHSS) που περιλαμβάνουν τους διφασικούς χάλυβες (DP) και τους χάλυβες αυξημένης πλαστικότητας (TRIP). Στην εικόνα 1 παρατηρούμε ότι οι μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων TRIP διαφέρουν κατά πολύ από εκείνες των συνηθισμένων χάλυβων υψηλής αντοχής όπως οι χάλυβες HSLA, IF και DP καθώς συνδυάζουν σε υψηλό βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 1: Αντοχή εφελκυσμού και ολική επιμήκυνση των χάλυβων TRIP σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες χάλυβων υψηλής αντοχής.

Οι χάλυβες HSLA οφείλουν την αντοχή τους στη σκλήρυνση με κατακρήμνιση αλλά κυρίως στην βελτίωση των ιδιοτήτων τους μέσω της εκλέπτυνσης των κόκκων, παρουσιάζοντας με αυτό τον τρόπο έναν αρκετά καλό συνδυασμό αντοχής και επιμήκυνσης. Αντιθέτως, οι διφασικοί χάλυβες (DP steels) οφείλουν την αντοχή τους στο γεγονός ότι αποτελούνται από μια μικροδομή δύο φάσεων (70-95% φερρίτης και 5-30% μαρτενσίτης) με διαφορετική σκληρότητα και συμπεριφορά κατά την πλαστική παραμόρφωση. Οι χάλυβες χωρίς στοιχεία παρεμβολής, highstrength interstitial free steels-IF-HS steels, οφείλουν την αντοχή τους αλλά και την υψηλή διαμορφωσιμότητα τους στη σκλήρυνση με κατακρήμνιση καρβιδίων και νιτριδίων. Την καλύτερη διαμορφωσιμότητα σήμερα, παρουσιάζουν οι χάλυβες IF-HS, αλλά η αντοχή τους είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκρίνοντάς την με τις προηγούμενες κατηγορίες με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την βιομηχανία αυτοκινήτου. Στον αντίποδα, οι διφασικοί χάλυβες παρουσιάζουν ένα καλύτερο συνδυασμό αντοχής και ολκιμότητας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται από την αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή των πλευρικών μπαρών ασφαλείας στις πόρτες και στην κατασκευή των ζαντών. Οι χάλυβες TRIP προσφέρουν έναν πολύ καλύτερο συνδυασμό ολκιμότητας και αντοχής σε εφελκυσμό που οφείλεται στην πλαστικότητα μετασχηματισμού του υπολειπόμενου ωστενίτη, σε μαρτενσίτη, κάνοντας έτσι τους χάλυβες αυτούς ιδιαίτερα ελκυστικούς σε εφαρμογές ψυχρής διαμόρφωσης όπως η βαθεία κοίλανση. Οι χάλυβες TRIP οι οποίοι έχουν αντοχή μεγαλύτερη από 600 MPa είναι περισσότερο διαμορφώσιμοι εξαιτίας του φαινομένου TRIP. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο ο μετασταθής ωστενίτης που υπάρχει σε θερμοκρασία δωματίου μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη κατά την ψυχρή διαμόρφωση.



Εικόνα 2: Σύγκριση της αντοχής σε εφελκυσμό των χαλύβων HSLA, DP, TRIP.

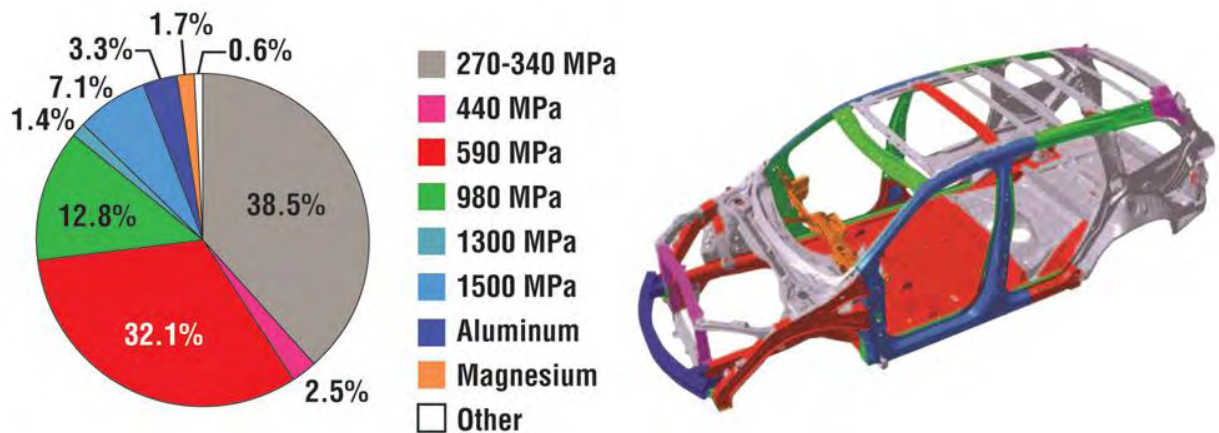
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής θερμοκρασίας M_s^σ σε χάλυβες TRIP και η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης παραμέτρων θερμικής κατεργασίας χάλυβα TRIP 700 στην τιμή της M_s^σ . Η εργασία αποτελείται από δύο τμήματα. Στο πρώτο, προετοιμάσθηκαν κατάλληλα διαλύματα για την ψύξη δοκιμίων σε διάφορες θερμοκρασίες και σχεδιάσθηκε και κατασκευάσθηκε ειδική κυψέλη ψύξης για την εκτέλεση πειραμάτων σύμφωνα με την μέθοδο SS-VT-TT [1]. Στο δεύτερο πραγματοποιήθηκαν θερμικές κατεργασίες σε χάλυβα TRIP και μελετήθηκε η επίδραση παραμέτρων όπως ο χρόνος μπεινιτικού μετασχηματισμού στην τιμή της θερμοκρασίας M_s^σ .

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Χάλυβες TRIP

Οι χάλυβες TRIP οφείλουν την ονομασία τους στο φαινόμενο TRIP δηλαδή στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό που προκαλείται εξαιτίας της άσκησης μηχανικής τάσεως στο υλικό [4]. Η μικροδομή τους αποτελείται κατά κύριο λόγο από φερρίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Επιπλέον εκτός από το ελάχιστο ποσοστό (5%) του παραμένοντα ωστενίτη παρατηρούνται με μικρά κλάσματα όγκου σκληρότερες φάσεις όπως μπαινίτης και μαρτενσίτης [5,6]. Ο χάλυβας TRIP αρχικά έχει ένα χαμηλό ποσοστό σκληρών φάσεων σε σχέση με τον χάλυβα DP. Οι TRIP χάλυβες χρησιμοποιούν υψηλότερα ποσοστά προσθήκης άνθρακα σε σχέση με τους διφασικούς χάλυβες με σκοπό να μειώσουν τη θερμοκρασία στην οποία ξεκινάει να μετασχηματίζεται ο μαρτενσίτης χαμηλότερα από τη θερμοκρασία που διαμορφώνεται η φάση του υπολειπόμενου ωστενίτη. Κατά τη διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού η κατακρήμνιση των καρβιδίων πρέπει να αποφεύγεται. Το πυρίτιο και το αλουμίνιο χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η κατακρήμνιση των καρβιδίων στην μπαινιτική περιοχή. Το επίπεδο παραμόρφωσης στο οποίο ο υπολειπόμενος ωστενίτης αρχίζει να μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη μπορεί να υπολογιστεί με τη ρύθμιση της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Σε χαμηλότερες περιεκτικότητες σε άνθρακα, ο παραμένον ωστενίτης αρχίζει να μετασχηματίζεται σχεδόν αμέσως κατά την παραμόρφωση, αυξάνοντας το βαθμό εργοσκληύρυνσης και τη διαμορφωσιμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διαμόρφωσης λόγω του φαινομένου TRIP [7,8,9]. Σε υψηλότερες περιεκτικότητες σε άνθρακα, ο υπολειπόμενος ωστενίτης είναι πιο σταθερός και ξεκινά να μετασχηματίζεται σε επίπεδα παραμόρφωσης πέραν από εκείνα που παράγονται κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης. Σε αυτές τις περιεκτικότητες άνθρακα ο υπολειπόμενος ωστενίτης παραμένει σταθερός έως το τελικό μέρος, μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια κάποιας επόμενης παραμόρφωσης, όπως κατά τη διάρκεια σύγκρουσης. Επομένως οι χάλυβες TRIP μπορούν να κατασκευαστούν ή να προσαρμοστούν με σκοπό να εξασφαλίζουν εξαιρετική διαμορφωσιμότητα για την κατασκευή σύνθετων μερών των προηγμένων χαλύβων υψηλής αντοχής ή να αναδείξουν υψηλή εργοσκληύρυνση κατά τη διάρκεια κάποιας παραμόρφωσης ή να παρέχουν άριστη ενεργειακή απορρόφηση σε περίπτωση σύγκρουσης.



Εικόνα 3: Η δομή του σώματος ενός αυτοκινήτου, η σχέση αντοχής των μετάλλων σε θραύση που χρησιμοποιούνται καθώς και το ποσοστό.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούν και εμπιστεύονται πολυφασικούς χάλυβες στους σκελετούς των αμαξωμάτων τους. Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται ο σκελετός ενός αμαξώματος ενώ με τα σημεία με χρώματα πράσινο, θαλασσί και γαλάζιο αμαξώματος στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί χάλυβες TRIP.

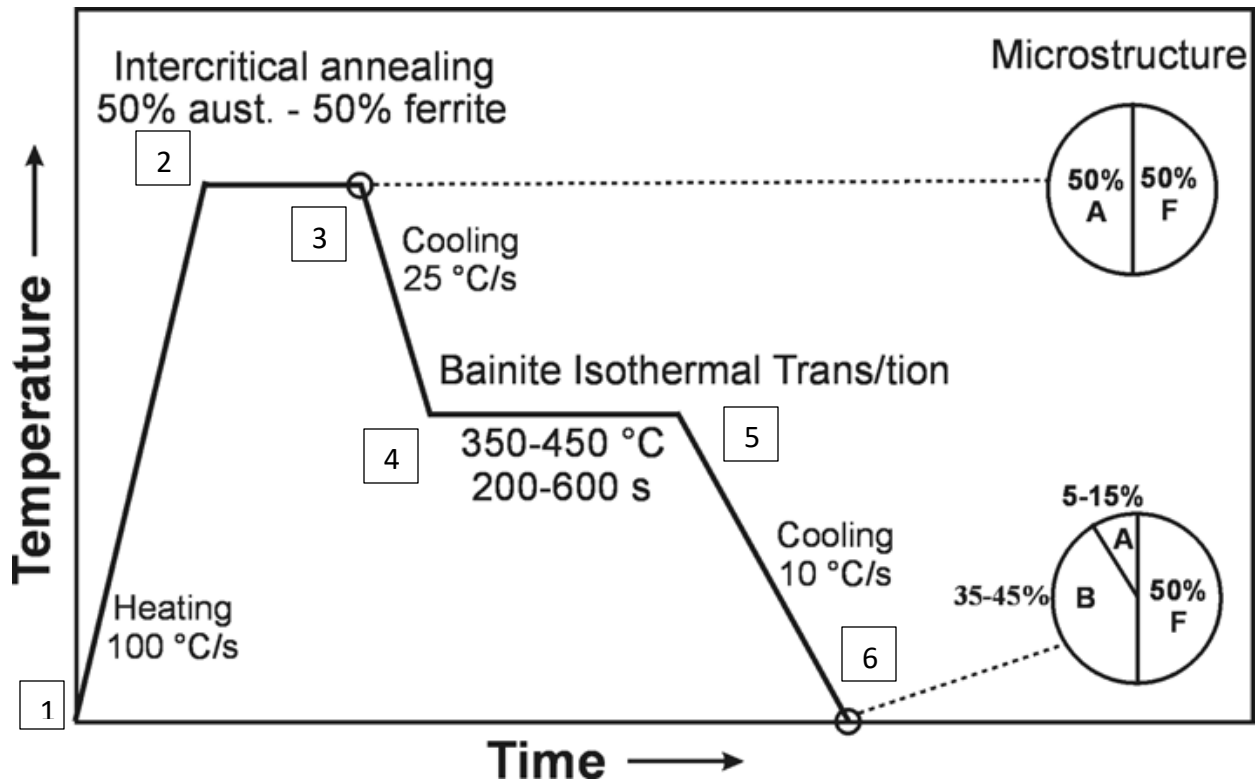
2.2 Η μικροδομή των χάλυβων TRIP

Υπό ιδανικές συνθήκες οι χάλυβες TRIP θα πρέπει να αποτελούνται από μόνο τρεις φάσεις: φερρίτη, μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη. Η μικροδομή εντούτοις περιέχει συχνά δευτερεύουσες ποσότητες καρβιδίων και, ανάλογα με τη χημική σύνθεση και μαρτενσίτη. Η παρουσία μαρτενσίτη και καρβιδίων στη μικροδομή υπονοούν επίσης ότι είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η ακριβής περιεκτικότητα σε άνθρακα της φάσης. Αυτό είναι θεμελιώδους σημασίας αφού οι περισσότερες ιδιότητες των χάλυβων TRIP εξαρτώνται αυστηρά από την περιεκτικότητα του C σε κάθε φάση. Ένας τυπικός χάλυβας TRIP εμπεριέχει άνθρακα (C) σε ποσοστό 0.2-0.4 % κ.β., 1- 2.5% κ.β. μαγγάνιο Mn, και 1.2-2%κ.β. πυρίτιο (Si). Η μικροδομή τους αποτελείται από 50-60%κ.ο. φερρίτη, 20-30%κ.ο. ελεύθερο καρβιδίων μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη σε ποσοστό 10-30%κ.ο.. Εμφανίζεται επίσης και ένα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη.

2.3 Θερμική κατεργασία χάλυβα TRIP

Οι χάλυβες TRIP παράγονται μέσω μιας θερμικής κατεργασίας δύο σταδίων που αποτελείται από ενδοκρίσιμη ανόπτηση (1ο στάδιο) και από ισοθερμοκρασιακή παραμονή στην μπαινιτική περιοχή (2ο στάδιο). Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται τα στάδια παραγωγής των χάλυβων TRIP ψυχρής ελάσεως. Κατά την διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανοπτήσεως δημιουργείται ένα μείγμα δύο φάσεων που αποτελείται από φερρίτη και ωστενίτη ($\alpha+\gamma$). Ακολουθεί ταχεία απόψυξη μέχρι τη θερμοκρασία μπαινιτικού μετασχηματισμού κατά την διάρκεια της οποίας δημιουργείται φερρίτης. Εκεί παραμένει το υλικό για εύλογο χρονικό διάστημα μέχρι να μετασχηματιστεί μέρος του ωστενίτη σε μπαινίτη. Τόσο κατά την διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης όσο και κατά την παραμονή στην μπαινιτική περιοχή ο παραμένων ωστενίτης εμπλουτίζεται σε C. Με αυτό τον τρόπο ο ωστενίτης σταθεροποιείται και παραμένει κατά την περαιτέρω απόψυξη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο ωστενίτης σταθεροποιείται σύμφωνα με τον Bhadeshia [3] εξαιτίας του φαινομένου της “ μη ολοκληρωμένης αντίδρασης ” του μπαινιτικού μετασχηματισμού. Σύμφωνα λοιπόν με την θεωρία αυτή ο μπαινιτικός φερρίτης αναπτύσσεται χωρίς διάχυση (διατμησιακός μετασχηματισμός) ενώ η περίσσεια C εμπλουτίζει τον παραμένοντα ωστενίτη και τον σταθεροποιεί. Η σταθεροποίηση του ωστενίτη παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και πρέπει να επιτευχθεί επιτυχώς, για να αποτρέψει τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό κατά την απόψυξη. Κατά την διάρκεια της επιβολής τάσης (παραμόρφωση) στο υλικό αυτός ο παραμένων ωστενίτης, ο οποίος βρίσκεται σε μετασταθή κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετατρέπεται σε μαρτενσίτη με αντίστοιχη αύξηση της τελικής αντοχής του υλικού.

Στο εμπόριο υπάρχουν δύο κατηγορίες χάλυβων TRIP που διαχωρίζονται ανάλογα με τον διαδικασία παραγωγής τους. Οι χάλυβες ψυχρής έλασης (cold rolled) και οι χάλυβες θερμής έλασης (hot rolled). Στην πρώτη περίπτωση μετά την ψυχρή έλαση θερμαίνεται με γρήγορο ρυθμό σε θερμοκρασία μερικής ωστενιτοποίησης με σκοπό τον σχηματισμό κάποιου ποσοστού ωστενίτη. Το στάδιο αυτό αντιστοιχεί στο πρώτο στάδιο που αναφέραμε παραπάνω της ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Το έλασμα στην συνέχεια ψύχεται με ελεγχόμενο ρυθμό που οδηγεί στον μετασχηματισμό του ωστενίτη αρχικώς σε φερρίτη και στη συνέχεια σε μπαινίτη. Όλη η διαδικασία παραγωγής φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 4 που ακολουθεί.



Εικόνα 4: Διάγραμμα θερμικών κατεργασιών χαλύβων TRIP.

1-2 Θέρμανση: ανακρυστάλλωση, καθίζηση καρβιδίων, διάλυση σεμεντίτη

2-3 Ανόπτηση: Μετασχηματισμός περλίτη και φερρίτη σε ωστενίτη, διαχωρισμός άνθρακα, ανάπτυξη κόκκων, καθίζηση καρβιδίων

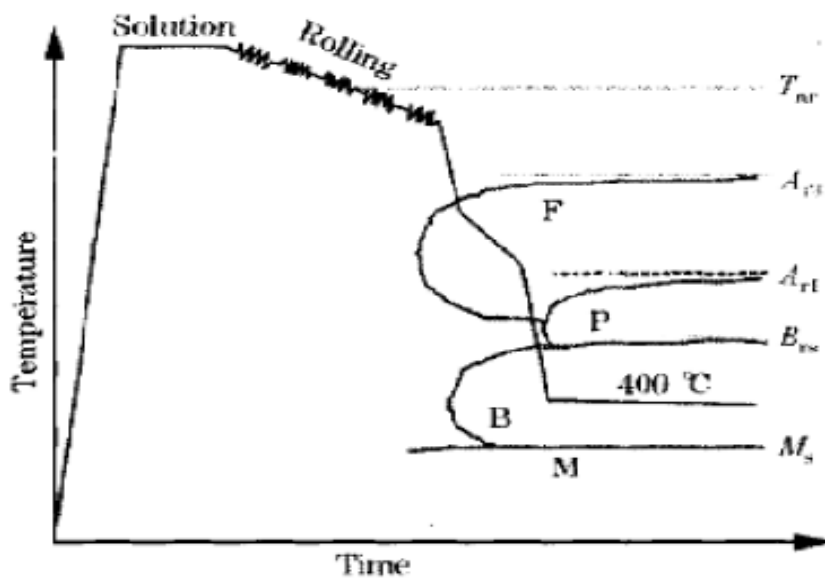
3-4 Ψύξη από θερμοκρασία ωστενιτοποίησης: Μετασχηματισμός σε φερρίτη

4-5 Επαναφορά: μετασχηματισμός σε μπαινίτη, καθίζηση σεμεντίτη

5-6 Ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος: ένα μέρος από ωστενίτη μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη

Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινιτικό φερρίτη κατά την διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού εμπλουτίζει τον υπολειπόμενο ωστενίτη σε C εξαιτίας της αποβολής του τελευταίου με αποτέλεσμα να τον σταθεροποιεί. Η μικροδομή αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να μεταβληθούν αλλάζοντας τόσο τον ρυθμό απόψυξης όσο και τις θερμοκρασίες των επιμέρους σταδίων. Για παράδειγμα προτιμάται η παραμονή στην μπαινιτική περιοχή στην οποία δημιουργείται ο μπαινίτης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες στις οποίες έχουμε ανάπτυξη φερρίτη.

Η διαδικασία παραγωγής των χαλύβων θερμής έλασης (Εικόνα 5) συνίσταται στην απόψυξη ενός πλήρως ωστενιτικού ελάσματος, που έχει υποστεί θερμή έλαση, στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, με παραμονή στις θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης ανόπτωσης και μπαινιτικής βαφής για τη δημιουργία της μικροδομής των χαλύβων TRIP. Το γεγονός αυτό δίνει το πλεονέκτημα της απευθείας παραγωγής της μικροδομής στις τελικές διαστάσεις του ελάσματος. Η διαδικασία είναι ιδιαίτερως φθηνή καθώς τα ελάσματα δεν χρειάζεται να θερμανθούν εκ νέου στην θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτωσης. Ωστόσο, οι χάλυβες θερμής έλασης παράγονται με περιορισμό στο πάχος του ελάσματος έως 3mm, με δυνατότητα έως και 1.4mm σε κάποια σύγχρονα έλαστρα. Αντίθετα, οι ψυχρής έλασης συνήθως παράγονται και σε μικρότερα πάχη (έως 1mm). Οι χάλυβες θερμής έλασης προτιμώνται σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας στις οποίες το κόστος παίζει πρωταρχικό ρόλο στην επιλογή του υλικού [10,12].



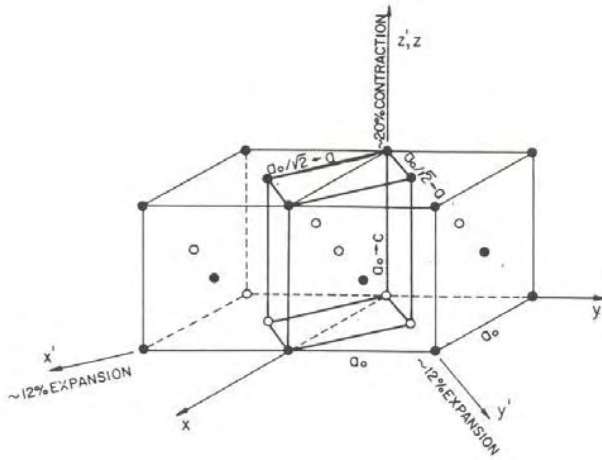
Εικόνα 5: Διαδικασία παραγωγής ενός τυπικού χάλυβα TRIP θερμής ελάσεως.

2.4 Φαινόμενο TRIP

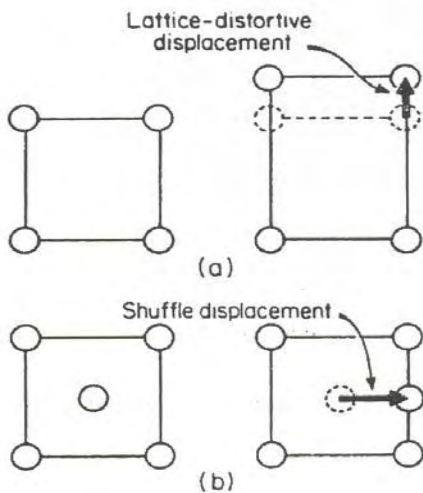
Οι πολυφασικοί ανθρακούχοι χάλυβες που υφίστανται πλαστική παραμόρφωση λόγω του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού έχουν λάβει την ιδιαίτερη προσοχή λόγω ενός ευνοϊκού συνδυασμού του ορίου διαρροής, της πλαστικότητας και του κόστους κατασκευής. Η βελτιωμένη απόδοση αυτής της τάξης των υψηλής αντοχής πολυφασικών χαλύβων, που συχνά αναφέρονται από τα αρχικά τους "TRIP -χάλυβες" ή χάλυβες πλαστικοποίησης εκ παραμορφώσεως (Transformation Induced- Plasticity steels), έχει αποδοθεί με την παρουσία του ωστενίτη στην αρχική μικροδομή. Όταν υποβάλλεται σε μηχανικές τάσεις, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Για να εξομαλυνθεί η παραμόρφωση που δημιουργείται κατά το μετασχηματισμό των φάσεων, οι περιοχές που περιβάλλουν το μετασχηματισμένο υλικό παραμορφώνονται πλαστικά. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται συνήθως ως το φαινόμενο-TRIP. Τα τυπικά υλικά που παρουσιάζουν αυτό το φαινόμενο περιλαμβάνουν ωστενιτικά σιδηρούχα κράματα όπως Fe-Ni-C και Fe-Mn-C, καθώς επίσης και μια ειδική τάξη πολυφασικών ανθρακούχων χαλύβων που περιέχουν αρχικά φερρίτη και μια διασκορπισμένη ανάπτυξη ωστενίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη.

Η εργοσκήρυση του χάλυβα μέσω της βαφής είναι μια διαδικασία που έχει χρησιμοποιηθεί για χιλιάδες χρόνια. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί ότι η εργοσκήρυση αυτή είναι αποτέλεσμα μιας δομικής αλλαγής που ονομάζεται μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι ένα ευρέως παρατηρούμενο φαινόμενο το οποίο συναντάται σε πολλές μεταλλικά καθώς επίσης και κεραμικά συστήματα. Μια μαρτενσιτική αντίδραση μπορεί να θεωρηθεί ως μια πρώτης τάξης δομικής αλλαγής στερεάς κατάστασης η οποία είναι επηρεασμένη από την μετατόπιση, που δεν περιλαμβάνει διάχυση και επηρεάζεται από την κινητική και την μορφολογία της ενέργειας παραμορφώσεως που προκύπτουν από την διάτμηση και τις μετατοπίσεις. Αυτό το σύνολο των τριών χαρακτηριστικών θεωρείται ως αναγκαία και ικανή συνθήκη για τον προσδιορισμό του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός αντιπροσωπεύει ένα υποσύνολο μιας πιο γενικής κατάταξης μετασχηματισμών φάσης επηρεασμένης από την μετατόπιση, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλές ταχύτητες μετασχηματισμού κατά την διάρκεια της οποίας τα άτομα κινούνται σε αποστάσεις μικρότερες από την ατομική απόσταση. Σε μια επηρεασμένη από την μετατόπιση αλλαγή υπάρχει μια συντονισμένη μετακίνηση ατόμων που μερικές φορές αναφέρεται περιγραφικά ως "στρατιωτικός" μετασχηματισμός. Τα άτομα μετακινούνται με οργανωμένους τρόπους σε σχέση με τα γειτονικά. Σε γενικές γραμμές αυτές οι μετατοπίσεις μπορούν να περιγραφούν ως ένας συνδυασμός ομοιογενούς παραμόρφωσης πλέγματος. Σε μια παραμόρφωση η στρέβλωση πλέγματος η συντονισμένη μετακίνηση των ατόμων μετατρέπει ένα κρυσταλλικό πλέγμα ομοιογενώς σε ένα άλλο και επίσης περιλαμβάνει περιστροφή του άκαμπτου σώματος εξαιτίας της σύζευξης μεταξύ της περιοχής μετασχηματισμού και της μήτρας. Το τμήμα της παραμόρφωσης του πλέγματος που επιτυγχάνει την αλλαγή στην κρυσταλλική δομή είναι μια καθαρή παραμόρφωση και συνήθως ονομάζεται Bain

παραμόρφωση, όρος που αρχικά υιοθετήθηκε για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό FCC→BCC (BCT) σε σιδηρούχα κράματα. Ο μετασχηματισμός παράγει διατμητική παραμόρφωση καθώς και αύξηση όγκου η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 5% ανάλογα με την χημική σύσταση του κράματος. Η στρέβλωση Bain η οποία βοηθά να απεικονίσει την αντιστοιχία του πλέγματος μεταξύ της μητρικών και των προϊόντων φάσεων παρουσιάζεται στην εικόνα 6. Από την άλλη πλευρά η ανακατανομή είναι μια συντονισμένη μετατόπιση ατόμων μέσα σε μια μονάδα κελιού η οποία μπορεί να αλλάξει την δομή αλλά από μόνη της δεν προκαλεί ομοιογενής στρέβλωση πλέγματος. Στην εικόνα 7 απεικονίζεται σε απλή μορφή η διάκριση μεταξύ της μετατόπισης του πλέγματος και των τυχαίων μετατοπίσεων [12].



