



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**Συσχέτιση μικροδομής και συνακόλουθων μηχανικών ιδιοτήτων σε πολυφασικούς χάλυβες
αυτοκινητοβιομηχανίας**

Στεργίου Σαβίνα-Αγγελική

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γ. Φούρλαρης

ΑΘΗΝΑ

Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Συσχέτιση μικροδομής και συνακόλουθων μηχανικών ιδιοτήτων σε πολυφασικούς χάλυβες αυτοκινητοβιομηχανίας

Στεργίου Σαβίνα-Αγγελική

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γ. Φούρλαρης

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής ΕΜΠ,(Υπογραφή)

Σ. Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ,(Υπογραφή)

Π. Τσακίριδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ,(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ

Οκτώβριος 2020

Περιεχόμενα

I. Κατάλογος πινάκων	iii
II. Κατάλογος εικόνων.....	iv
III. Περίληψη.....	1
IV. Abstract	2
V. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	3
1. Θεωρητικό Μέρος.....	4
1.1. Γενικές Έννοιες	4
1.1.1. Διαγράμματα Ισορροπίας Φάσεων	4
1.1.2. Μετασχηματισμοί Φάσεων εκτός ισορροπίας	8
1.1.3. Μηχανισμοί Μετασχηματισμού του Μαρτενσίτη	10
1.1.4. Μηχανικές Ιδιότητες.....	12
1.2. Η χρήση των χαλύβων στην αυτοκινητοβιομηχανία	16
1.2.1. Κανονισμοί στην οικονομία καυσίμου	17
1.2.2. Κανονισμοί στην ασφάλεια των επιβατών	17
1.2.3. Κατηγοριοποίηση χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας	18
1.3. Χάλυβες AHSS – Μικροδομή και Ιδιότητες.....	20
1.4. Γενικά για τους Χάλυβες TRIP.....	22
1.4.1. Ιστορική Ανασκόπηση.....	22
1.5. Το φαινόμενο TRIP σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα	23
1.6. Θερμικές Κατεργασίες Χαλύβων TRIP και ανάπτυξη της μικροδομής	24
1.6.1. 1 ^ο στάδιο: Γρήγορη θέρμανση	25
1.6.2. 2 ^ο στάδιο: Ενδοκρίσιμη απόπτηση	26
1.6.3. 3 ^ο στάδιο – Γρήγορη απόψυξη	27
1.6.4. 4 ^ο στάδιο – Ισοθερμοκρασιακός Μπαινιτικός Μετασχηματισμός	27
1.6.5. 5 ^ο στάδιο – Γρήγορη απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	28
1.7. Οι κραματικές προσθήκες.....	29
1.7.1. Επιπτώσεις των κραματικών στοιχείων	30
1.8. Φυσική Μεταλλουργία Χαλύβων TRIP	32
1.8.1. Φερρίτης	32
1.8.2. Μπαινίτης	33
1.8.3. Ωστενίτης.....	34
1.8.4. Μαρτενσίτης	35

2. Πειραματικό Μέρος.....	36
2.1. Περιγραφή Υλικού	36
2.2. Πειραματική Διαδικασία	36
2.3. Θερμικές Κατεργασίες.....	37
2.4. Προετοιμασία Δοκιμίων.....	38
2.5. Μελέτη Μικροδομής.....	40
2.5.1. Οπτικό Μικροσκόπιο.....	40
2.5.2. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)	41
2.5.3. Υπολογισμός Φάσεων	42
2.6. Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς.....	43
2.6.1. Δοκιμή Μικροσκληρομέτρησης.....	43
2.7. Όριο Διαρροής και Μέγιστη Εφελκυστική Αντοχή (YS – UTS).....	44
2.8. Αποτελέσματα	45
2.8.1. Μελέτη Μικροδομής	45
2.8.2. Αποτελέσματα EDS.....	72
2.8.3. Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς	75
2.8.4. Θεωρητικός Υπολογισμός Ορίου Διαρροής – Μέγιστης Εφελκυστικής Τάσης.....	77
2.9. Συμπεράσματα	78
Βιβλιογραφία	80

I. Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Τυπικές χημικές συστάσεις (%κβ) χαλύβων TRIP [43]	29
Πίνακας 2. Χημική σύσταση του δοθέντος δείγματος (%κβ)	36
Πίνακας 3. Γενική χημική ανάλυση του δοκιμίου AR	45
Πίνακας 4. Σημειακές στοιχειακές αναλύσεις EDS στις φάσεις του φερρίτη (α) και μαρτενσίτη (α') σε σύγκριση με την γενική στοιχειακή ανάλυση, για το δοκίμιο WQ	46
Πίνακας 5. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των συστατικών της μικροδομής του δοκιμίου 300-1	48
Πίνακας 6. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των φάσεων του δοκιμίου 300-2	50
Πίνακας 7. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των φάσεων του δοκιμίου 300-5	52
Πίνακας 8. Αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων, μέσω EDS, των φάσεων φερρίτη, παραμένων ωστενίτη και μαρτενσίτη, για το δοκίμιο 300-30.....	54
Πίνακας 9. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω της EDS, των φάσεων φερρίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη, του δοκιμίου 350-1	56
Πίνακας 10. Στοιχειακές αναλύσεις EDS των φάσεων μπαινίτη και μαρτενσίτη.....	58
Πίνακας 11. Στοιχειακές αναλύσεις των στοιχείων των φάσεων φερρίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη, του δοκιμίου 350-5	60
Πίνακας 12. Στοιχειακές αναλύσεις των φάσεων φερρίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη, του δοκιμίου 350-30	62
Πίνακας 13. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των φάσεων του φερρίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη, για το δοκίμιο 400-1	64
Πίνακας 14. Στοιχειακές αναλύσεις EDS των φάσεων φερρίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη, του δοκιμίου 400-2	66
Πίνακας 15. Αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων EDS των φάσεων φερρίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη, το δοκίμιο 400-5.....	68
Πίνακας 16. Αποτελέσματα στοιχειακών αναλύσεων EDS, των φάσεων φερρίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη, του δοκιμίου 400-30.....	70
Πίνακας 17. Αποτελέσματα Μικροσκληρομετρήσεων Vickers	75
Πίνακας 18. Θεωρητικό Υπολογισμός του Ορίου Θραύσης και της Εφελκυστικής Αντοχής με βάση της σκληρότητα Vickers.	77

II. Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Το Διάγραμμα Fe-Fe ₃ C. (δεξιά), με τις κρυσταλλικές δομές των κύριων φάσεων, ωστενίτη και φερρίτη (αριστερά) [3]	5
Εικόνα 2. Τμηματική απεικόνιση του διαγράμματος Fe-Fe ₃ C για υποευτηκτοειδείς χάλυβες.....	7
Εικόνα 3. Μικρογραφία υποευτηκτοειδούς χάλυβα. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (ανοιχτόχρωμη περιοχή) και του περλίτη (σκουρόχρωμη).	7
Εικόνα 4. Διάγραμμα TTT υποευτηκτοειδούς χάλυβα.....	8
Εικόνα 5. Παραγόμενες μικροδομές από χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης: α) περλίτης β) μπαινίτης στους 290°C, γ) μπαινίτης στους 180°C, δ) μαρτενσίτης [33].....	9
Εικόνα 6. Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης της θερμοκρασίας και της επιβαλλόμενης τάσης στους μηχανισμούς μαρτενσιτικού μετασχηματισμού [34].....	10
Εικόνα 7. Επίδραση των κραματικών στοιχείων στις καμπύλες των ισόθερων θερμικών κατεργασιών. 11	
Εικόνα 8. Τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου υλικού (δεξιά) με την μεταβολή στις διαστάσεις του μήκους-διατομής που υφίσταται το δοκίμιο κατά τον εφελκυσμό (αριστερά) [35].....	13
Εικόνα 9. Συσχέτιση Ορίου Διαρροής και Μέγιστης Εφελκυστικής Αντοχής με την Σκληρότητα. Η ευθεία γραμμή προέκυψε από εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης, ενώ οι διακεκομμένες αναφέρονται στο τυπικό σφάλμα ±1 [2]	14
Εικόνα 10. Κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται στο αμάξιμα [36].....	16
Εικόνα 11. Διάγραμμα Τάσης-Επιμήκυνσης διάφορων τύπων χάλυβων, προς σύγκριση με τους χάλυβες AHSS [7]	20
Εικόνα 12. Η τάση στην χρήση των διαφορετικών τύπων χάλυβων ανά τις χρονιές 2007, 2010, 2013 [37]]	21
Εικόνα 13. Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής μικροδομής χάλυβα TRIP	22
Εικόνα 14. Σχηματική απεικόνιση της αλλαγής στην μικροδομή σε χάλυβες TRIP, σε συγκριτικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης με τους χάλυβες DP και HSLA [38]	23
Εικόνα 15. Τα στάδια παραγωγής και η ανάπτυξη της μικροδομής των χάλυβων TRIP.....	24
Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση των πέντε βασικών σταδίων επεξεργασίας χάλυβα TRIP ψυχρής έλασης, χαμηλής κραμάτωσης.....	25
Εικόνα 17. Σχηματικό διάγραμμα ανάπτυξης της μικροδομής κατά το στάδιο της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής σε χάλυβες TRIP. [Nina Fonstein,].....	28
Εικόνα 18. Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης των κραματικών στοιχείων στις καμπύλες TTT	29
Εικόνα 19. Επίδραση του συνδυασμού συστάσεων των χάλυβων TRIP στην σκληρότητα και την επικαλυψιμότητα.....	31
Εικόνα 20.. Μικροδομή δοκίμιου, έπειτα από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 900°C και ρυθμό απόψυξης 50°C/s. Διακρίνεται τα μικρογραφικά συστατικά του ενδοκρίσιμου φερρίτη (IF), του επιταξιακού φερρίτη (EF) και του νησιδίου μαρτενσίτη-ωστετίτη (M/A) [40]	32
Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση της μετάβασης από ανώτερο σε κατώτερο μπαινίτη. Από Bhadeshia (2001)	33
Εικόνα 22. Σχηματικό διάγραμμα με τις Θερμικές Κατεργασίες που υπέστησαν τα δοκίμια.....	38
Εικόνα 23. Σχηματική Απεικόνιση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM).....	41
Εικόνα 24. Σχηματική αναπαράσταση της σκληρομέτρησης Vickers. Πάνω: το προφίλ της αδαμάντινης πυραμίδας. Κάτω: Το αποτύπωμα και η μέτρηση των διαγωνίων από το μικροσκόπιο.	43

Εικόνα 25. Μικρογραφία SEM για το δοκίμιο AR. Μεγέθυνση x2000	45
Εικόνα 26. Μικρογραφία SEM για το δοκίμιο WQ. Μεγέθυνση x2000. Επισημαίνονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α) και μαρτενσίτη (α').....	47
Εικόνα 27. Η μέθοδος grid point count σε μεγέθυνση της αριστερής μικρογραφίας.....	47
Εικόνα 28. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-1. Μεγέθυνση x2000	49
Εικόνα 29 Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-1. Μεγέθυνση x 4000. Επισημαίνονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και παραμένων ωστενίτη (γ _R), καθώς και περιορισμένη ανάπτυξη της μπαινιτικής μορφολογίας	49
Εικόνα 30. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-2. Μεγέθυνση x2000	51
Εικόνα 31. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-02. Μεγέθυνση x4000. Απεικονίζονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α'), του παραμένων ωστενίτη (γ _R) και η μπαινιτική μορφολογία.	51
Εικόνα 32. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-5. Μεγέθυνση x2000.	53
Εικόνα 33. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-5. Μεγέθυνση x5000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), παραμένων ωστενίτη (γ _R), μαρτενσίτη (α') και μπαινιτικής μορφολογίας	53
Εικόνα 34. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-30. Μεγέθυνση x1000	55
Εικόνα 35. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-30. Μεγέθυνση x2000. Απεικονίζονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και παραμένων ωστενίτη (γ _R).....	55
Εικόνα 36. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-1. Μεγέθυνση x2000	57
Εικόνα 37. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-1. Μεγέθυνση x6000. Απεικονίζονται οι φάσεις του φερρίτη(α), παραμένων ωστενίτη (γ _R), μαρτενσίτης (α') και μπαινίτης (ba).....	57
Εικόνα 38. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-2. Μεγέθυνση x2000	59
Εικόνα 39. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-2. Μεγέθυνση x4000. Επισημαίνονται οι μπαινιτικές μορφολογίες (ba 1/2) και η φάση του μαρτενσίτη (α').....	59
Εικόνα 40. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-5. Μεγέθυνση x2000	61
Εικόνα 41. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-5. Μεγέθυνση x4000. Απεικονίζονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α), μπαινίτη (ba), μαρτενσίτη (α') και παραμένων ωστενίτη (γ _R)	61
Εικόνα 43. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-30. Μεγέθυνση x3000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α'), μπαινίτη (ba) καθώς και οι περιοχές των μπαινιτικών κόκκων που εμφανίζουν κατακρημνίσματα σεμενίτη	63
Εικόνα 44. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-1. Μεγέθυνση x3000	65
Εικόνα 45. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-1. Μεγέθυνση x4000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μπαινίτη, (ba), μαρτενσίτη (α')	65
Εικόνα 46. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-2. Μεγέθυνση x3000	67
Εικόνα 47. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-2. Μεγέθυνση x4000. Απεικονίζονται φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και μπαινίτη (ab 1&2).....	67
Εικόνα 48. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-5. Μεγέθυνση x3000	69
Εικόνα 49. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-5. Μεγέθυνση x4000. Διακρίνονται οι μορφολογίες του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και μπαινίτη (ba)	69
Εικόνα 50. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-30. Μεγέθυνση x4000	71
Εικόνα 51. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-30. Μεγέθυνση x5000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και μπαινίτη (ba), καθώς και ο σχηματισμός καρβιδίων εντός της μπαινιτικής μορφολογίας.....	71

Εικόνα 52. Διάγραμμα μεταβολής του λόγου $Al+Si / Mn$ κατά τις θερμικές κατεργασίες σε κόκκους μαρτενσίτη και μικτών φάσεων μαρτενσίτη/παραμένων οστενίτη, ενώ αριστερά παρατίθενται το αντίστοιχο μέσο μέγεθος των κόκκων	72
Εικόνα 53. Διάγραμμα της μεταβολής του λόγου $Al+Si/Mn$ κατά τις θερμικές κατεργασίες σε κόκκους που εμφανίζουν μπαινιτική μορφολογία, ενώ αριστερά παρατίθενται το μέσο μέγεθος των κόκκων στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι στοιχειακές αναλύσεις.....	74
Εικόνα 54 Μεταβολή της σκληρότητας Vickers ανάλογα της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής σε κάθε θερμική κατεργασία.....	76

III. Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συσχέτιση της μικροδομής χάλυβα TRIP, ψυχρά ελασμένου και χαμηλά κραματωμένου, με τις μηχανικές του ιδιότητες. Το υλικό έχει ονομαστική αντοχή 700MPa και παράγεται σε μορφή ελασμάτων ψυχρής έλασης.

Χρησιμοποιείται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, και αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων απαιτήσεων σε μείωση του βάρους του αμαξώματος (BIW), τις υφιστάμενες νομοθεσίες για μείωση του διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες που συμβάλουν στην ασφάλεια των επιβατών.

Το πιο κρίσιμο στάδιο στην γραμμή παραγωγής, που καθορίζει και τον σχηματισμό της επιθυμητής μικροδομής, και άρα των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων, αποτελεί η ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που επιδρούν στην επιλογή των κατάλληλων θερμοκρασιών, και χρόνων παραμονής, διενεργήθηκαν σειρές πειραμάτων προσομοίωσης της θερμικής κατεργασίας με τελικό σκοπό την αναζήτηση εναλλακτικών παραμέτρων θερμικών κατεργασιών, την συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων και μικροδομής και την ερμηνεία των μετασχηματισμών φάσεων που τις διέπουν.

Η υλοποίηση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Η μελέτη της μικροδομής έγινε με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning-Electron Microscopy-SEM), ενώ πραγματοποιήθηκε και ημι-ποσοτική χημική ανάλυση μέσω της τεχνικής EDS. Για την μέτρηση της μηχανικής αντοχής, έγιναν δοκιμές μικροσκληρότητας, ενώ μέσω αυτής έγινε προσπάθεια για εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού.

Από την παραπάνω διαδικασία, εξήχθησαν παρατηρήσεις και συμπεράσματα, με βάση την προϋπάρχουσα βιβλιογραφία. Αναφορικά με τις θερμικές κατεργασίες της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής, αύξηση του χρόνου παραμονής, οδηγεί σε μεγαλύτερο κλάσμα και λεπτομερέστερη μορφολογία μπαινίτη, και άρα πιο σταθεροποιημένη φάση του παραμένον ωστενίτη. Ακόμη, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε παρόμοιο αποτέλεσμα για συντομότερους χρόνους παραμονής. Η συσχέτιση της μικροδομής και των επιμέρους συστατικών που παρουσιάζονται, πραγματοποιήθηκε σε σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες που επιδεικνύει το υλικό. Οι μικροσκληρομετρήσεις υποδεικνύουν την ύπαρξη σκληρής ψαθυρής φάσης στην χαμηλή θερμοκρασία των 300°C, ενώ καλύτερες μηχανικές ιδιότητες εμφάνισαν τα δοκίμια των 400°C.

IV. Abstract

The subject of this present thesis is the correlation of the microstructure of a cold formed and low-alloyed TRIP steel, with its mechanical properties. The material has a nominal tensile strength of 700MPa and it is being produced in sheet forms, from a cold forming processing.

It is mainly used in automotive industry and it was developed as a result of demanding requirements in the decrease of the body-in white (BIW) weight, the current legal restrictions in reducing carbon emissions, as well as the increased mechanical properties that contribute to the passengers' safety.

The most crucial stage in the production line, that also defines the formation of the microstructure and by that, the final properties, is that of the isothermal bainitic holding. Considering the parameters that affect the selection of appropriate temperatures, and length of stay, a series of thermal treatment simulations were carried out.

The implementation of the experiments took place in the Laboratory of Physical Metallurgy of the School of Mining and Metallurgical Engineering. The microstructure was studied using an optical microscope and an electronic scanning microscope (SEM), with the semi-quantitative chemical analysis being carried out through the EDS technique. To measure the mechanical strength, microhardness tests were carried out, and an effort was made to assess the yield and ultimate tensile strength of the material.

From the above procedure, observations and conclusions were drawn, based on the pre-existing literature. Regarding the thermal treatments of isothermal bainitic holding, an increase in the holding time leads to a larger fraction and more detailed morphology of bainite, and therefore a more stabilized phase of the remaining austenite. Moreover, an increase in temperature leads to a similar effect for shorter holding times. The correlation between the microstructure and its individual constituents presented was made in relation to the mechanical properties demonstrated by the material. Microhardness indicates the existence of a hard-looking phase at a low temperature of 300°C, while better mechanical properties were shown at the 400°C test pieces.

V. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

- Μελέτη της επίδρασης της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής σε χάλυβα αυτοκινητοβιομηχανίας TRIP700. Πραγματοποιήθηκαν σειρά πειραμάτων με μεταβολή της θερμοκρασίας (300-350 και 400°C) και του χρόνου της βαφής (1, 2, 5 και 30 λεπτά), κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους στην θερμική κατεργασία του χάλυβα.
- Συσχέτιση της μικροδομής των δοκιμίων που προέκυψαν από τις διάφορες θερμικές κατεργασίες με την σκληρότητα αυτών. Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής πραγματοποιήθηκε από τις μικρογραφίες που ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

1. Θεωρητικό Μέρος

1.1. Γενικές Έννοιες

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνονται εκτενής αναφορά στις βασικές έννοιες που περιλαμβάνουν των μετασχηματισμό φάσεων, με τα αντίστοιχα διαγράμματα, τις διάφορες φάσεις που παρουσιάζονται καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες αυτών, για την καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων της μικροδομής του εξεταζόμενου δοκιμίου της παρούσας διπλωματικής.

1.1.1. Διαγράμματα Ισορροπίας Φάσεων

Τα διμερή κράματα, διακρίνονται σε κράματα μετάλλου με ένα άλλο στοιχείο, το οποίο μπορεί να είναι άλλο μέταλλο, αμέταλλο, ή επαμφοτερίζον.

Με τον όρο φάση, αναφέρεται μια ενιαία περιοχή με ίδια χημική σύσταση και κρυσταλλική δομή, η οποία έχει καθορισμένα όρια και διαχωρίζεται από τις υπόλοιπες φάσεις με μια επιφάνεια. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε κάθε συστατικό και την θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται τα κράματα, μπορούν να εμφανίσουν διαφορετικές φάσεις

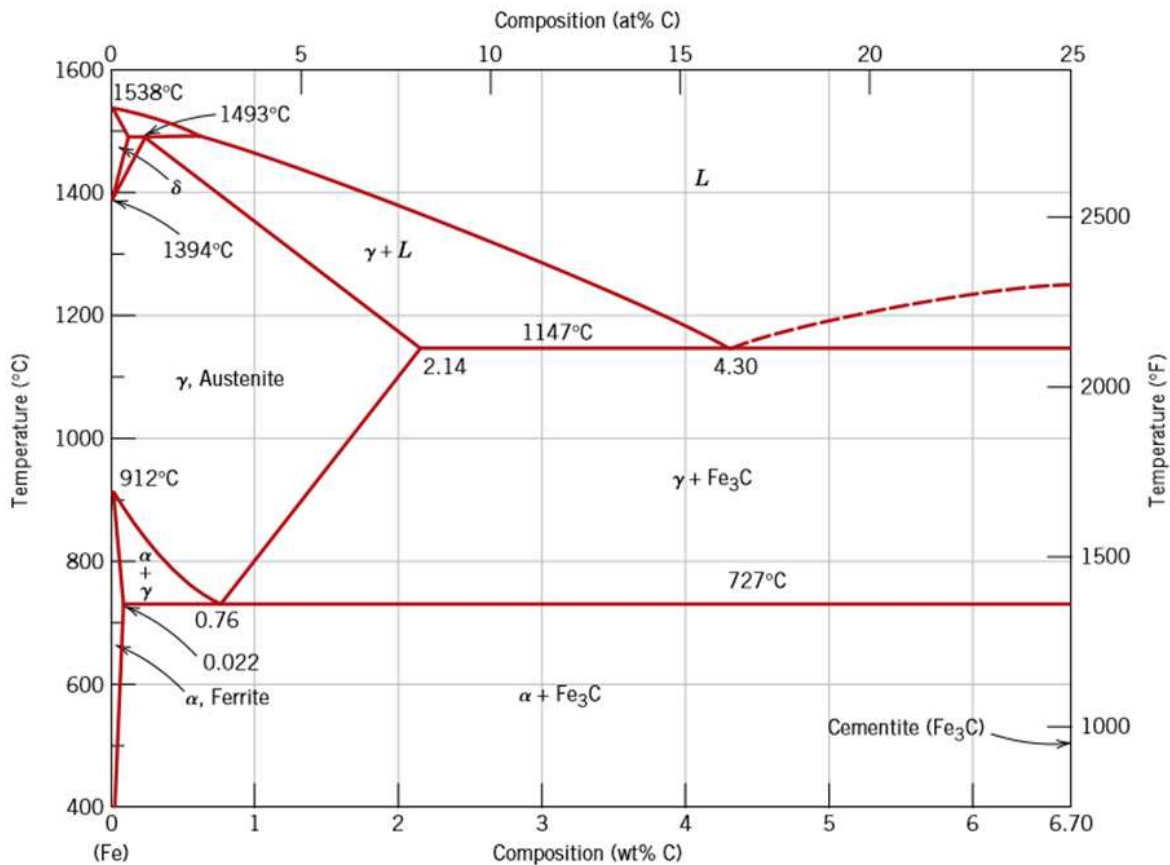
Τα κράματα εξετάζονται πάντα από την άποψη της ισορροπίας των φάσεων, που πραγματοποιείται με διάχυση των ατόμων σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση και απαιτεί πάντοτε αρκετό χρόνο. Οι περιοχές των φάσεων διαχωρίζονται μεταξύ τους με τις καμπύλες ισορροπίας.