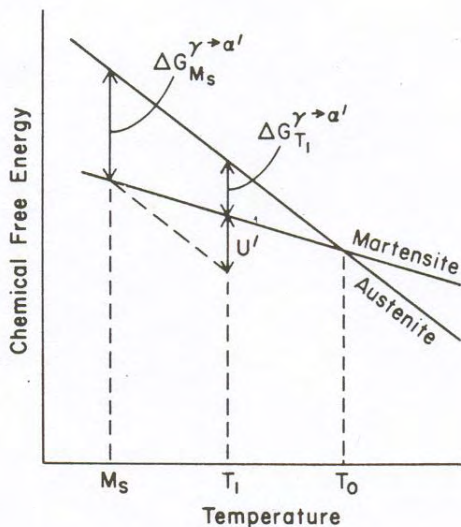
Εικόνα 6: Παραμόρφωση πλέγματος και αντιστοιχία που προτείνεται για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό από το FCC→BCC (BCT).



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση (a) μετατόπισης του πλέγματος (b) τυχαίων μετατοπίσεων.

2.5 Χημικό δυναμικό μαρτενσιτικού μετασχηματισμού

Σε οποιαδήποτε δεδομένη θερμοκρασία υπάρχει μια προτίμηση ως προς την κρυσταλλογραφική δομή που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας. Ο μαρτενσίτης έχει θερμοδυναμικά προτιμώμενη κρυσταλλική δομή σε χαμηλές θερμοκρασίες έτσι ώστε όταν γίνεται βαφή στον χάλυβα η ωστενιτική δομή, σταθερή σε υψηλές θερμοκρασίες, τείνει να μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Η εικόνα 8 δείχνει σχηματικά την αλλαγή στις χημικές ελεύθερες ενέργειες του μαρτενσίτη και του ωστενίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας.



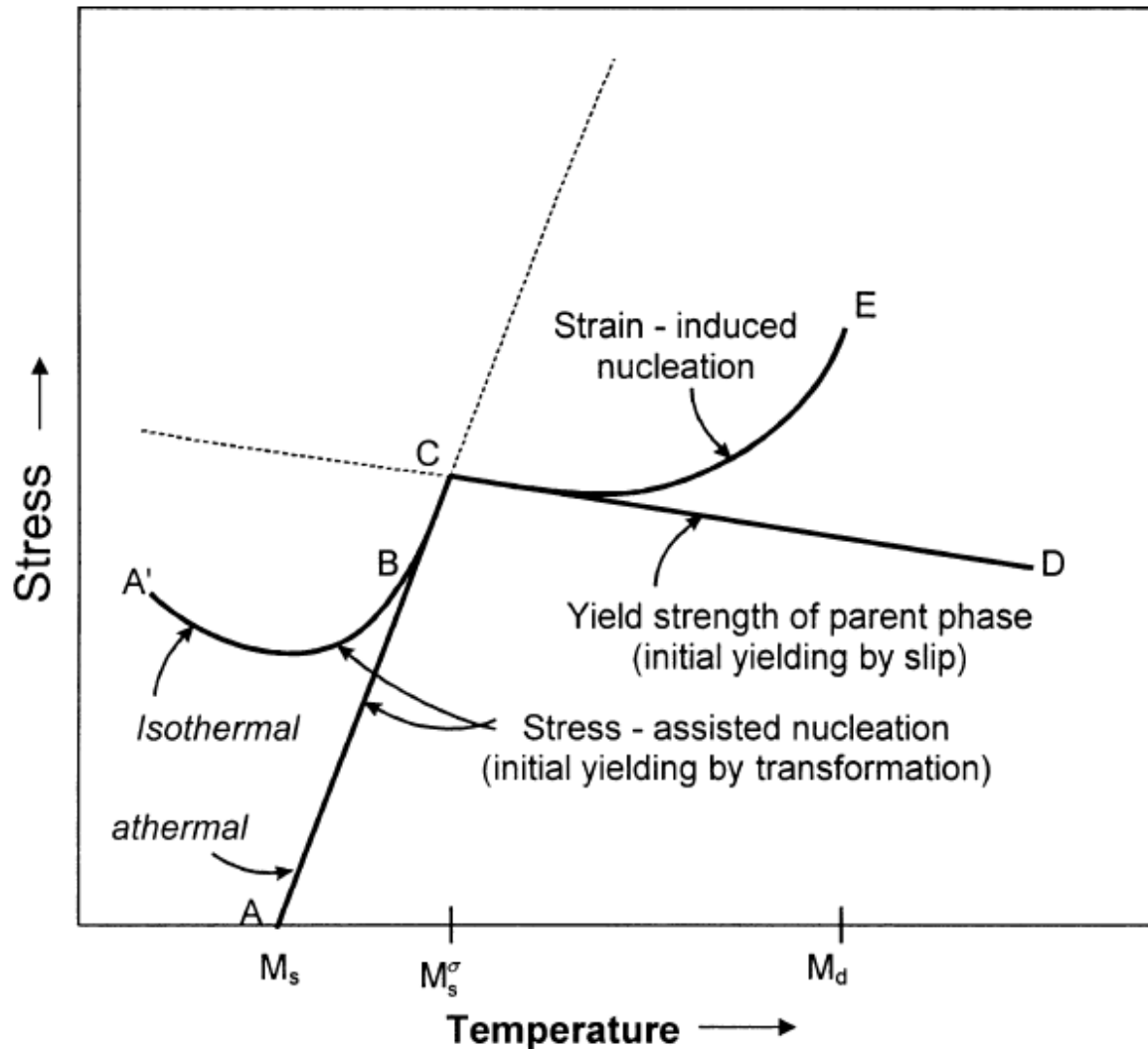
Εικόνα 8: Διάγραμμα ελεύθερης ενέργειας σε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.

Η διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια του ωστενίτη και του μαρτενσίτη αντιπροσωπεύει το χημικό δυναμικό $\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha'}$ για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Για να γίνει ο μετασχηματισμός το ενεργειακό φράγμα πρέπει να ξεπεραστεί αφού κατά την διάρκεια του μετασχηματισμού τα άτομα του κρύσταλλου θα λάβουν προσωρινά διατάξεις που αντιστοιχούν σε υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Εάν το χημικό δυναμικό για τον μετασχηματισμό δεν είναι αρκετά υψηλό το ενεργειακό φράγμα δεν μπορεί να ξεπεραστεί ο ωστενίτης δεν μπορεί να μετατραπεί στην θερμοδυναμικά ευνοϊκότερη φάση του μαρτενσίτη και τότε λέγεται μετασταθής. Σε θερμοκρασία T_0 όπου η ελεύθερη ενέργεια του ωστενίτη και του μαρτενσίτη είναι σε ισορροπία και καθώς η θερμοκρασία μειώνεται ($T_1 < T_0$) το χημικό δυναμικό $\Delta G_{T_1}^{\gamma \rightarrow \alpha'}$ αυξάνεται έτσι ώστε όταν ο ωστενίτης ψύχεται γρήγορα κάτω από μια αρκετά χαμηλή θερμοκρασία M_s μια αυθόρμητη μετατροπή σε μαρτενσίτη συμβαίνει. Η διαφορά στις ελεύθερες ενέργειες μεταξύ του ωστενίτη (γ) και του μαρτενσίτη (α') στην θερμοκρασία M_s είναι το κρίσιμο χημικό δυναμικό $\Delta G_{M_s}^{\gamma \rightarrow \alpha'}$ για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός συνεχίζεται με περαιτέρω ψύξη κάτω από την M_s μέχρι την θερμοκρασία M_f όπου δεν μπορεί να παρατηρηθεί κανένας μετασχηματισμός και το ποσό του μη μετασχηματισμένου ωστενίτη ονομάζεται παραμένον ωστενίτης. Ένα άλλο μέσο τροποποίησης για το χημικό δυναμικό του

μετασχηματισμού είναι με την παροχή μηχανικού έργου με την εφαρμογή τάσης. Με αυτόν τον τρόπο ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη μπορεί να συμβεί σε θερμοκρασίες υψηλότερες. Ο μετασχηματισμός σε θερμοκρασίες πάνω από την M_s λέγεται μηχανικά επηρεαζόμενος [12].

2.6 Πλαστικότητα μετασχηματισμού

Είναι χρήσιμο να γίνει διάκριση μεταξύ των ελαστικών τάσεων και της πλαστικής παραμόρφωσης στον επηρεασμό της μαρτενσιτικής πυρήνωσης. Όπως φαίνεται στο εικόνα 9 η εφαρμογή μιας τάσης σε θερμοκρασία που δεν υπερβαίνει κατά πολύ την M_s μπορεί να περιλαμβάνει πυρήνωση ακόμα και αν η τάση είναι αρκετά κάτω από το όριο διαρροής. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται υποβοηθούμενος από την τάση επειδή οι υπάρχουσες θέσεις πυρήνωσης είναι μηχανικά υποβοηθούμενες από την θερμοδυναμική συμβολή της εφαρμοζόμενης τάσης. Δηλαδή το κρίσιμο χημικό δυναμικό για την πυρήνωση των θέσεων το οποίο λειτουργεί κανονικά χωρίς εξωτερική τάση στην M_s μπορεί να επιτευχθεί σε θερμοκρασίες πάνω από την M_s αφού το μηχανικό δυναμικό αντισταθμίζει το μειωμένο χημικό δυναμικό σε τόσο υψηλότερες θερμοκρασίες. Λόγω αυτής της αλληλεξάρτησης η πυρήνωση που προκαλείται από την τάση απαιτεί υψηλότερες τάσεις για υψηλότερες θερμοκρασίες σύμφωνα με την κλίση της γραμμής AC της εικόνας 9. Στην θερμοκρασία που ορίζεται ως M_s^{σ} η τάση που απαιτείται για την πυρήνωση φθάνει το όριο διαρροής της μητρικής φάσης. Πάνω από την θερμοκρασία M_s^{σ} η πλαστική διαρροή προηγείται του μετασχηματισμού και μια πρόσθετη συνεισφορά στον μετασχηματισμό μπορεί να υπάρξει από την παραγωγή μιας νέας και πιο ισχυρής πυρήνωσης από την πλαστική παραμόρφωση. Αυτός ο μετασχηματισμός ορίζεται ως υποβοηθούμενος από την μετατόπιση (S.I.T.). Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι τάσεις που συμβαίνει πυρήνωση σε θερμοκρασίες πάνω από την δεν συμπίπτουν με την επέκταση της γραμμής AC αλλά με την γραμμή CD. Η θερμοκρασία M_s^{σ} καθορίζει έτσι ένα όριο μεταξύ των θερμοκρασιών όπου δύο διαφορετικοί τύποι πυρήνωσης συμβαίνουν. Η M_d είναι η θερμοκρασία πάνω από την οποία το χημικό δυναμικό γίνεται τόσο μικρό όπου η πυρήνωση δεν προκαλείται μηχανικά ακόμα και κάτω από πλαστική παραμόρφωση. Το μακροσκοπικό όριο διαρροής ακολουθεί την γραμμή ACD της εικόνας 9. Συχνά υπάρχει μια επικάλυψη μεταξύ των stress-assisted και strain-induced θερμοκρασιών, έτσι η θερμοκρασία δεν μπορεί να οριστεί ακριβώς. Η γραμμή ACD προσδιορίζει τις συνθήκες θερμοκρασίας-τάσης όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο TRIP.



Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση μεταξύ Stress-assisted και Strain-induced μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

Στις θερμοκρασίες κάτω από την M_s^σ αυξάνοντας την εφαρμοζόμενη τάση πάνω από τον stress-assisted μετασχηματισμό ξεκινά η γραμμή AB (εικόνα 9) και προκαλείται επιπλέον μετασχηματισμός και η επακόλουθη πλαστική διαρροή είναι αποτέλεσμα της πλαστικότητας του μετασχηματισμού. Υπό αυτές τις συνθήκες το κλάσμα όγκου του μαρτενσίτη που σχηματίζεται είναι μια γραμμική συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης για ένα σημαντικό μέρος του μετασχηματισμού. Το αποτέλεσμα της μορφολογίας είναι περίπου το ίδιο που παρατηρήθηκε για τον αυτόματο μετασχηματισμό ο οποίος λαμβάνει χώρα χωρίς να εφαρμοστεί τάση κατά την ψύξη κάτω από την M_s^σ . Σε θερμοκρασίες πάνω από την M_s^σ υπάρχει μια σχέση μεταξύ του κλάσματος όγκου του μαρτενσίτη και της πλαστικής παραμόρφωσης καθώς η τάση αυξάνεται πάνω από τον υποβοηθούμενο από την παραμόρφωση μετασχηματισμό όπου ξεκινά η γραμμή BC. Σε αυτήν την περίπτωση η μορφολογία εξαρτάται στην νέες θέσεις πυρήνωσης που εισάγονται από την ολισθήση του ορίου διαρροής κατά μήκος της γραμμής BC [12].

Κεφάλαιο 3 Πειραματική διαδικασία

3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή κυψέλης

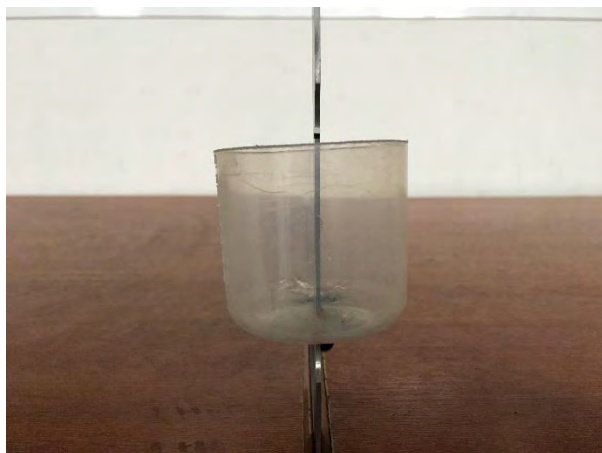
Για την μελέτη της χαρακτηριστικής θερμοκρασίας M_s^σ , απαιτείται με βάση την πειραματική διαδικασία που περιεγράφηκε στην εργασία [1] η εκτέλεση πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού σε φόρτιση-αποφόρτιση με συνεχώς μειωμένη θερμοκρασία. Η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας έγινε:

- Με χρήση κατάλληλου διαλύματος ψύξης και
- Σχεδιασμό κυψέλης για την τοποθέτηση του διαλύματος ψύξης στην επιφάνεια του δοκιμίου

Στην τελική της μορφή η κυψέλη θα έπρεπε να είναι κατασκευασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να:

- αντέχει σε χαμηλές θερμοκρασίες
- να έχει μικρό μέγεθος που να προσαρμόζεται στο μήκος αναφοράς του δοκιμίου
- να είναι κατάλληλα σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει την μέτρηση των παραμορφώσεων στο δοκίμιο

Πριν από την τελική επιλογή του υλικού έγινε κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος ψύξης ώστε η κυψέλη να πληρεί τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για την κατασκευή της κυψέλης επιλέχθηκαν πλαστικά δοχεία ζέσεως των 100ml τα οποία διαμορφώθηκαν κατάλληλα. Τα πλαστικά αυτά δοχεία είναι κατασκευασμένα από πολυπροπυλένιο το οποίο έχει μεγαλύτερη αντοχή τόσο στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας όσο και στις γρήγορες μεταβολές της θερμοκρασίας [13]. Τα δοχεία αυτά διαμορφώθηκαν κατάλληλα σύμφωνα με το σχέδιο του σχήματος ώστε να μπορούν να υποδεχθούν δοκίμια εφελκυσμού και να γίνεται όσο το δυνατόν πιο εύκολη η εναλλαγή διαλυμάτων. Για τους λόγους αυτούς τα πλαστικά δοχεία κόπηκαν στο πάνω μέρος τους για την προσαρμογή του ύψους τους στο μήκος αναφοράς του δοκιμίου εφελκυσμού. Στην συνέχεια δημιουργήθηκε κατάλληλη σχισμή στο κάτω μέρος ώστε να γίνεται τοποθέτηση του δοκιμίου εφελκυσμού. Για την εναλλαγή διαλυμάτων δημιουργήθηκε οπή και κολλήθηκε μικρό σωληνάκι στην βάση της κυψέλης. Η τελική μορφή της κυψέλης μαζί με το ενσωματωμένο δοκίμιο εφελκυσμού φαίνεται στην εικόνες 10 και 11.



Εικόνα 10: Κυψέλη με ενσωματωμένο δοκίμιο εφελκυσμού.



Εικόνα 11: Κυψέλη με ενσωματωμένο δοκίμιο εφελκυσμού.

3.2 Μελέτη και προετοιμασία διαλυμάτων ψύξης

Τα πειράματα μονοαξονικής φόρτισης-αποφόρτισης στην περιοχή της πλαστικής διαρροής πραγματοποιήθηκαν σε εύρος θερμοκρασιών από τους 10°C έως τους -30°C. Για να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά διαλύματα με κατάλληλη ανάμιξη όπως ξηρός πάγος, αιθανόλη, αιθυλενογλυκόλη, προπανόνη, βενζίνη, αλάτι και νερό [14]. Η μέτρηση των θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκε με θερμοστοιχείο ενώ για την προετοιμασία των διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά ακριβείας, προκειμένου να ελεγχθούν οι κατά βάρος αναλογίες. Ως μονωτικό για την επίτευξη των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκε το υλικό πετροβάμβακας (εικόνα 12,13).

Ο ξηρός πάγος δημιουργήθηκε κατά την εκτόνωση πυροσβεστήρα που περιέχει CO₂. Έτσι στερεοποιείται κατά την εξαγωγή του υπό πίεση στην θερμοκρασία των -78°C. Ο ξηρός πάγος αποθηκεύτηκε σε θερμομονωτικό δοχείο με σκοπό να περιοριστεί η εξάχνωσή του. Από τις μετρήσεις που έγιναν ο μέσος όρος γραμμαρίων ξηρού πάγου που συλλέγονταν ήταν 46 g/sec όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Μέσος όρος γραμμαρίων ξηρού πάγου.

Χρόνος (sec.)	Γραμμάρια ξηρού πάγου	Μέσος όρος γραμμαρίων ανά sec.
4.7	223	47.5
3.3	151	45.8
2.3	104	45.3



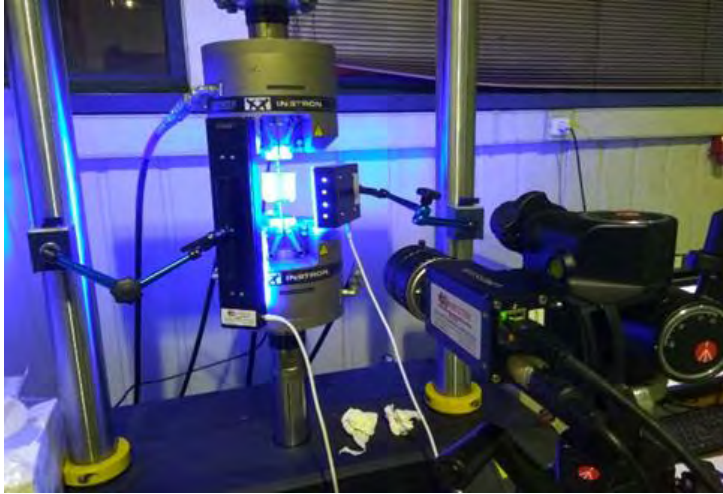
Εικόνα 12: Διαλύματα για επίτευξη θερμοκρασιών.



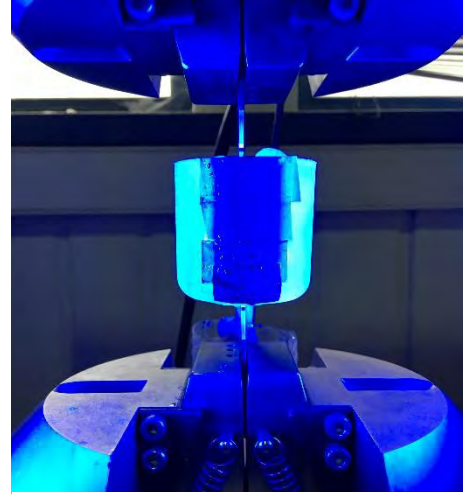
Εικόνα 13: Ακριβής αναλογία διαλυμάτων.

3.3 Καταγραφή παραμορφώσεων

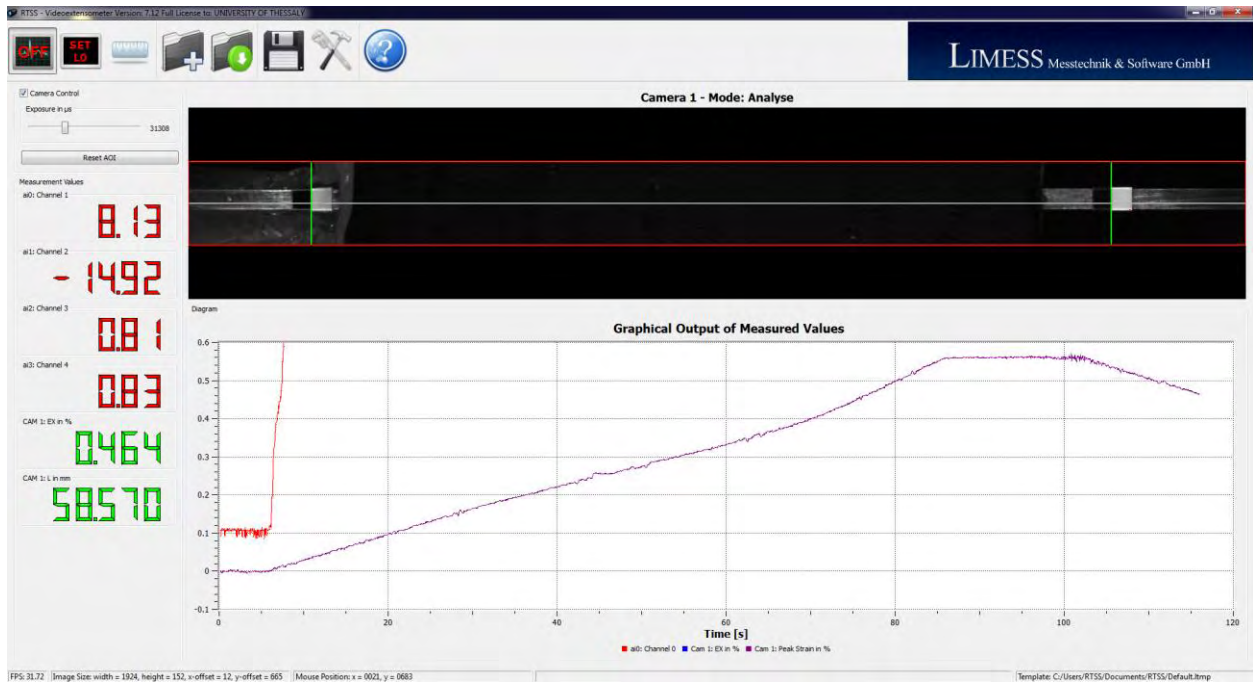
Η μέτρηση της παραμόρφωσης έπρεπε να γίνει με μέθοδο καταγραφής χωρίς επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου λόγω της παρουσίας της κυψέλης. Η λύση δόθηκε χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του οπτικού επιμηκυσιομέτρου της Limess. Η κάμερα υψηλής ανάλυσης και υψηλού ρυθμού καταγραφής σε συνδυασμό με το αντίστοιχο λογισμικό μπορεί να καταγράψει οπτικά με εξαιρετική ακρίβεια την παραμόρφωση. Η κάμερα λειτουργεί με την βοήθεια κατάλληλου φωτισμού με την χρήση μπλε led φώτων. Με την παροχή του κατάλληλου φωτισμού γίνονται ευδιάκριτα δύο προκαθορισμένα σημεία στην επιφάνεια του δοκιμίου που χαρακτηρίζει ο χρήστης με την βοήθεια ειδικών αυτοκόλλητων (άσπρο-μαύρο) στο μήκος αναφοράς του δοκιμίου (L_0) όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Έτσι σε συνδυασμό με το L_0 που εισάγεται στο λογισμικό είναι δυνατή η παρακολούθηση της παραμόρφωσης κάθε χρονική στιγμή. Τα ασπρόμαυρα αυτοκόλλητα τοποθετήθηκαν σε κατάλληλες θέσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου παραβάλλεται η κυψέλη. Φωτογραφίες από την διάταξη ακολουθούν (εικόνα 14,15).



Εικόνα 15: Πειραματική διάταξη.



Εικόνα 14: Δοκίμιο εφελκυσμού τοποθετημένο πάνω στην μηχανή εφελκυσμού με ενσωματωμένη την κυψέλη.



Εικόνα 16: Λογισμικό καταγραφής παραμόρφωσης της Limess.

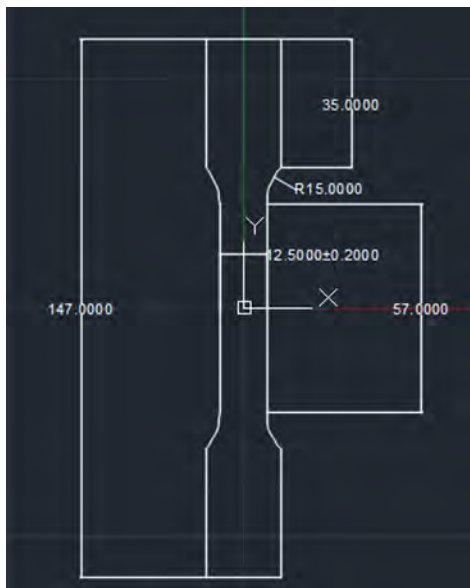
3.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της θερμοκρασίας $M_s^σ$ σύμφωνα με την τεχνική SS-VT-TT [2] απαιτεί επαναλαμβανόμενη φόρτιση-αποφόρτιση του δοκιμίου σε τιμή παραμόρφωσης μέσα στην πλαστική περιοχή. Επειδή ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός συνοδεύεται από μεταβολή όγκου στην μικροδομή, κατά την ενεργοποίησή του ακολουθεί τοπική αποφόρτιση στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Η θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται η έναρξη του τοπικού αυτού φαινομένου είναι η χαρακτηριστική θερμοκρασία $M_s^σ$. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στην μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 με δυναμοκυψέλη 100 kN του εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Π.Θ.. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν κάποια δοκιμαστικά πειράματα χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους καταγραφής της παραμόρφωσης με συμβατικό επιμηκυνσιόμετρο επαφής και οπτικό επιμηκυνσιόμετρο και ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μεθόδων. Αφού επαληθεύτηκε η σωστή καταγραφή παραμορφώσεων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Πρώτα έγινε μια φόρτιση-αποφόρτιση στην πλαστική περιοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ακολούθησε επαναληπτική διαδικασία φορτίσεων αποφορτίσεων μειώνοντας σε κάθε πείραμα την θερμοκρασία.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σχεδιάστηκαν με βάση την προδιαγραφή E 8M [15] όπως φαίνεται στην εικόνα 17.