Το διάγραμμα φάσεων χαράσσεται με τις θερμοκρασίες και με την σύσταση τις εκατό κατά βάρος. Από ένα τέτοιο διάγραμμα, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν:

- Σε κάθε θερμοκρασία, ο αριθμός και το είδος των φάσεων, καθώς και την σύσταση και το βάρος τους.
- Ο μετασχηματισμός των φάσεων, όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται.
- Κατά την απόψυξη, να γίνεται η κατανόηση του σχηματισμού των κρυσταλλιτών από άποψη διαστάσεων, διασποράς, σχήματος, και προσανατολισμού.
- Η επίδραση της μεταβολής της σύστασης ενός κράματος, όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.
- Η διαλυτότητα σε στερεή κατάσταση ενός στοιχείου ή ένωσης σε μια άλλη, σε καταστάσεις ισορροπίας.

Διάγραμμα Ισορροπίας Fe-Fe₃C

Τα κράματα Fe-C εμφανίζουν πλήρη αναμιξιμότητα των στοιχείων τους στην υγρή φάση, αλλά περιορισμένη αναμιξιμότητα στην στερεή. Το διάγραμμα ξεκινάει από τον καθαρό σίδηρο, για μηδενική περιεκτικότητα σε C, και τερματίζει για περιεκτικότητα 6,67%C. Το διάγραμμα ισορροπίας αναφέρεται ως Fe-Fe₃C επειδή στην μέγιστη αναλογία σε άνθρακα, σχηματίζεται η ενδομεταλλική ένωση του σεμεντίτη. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα, ενώ γίνεται αναφορά στα βασικά σημεία που το απαρτίζουν.



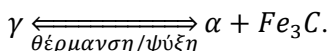
Εικόνα 1. Το Διάγραμμα Fe-Fe₃C. (δεξιά), με τις κρυσταλλικές δομές των κύριων φάσεων, ωστενίτη και φερρίτη (αριστερά) [3]

- Για περιεκτικότητα 0%wt C, και σε θερμοκρασία δωματίου σχηματίζεται καθαρός σίδηρος, ή α-Fe, με την κρυσταλλική δομή BCC, ο οποίος παραμένει σε αυτή την μορφή μέχρι τους 912°C. Έπειτα, μετασχηματίζεται σε ωστενίτη, ή γ-Fe, ο οποίος κρυσταλλώνεται μέχρι την θερμοκρασία των 1394°C. Από αυτήν την θερμοκρασία, μέχρι τους 1538°C βρίσκεται στην πάλι στην κρυσταλλική μορφή BCC αλλά ονομάζεται δ-Fe, ενώ πέρα από αυτήν πραγματοποιείται η τήξη του. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο δ-Fe έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον α-Fe, απλά σχηματίζεται και

παραμένει σταθερός σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Λόγω αυτού, δεν έχει τεχνολογική σημασία και δεν απαιτείται να γίνει περαιτέρω επεξήγηση.

- Για περιεκτικότητα 6,7%wt C, σχηματίζεται καθαρός σεμεντίτης. Για μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε άνθρακα, μέχρι και 100%, θα υπήρχε μόνο καθαρός γραφίτης, κάτι το οποίο δεν έχει κάποια πρακτική σημασία. Επομένως, το διμερές διάγραμμα, αναφέρεται μόνο μέχρι αυτήν την περιεκτικότητα.
- Ο άνθρακας σχηματίζει με τον σίδηρο, στερεό διάλυμα παρεμβολής, με τα άτομα να καταλαμβάνουν τις κενές θέσεις στο πλέγμα του φερρίτη και του ωστενίτη. Λόγω της κρυσταλλικής δομής BCC, ο άνθρακας έχει περιορισμένη διαλυτότητα, και απαντάται μέχρι 0,002%wt στον φερρίτη. Εν αντιθέσει, η μέγιστη διαλυτότητα στον ωστενίτη, αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα 2,14%wt C και στην θερμοκρασία των 1147°C.
- Οι μεταβολές των φάσεων, ορίζονται από δύο βασικές αντιδράσεις: την ευτηκτική αντίδραση και την ευτηκτοειδή αντίδραση. Η πρώτη λαμβάνει χώρα για περιεκτικότητα σε άνθρακα 4.3%wt και σε θερμοκρασία 1147°C, με την εξίσωση $L \xrightleftharpoons{\text{θέρμανση/ψύξη}} \gamma + Fe_3C$. Η δεύτερη πραγματοποιείται

για περιεκτικότητα άνθρακα στον ωστενίτη 0,76%wt και σε θερμοκρασία 727°C, με την μορφή:



Ανάπτυξη της μικροδομής των χαλύβων με βάση το διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe₃C.

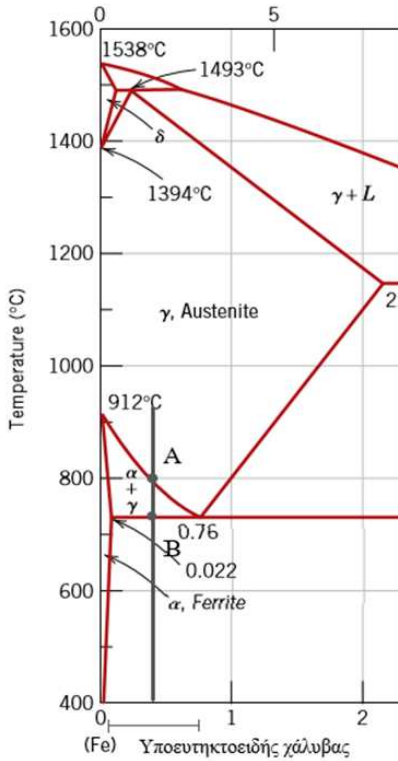
Δύο βασικές κατηγορίες κραμάτων σιδήρου-άνθρακα παρατηρούνται στο παραπάνω διαγράμμα, οι χάλυβες και οι χυτοσίδηροι. Για περιεκτικότητες 2.14-6.7%wt C, τα κράματα συγκαταλέγονται στα διάφορα είδη χυτοσιδηρών. Ο χάλυβας ορίζεται ως το κράμα σιδήρου με βασική προσθήκη τον άνθρακα, σε ποσοστό κατά βάρος 0.022% έως 2.14%, ενώ δύναται να γίνει προσθήκη και άλλων κραματικών στοιχείων. Στην πράξη βέβαια δεν χρησιμοποιούνται χάλυβες με περιεκτικότητα άνω του 1.2%. Επομένως, παρακάτω θα πρέπει να γίνει αναφορά της ανάπτυξης της μικροδομής των χαλύβων, με βάση το διάγραμμα Fe-Fe₃C.