Όλα τα πειράματα εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με τις ίδιες παραμέτρους στην μηχανή εφελκυσμού με ρυθμό μετατόπισης 0.5 mm/min..



Εικόνα 17: Σχέδιο δοκιμίων εφελκυσμού.

3.5 Θερμικές κατεργασίες χάλυβα TRIP 700

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε χάλυβας TRIP 700 που περιέχει αλουμίνιο, σε μορφή ελάσματος πάχους 1.5 mm, και η χημική σύσταση του δίνεται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2: Χημική σύσταση χάλυβα TRIP 700 VOESTALPINE.

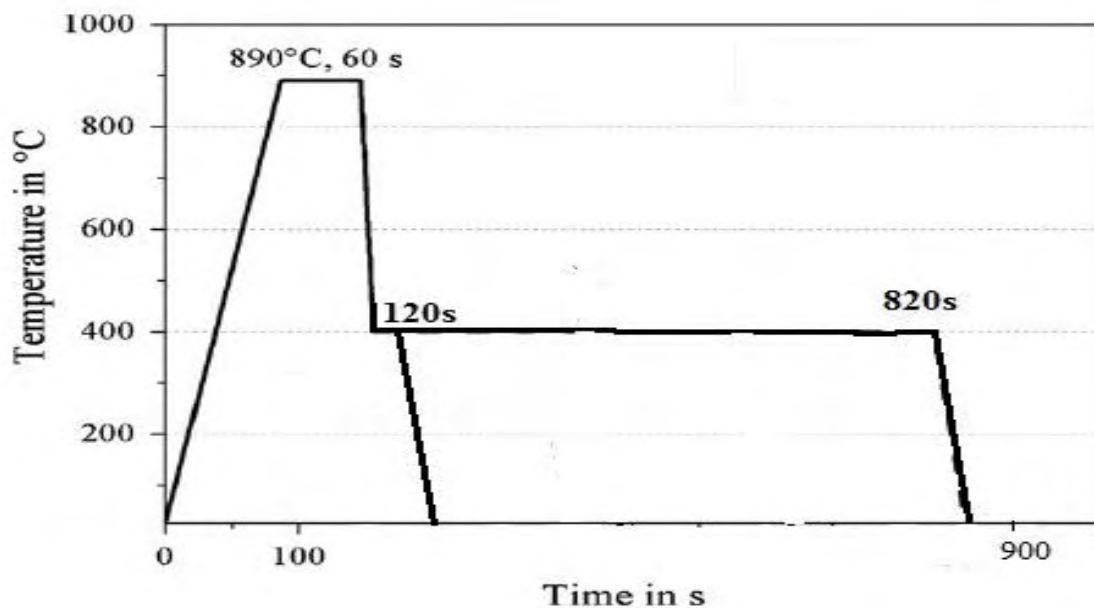
C	Si	Mn	P	Al	S	Cr	Ni	Mo	Cu	W	As	Nb	Ti
0.202	0.348	1.99	0.009	1.07	0.0013	0.0038	0.017	0.011	0.044	0.02	0.004	0.002	0.002

Οι θερμικές κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν με χρήση των ειδικών φούρνων άλατος του Εργαστηρίου Υλικών του Π.Θ..

Αρχικά πραγματοποιήθηκε θερμική κατεργασία σε θερμοκρασία 930°C, η οποία υπερβαίνει την θερμοκρασία Ac3: 913,43°C και η διαδικασία ωστενιτοποίησης διήρκησε 4min.

Η πρώτη θερμική κατεργασία (treatment A) περιλάμβανε θέρμανση στην θερμοκρασία της ανόπτησης (annealing) στην θερμοκρασία 890°C για 60 δευτερόλεπτα και στην συνέχεια θέρμανση στην θερμοκρασία της επαναφοράς (tempering) σε θερμοκρασία 400°C για 120 δευτερόλεπτα (εικόνα 18).

Η δεύτερη θερμική κατεργασία (treatment B) περιλάμβανε θέρμανση στην περιοχή της ανόπτησης (annealing) στην θερμοκρασία 890°C για 60 δευτερόλεπτα, όπως η πρώτη, και στην συνέχεια θέρμανση στην θερμοκρασία της επαναφοράς (tempering) σε θερμοκρασία 400°C για 820 δευτερόλεπτα (εικόνα 18).



Εικόνα 18: Θερμικές κατεργασίες που ακολουθήθηκαν.

Κεφάλαιο 4 Πειραματικά αποτελέσματα

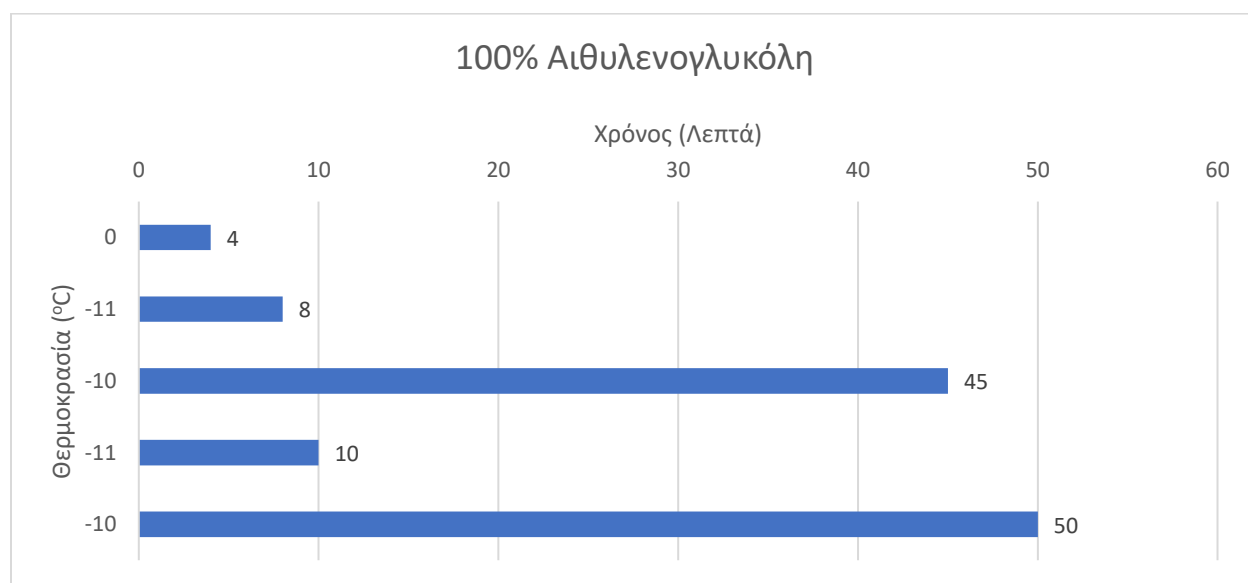
4.1 Μετρήσεις τιμών θερμοκρασίας

4.1.1 Πείραμα με διάλυμα 100% αιθυλενογλυκόλη

Η επίτευξη της τιμής θερμοκρασίας -10°C πραγματοποιήθηκε με την χρήση καθαρής αιθυλενογλυκόλης και ξηρού πάγου (πίνακας 3). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1 η θερμοκρασία αυτή επιτυγχάνεται για χρονικό διάστημα 45 λεπτών χωρίς να απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ξηρού πάγου. Συγκεκριμένα με προσθήκη 38 γραμμαρίων ξηρού πάγου επιτεύχθηκε η επιθυμητή θερμοκρασία ενώ με επιπλέον προσθήκη 20 γραμμαρίων ξηρού πάγου στο υπάρχων διάλυμα παρατηρήθηκε η διατήρηση της θερμοκρασίας για το ακόμα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα των 50 λεπτών.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με διάλυμα 100% αιθυλενογλυκόλης.

Ξηρός Πάγος (g)	Ethylene Glycol (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
18	100	0	4
38	100	-11	8
38	100	-10	45
58	100	-11	10
58	100	-10	50



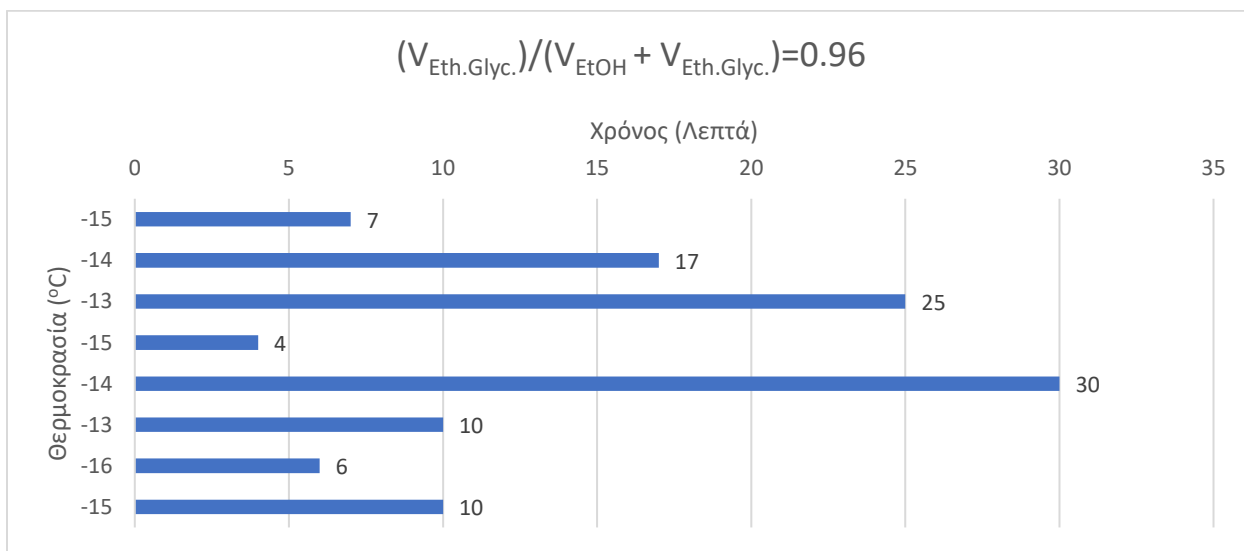
Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

4.1.2 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης

Η τιμή της θερμοκρασίας -15°C επιτεύχθηκε με την χρήση διαλύματος αιθυλενογλυκόλης-αιθανόλης σε ογκομετρική αναλογία $(V_{\text{Eth.Glyc.}})/(V_{\text{EtOH}} + V_{\text{Eth.Glyc.}}) = 0.96$ (πίνακας 4). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2 η θερμοκρασία αυτή επιτυγχάνεται για χρονικό διάστημα 7 λεπτών με 40 γραμμάρια ξηρού πάγου. Με επιπλέον προσθήκη 10 γραμμαρίων ξηρού πάγου στο ίδιο διάλυμα πραγματοποιείται η παράταση της πτώσης της θερμοκρασίας για χρονικό διάστημα 4 λεπτών. Παρόλα αυτά ο χρόνος διατήρησης του διαλύματος στην θερμοκρασία -14°C αυξάνεται δραματικά στον χρόνο των 30 λεπτών. Η προσθήκη 25 γραμμαρίων επιπλέον ξηρού πάγου στο υπάρχον διάλυμα είναι αρκετή για να επιτύχουμε την θερμοκρασία των -16°C για περίπου 6 λεπτά.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{\text{Eth.Glyc.}})/(V_{\text{EtOH}} + V_{\text{Eth.Glyc.}}) = 0.96$.

Ξηρός Πάγος (g)	Ethylene Glycol (ml)	Ethanol (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
40	100	4,167	-15	7
40	100	4,167	-14	17
40	100	4,167	-13	25
50	100	4,167	-15	4
50	100	4,167	-14	30
50	100	4,167	-13	10
75	100	4,167	-16	6
75	100	4,167	-15	10



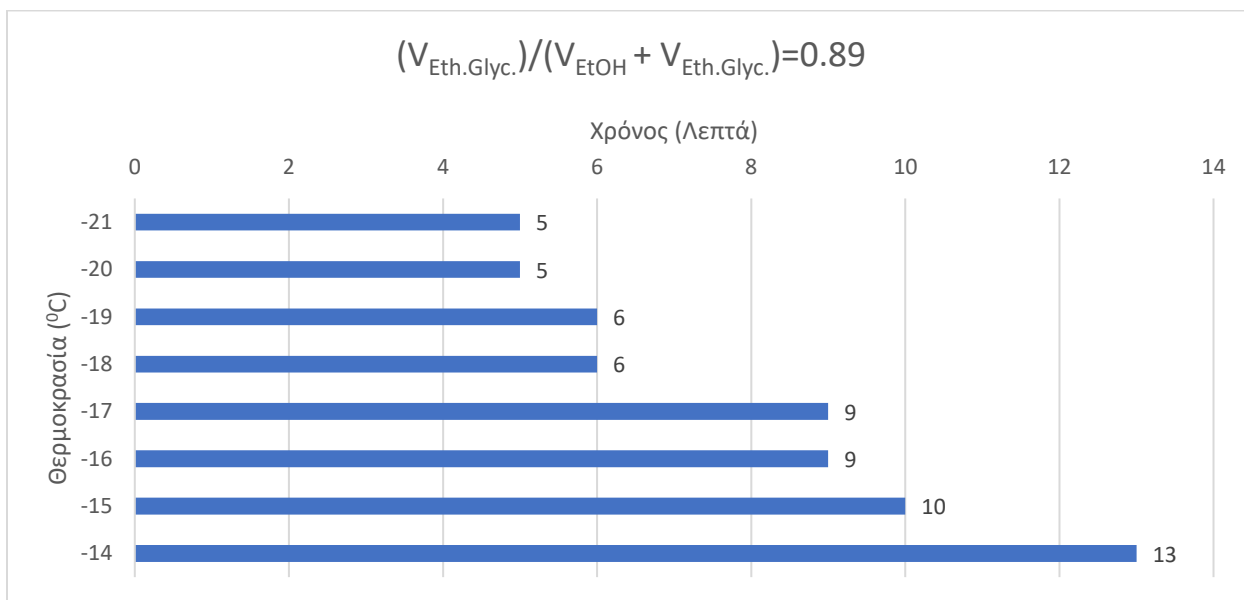
Διάγραμμα 2: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

4.1.3 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης

Η επίτευξη της τιμής θερμοκρασίας -20°C πραγματοποιήθηκε με την χρήση διαλύματος αιθυλενογλυκόλης-αιθανόλης σε ογκομετρική αναλογία $(V_{\text{Eth.Glyc.}})/(V_{\text{EtOH}} + V_{\text{Eth.Glyc.}}) = 0.89$ (πίνακας 5). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3 η θερμοκρασία αυτή επιτυγχάνεται για χρονικό διάστημα 5 λεπτών με ποσότητα 60 γραμμαρίων ξηρού πάγου. Η διατήρηση του διαλύματος στις υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνεται αλλά όχι σε τόσο σημαντικό βαθμό. Έτσι η διατήρηση στους -19°C και -18°C διαρκεί 6 λεπτά ενώ η διατήρηση στους -17°C και -16°C διαρκεί 9 λεπτά η καθεμία και η διατήρηση στους -15°C και -14°C διαρκεί 10 και 13 λεπτά αντίστοιχα.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{\text{Eth.Glyc.}})/(V_{\text{EtOH}} + V_{\text{Eth.Glyc.}}) = 0.89$.

Ξηρός Πάγος (g)	Ethylene Glycol (ml)	Ethanol (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
60	100	12.35	-21	5
60	100	12.35	-20	5
60	100	12.35	-19	6
60	100	12.35	-18	6
60	100	12.35	-17	9
60	100	12.35	-16	9
60	100	12.35	-15	10
60	100	12.35	-14	13



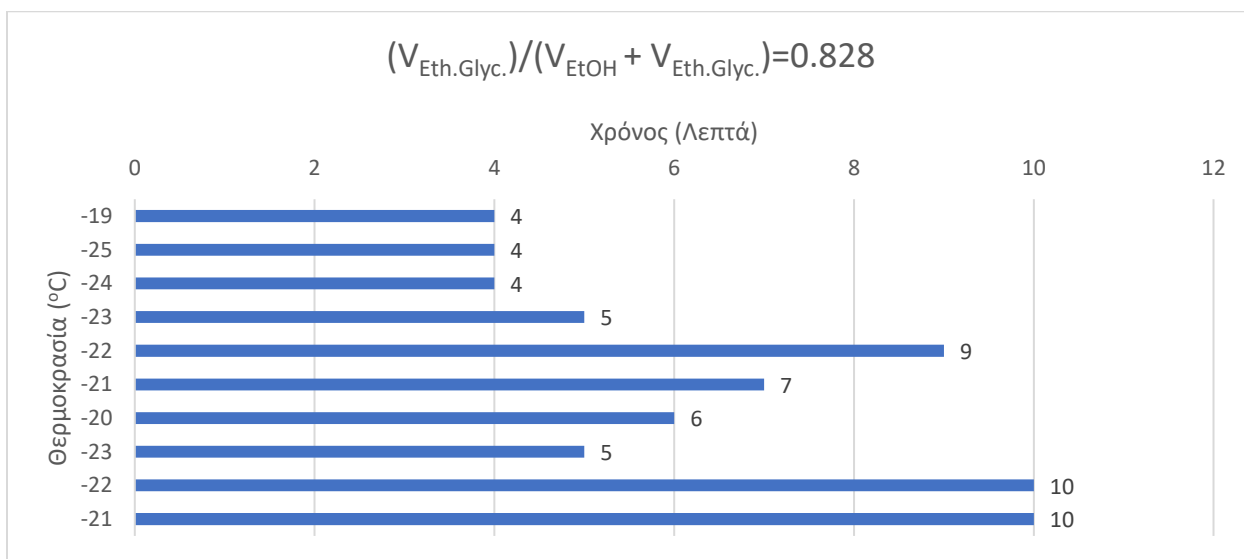
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

4.1.4 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης

Η τιμή της θερμοκρασίας -25°C επιτεύχθηκε με την χρήση διαλύματος αιθυλενογλυκόλης-αιθανόλης σε ογκομετρική αναλογία $(V_{\text{Eth.Glyc.}})/(V_{\text{EtOH}} + V_{\text{Eth.Glyc.}}) = 0.828$ (πίνακας 6). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4 η θερμοκρασία αυτή επιτυγχάνεται για χρονικό διάστημα 4 λεπτών με ποσότητα 55 γραμμαρίων ξηρού πάγου. Ο διατήρηση του διαλύματος στις υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνεται αλλά όχι σε τόσο σημαντικό βαθμό. Έτσι η διατήρηση του στους -24°C διαρκεί 5 λεπτά, η διατήρηση στους -23°C διαρκεί 5 λεπτά ενώ η διατήρηση στους -22°C αυξάνεται σημαντικά στα 9 λεπτά.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{\text{Eth.Glyc.}})/(V_{\text{EtOH}} + V_{\text{Eth.Glyc.}}) = 0.828$.

Ξηρός Πάγος (g)	Ethylene Glycol (ml)	Ethanol (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
40	100	20.77	-19	4
55	100	20.77	-25	4
55	100	20.77	-24	4
55	100	20.77	-23	5
55	100	20.77	-22	9
55	100	20.77	-21	7
55	100	20.77	-20	6
60	100	20.77	-23	5
60	100	20.77	-22	10
60	100	20.77	-21	10



Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

4.1.5 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης

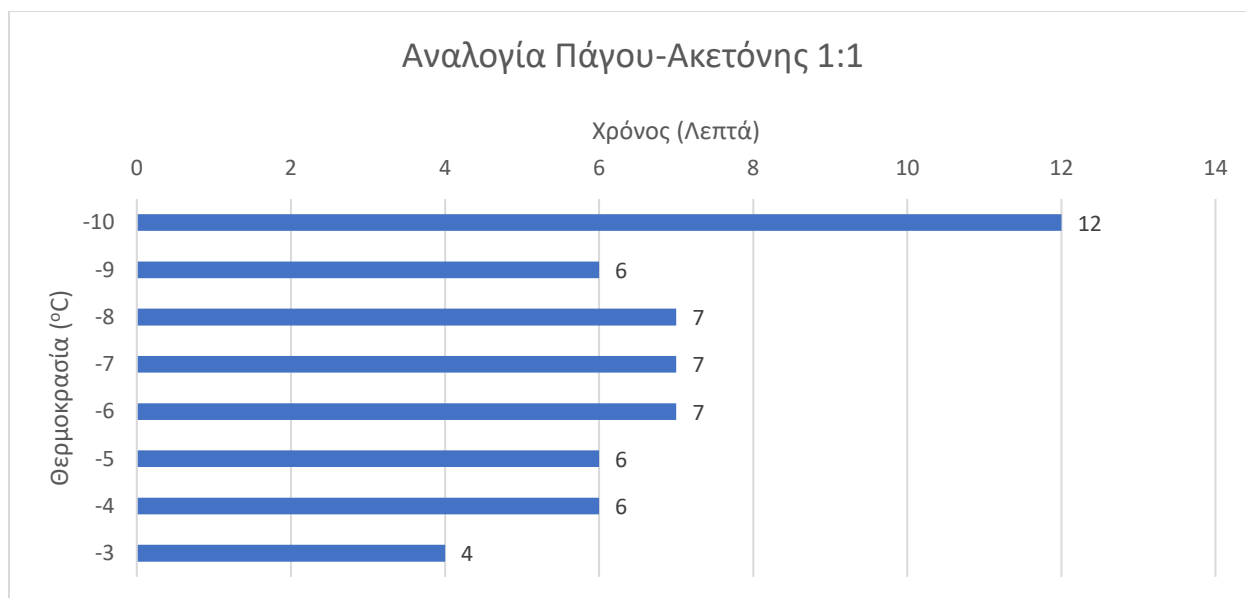
Η επίτευξη της τιμής της θερμοκρασίας -10°C μπορεί να γίνει και με την χρησιμοποίηση διαλύματος ακετόνης. Σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζεται ξηρός πάγος παρά μόνο παγάκια νερού. Αν και η επίτευξη αυτής της θερμοκρασίας συμβαίνει για μικρότερο χρόνο σε σχέση το διάλυμα αιθυλενογλυκόλης παραμένει ικανοποιητική και είναι καταλληλότερη και οικονομικότερη γιατί δεν απαιτείται ξηρός πάγος. Έτσι χρησιμοποιήθηκε διάλυμα πάγου-ακετόνης σε αναλογία 1:1 (πίνακες 7,8) και η τιμή της θερμοκρασίας -10°C επιτεύχθηκε για 12 λεπτά όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5. Η αύξηση όμως της θερμοκρασίας γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό σε σχέση με τα διαλύματα αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης.

Πίνακας 7: Μέση πυκνότητα πάγου.

Πυκνότητα Πάγου στους 0°C	Πυκνότητα Νερού στους 0°C	Μέση Πυκνότητα
0.9167 g/cm ³	0.9998 g/cm ³	0.95825 g/cm ³

Πίνακας 8: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης 1:1.

Πάγος (g)	Ακετόνη (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
47.91	50	-10	12
47.91	50	-9	6
47.91	50	-8	7
47.91	50	-7	7
47.91	50	-6	7
47.91	50	-5	6
47.91	50	-4	6
47.91	50	-3	4



Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικές αναλογίες πάγου-ακετόνης όπως 0.5-1 και 0.7-1 αλλά δεν επιτεύχθηκε διαφορετική επιθυμητή θερμοκρασία. Όπως φαίνεται στους πίνακες 9 και 10 με αναλογία πάγου-ακετόνης 0.5-1 επιτυγχάνεται η θερμοκρασία των -2°C για 5 λεπτά και με αναλογία 0.7-1 επιτυγχάνεται η θερμοκρασία των -9°C για επίσης 5 λεπτά.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης 0.5:1.

Πάγος (g)	Ακετόνη (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
23.95	50	-2	5

Πίνακας 10: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-ακετόνης 0.7:1.

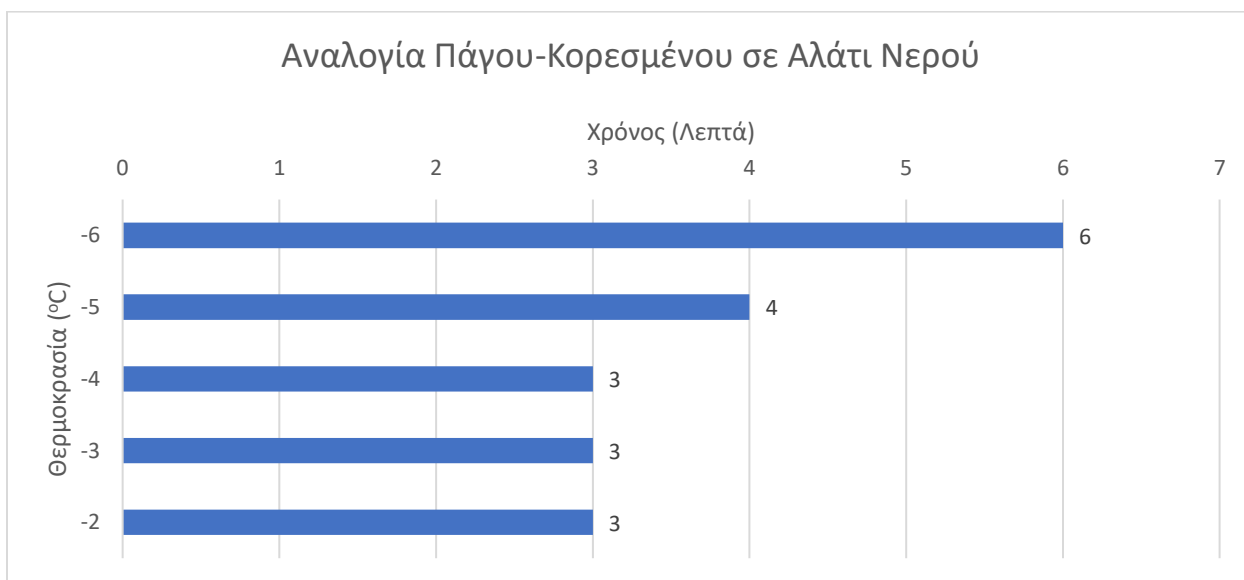
Πάγος (g)	Ακετόνη (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
35.9325	50	-9	5

4.1.6 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-νερού με την προσθήκη αλατιού

Η επίτευξη της τιμής θερμοκρασίας -5°C πραγματοποιήθηκε με διάλυμα πάγου και κορεσμένου σε αλάτι νερού. Η διαλυτότητα του αλατιού στο νερό είναι 359 γραμμάρια ανά λίτρο. Οπότε χρησιμοποιήθηκαν 300 ml νερό και 107.7 γραμμάρια αλάτι (πίνακας 11). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6 η διατήρηση θερμοκρασίας -5°C για 4 λεπτά είναι ικανοποιητικός χρόνος για τις απαιτήσεις του πειράματος. Η διατήρηση του διαλύματος στις υψηλότερες θερμοκρασίες των -4°C , -3°C και -2°C διήρκεσε μόλις 3 λεπτά η καθεμία.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-κορεσμένου σε αλάτι νερού.