Η ευτηκτοειδής αντίδραση στους 727°C αποτελεί το σημείο στο οποίο ο άνθρακας θα ανακατανεμηθεί μέσω διάχυσης και αυτή ορίζει τον μετασχηματισμό φάσεων από ωστενίτη σε α-Fe και σεμεντίτη. Τα δύο προϊόντα της αντιδράσης σχηματίζονται στα όρια των ωστενιτικών κόκκων και αναπτύσσονται προς το εσωτερικό τους. Απαντώνται με την μορφή εναλασσόμενων πλακιδίων, με διαφορετικό ενιαίο προσανατολισμό σε κάθε κόκκο, ενώ σχηματίζονται στις λεγόμενες αποικίες. Αυτή η μορφολογία αναφέρεται ως περλίτης, και στο οπτικό μικροσκόπιο εμφανίζεται ως εναλασσόμενα πλακίδια φωτεινών περιοχών (φερρίτης) και σκουρόχρωμων περιοχών (σεμεντίτης). Λόγω του ότι αποτελείται από αυτές τις δύο διαφορετικές κρυσταλλικές δομές, παρουσιάζει και ενδιάμεσες ιδιότητες του μαλακού φερρίτη, και του σκληρού, ψαθυρού σεμεντίτη.

Τα υπόλοιπα κράματα κοντά σε αυτήν την περιεκτικότητα άνθρακα ονομάζονται υπερ ή υποευτηκτοειδή κράματα, αναφορικά με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, σε σχέση με αυτή της ευτηκτικής αντίδρασης. Η διαφορά έγκειται στην ύπαρξη υποευτηκτοειδών φάσεων, που προυπάρχουν της ευτηκτοειδής αντίδρασης. Αυτές οι φάσεις είναι θερμοδυναμικά σταθερές και παραμένουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όπως σχηματίστηκαν πριν την ευτηκτοειδή αντίδραση. Για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 0,76%wt C εμφανίζεται αρχικά προευτηκτοειδής σεμεντίτης, ενώ αντίστοιχα για μικρότερες

περιεκτικότητες της ευτηκτοειδούς, στα όρια των κόκκων ωστενίτη σχηματίζεται αρχικά προευτηκτοειδής φερρίτης.

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκε χάλυβας με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,2%, άρα θα δοθεί έμφαση στην ανάπτυξη της μικροδομής των υποευτηκτοειδών χάλυβων.

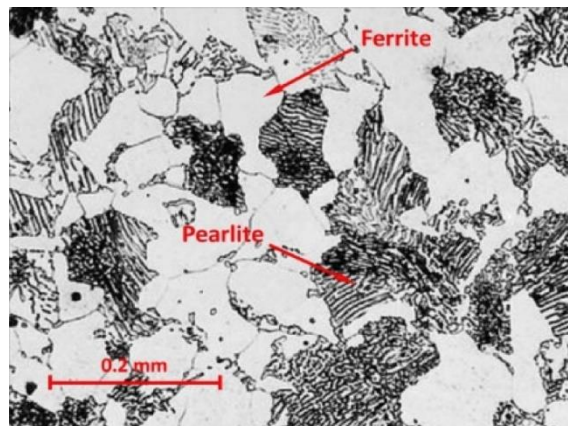


Εικόνα 2. Τμηματική απεικόνιση του διαγράμματος Fe-Fe₃C για υποευτηκτοειδείς χάλυβες

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αριστερά, έχει χαραχτεί κάθετη γραμμή, η οποία συμβολίζει την αργή απόψυξη ενός χάλυβα υποευτηκτοειδούς σύστασης. Από την ωστενιτική περιοχή, και μειώνοντας την θερμοκρασία, πρώτα τέμνεται το σημείο A, και για θερμοκρασία 800°C, όπου ξεκινά η φύτρωση φερρίτη στα όρια των κόκκων ωστενίτη. Μέχρι το σημείο B ο φερρίτης αναπτύσσεται περαιτέρω, με τον ωστενίτη να εμπλουτίζεται σε άνθρακα, λόγω της περιορισμένης διαλυτότητας στο πλέγμα του φερρίτη. Αυτό συμβαίνει μέχρι και την θερμοκρασία 727°C, όπου ύστερα λαμβάνει χώρα η ευτηκτοειδής αντίδραση και ο εναπομένον ωστενίτης σχηματίζει περλίτη.

Επομένως, η τελική μικροδομή στην θερμοκρασία δωματίου θα αποτελείται από προευτηκτοειδή φερρίτη, επειδή σχηματίστηκε πριν από την ευτηκτοειδή αντίδραση, και περλίτη (εναλλασσόμενα πλακίδια φερρίτη και σεμεντίτη).

Παρακάτω, φαίνεται μια εικόνα, όπως λήφθηκε από το μικροσκόπιο, για υποευτηκτοειδή χάλυβας με περιεκτικότητα %wt C, ενώ παρουσιάζονται οι διακριτές φάσεις της μικροδομής.



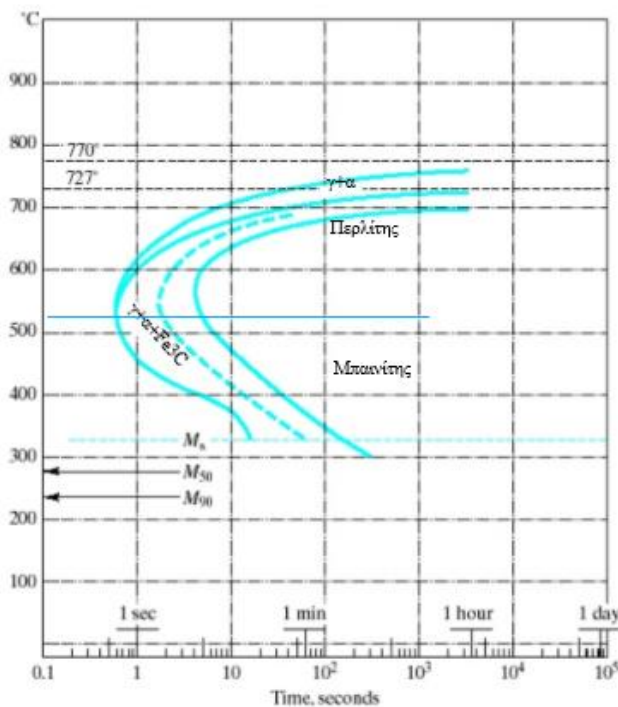
Εικόνα 3. Μικρογραφία υποευτηκτοειδούς χάλυβα. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (ανοιχτόχρωμη περιοχή) και του περλίτη (σκουρόχρωμη).

1.1.2. Μετασχηματισμοί Φάσεων εκτός ισορροπίας

Το διάγραμμα Fe-Fe₃C είναι χρήσιμο για την περιγραφή του μετασχηματισμού των φάσεων σε καταστάσεις ισορροπίας, αλλά δεν δίνει πληροφορίες για την περίπτωση που ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε φάσεις εκτός ισορροπίας. Στους χάλυβες μπορούν να παρατηρηθούν και άλλες μικροδομές εκτός του φερρίτη και περλίτη, όταν υποστούν ισοθερμοκρασιακές βαφές ή συνεχή ψύξη με διαφορετικό βήμα.

Υπάρχουν δύο τύποι διαγραμμάτων, που σχεδιάζονται ανάλογα με την χημική σύσταση του εκάστοτε χάλυβα, και χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του μετασχηματισμού των διαφόρων μικροδομών σε μια θερμική κατεργασία και την πρόβλεψη αυτής. Το διάγραμμα CCT (Continuous Cooling Transformation): αποτελεί το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου στο οποίο αποτυπώνεται η έναρξη και η λήξη των μετασχηματισμών κατά τη συνεχή ψύξη των χάλυβων. Το διάγραμμα TTT (Time – Temperature – Transformation) ορίζεται ως το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου το οποίο απεικονίζει την έναρξη και την λήξη των ισόθερων μετασχηματισμών των χάλυβων.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται η μελέτη της ισοθερμοκρασιακής επίδρασης, επομένως, είναι χρήσιμο να εξεταστεί το διάγραμμα TTT, καθώς και τα στοιχεία της μικροδομής που προκύπτουν από τον μετασχηματισμό που περιγράφουν. Παρακάτω παρατίθενται ένα ενδεικτικό διάγραμμα, για χάλυβα υποευτηκτοειδούς σύστασης.