Αλάτι (g)	Νερό (ml)	Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Χρόνος (Λεπτά)
107.7	300	-6	6
107.7	300	-5	4
107.7	300	-4	3
107.7	300	-3	3
107.7	300	-2	3



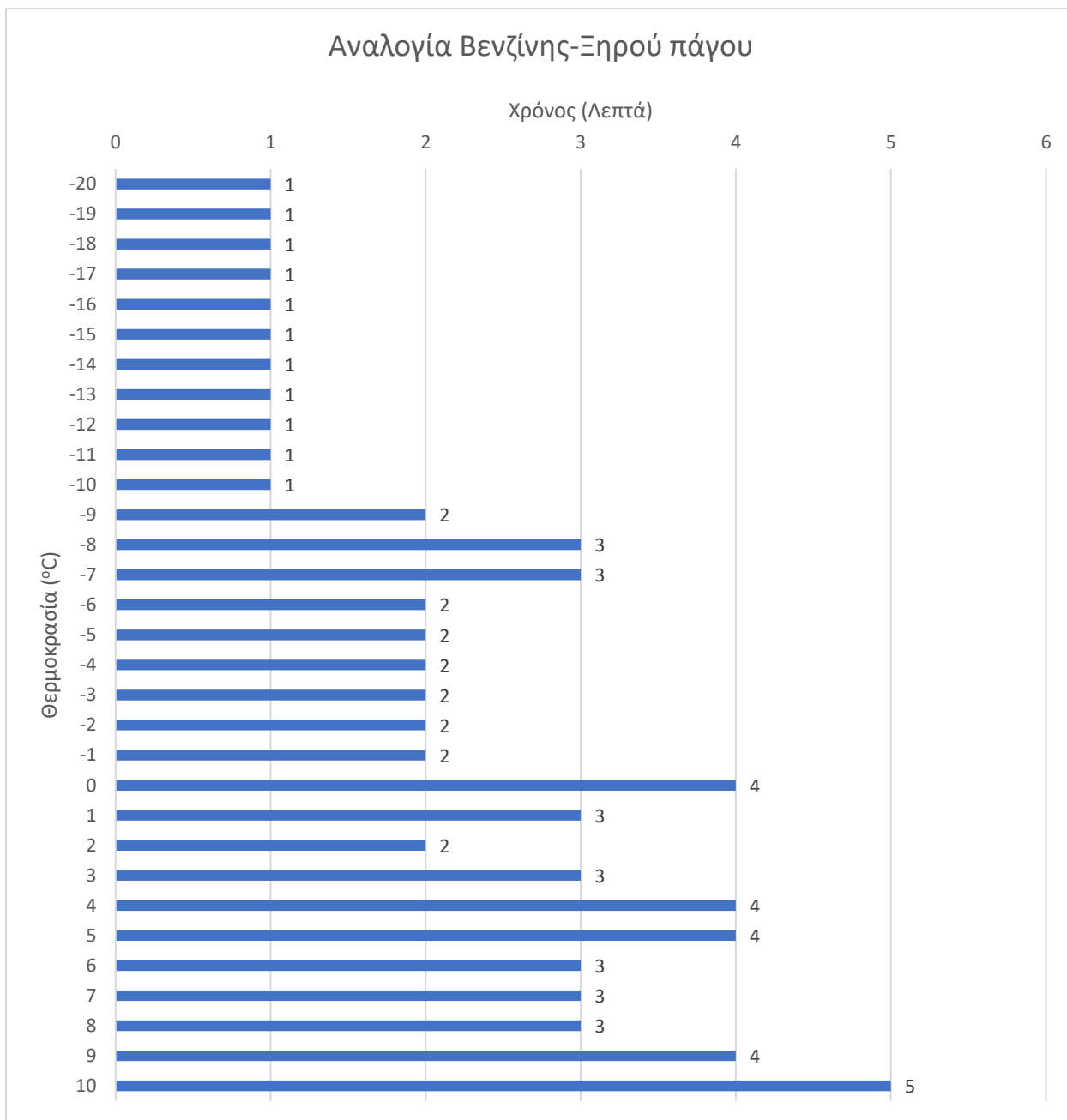
Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

4.1.7 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος βενζίνης-ξηρού πάγου

Ένα άλλο διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό της βενζίνης με ξηρό πάγο (πίνακας 12). Σε αυτήν την περίπτωση αν και οι απαιτήσεις ποσότητας ξηρού πάγου ήταν ελάχιστες κρίθηκε μη ικανοποιητικό ως προς την επίτευξη οποιαδήποτε θερμοκρασίας καθώς η διατήρηση του διαλύματος σε αυτές ήταν μικρή της τάξεως των 1,2 και 3 λεπτών όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.

Πίνακας 12: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος βενζίνης-ξηρού πάγου.

Ξηρός Παγος (g)	Βενζίνη (ml)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (Λεπτά)
15	100	-20	1
15	100	-19	1
15	100	-18	1
15	100	-17	1
15	100	-16	1
15	100	-15	1
15	100	-14	1
15	100	-13	1
15	100	-12	1
15	100	-11	1
15	100	-10	1
15	100	-9	2
15	100	-8	3
15	100	-7	3
15	100	-6	2
15	100	-5	2
15	100	-4	2
15	100	-3	2
15	100	-2	2
15	100	-1	2
15	100	0	4
15	100	1	3
15	100	2	2
15	100	3	3
15	100	4	4
15	100	5	4
15	100	6	3
15	100	7	3
15	100	8	3
15	100	9	4
15	100	10	5



Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

Το διάλυμα όμως αυτό θα μπορούσε να χρησιμεύσει στην επίτευξη της τιμής θερμοκρασίας 5°C καθώς με μόλις 7 γραμμάρια (πίνακας 13) μπορεί να διατηρηθεί σε αυτήν την θερμοκρασία για τον χρόνο των 3 λεπτών όπως φαίνεται στο διάγραμμα 8.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος βενζίνης-ξηρού πάγου.

Ξηρός Παγός (g)	Βενζίνη (ml)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (Λεπτά)
7	100	3	3
7	100	4	3
7	100	5	3
7	100	6	4



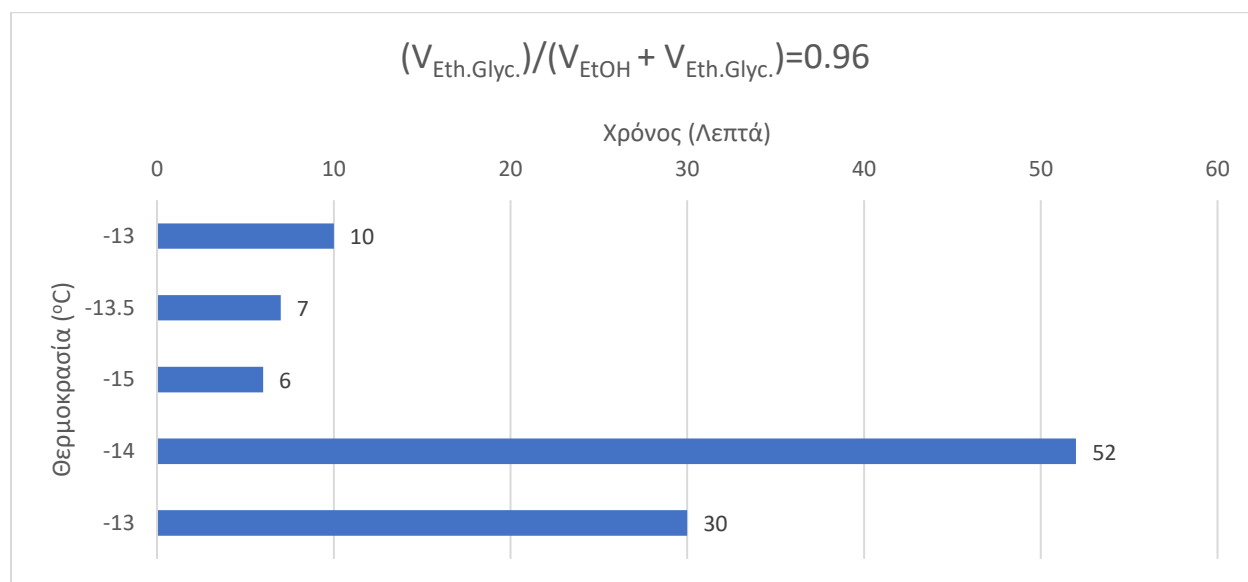
Διάγραμμα 8: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία

4.1.8 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος αιθανόλης-αιθυλενογλυκόλης σε μεγαλύτερο όγκο

Σε αυτήν την περίπτωση όπου είναι μια επανάληψη του πειράματος για την θερμοκρασία των -15°C σε μεγαλύτερο όγκο της τάξεως του μισού λίτρου αιθυλενογλυκόλης γίνεται αντιληπτή η μεγάλη ποσότητα ξηρού πάγου που απαιτείται (πίνακας 14). Έτσι απαιτείται ποσότητα τουλάχιστον 175 γραμμαρίων ξηρού πάγου για την επίτευξη των -15°C και ο χρόνος διατήρησης του διαλύματος σε αυτήν την θερμοκρασία είναι 6 λεπτά. Στην κατά ένα βαθμό υψηλότερη θερμοκρασία (-14°C) ο χρόνος διατήρησης του διαλύματος είναι 52 λεπτά και είναι σημαντικά μεγαλύτερος όπως φαίνεται στο διάγραμμα 9.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα θερμοκρασιών με ογκομετρική αναλογία διαλύματος $(V_{Eth.Glyc.})/(V_{EtOH} + V_{Eth.Glyc.}) = 0.96$.

Ξηρός Πάγος (g)	Ethylene Glycol (ml)	Ethanol (ml)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (Λεπτά)
130	500	21	-13	10
150	500	21	-13.5	7
175	500	21	-15	6
175	500	21	-14	52
175	500	21	-13	30



Διάγραμμα 9: Αποτελέσματα επιτυχημένης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο διατήρησης του διαλύματος σε κάθε θερμοκρασία.

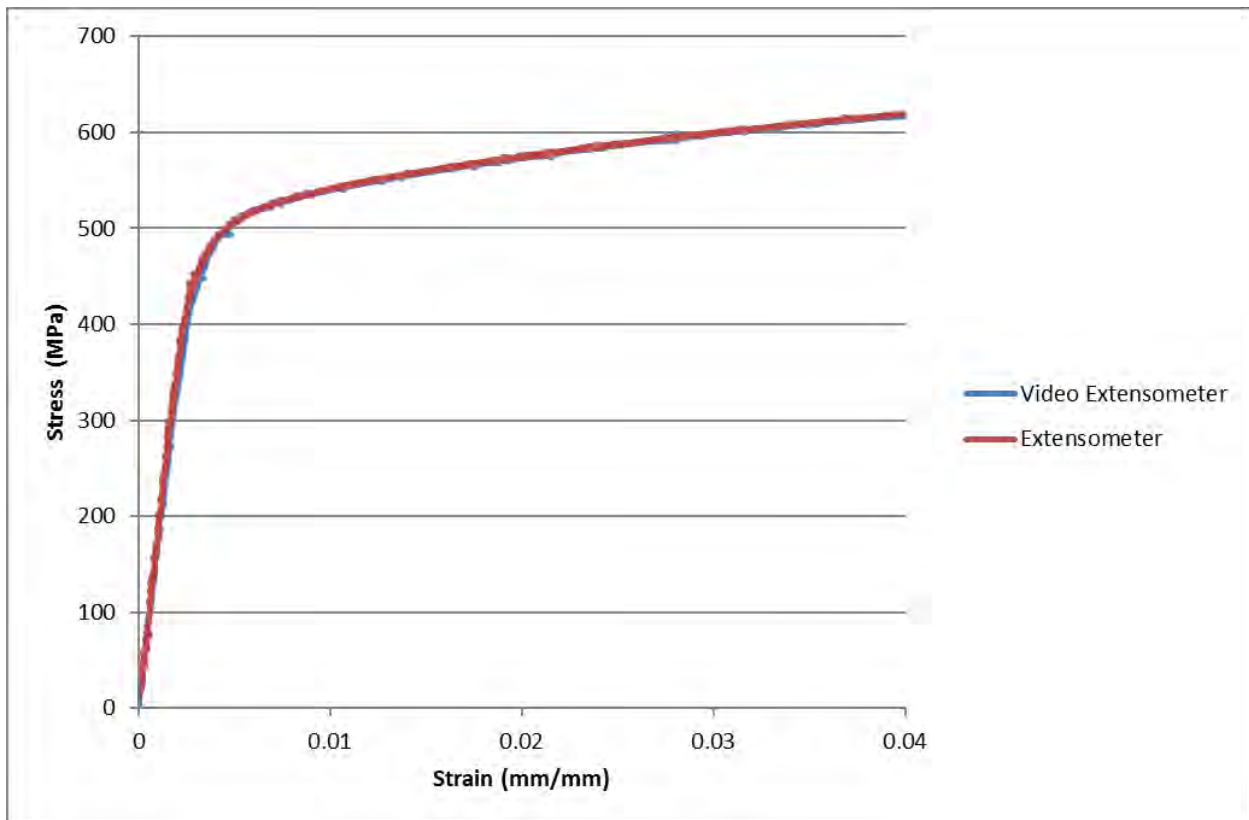
4.1.9 Πείραμα με ογκομετρική αναλογία διαλύματος πάγου-νερού

Η επίτευξη της τιμής της θερμοκρασίας 0°C πραγματοποιήθηκε με διάλυμα πάγου-νερού καθώς αυτό διατηρήθηκε για 9 λεπτά σε αυτήν στην θερμοκρασία. Η θερμοκρασία των 5°C επιτεύχθηκε με παγωμένο νερό από το ψυγείο.

4.2 Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού

4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση οπτικού επιμηκυνσιομέτρου-επιμηκυνσιομέτρου επαφής

Η ακρίβεια της μέτρησης παραμορφώσεων με το οπτικό επιμηκυνσιόμετρο επαληθεύεται συγκρίνοντας τις τιμές που καταγράφει το σύστημα με τις αντίστοιχες τιμές που καταγράφει το συμβατικό επιμηκυνσιόμετρο επαφής, σε ένα πείραμα εφελκυσμού.

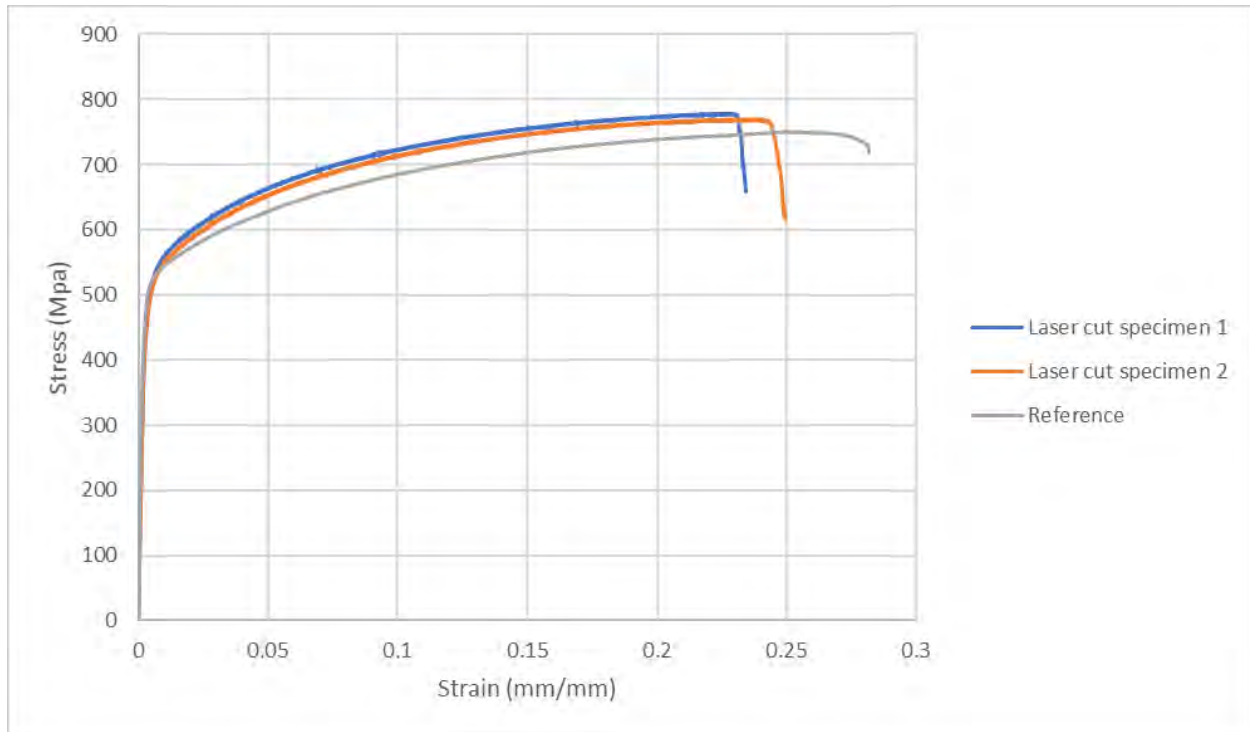


Διάγραμμα 10: Σύγκριση αποτελεσμάτων συμβατικού επιμηκυνσιομέτρου-οπτικού επιμηκυνσιομέτρου σε πείραμα εφελκυσμού.

Τα αποτελέσματα των καταγραφών των δύο μεθόδων παρουσιάζονται στο διάγραμμα 10 και υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο καμπυλών οπότε τα αποτελέσματα που εξάγονται από το σύστημα του οπτικού επιμηκυνσιομέτρου είναι αποδεκτά.

4.2.2 Επίδραση μηχανουργικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες

Για την κοπή των δοκιμίων εφελκυσμού δοκιμάσθηκε αρχικά η μέθοδος κοπής με laser. Από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων εφελκυσμού παρατηρήθηκαν μεταβολές στην συμπεριφορά σ-ε του υλικού σε σχέση με δοκίμια που είχαν συμβατική μηχανουργική κοπή.

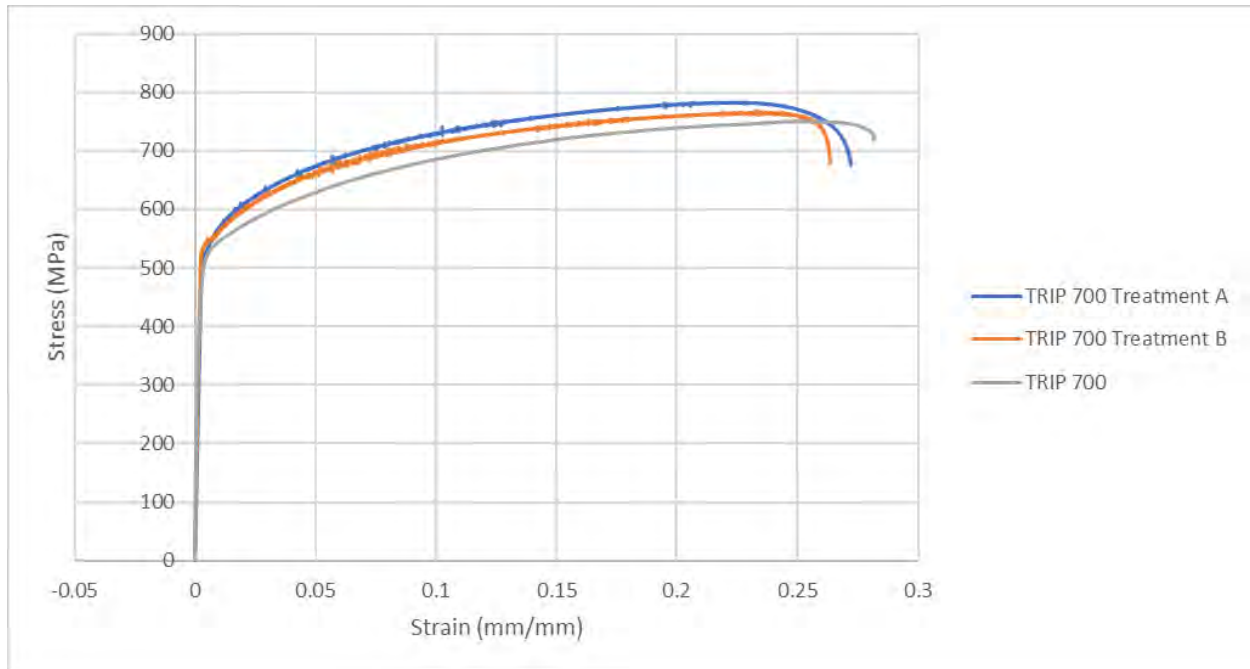


Διάγραμμα 11: Σύγκριση καμπύλης εφελκυσμού δοκιμίων ,που κόπηκαν με laser, με την reference καμπύλη εφελκυσμού του υλικού.

Στο διάγραμμα 11 φαίνεται ότι τα δοκίμια που είχαν υποστεί κοπή με laser έδειξαν αυξημένο όριο διαρροής και μειωμένη ολική παραμόρφωση. Αυτό ίσως οφείλεται στην διαφορετική μικροδομή του υλικού που προήλθε από την θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη κοπής των δοκιμίων λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας κοπής. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η συμβατική μηχανουργική κοπή για την προετοιμασία των δοκιμίων.

4.2.3 Επίδραση θερμικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού στα τρία υλικά παρουσιάζονται στο διάγραμμα 12 ενώ οι μηχανικές ιδιότητες τους αποτυπώνονται στον πίνακα 15.



Διάγραμμα 12: Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού TRIP 700, TRIP 700 Treatment A, TRIP 700 Treatment B.

Πίνακας 15: Μηχανικές ιδιότητες Trip 700, Heat treatment A και Heat treatment B.

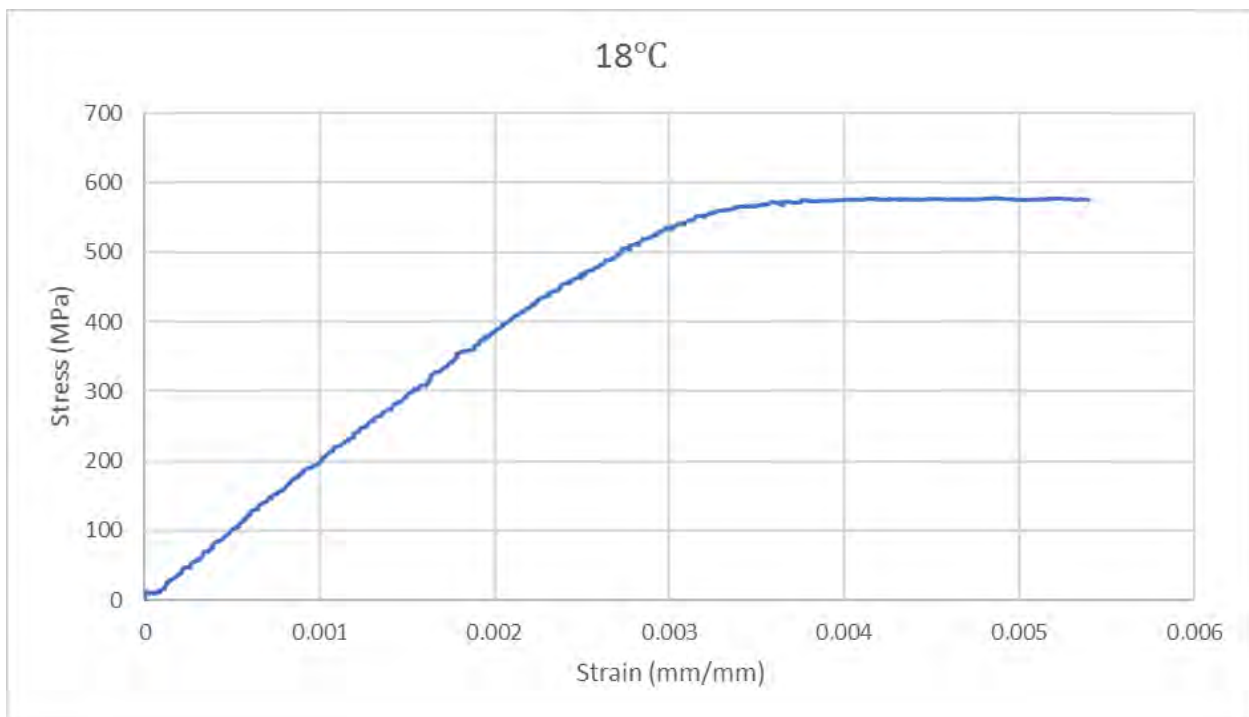
Υλικό	Όριο Διαρροής (MPa)	Όριο Θραύσης (MPa)	Εκθέτης εργοσκήρυσης (n)	Ομοιόμορφη Παραμόρφωση (mm/mm)	Παραμόρφωση Θραύσης (mm/mm)
Trip 700	517	748	0.23	0.24	0.28
Heat Treatment A	530	782	0.17	0.21	0.27
Heat Treatment B	540	764	0.19	0.23	0.26

Οι θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα η μεγάλη παραμονή στον μπαινιτικό μετασχηματισμό (Heat Treatment B) είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο όριο διαρροής σε σχέση την μικρή παραμονή στον μπαινιτικό μετασχηματισμό (Heat Treatment A). Παρατηρείται όμως ότι το υλικό που έχει

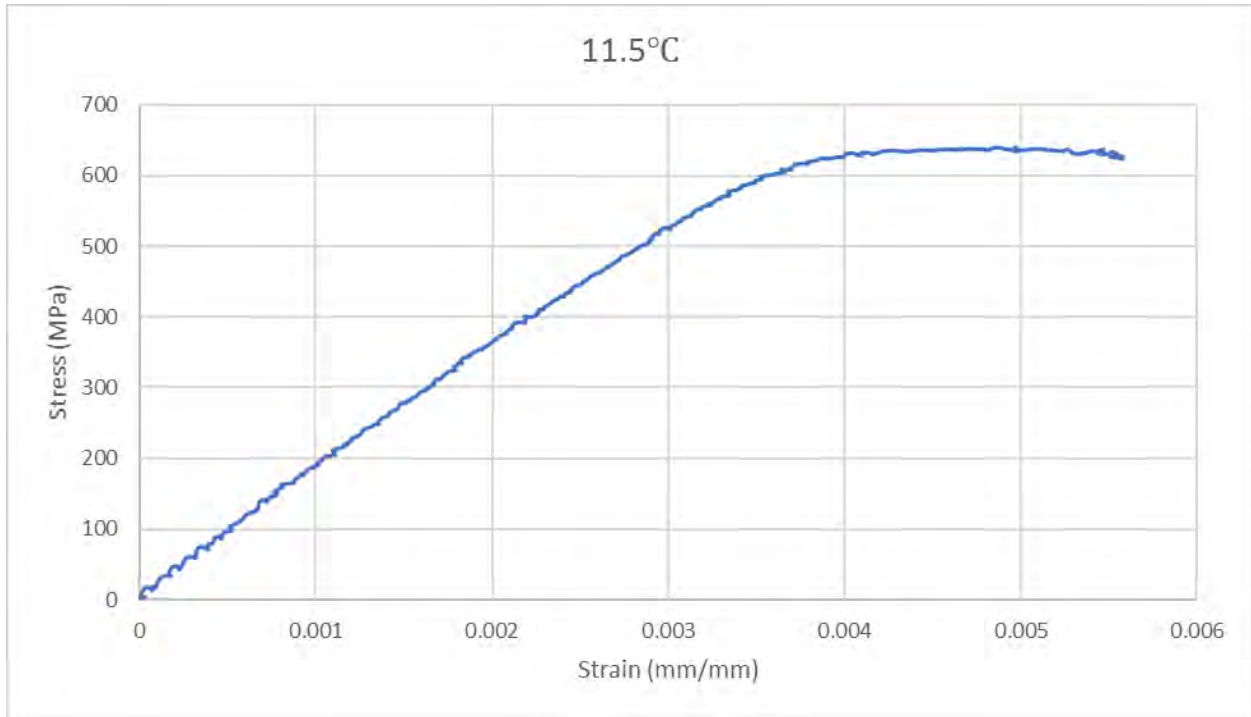
υποστεί την θερμική κατεργασία Β παρουσιάζει μεγαλύτερο εκθέτη εργοσκλήρυνσης, μικρότερο όριο θραύσης καθώς και μικρότερη παραμόρφωση θραύσης από ότι το υλικό που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία Α ενώ οι τιμή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης είναι ελάχιστα μεγαλύτερη.

4.2.4 Αποτελέσματα πειραμάτων με την μέθοδο SS-VT-TT σε χάλυβα TRIP 700

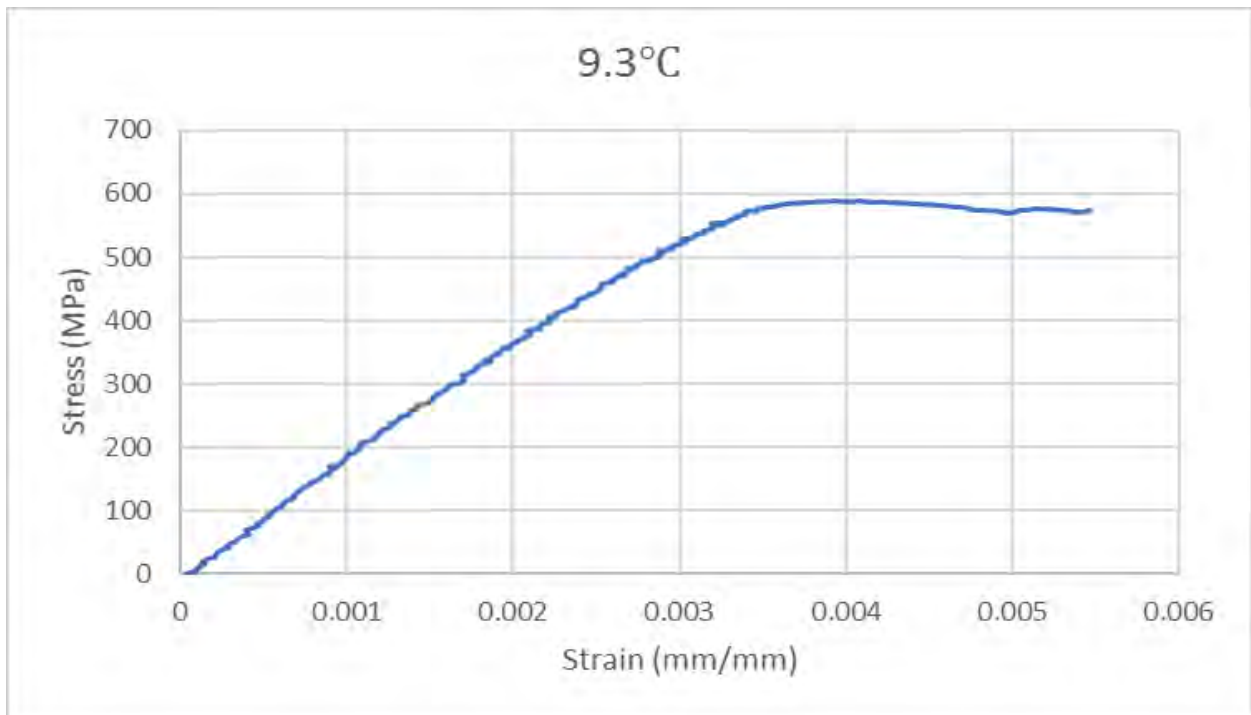
Για τον χάλυβα TRIP 700 κατεργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα φορτίσεων-αποφορτίσεων σύμφωνα με την μέθοδο SS-VT-TT στις θερμοκρασίες 18°C, 11.5°C, 9.3°C, 3.1°C, -3°C, -4.5°C, -7°C, -13°C, -14.1°C, -19.8°C και -25°C. Στα διαγράμματα 13-23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



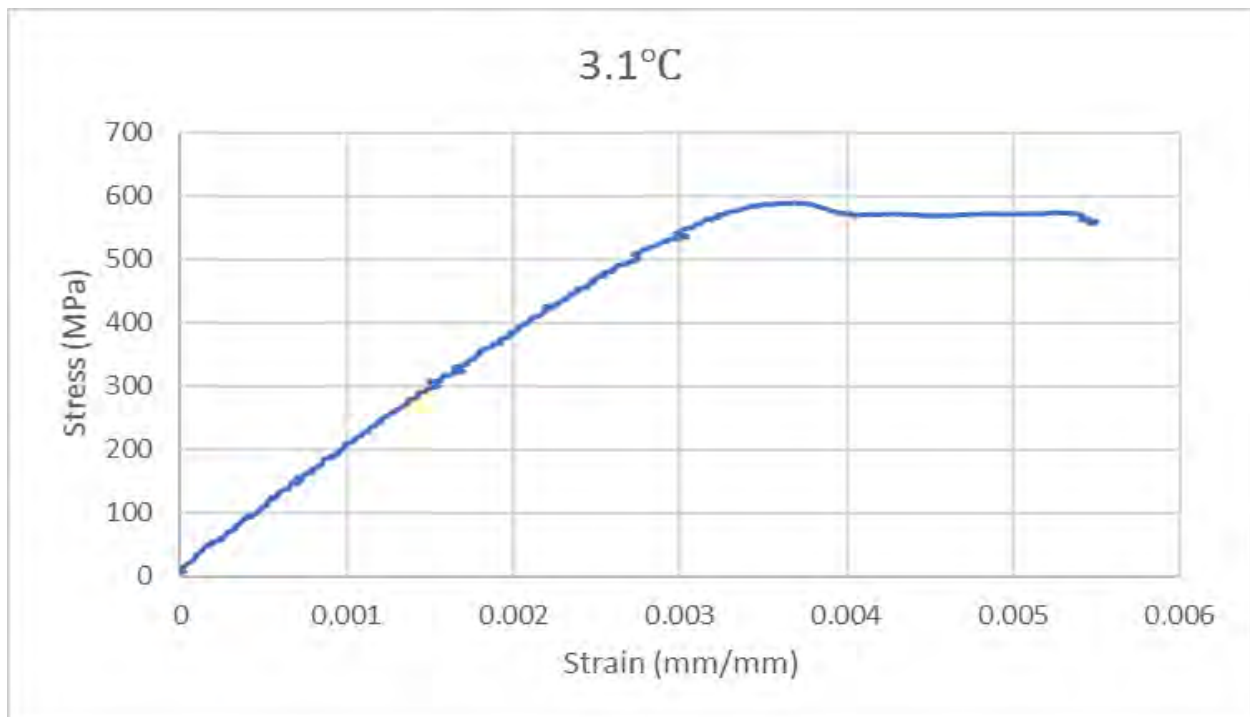
Διάγραμμα 13: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 18°C.



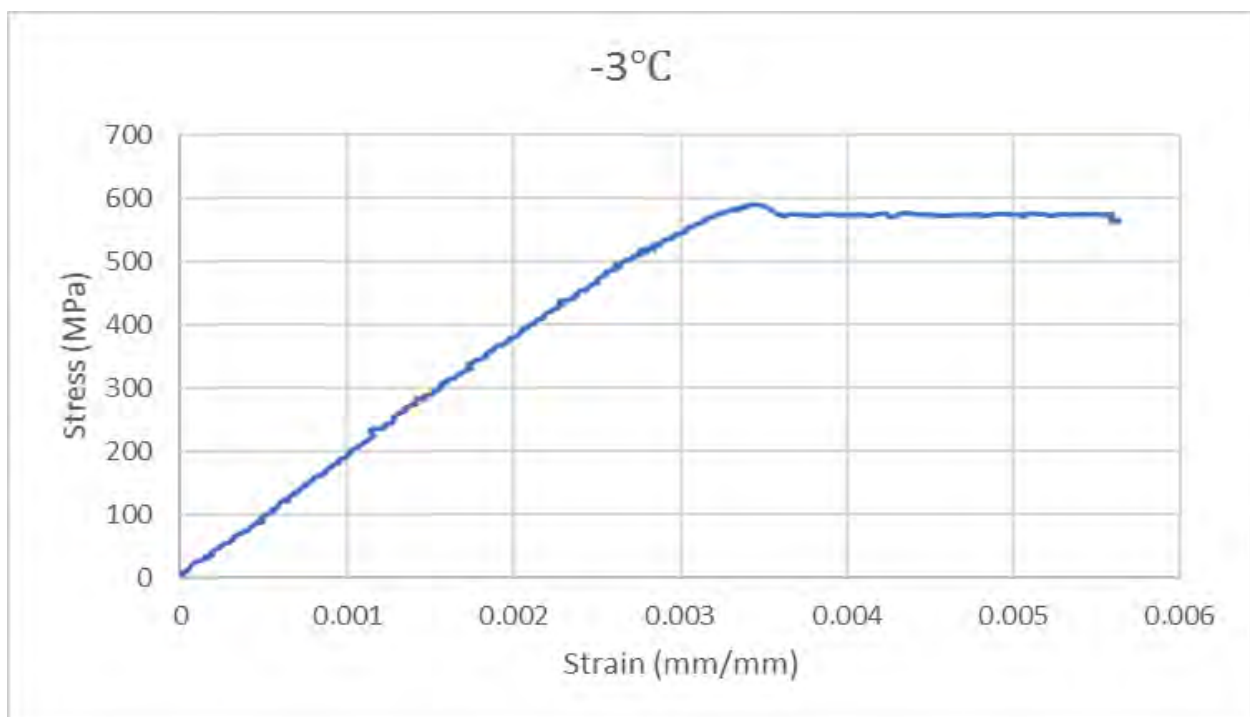
Διάγραμμα 14: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 11.5°C.



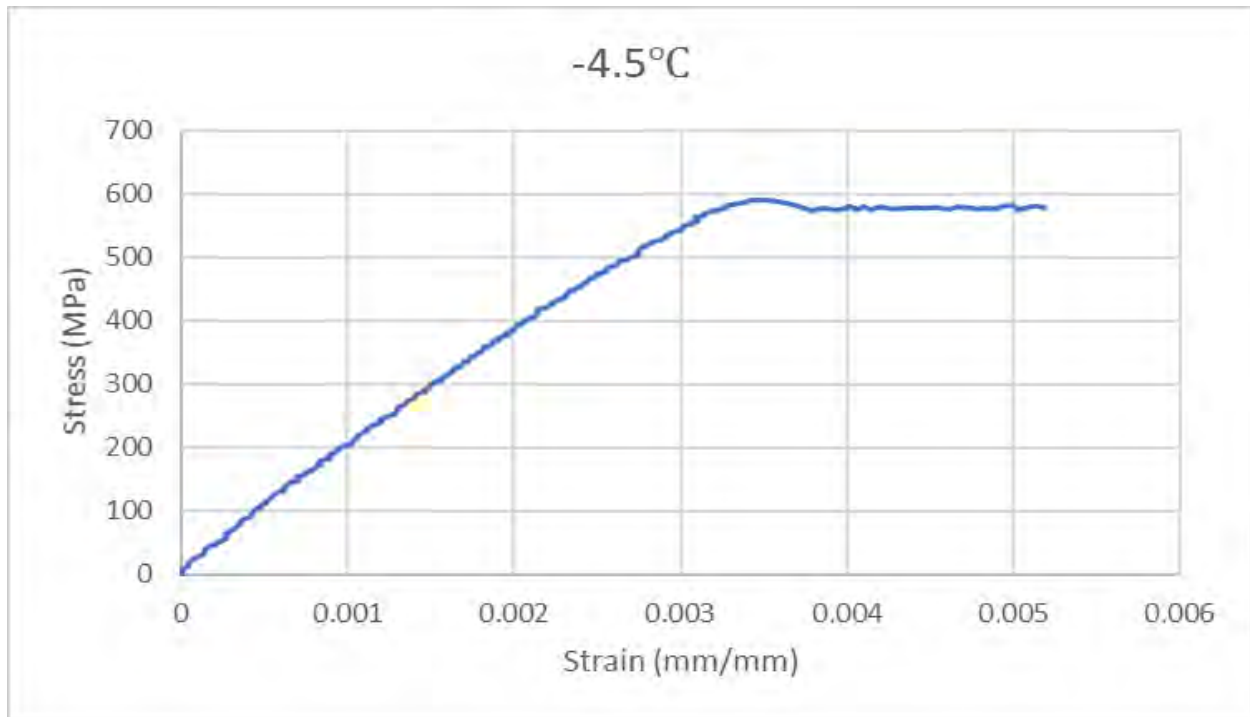
Διάγραμμα 15: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 9.3°C.



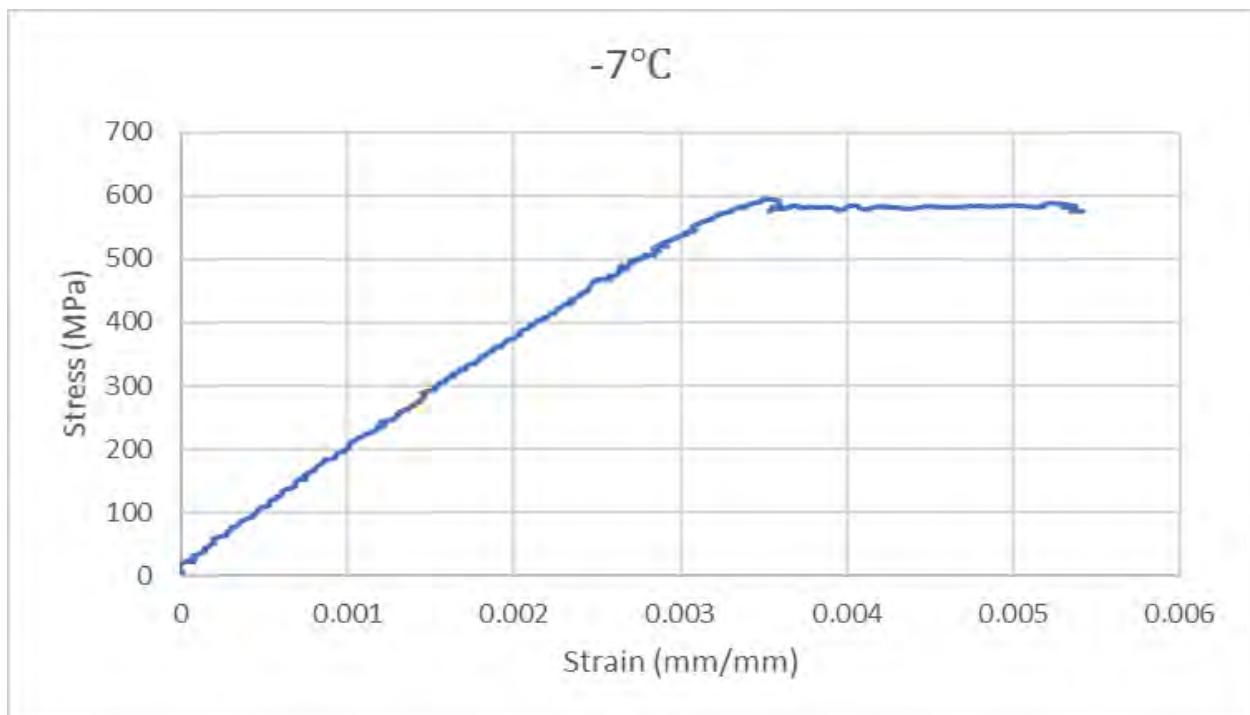
Διάγραμμα 16: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία 3.1°C.



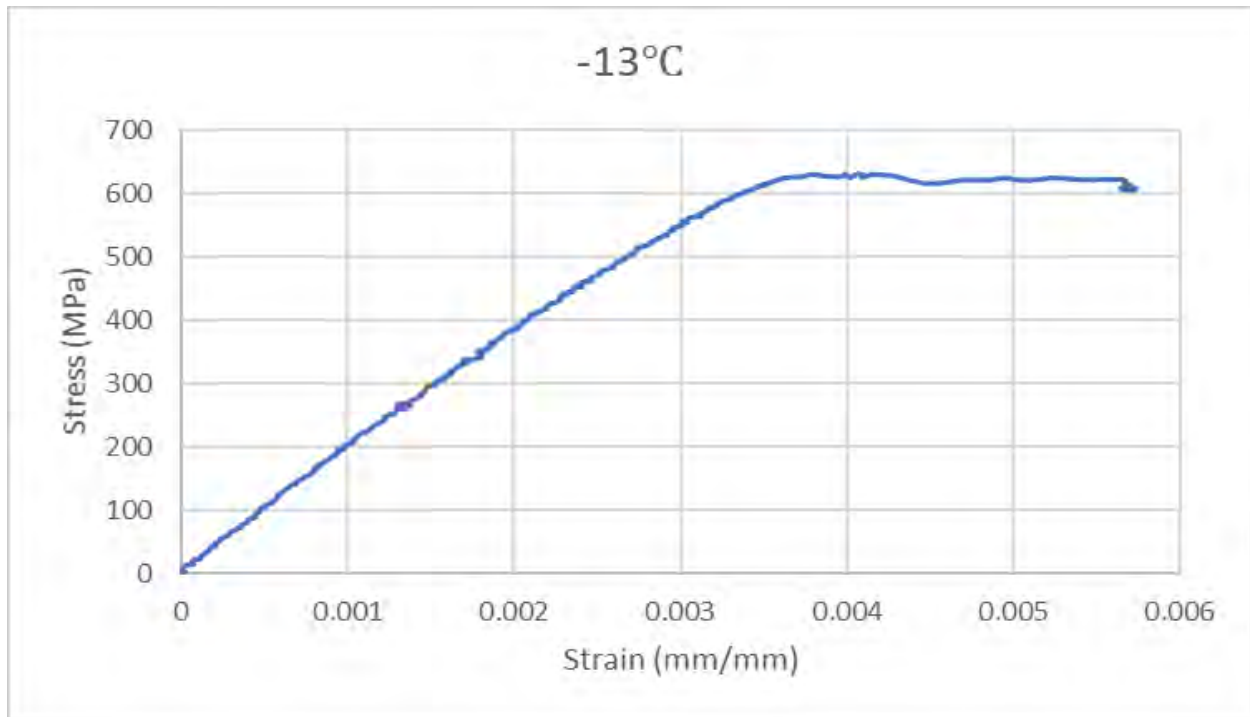
Διάγραμμα 17: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -3°C.



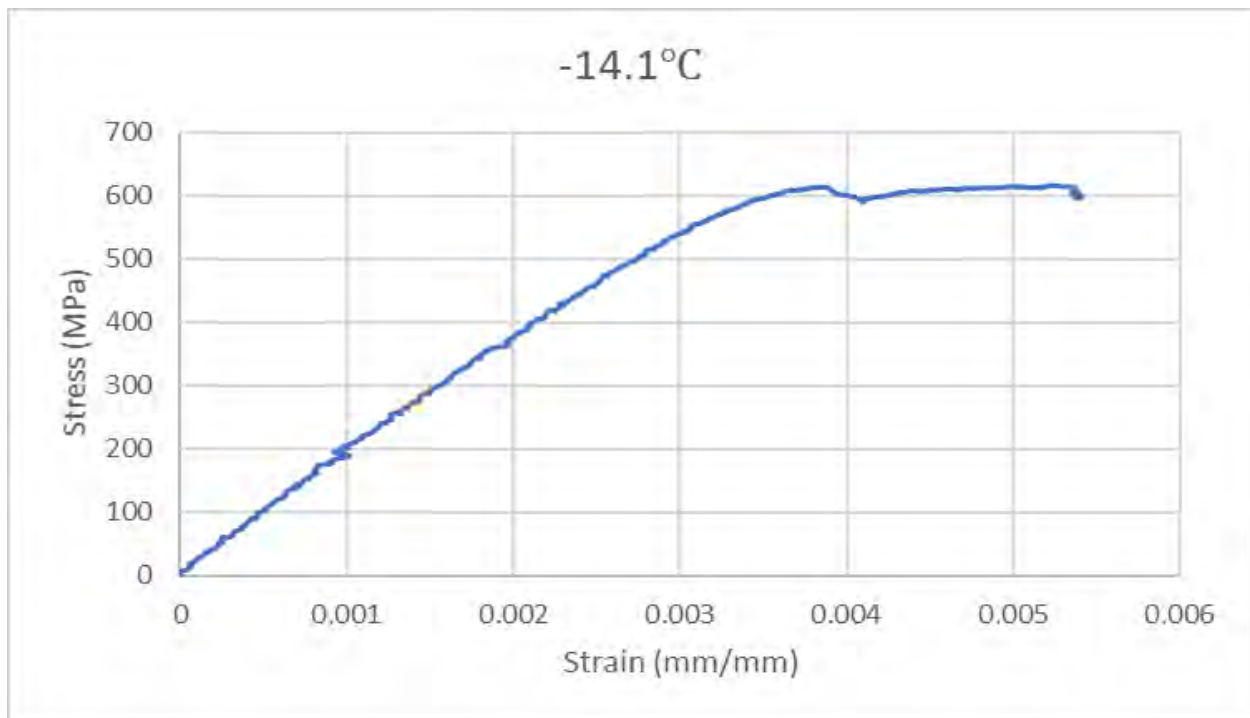
Διάγραμμα 18: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -4.5°C.



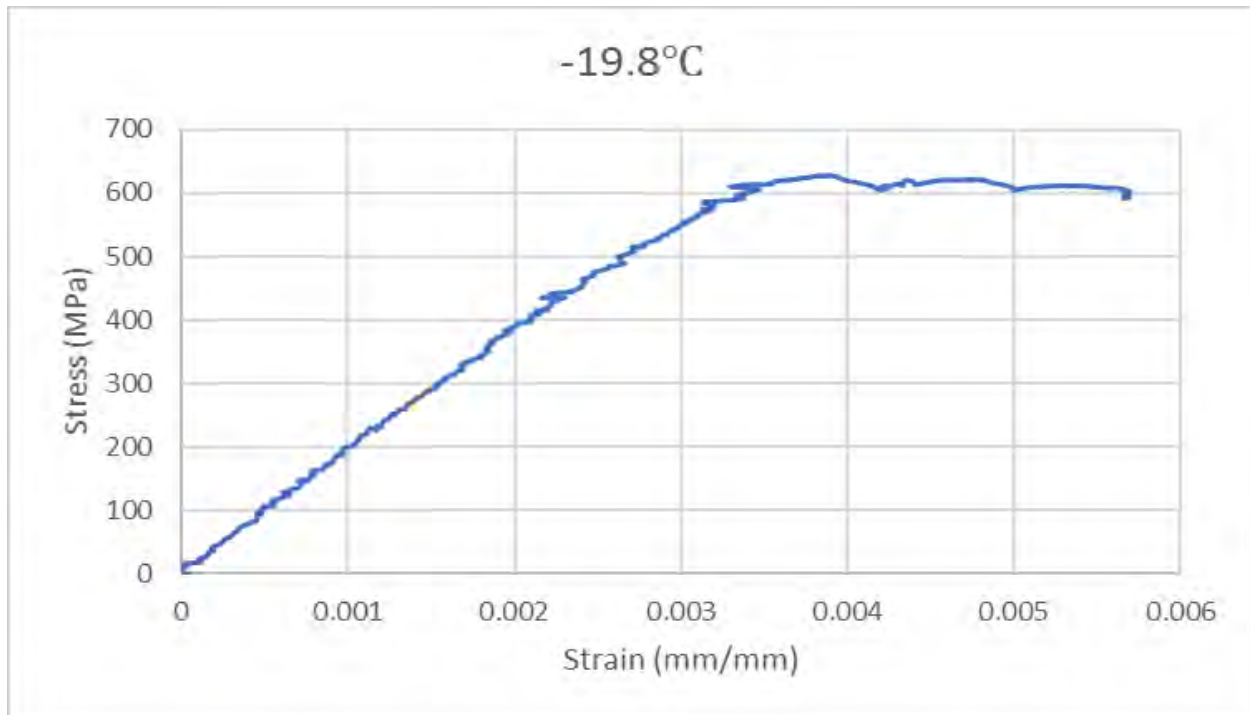
Διάγραμμα 19: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -7°C.