Εικόνα 4. Διάγραμμα TTT υποευτηκτοειδούς χάλυβα

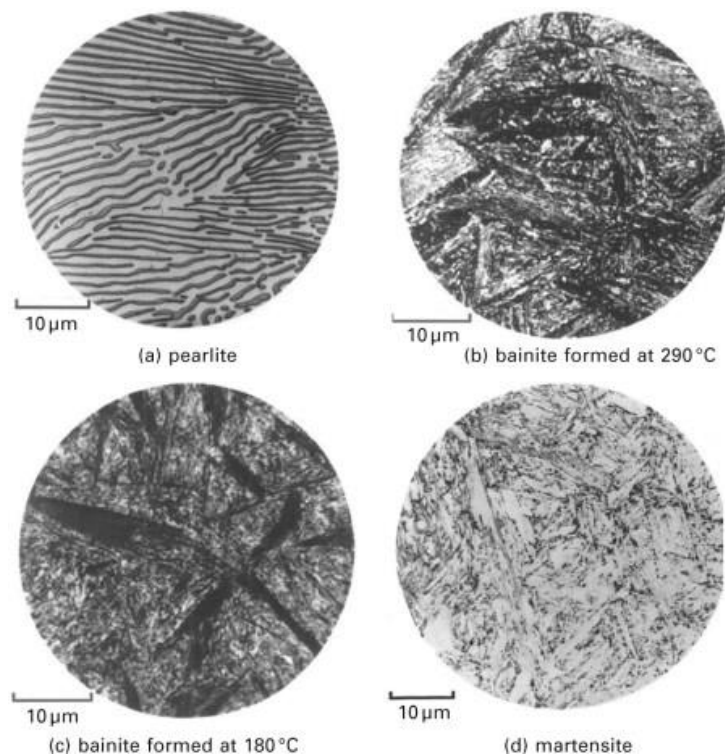
Οι καμπύλες σχεδιάζονται για κάθε θερμοκρασία και σε λογαριθμική κλίμακα του χρόνου. Ξεκινώντας από ανώτερες θερμοκρασίες, και αυξάνοντας τον ρυθμό ψύξης, λαμβάνονται, κατά σειρά, οι φάσεις του περλίτη, μπαϊνίτη και μαρτενσίτη.

Η έναρξη του μετασχηματισμού, στην περίπτωση του περλίτη και μπαϊνίτη, ορίζεται από την πρώτη καμπύλη από τα αριστερά, η διακεκομμένη γραμμή συμβολίζει τον μετασχηματισμό κατά 50%, ενώ η δεύτερη καμπύλη ορίζει το τέλος τους μετασχηματισμού.

Στην περίπτωση του μαρτενσίτη, δεν διακρίνεται κάποια καμπύλη, αλλά αυτή η φάση προκύπτει από τον μετασχηματισμό του ωστενίτη κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία (M_s), ενώ επιπλέον αναφέρονται οι θερμοκρασίες στις οποίες θα προκύψει ορισμένο ποσοστό μαρτενσίτη.

Παρακάτω, δίνεται περαιτέρω επεξήγηση των φάσεων, όπως αυτές προκύπτουν από τις ισόθερμες θερμικές κατεργασίες για χάλυβες ευθηκτοειδούς σύστασης, και όσο μειώνεται η θερμοκρασία μετασχηματισμού, με τις αντίστοιχες τυπικές μικροδομές να αναπαρίστανται στην Εικόνα 5.

- **Περλίτης:** Όπως προαναφέρθηκε, η μορφολογία του αποτελείται από εναλλασόμενα φυλλάρια φερρίτη-σεμεντίτη. Σε ανώτερη θερμοκρασία, και κοντά στην θερμοκρασία A_1 , η φύτρωση του περλίτη θα συμβεί σε λιγότερα σημεία, αλλά ο ρυθμός διάχυσης του άνθρακα είναι μεγαλύτερος. Επομένως, με το πέρας του μετασχηματισμού, ο περλίτης θα εμφανίζεται χονδρόκοκκος. Όσο η θερμοκρασία μειώνεται, και μέχρι την μύτη της καμπύλης, ο περλίτης εμφανίζεται ως λεπτόκοκκος.
- **Μπαινίτης:** Για θερμοκρασίες χαμηλότερες από την μύτη της καμπύλης έναρξης των μετασχηματισμών, η διάχυση των ατόμων άνθρακα είναι πιο περιορισμένη και σε συνδυασμό με την χαμηλή θερμοκρασία, προκύπτει ο σχηματισμός του μπαινίτη. Ο μπαινίτης αποτελείται από μια φερρίτική μήτρα και καρβίδια σεμεντίτη. Ανάλογα με την θερμοκρασία που θα μετασχηματιστεί, απαντάται με την μορφολογία λεπτών πλακιδίων (ανώτερος) ή βελονοειδής (κατώτερος)
- **Μαρτενσίτης:** Αυτή η φάση προκύπτει στην περίπτωση όπου ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά σύντομος, ώστε να αποφευχθεί η διάχυση του άνθρακα, ενώ επίσης ο μετασχηματισμός δεν εξαρτάται από τον χρόνο κράτησης στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Ο μαρτενσίτης είναι ένα υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα άνθρακα στο σίδηρο, ενώ η μοναδιαία κυψελίδα στο πλέγμα του είναι παραμορφωμένη κυψελίδα κατά την μία κατεύθυνση, του BCC φερρίτη, η οποία ονομάζεται BCT (χωροκεντρομένη τετραγωνική).



Εικόνα 5. Παραγόμενες μικροδομές από χάλυβα ευθηκτοειδούς σύστασης: α) περλίτης β) μπαινίτης στους 290°C, γ) μπαινίτης στους 180°C, δ) μαρτενσίτης [37]

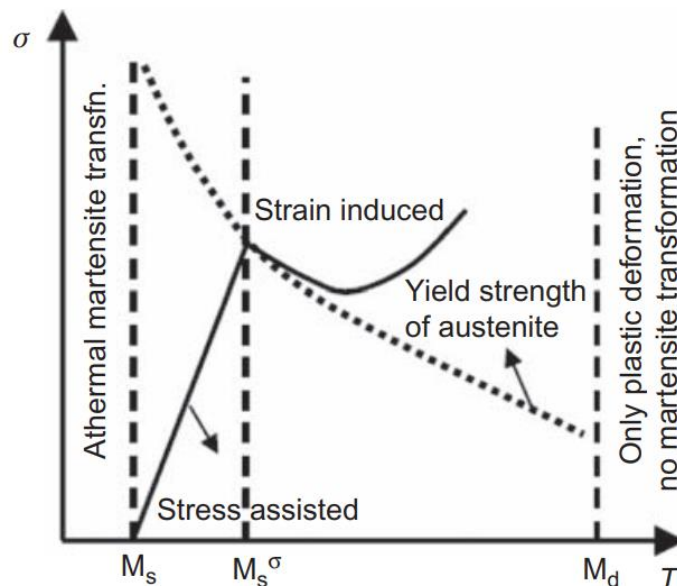
1.1.3. Μηχανισμοί Μετασχηματισμού του Μαρτενσίτη

Ο μετασχηματισμός ωστενίτη σε μαρτενσίτη είναι μη διαχυσιακός - διατμησιακός μετασχηματισμός. Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται σε επίπεδα συναρμογής (habit planes) και ακολουθεί ορισμένες διευθύνσεις. Ο μετασχηματισμός από την δομή FCC σε BCC συμβαίνει με 24 πιθανούς συνδυασμούς με διακριτό προσανατολισμό πλέγματος, με την πυρηνοποίηση να περιορίζεται σε ορισμένες από αυτές κάθε φορά, καθώς διαφέρει η θερμομηχανική καταπόνηση ανάλογα την επιβαλλόμενη τάση και παραμόρφωση.