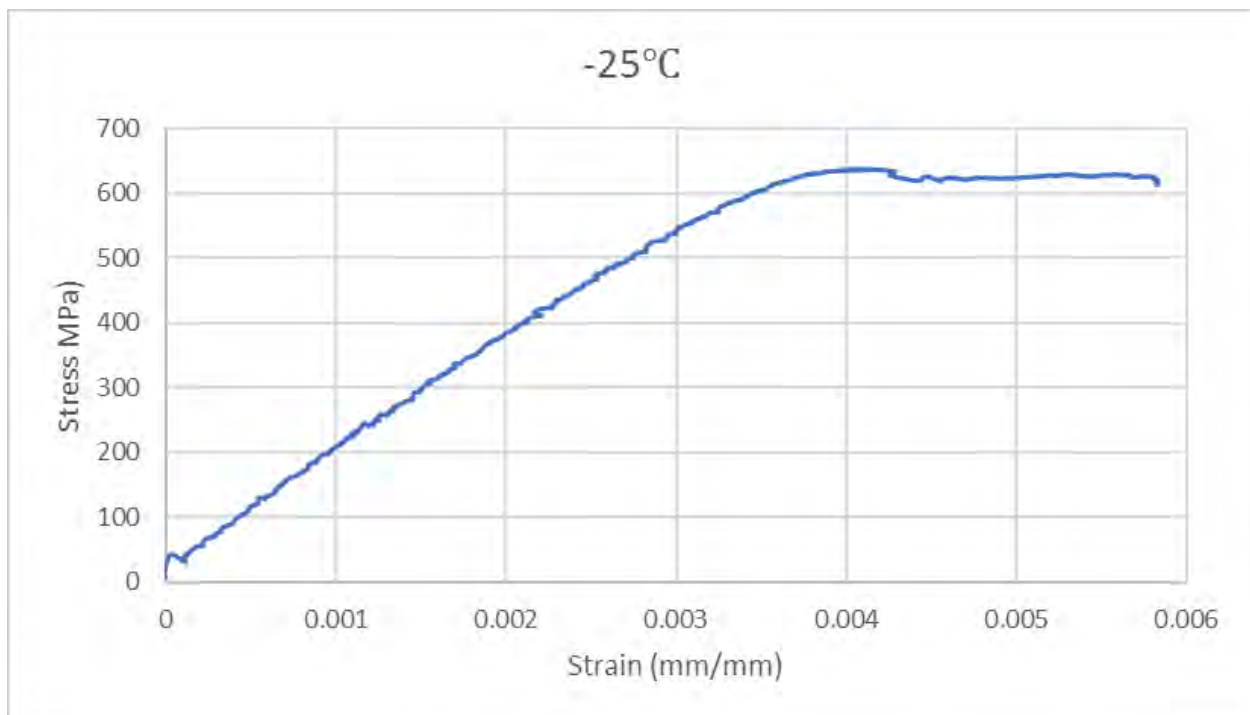
Διάγραμμα 20: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -13°C.



Διάγραμμα 21: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -14.1°C.



Διάγραμμα 22: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -19.8°C.

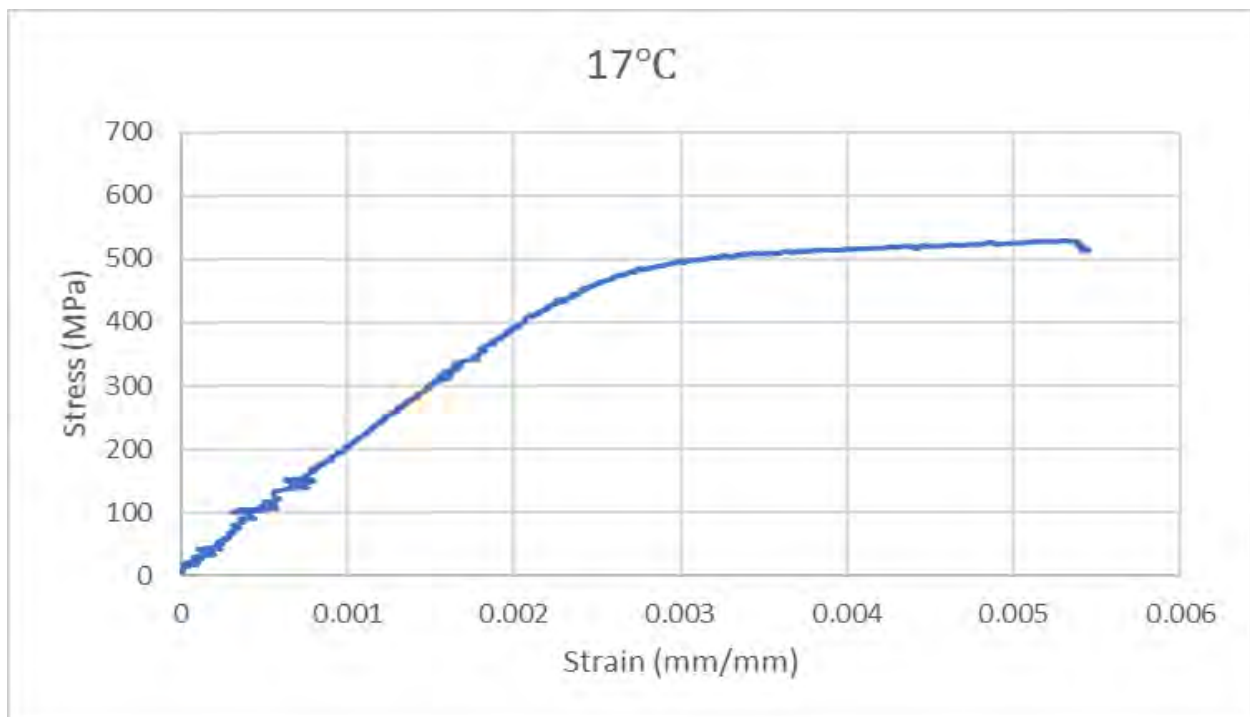


Διάγραμμα 23: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700 στην θερμοκρασία -25°C.

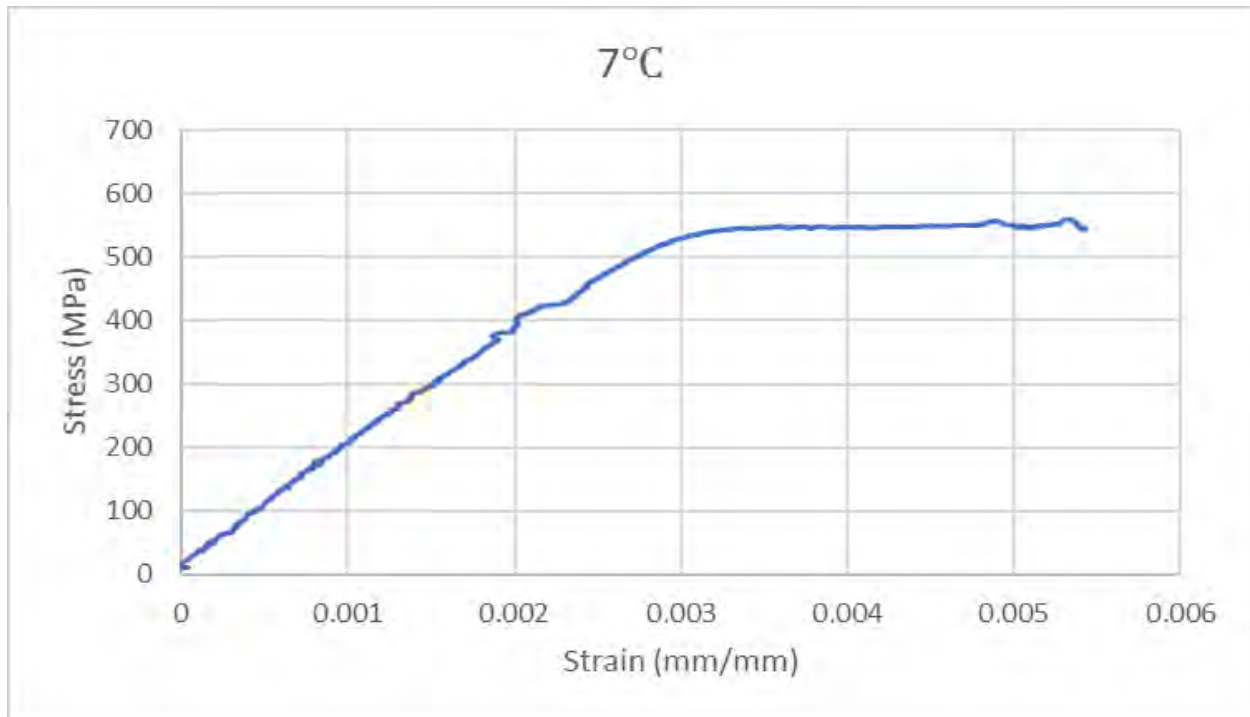
Από τα διαγράμματα 13- 23 φαίνεται ότι από την θερμοκρασία των 9°C , παρατηρείται σταδιακά η εμφάνιση ενός ομαλού φαινομένου τοπικής αποφόρτισης, που γίνεται πιο διακριτό στην περιοχή των - 3°C, ενώ στην συνέχεια φαίνεται να ομαλοποιείται ξανά για μικρότερες τιμές θερμοκρασιών .

4.2.5 Αποτελέσματα πειραμάτων φορτίσεων-αποφορτίσεων σε χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A

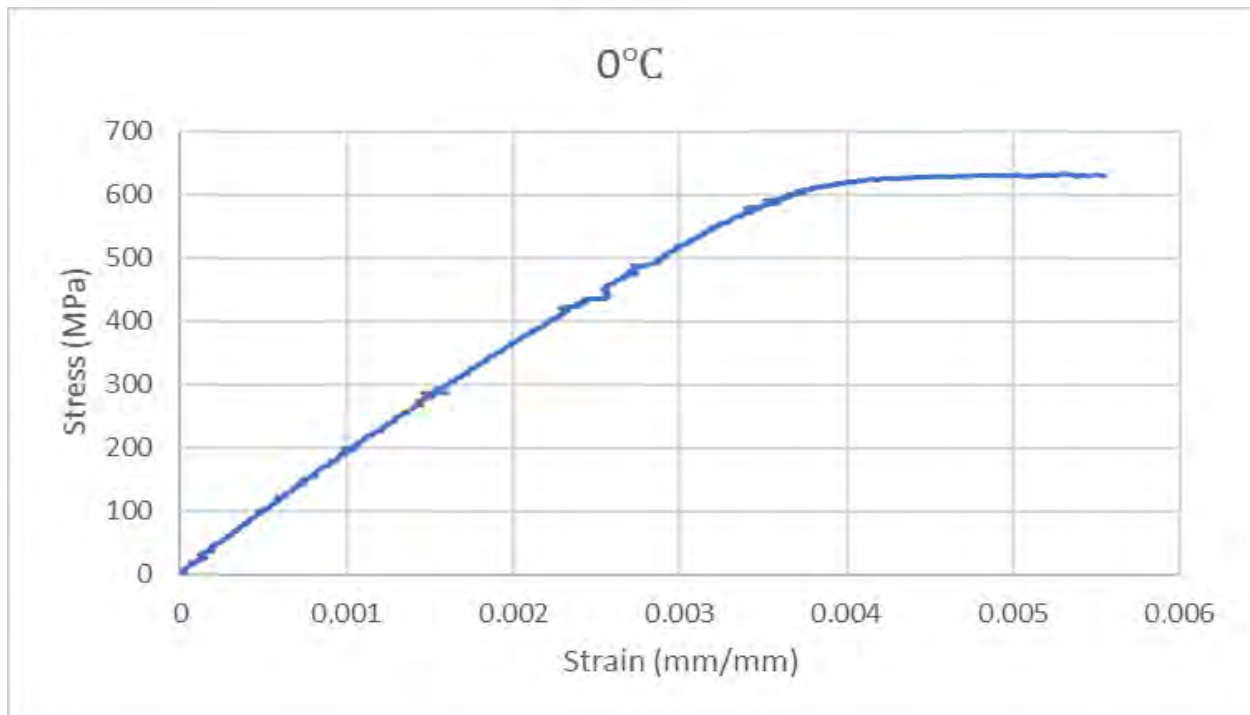
Για τον χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A πραγματοποιήθηκαν πειράματα φορτίσεων-αποφορτίσεων σύμφωνα με την μέθοδο SS-VT-TT στις θερμοκρασίες 17°C, 7°C, 0°C, -5°C, -7.5°C, -8°C, -11°C, -13°C, -19°C και -28°C. Στα διαγράμματα 24-33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



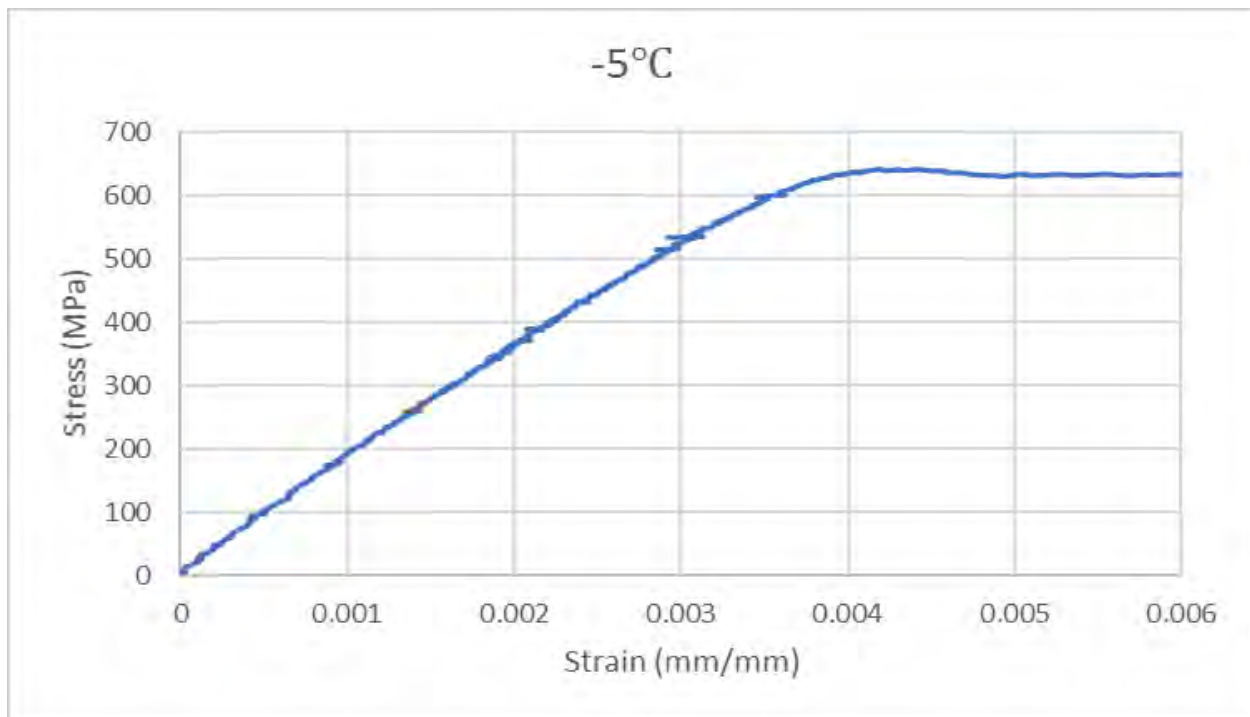
Διάγραμμα 24: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία 17°C.



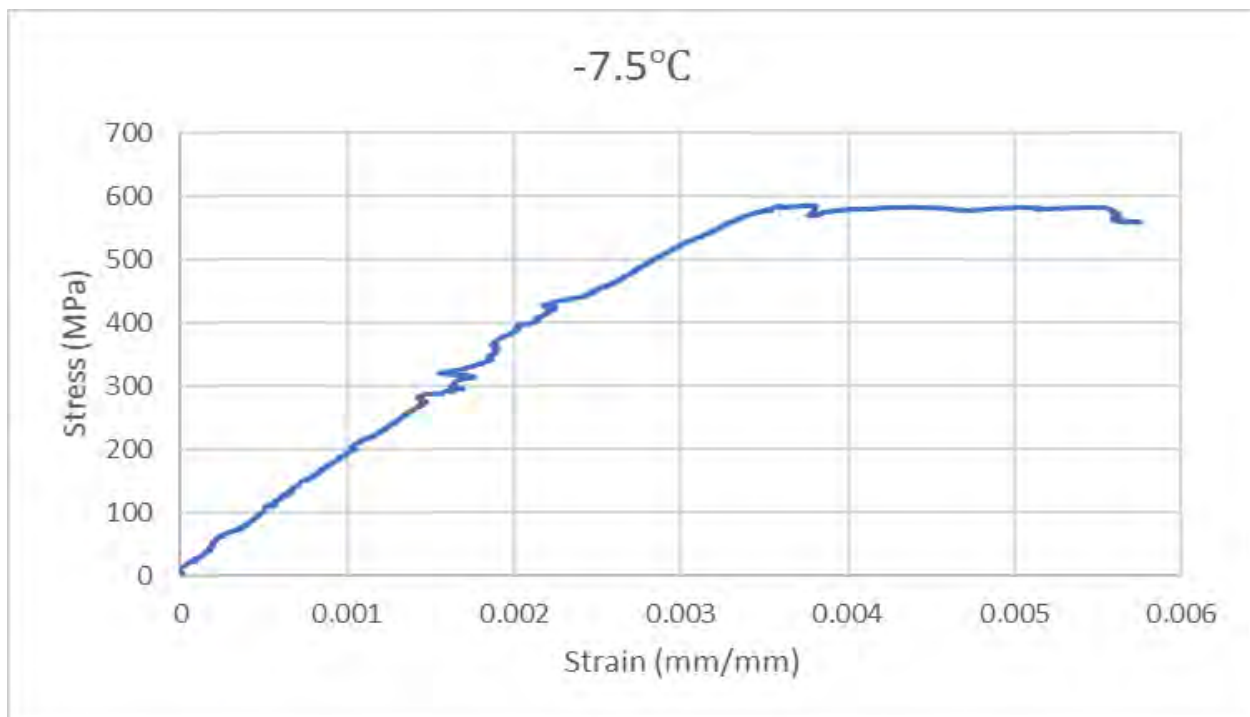
Διάγραμμα 25: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία 7°C.



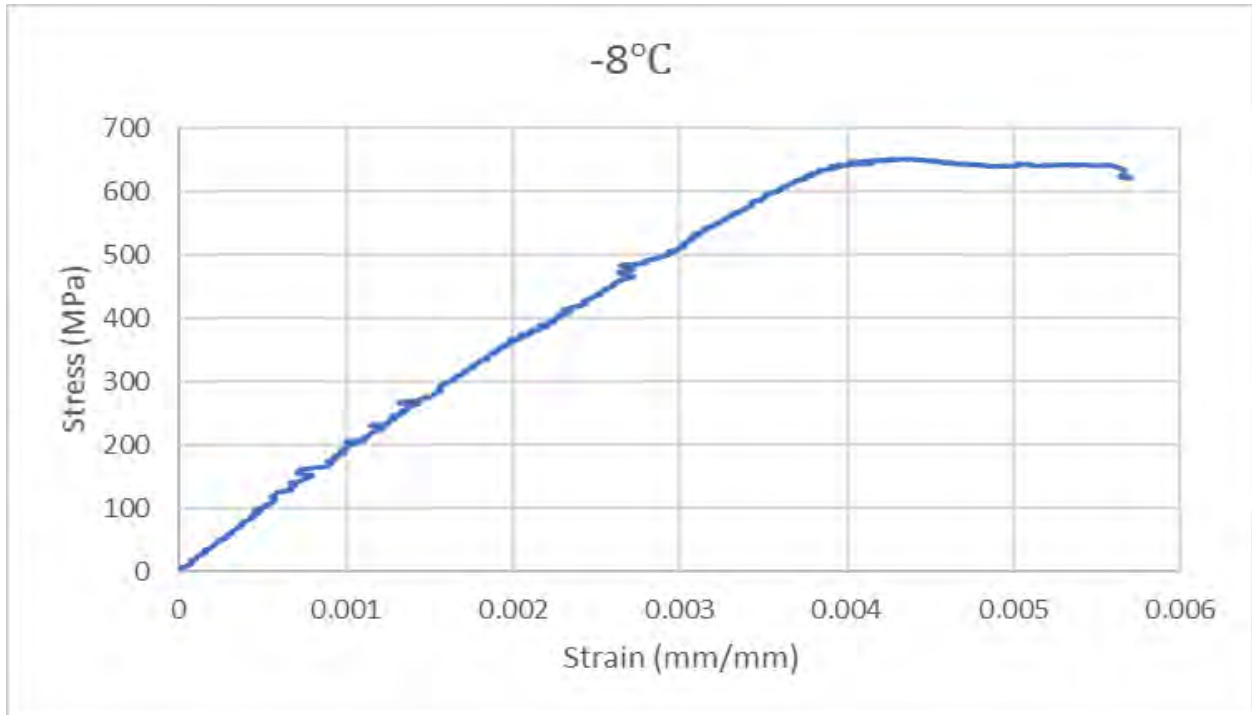
Διάγραμμα 26: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία 0°C.



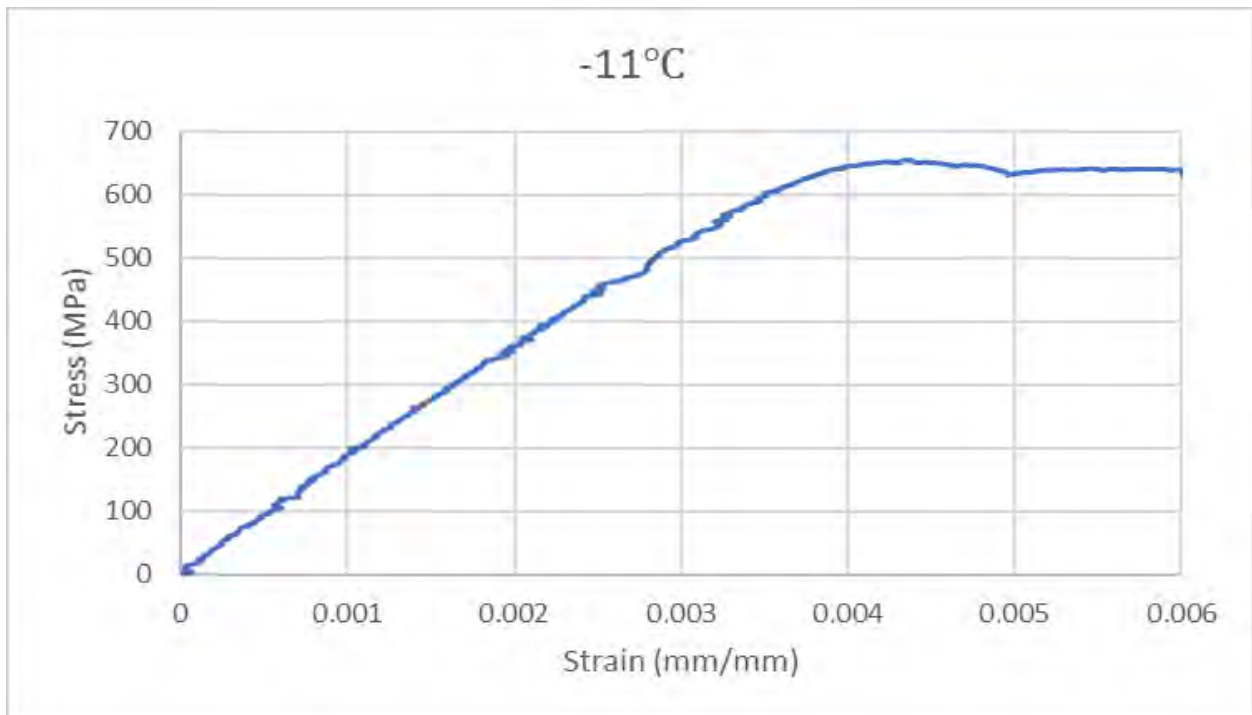
Διάγραμμα 27: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -5°C.



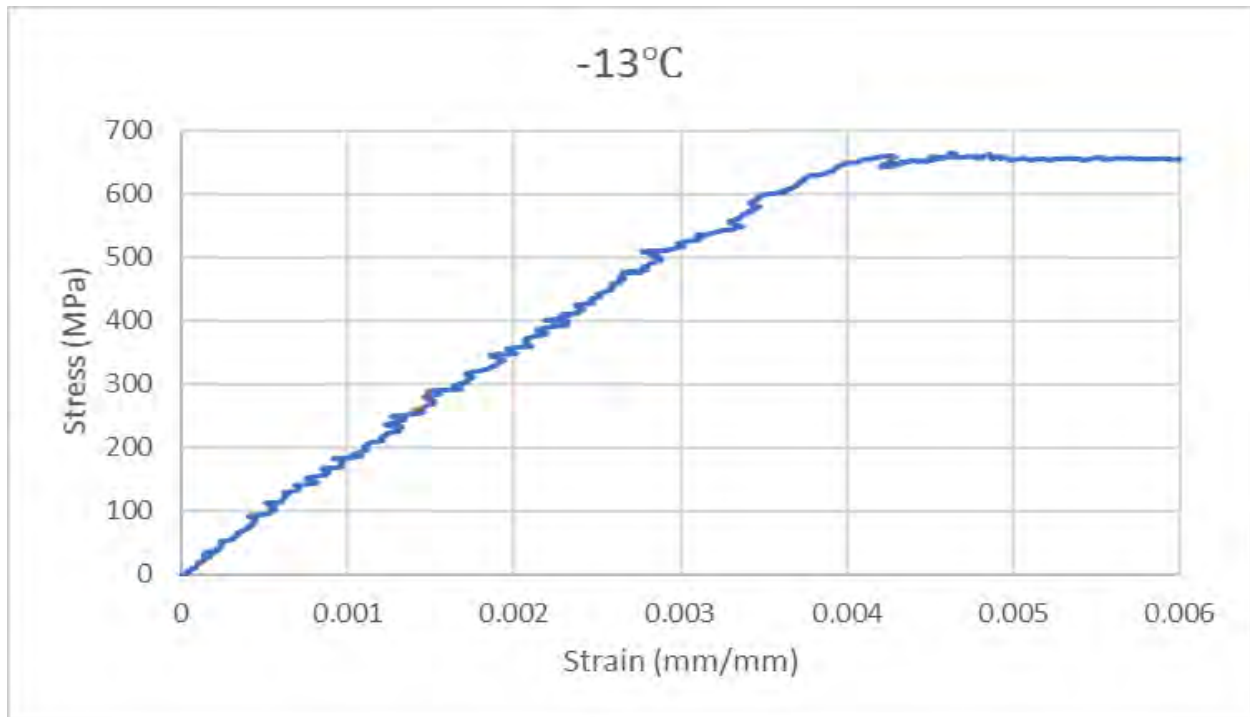
Διάγραμμα 28: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -7.5°C.



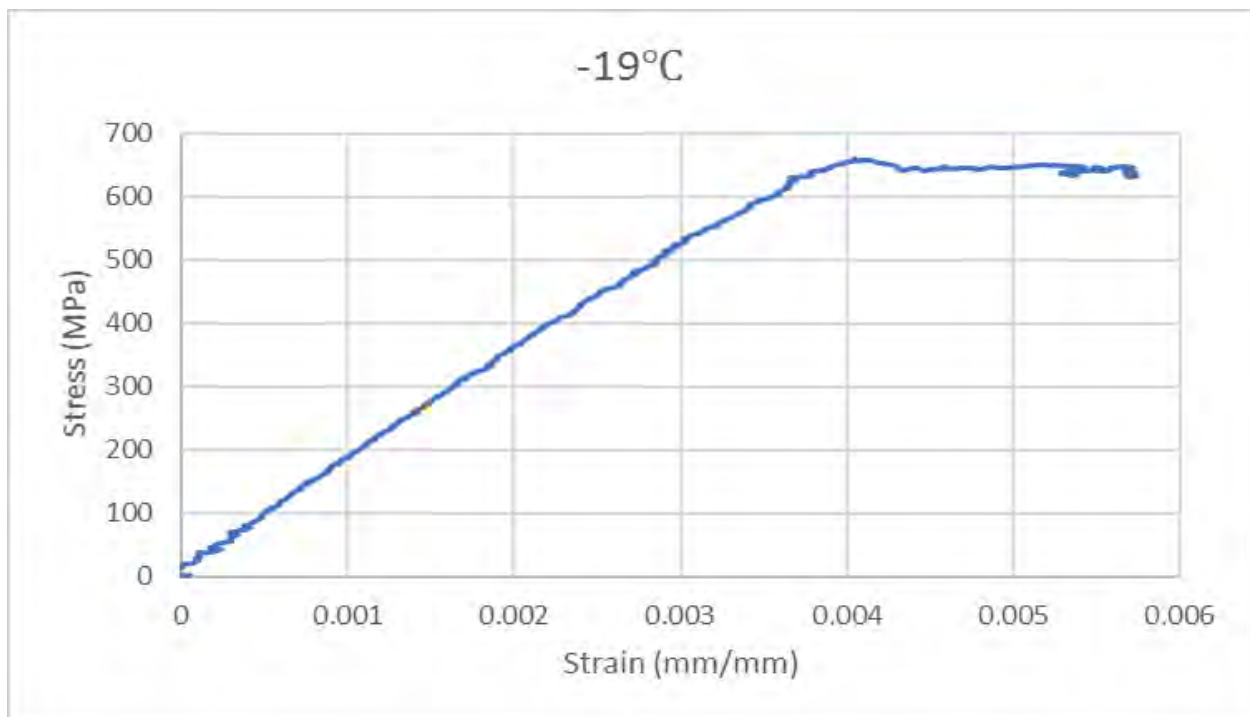
Διάγραμμα 29: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -8°C.