Η προσθήκη του άνθρακα, στους χάλυβες, αυξάνει την τετραγωνικότητα του πλέγματος, λόγω των θέσεων που καταλαμβάνει σε αυτό, και επομένως ο μαρτενσίτης, σε αυτή την περίπτωση, θα απαντάται σε τετραγωνική κυβική δομή (BCT).

Υπάρχουν τρεις τρόποι μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, όπως μπορούν να διακριθούν στην Εικόνα 6, και οι οποίοι ταξινομούνται σε σχέση με την αιτία που τον προκάλεσε. Αυτοί είναι: α) Αθερμικός μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, β) Προκαλούμενος από επιβολή τάσης, γ) Λόγω προκαλούμενης παραμόρφωσης.

Ο αθερμικός μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μια διαδικασία που εξαρτάται από την θερμοδυναμική του συστήματος, επομένως επηρεάζεται από την εναλλαγή της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία M_s χρησιμοποιείται για να υποδείξει το μέγιστη θερμοκρασία από την οποία θα ξεκινήσει το φαινόμενο. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός προκαλούμενος από επιβαλλόμενη τάση λαμβάνει χώρα για ανώτερες θερμοκρασίες από την M_s , με την παρουσία μηχανικής κινητήριας δύναμης, και μέχρι την θερμοκρασία M_s^σ . Η θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού αυξάνει γραμμικά με την επιβαλλόμενη τάση, μέχρι το όριο διαρροής του ωστενίτη, κατά την M_s^σ . Όταν αυτό το όριο ξεπεραστεί, η επιβαλλόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του μητρικού ωστενίτη, ο οποίος παραμορφώνεται πλαστικά και δημιουργεί νέες θέσεις πυρήνωσης του μαρτενσίτη. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μετασχηματισμός του προκαλείται λόγω της παραμόρφωσης, και μέχρι την θερμοκρασία M_d . Για ανώτερες θερμοκρασίες, ο ωστενίτης θεωρείται σταθερός και δεν μετασχηματίζεται περαιτέρω, ενώ συνεχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά.



Εικόνα 6. Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης της θερμοκρασίας και της επιβαλλόμενης τάσης στους μηχανισμούς μαρτενσιτικού μετασχηματισμού [38]

Επίδραση των κραματικών στοιχείων

Η προσθήκη κραματικών στοιχείων επιδρά άμεσα στην μορφολογία του διαγράμματος Fe-Fe₃C και ακολούθως, στις καμπύλες των διαγραμμάτων TTT. Ανάλογα με τον τρόπο που επιδρούν στο διάγραμμα ισορροπίας, διακρίνονται σε:

- Σταθεροποιητές-α (ferrite stabilizers): Κραματικά στοιχεία (Si, Al, Be, P, V, Cr, Ti, Mo, W) που σταθεροποιούν τον φερρίτη και σχηματίζουν ωστενιτικό βρόχο στο διάγραμμα φάσεων.
- Σταθεροποιητές-γ (austenite stabilizers): Κραματικά στοιχεία (Ni, Mn) που σταθεροποιούν τον ωστενίτη και σχηματίζουν ανοικτό ωστενιτικό πεδίο στο διάγραμμα φάσεων. [1]

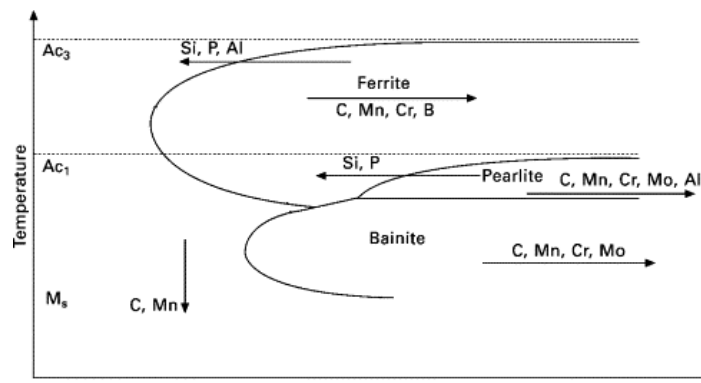
Επομένως, πρέπει να σημειωθεί, ότι ένα άμεσο αντίκτυπο αυτών των στοιχείων είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας στην οποία λαμβάνει χώρα η ευτηκτοειδής αντίδραση.

Ακόμη, τα κραματικά στοιχεία επιδρούν στην κινητική και τον μηχανισμό του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε περλίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη. Αυτό συμβαίνει ανάλογα με την τάση τους να σχηματίζουν καρβίδια ή όχι. Ιδιαίτερα, τα στοιχεία που σχηματίζουν καρβίδια δημιουργούν ποιοτικές και ποσοτικές μεταβολές στις ισόθερμες καμπύλες μετασχηματισμού. Σε ανώτερες θερμοκρασίες μειώνουν τον σχηματισμό περλίτη και σε κατώτερες προωθούν τον μετασχηματισμό μπαινίτη. Επομένως, αυτά τα κραματικά στοιχεία δημιουργούν δύο καμπύλες αποσύνθεσης του ωστενίτη. Τα κραματικά στοιχεία μπορούν να διαχωριστούν επίσης, ως εξής:

- Καρβιδιογόνα: Τα κραματικά στοιχεία που εμφανίζουν μεγαλύτερη χημική συγγένεια με τον άνθρακα, και έχουν την τάση να σχηματίζουν καρβίδια (Mn, Cr, Mo).
- Μη-καρβιδιογόνα: Τα κραματικά στοιχεία που σχηματίζουν στερεό διάλυμα με τον σίδηρο (Ni, Si, Al, Cu, N)

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός επηρεάζεται άμεσα από την προσθήκη των κραματικών στοιχείων. Τα περισσότερα από αυτά μειώνουν την θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού, με εξαίρεση τα στοιχεία Co, Al. Βέβαια, μεγαλύτερη επίδραση επιφέρει η προσθήκη άνθρακα, όπου αύξηση της περιεκτικότητας κατά 1%wt C μειώνει την θερμοκρασία μετασχηματισμού κατά 300°C.

Παρακάτω, απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα TTT προευτηκτοειδούς χάλυβα με την επίπτωση των κραματικών στοιχείων στην μορφολογία των καμπυλών, καθώς και στην έναρξη των μετασχηματισμών.



Εικόνα 7. Επίδραση των κραματικών στοιχείων στις καμπύλες των ισόθερων θερμικών κατεργασιών

1.1.4. Μηχανικές Ιδιότητες

Κατά την διαδικασία επιλογής ενός τύπου χάλυβα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μηχανικές του ιδιότητες. Βασικές παράμετροι που συγκαταλέγονται σε αυτές είναι: το όριο διαρροής (YS), η μέγιστη εφελκυστική αντοχή (UTS), η ολκιμότητα (διατήρηση πλαστικής παραμόρφωσης πριν από την θραύση), η δυσθραυστότητα (η απορροφούμενη ενέργεια πριν από τη θραύση, που υποδεικνύεται από τη συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη εφελκυσμού τάσης-καταπόνησης), και η σκληρότητα (αντίσταση της επιφάνειας στην παραμόρφωση). Ο χάλυβας αποτελεί ένα υλικό που επιδεικνύει ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων, το οποίο προκύπτει από την ποικίλη χημεία και μικροδομή που παρουσιάζει. Αυτές οι ιδιότητες πρέπει να είναι προσαρμοσμένες ώστε να ικανοποιούν το ευρύ φάσμα στις απαιτήσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας.