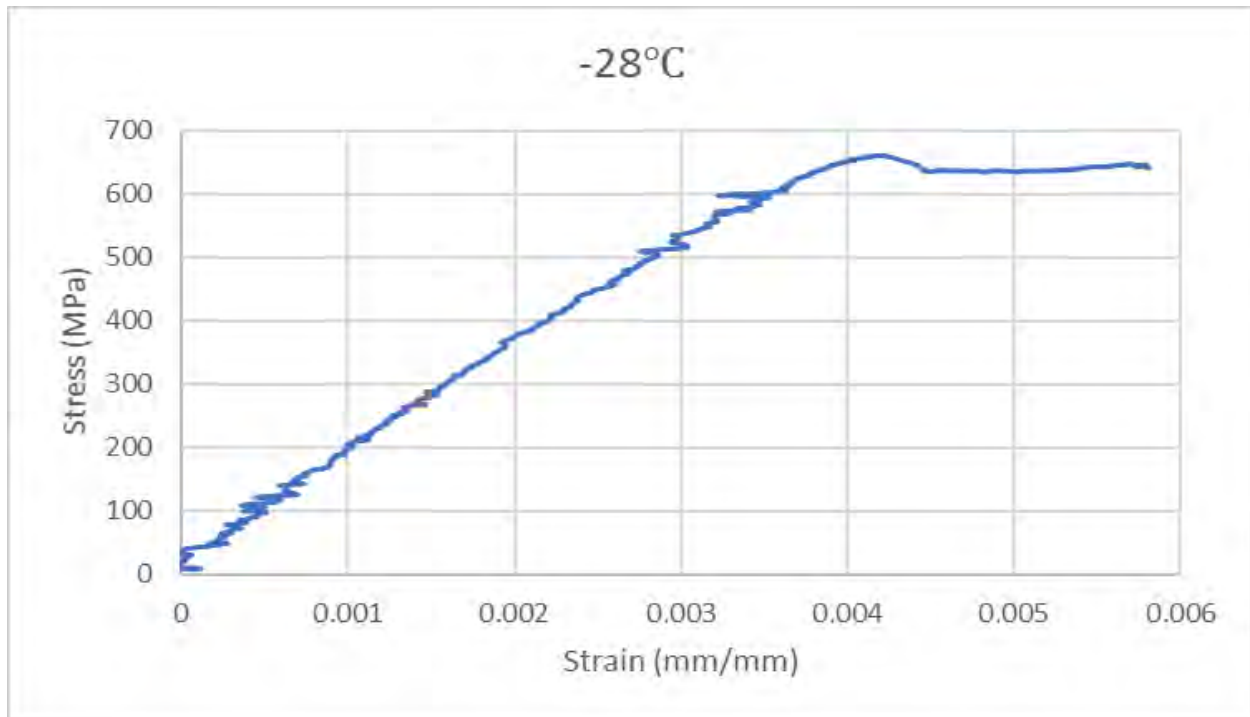
Διάγραμμα 30: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -11°C.



Διάγραμμα 31: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -13°C.



Διάγραμμα 32: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -19°C.

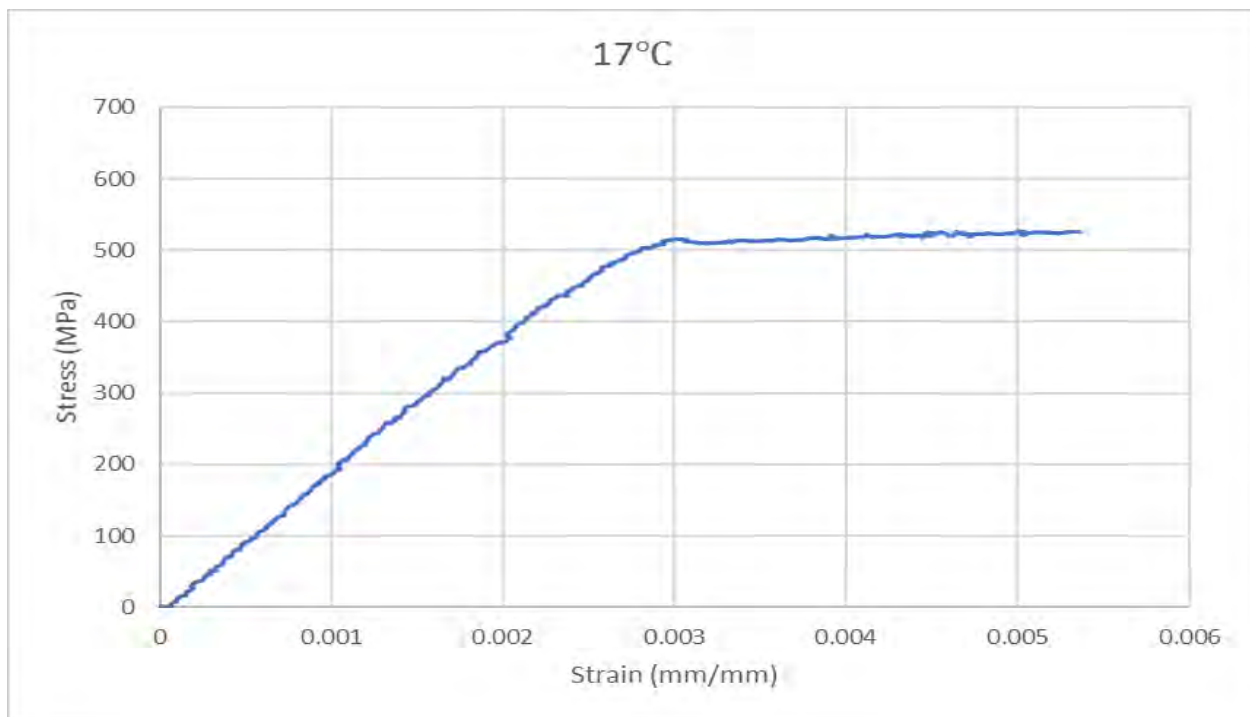


Διάγραμμα 33: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A, στην θερμοκρασία -28°C.

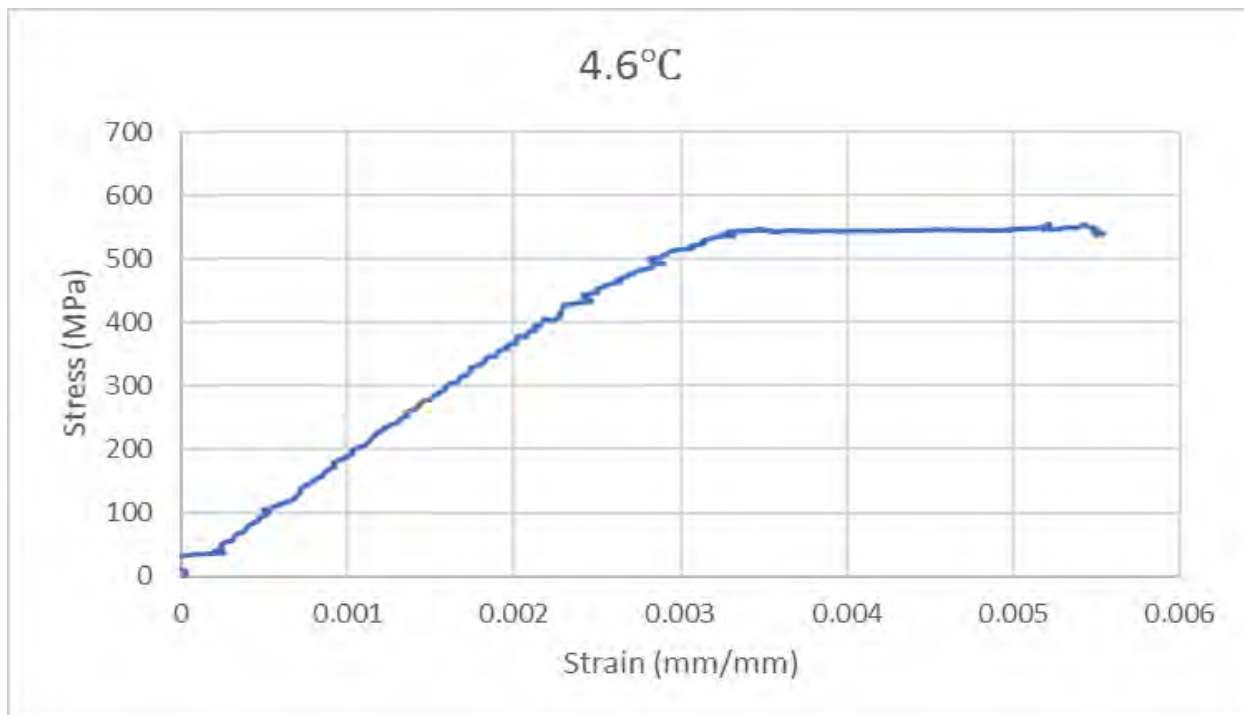
Για το υλικό TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία A και από τα διαγράμματα 24-33 φαίνεται ότι η μετάβαση στο τοπικό φαινόμενο αποφόρτισης επικεντρώνεται στην περιοχή των -13°C και ομαλοποιείται στην συνέχεια.

4.2.6 Αποτελέσματα πειραμάτων φορτίσεων-αποφορτίσεων σε χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B

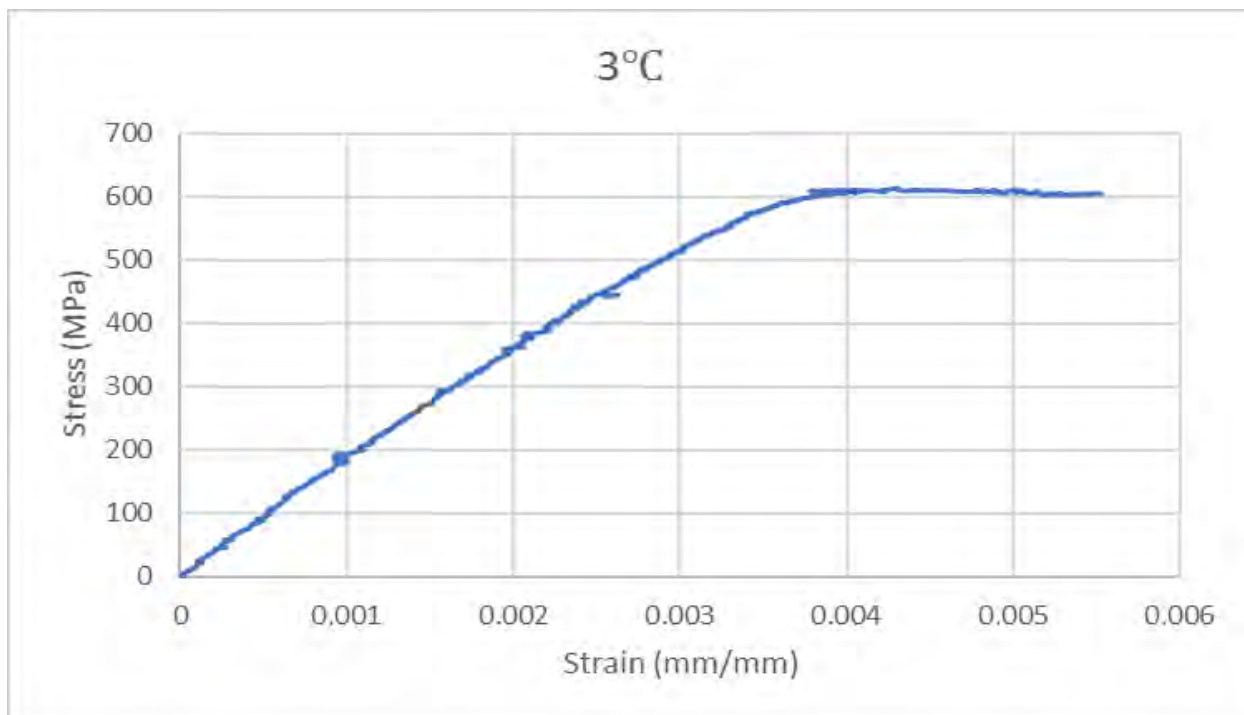
Για τον χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B πραγματοποιήθηκαν πειράματα φορτίσεων-αποφορτίσεων σύμφωνα με την μέθοδο SS-VT-Π στις θερμοκρασίες 17°C, 4.6°C, 3°C, 1.3°C, 0°C, -2°C, -3°C, -4.6°C, -6.5°C, -8°C, -10°C, -15°C, -20°C, -22°C και -27°C. Στα διαγράμματα 34-48 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



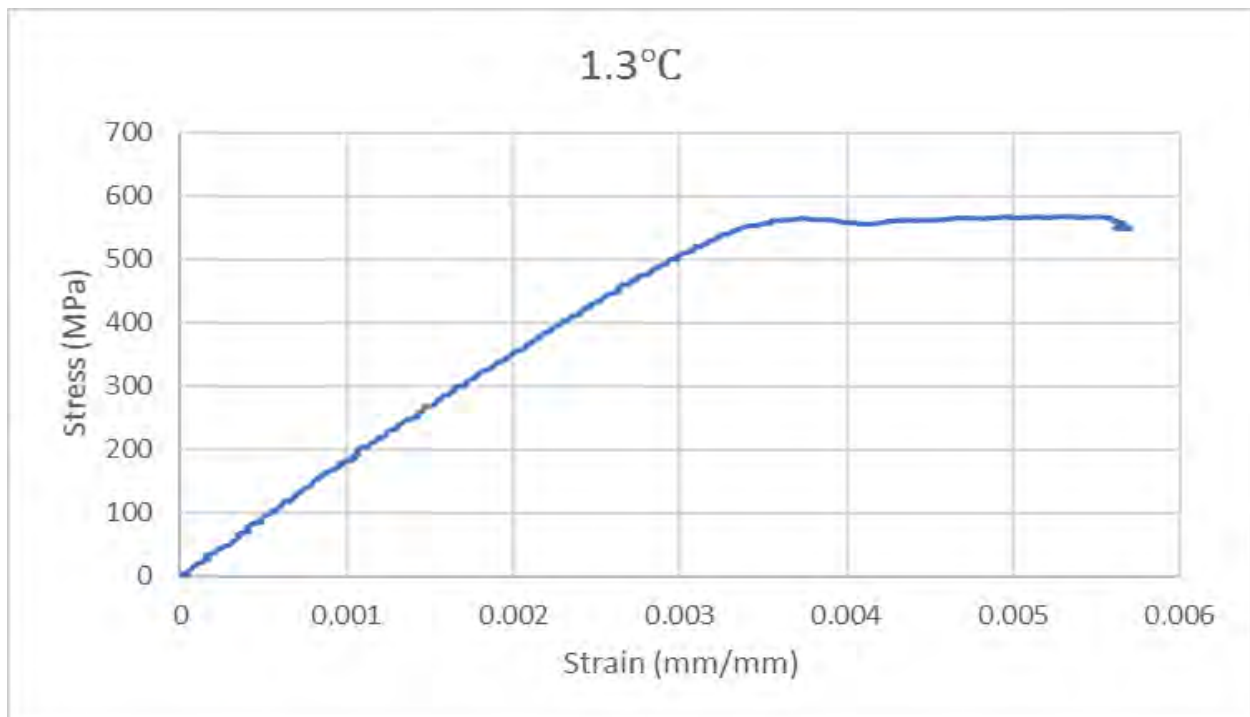
Διάγραμμα 34: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία 17°C.



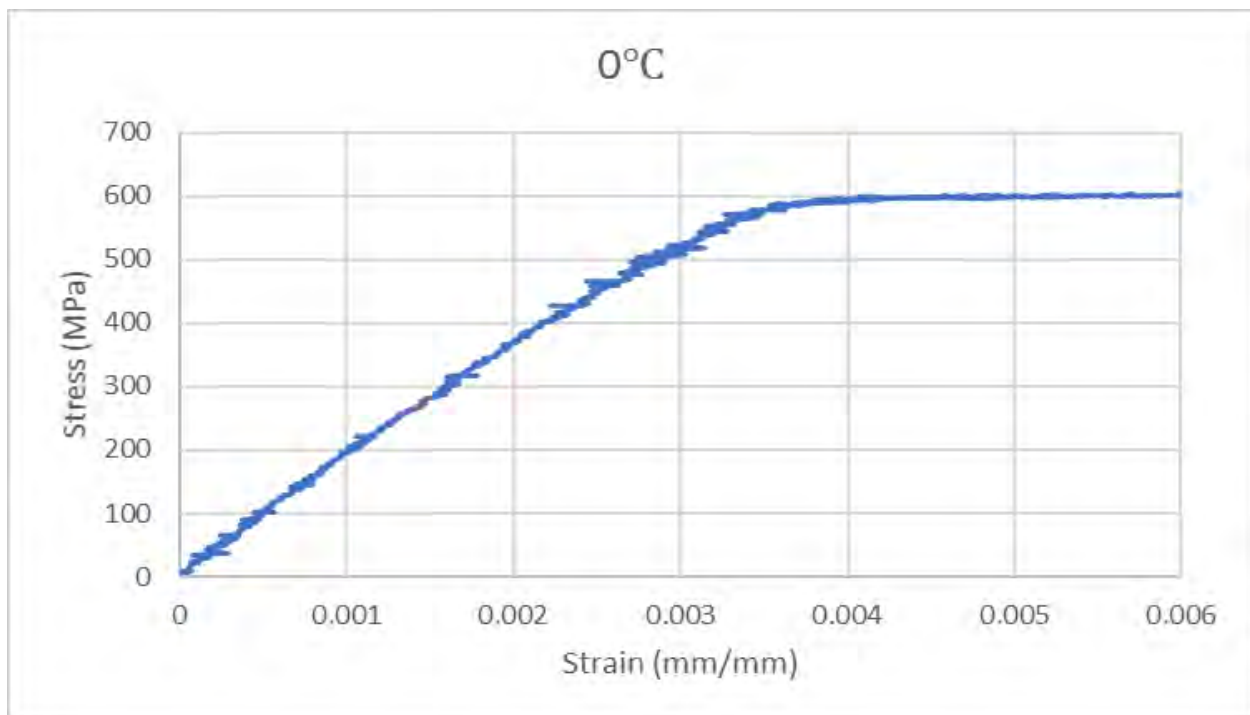
Διάγραμμα 35: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία 4.6°C.



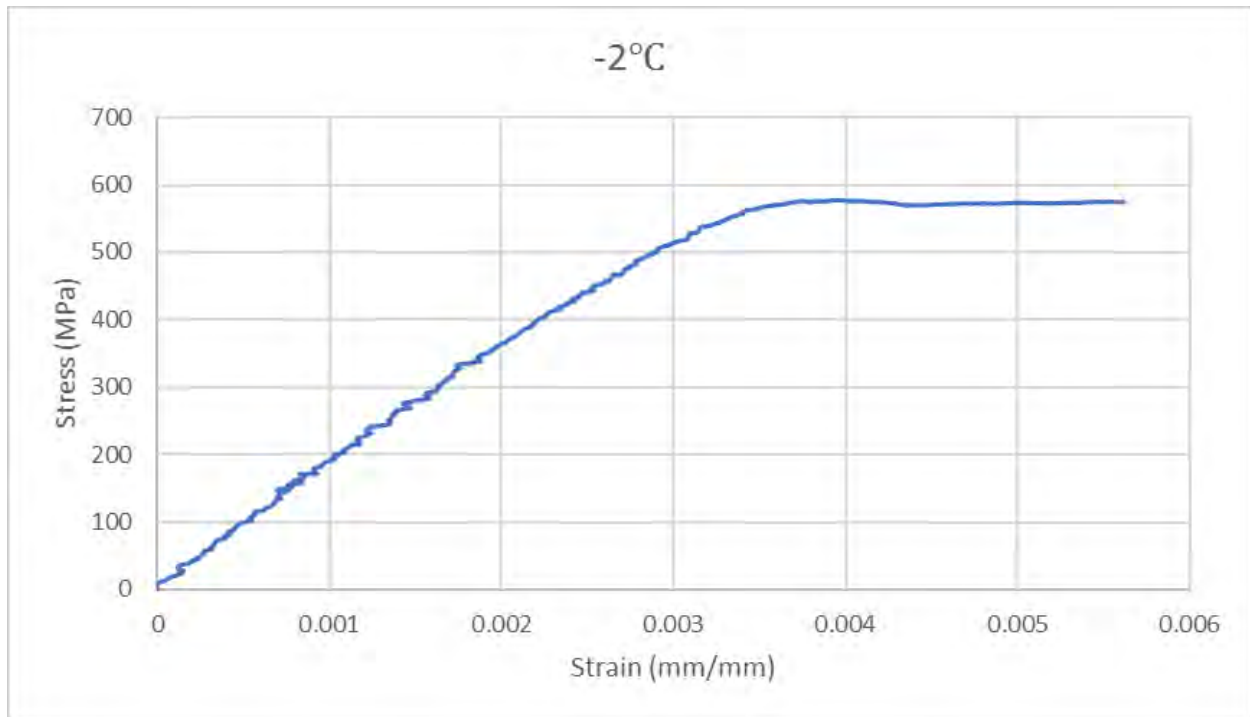
Διάγραμμα 36: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία 3°C.



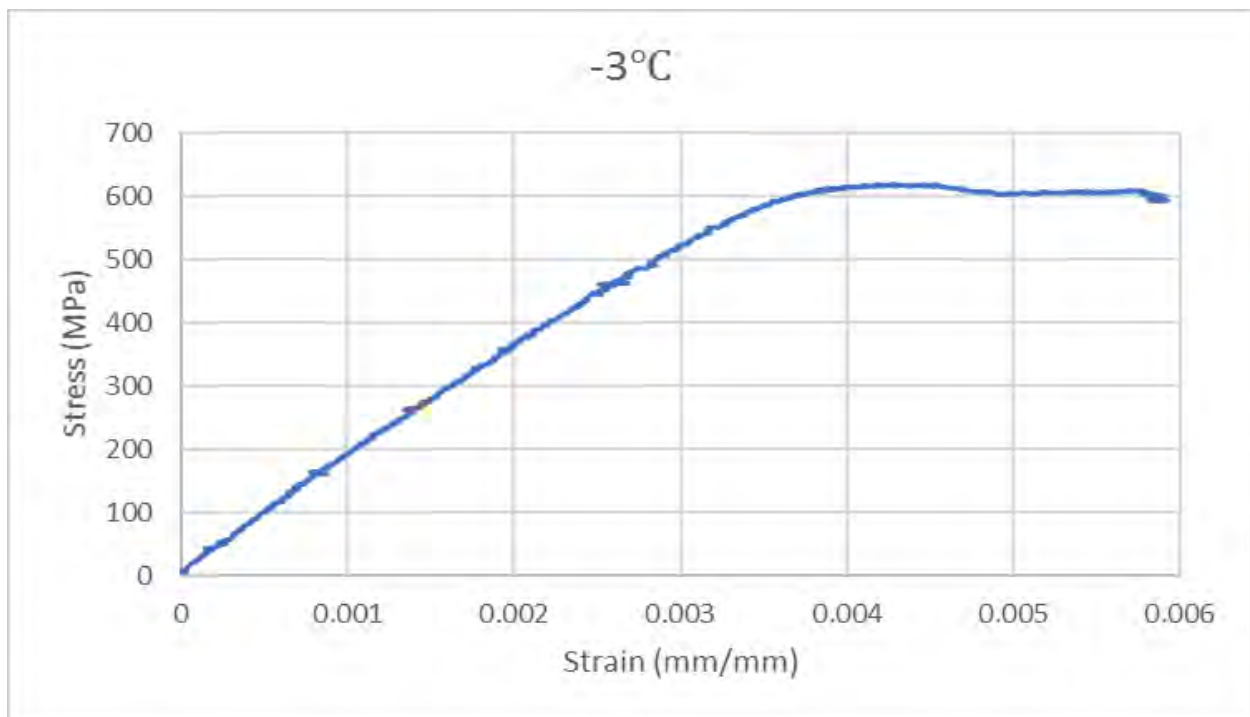
Διάγραμμα 37: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία 1.3°C.



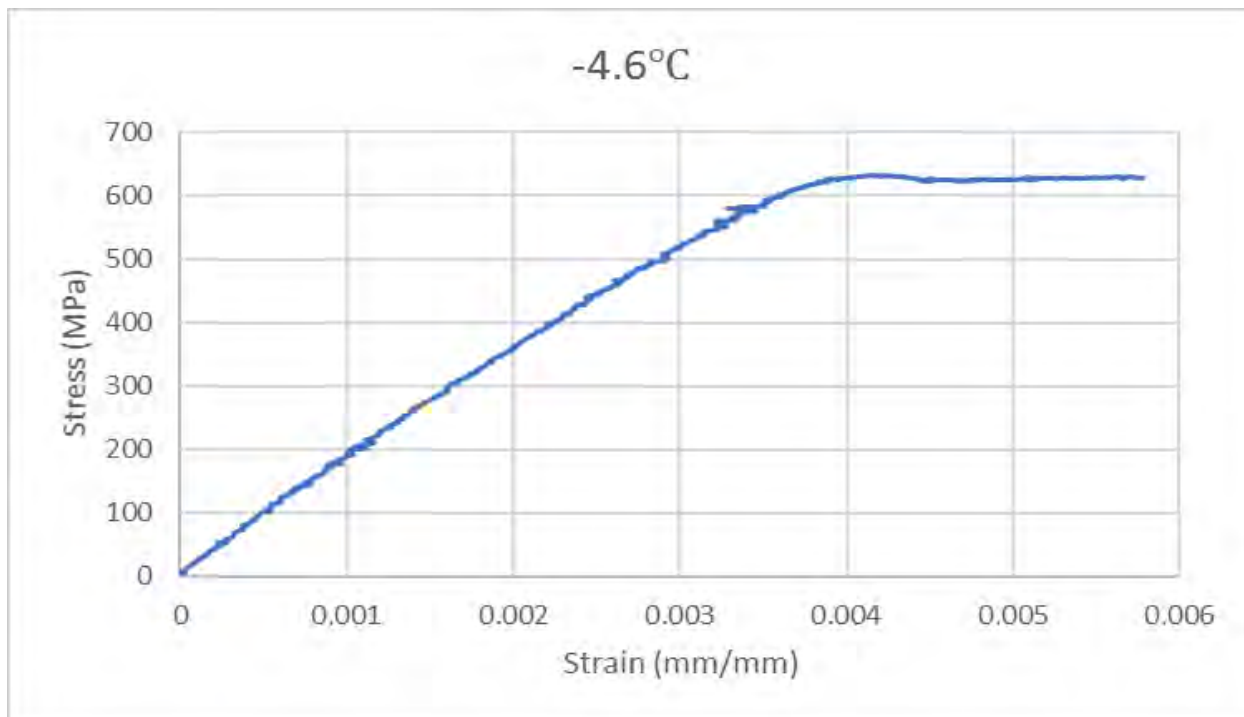
Διάγραμμα 38: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία 0°C.



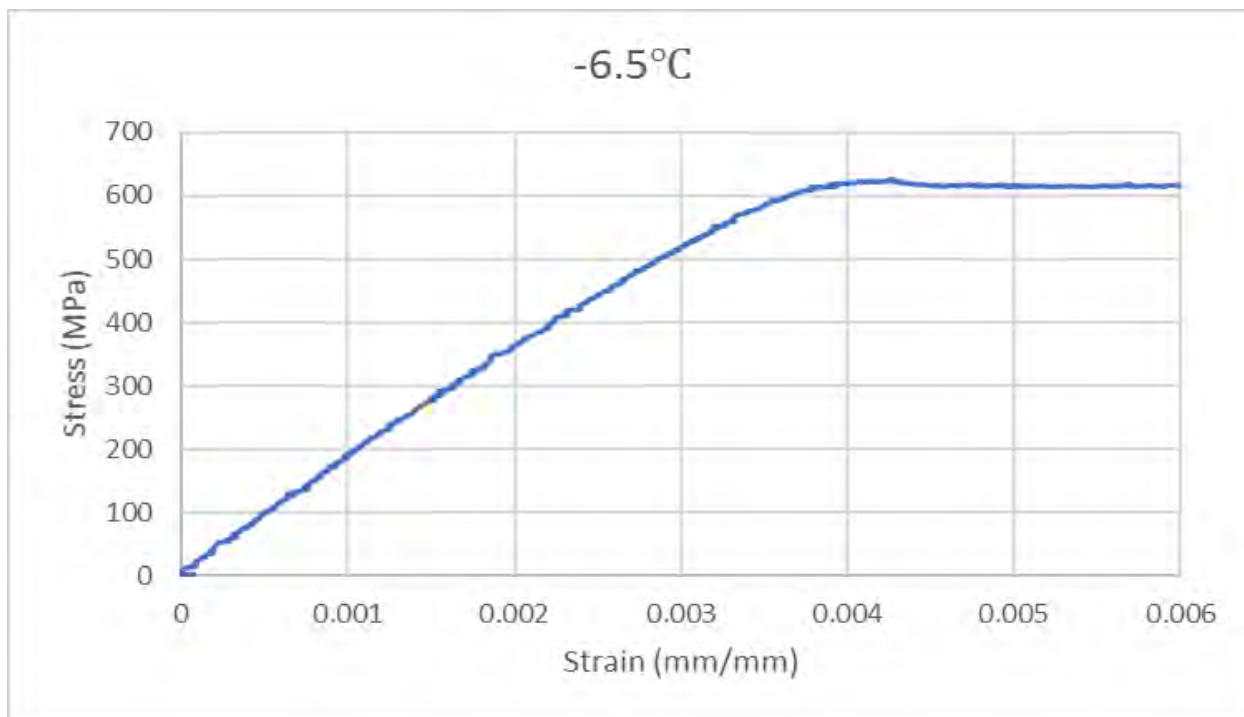
Διάγραμμα 39: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -2°C.



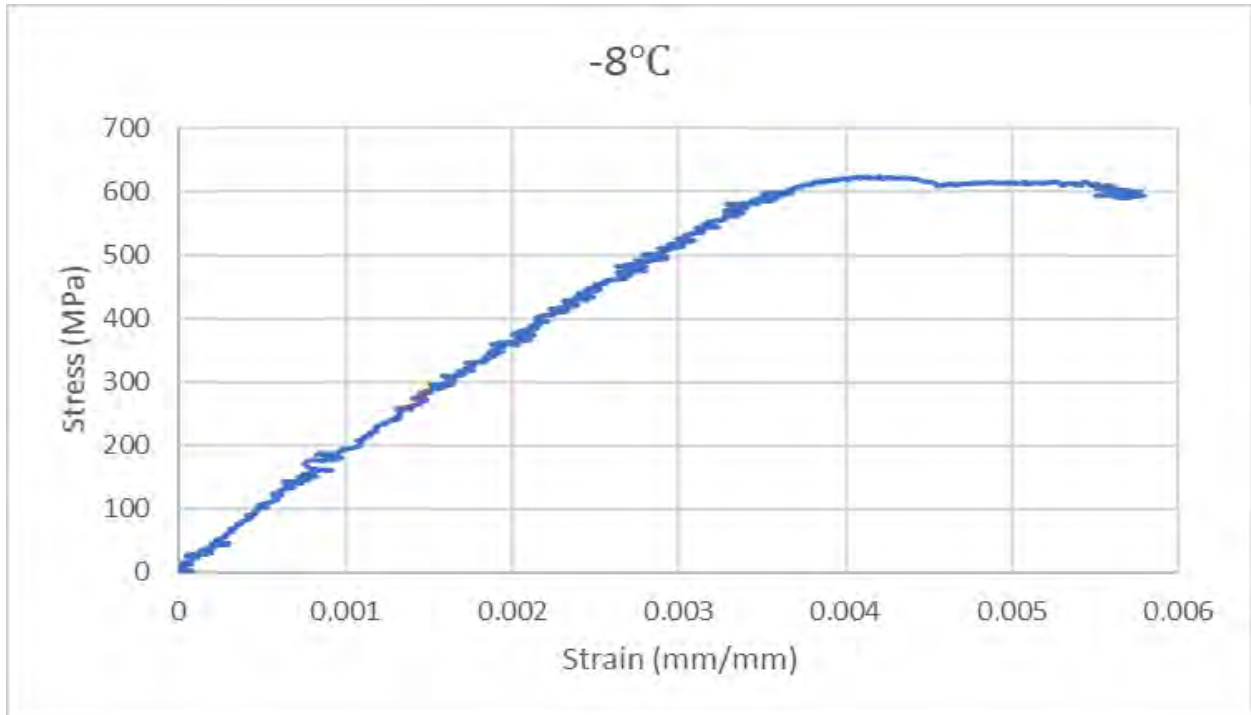
Διάγραμμα 40: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -3°C.



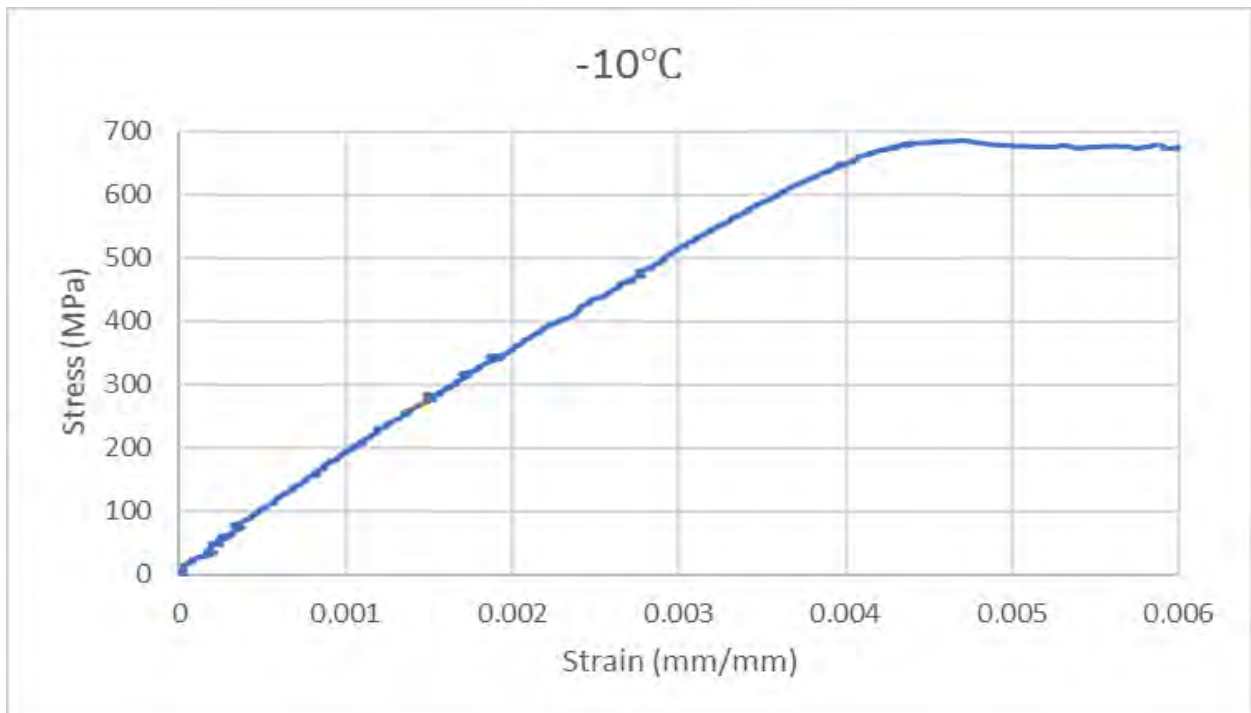
Διάγραμμα 41: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -4.6°C.



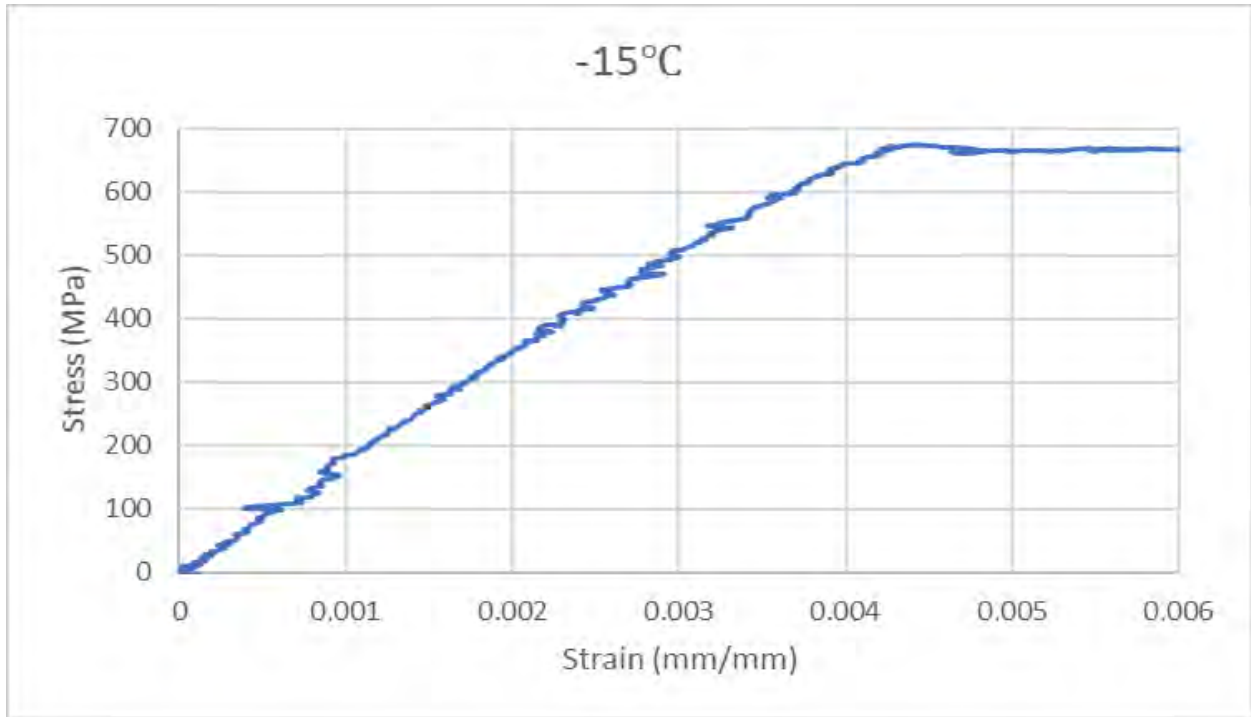
Διάγραμμα 42: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -6.5°C.



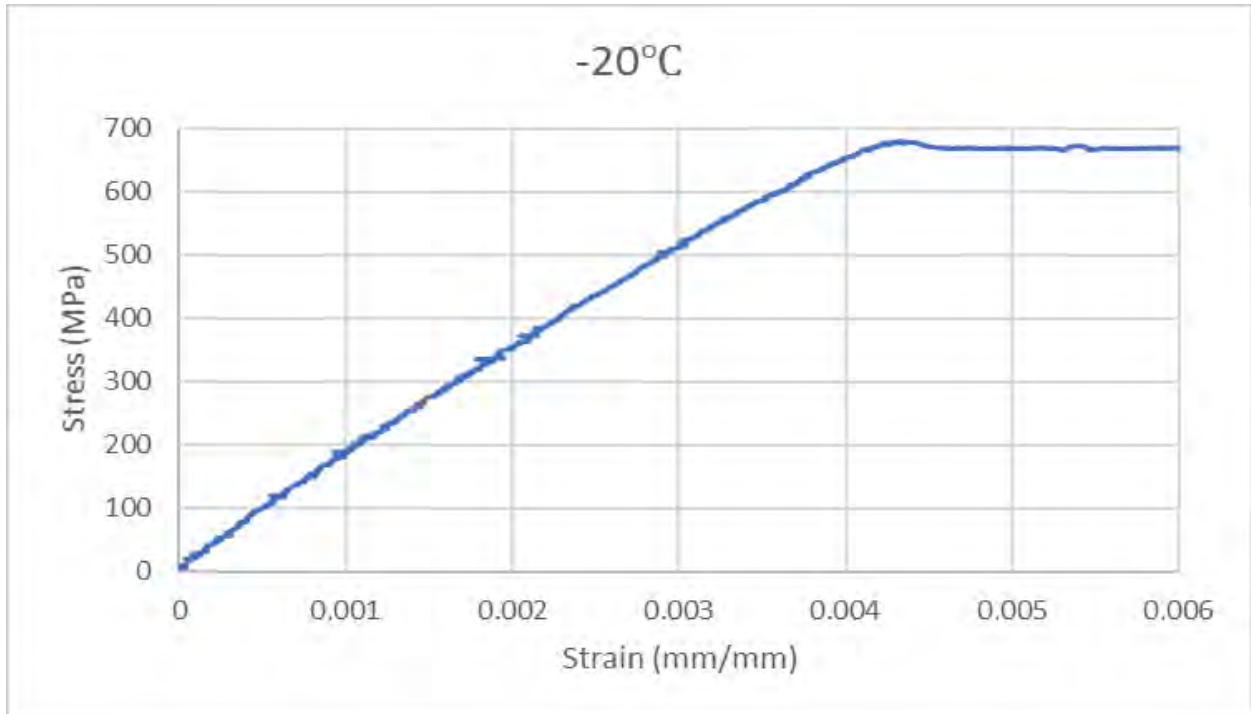
Διάγραμμα 43: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -8°C.



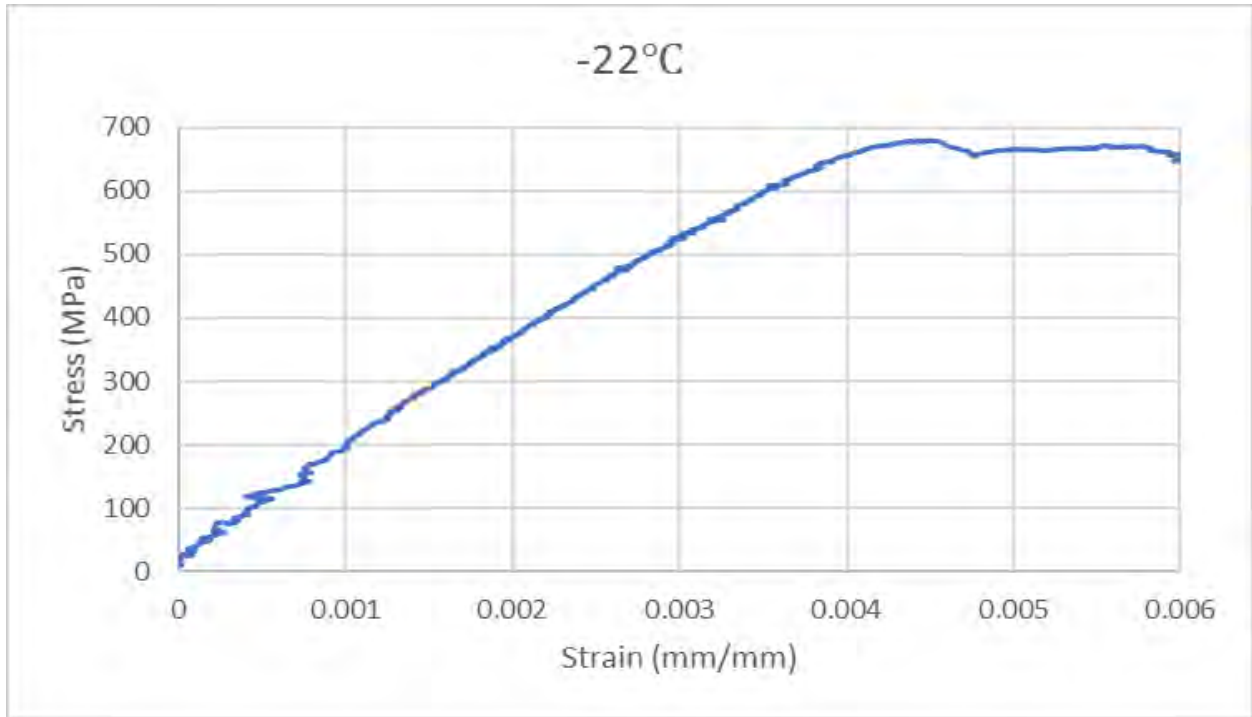
Διάγραμμα 44: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -10°C.



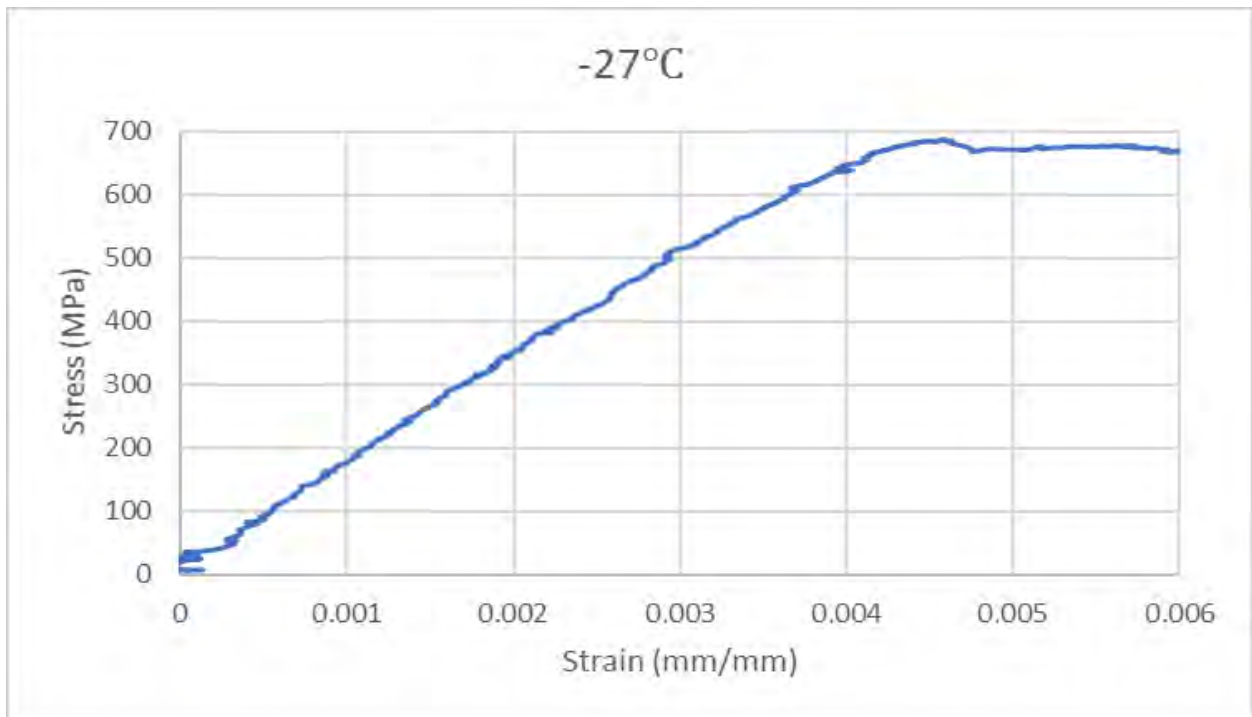
Διάγραμμα 45: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -15°C.



Διάγραμμα 46: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -20°C.



Διάγραμμα 47: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -22°C.



Διάγραμμα 48: Πείραμα φόρτισης-αποφόρτισης σε χάλυβα TRIP 700, που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B, στην θερμοκρασία -27°C.

Στο υλικό TRIP 700 που έχει υποστεί την θερμική κατεργασία B φαίνεται ότι η χαρακτηριστική θερμοκρασία μετάβασης στο τοπικό φαινόμενο διαρροής λαμβάνει χώρα κοντά στην θερμοκρασία των -22°C .

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η θερμική κατεργασία του χάλυβα TRIP 700 έχει επίδραση στην τιμή της M_s^{σ} . Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι η χαρακτηριστική θερμοκρασία είναι μικρότερη στην περίπτωση του χάλυβα με θερμική κατεργασία B σε σχέση με τον χάλυβα με κατεργασία A.

Η παραπάνω συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από τις καμπύλες εφελκυσμού (Διάγραμμα 12), από τις οποίες προκύπτει ελαφρώς πιο σταδιακή εργοσκήρυση του υλικού B που συνοδεύεται από μεγαλύτερη ομοιόμορφη παραμόρφωση σε σχέση με το υλικό A [16].

Ας σημειωθεί ότι η θερμική κατεργασία του χάλυβα TRIP 700 δεν ήταν γνωστή. Η υψηλή σχετικά τιμή της M_s^{σ} δεν συμβαδίζει με τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού (μεγαλύτερη ομοιόμορφη παραμόρφωση από τα άλλα δύο υλικά). Εδώ πιθανόν να παίζει ρόλο και το μέγεθος των σωματιδίων που μεταβάλλεται κατά την θερμική κατεργασία, αλλά που δεν μελετήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στην παρούσα εργασία έγινε σχεδιασμός πειραματικής διάταξης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής θερμοκρασίας M_g^c και προσδιορισμός της για χάλυβα TRIP 700 που είχε υποστεί διαφορετική θερμική κατεργασία. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι παράμετροι θερμικής κατεργασίας, όπως ο χρόνος μπαινιτικού μετασχηματισμού, επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Συγκεκριμένα η αύξηση του χρόνου στην περιοχή μπαινιτικού μετασχηματισμού οδηγεί σε αύξηση του ορίου διαρροής, αύξηση του εκθέτη εργοσκλήρυνσης καθώς και μικρή αύξηση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης. Παράλληλα προκαλεί μείωση του ορίου θραύσης και της παραμόρφωσης θραύσης. Επίσης, οδηγεί σε μείωση της χαρακτηριστικής θερμοκρασίας του υλικού συμπεριφορά που αποτυπώνεται και στο διάγραμμα εφελκυσμού όπου φαίνεται μια πιο σταδιακή εργοσκλήρυνση (αύξηση της τιμής ομοιόμορφης παραμόρφωσης).

Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία

1. Vasilakos A.N., Papamantellos K., Haidemenopoulos G.N., Bleck W., *Experimental determination of the stability of retained austenite in low alloy TRIP steels*, Materials Technology, 70, 1999, pp. 466–471
2. Haidemenopoulos G.N., Kermandis A., Malliaros C., Dickert H.H., Kucharzyk P., Bleck W., *On the effect of austenite stability on high cycle fatigue of TRIP 700 steel*, Materials Science and Engineering, A573, 2013, pp. 7-11
3. Bhadeshia H.K.D.H., *Bainite in steels: Transformation, Microstructure and Properties*, Second Edition, IOM Communication LTD, 2001
4. Jacques P.J., *Transformation-induced plasticity for high strength formable steels*, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8, 2004, pp. 259-265
5. TRIP steels, Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: https://en.Wikipedia.org/wiki/TRIP_steel
6. Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Steel, Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/>
7. Matsumura O., Sakuma Y., Takechi H., *Trip and Its Kinetic Aspects in Austempered*, Transformation Iron Steel Inst.Jpn., 21, 1987, pp. 1301-1306
8. Jacques P., Cornet X., Harlet P., Ladriere J., Delannay F., *Enhancement of the Mechanical Properties of a Low-Carbon, Low-Silicon Steel by Formation of a Multiphased Microstructure Containing Retained Austenite*, Metall. Mater. Trans. A, 29A, 1998, pp. 2383
9. Sakuma Y., Matsumura O., Takechi H., *Mechanical properties and retained austenite in intercritically heat-treated bainite-transformed steel and their variation with Si and Mn additions*, Metall.Trans., A22, 1991, pp. 489-198
10. Kokkonidis P., *Correlation between Microstructure and Properties in TRIP steels*, Doctoral Thesis, National Technical University of Athens, 2012
11. Zheng H., Wang W., Wu D., Xue S., Zhai Q., Frenzelc J., Luo Z., *Athermal nature of the martensitic transformation in Heusler alloy Ni–Mn–Sn*, Intermetallics, 36, 2013, pp. 90-95
12. Haidemenopoulos G.N., *Physical Metallurgy*, Tzliolas Publishing, 2007, pp. 629-712 (in Greek)
13. Ιδιότητες πολυπροπυλενίου, Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://el.wikipedia.org/wiki/Πολυπροπυλένιο#.CE.A7.CE.B7.CE.BC.CE.B9.CE.BA.CE.AD.CF.82 .CE.BA.CE.B1.CE.B9 .CF.86.CF.85.CF.83.CE.B9.CE.BA.CE.AD.CF.82 .CE.B9.CE.B4.CE.B9.CF.8C.CF.84.CE.B7.CF.84.CE.B5.CF.82>
14. Cooling baths, Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_cooling_baths
15. ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual book of ASTM Standards. 2001, American Society for testing and Materials: Philadelphia (PA)

16. Olson, G.B., *Transformation plasticity and the stability of plastic flow*, in: Krauss, G., (Ed.), *Deformation, Processing, and Structure*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1984