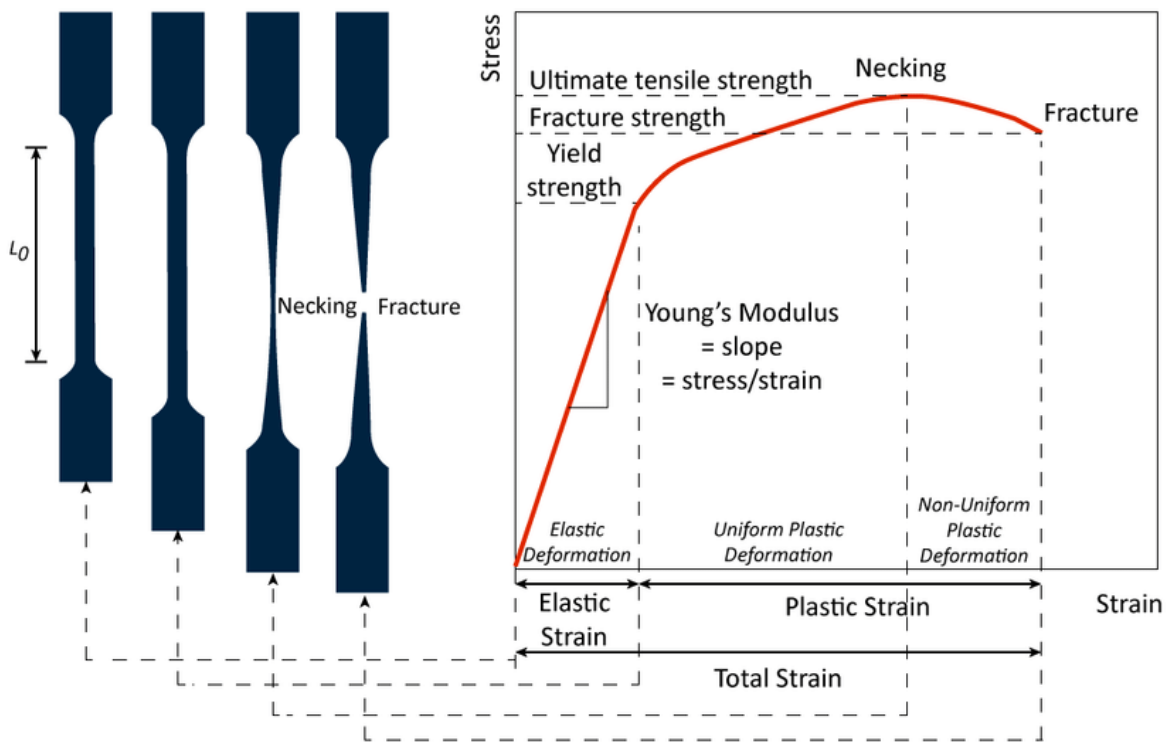
Ολκιμότητα-Δυσθραυστότητα

Η ικανότητα των υλικών να δέχονται πλαστικές παραμορφώσεις πριν από την θραύση τους ονομάζεται ολκιμότητα (ductility), και τα υλικά που έχουν αυτήν την ικανότητα ονομάζονται όλκιμα. Σε αντίθεση, τα υλικά που έχουν περιορισμένη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης λέγονται ψαθυρά (brittle). Τα όλκιμα υλικά εμφανίζουν μεγάλη περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, σχηματίζουν λαιμό και έπειτα οδηγούνται στην θραύση. Τα ψαθυρά υλικά επιδέχονται μεγαλύτερες τάσεις στην ελαστική περιοχή, έχουν πολύ μικρότερη πλαστική παραμόρφωση και δεν σχηματίζουν λαιμό πριν την θραύση.

Οι χάλυβες ανήκουν στην κατηγορία των όλκιμων υλικών και είναι χρήσιμο να εξεταστούν τόσο το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, όσο και οι βασικές έννοιες που απορρέουν από αυτό. Παρακάτω, παρουσιάζεται η Εικόνα 8, ενώ αναφέρονται τα σημαντικά στοιχεία του διαγράμματος.

Το τάση, σ , ορίζεται ως δύναμη διαιρεμένη ανά την επιφάνεια στην οποία ασκείται. Η τάση σχεδιάζεται συχνά ως προς την παραμόρφωση ϵ ($\Delta l / l$), που είναι η ποσοστιαία αλλαγή σε μια συγκεκριμένη διάσταση του αντικειμένου που υποβάλλεται σε τάση. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προκύπτει, είναι χρήσιμη για την κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Από το διάγραμμα, παρατηρούνται δύο διακριτές περιοχές, η ελαστική και η πλαστική περιοχή. Στην πρώτη περίπτωση, η παραμόρφωση του υλικού δεν είναι μόνιμη, καθώς όταν το φορτίο αφαιρεθεί, όσο η τάση παραμένει στο ελαστικό εύρος, το υλικό θα ανακτήσει τις αρχικές του διαστάσεις. Σε αυτήν την περιοχή, ο βαθμός στον οποίο θα παραμορφωθεί το υλικό εξαρτάται γραμμικά από τον βαθμό της επιβαλλόμενης τάσης. Η κλίση αυτού του τμήματος, στο γράφημα, ορίζεται ως το μέτρο ελαστικότητας E , (όπου $E = \sigma / \epsilon$) και είναι σταθερό για κάθε υλικό. Αυτό συμβαίνει για μικρές τιμές τάσεων, όπου οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων τεντώνονται, χωρίς όμως να διαρρηχθούν.



Εικόνα 8. Τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου υλικού (δεξιά) με την μεταβολή στις διαστάσεις του μήκους-διατομής που υφίσταται το δοκίμιο κατά τον εφελκυσμό (αριστερά) [39]

Όριο διαρροής

Το όριο διαρροής (YS) είναι η τάση που απαιτείται για την παραγωγή μιας μικρής, καθορισμένης ποσότητας πλαστικής (μη ανακτήσιμης) παραμόρφωσης, ενώ συνήθως ορίζεται για 0,002 παραμόρφωση, σηματοδοτώντας το τέλος της ελαστικής περιοχής. Το όριο διαρροής βρίσκεται γενικά στην κορυφή του γραμμικού, ελαστικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Κατά την φόρτιση πέρα από το YS, τα άτομα αναδιατάσσονται, με τους δεσμούς τους να αναμορφώνονται και τότε τα άτομα αρχίζουν να «γλιστρούν» ή να κινούνται το ένα δίπλα στο άλλο. Κατά την αποφόρτιση, αυτά τα άτομα δεν επιστρέφουν στην αρχική τους θέση, κάτι το οποίο είναι η αιτία πλαστικής παραμόρφωσης στα μέταλλα. Εάν το φορτίο αφαιρεθεί στο εύρος των πλαστικών τάσεων, θα προκύψει κάποια ελαστική ανάκαμψη, καθώς η ευθεία της αποφόρτισης θα είναι παράλληλη με αυτή της ελαστικής περιοχής αλλά θα παραμείνει κάποια μόνιμη παραμόρφωση που θα έχει προκληθεί από την ολίσθηση των ατόμων.

Μέγιστη Εφελκυστική Αντοχή

Αφού ασκηθεί μια συγκεκριμένη τάση, το υλικό θα αρχίσει να σχηματίζει λαιμό και να οδηγείτε προς την θραύση. Σε αυτό το σημείο, η τιμή της τάσης είναι γνωστή ως μέγιστη εφελκυστική αντοχή (UTS) και είναι συνήθως η μέγιστη τάση στην καμπύλη για τα όλκιμα υλικά. Ολόκληρη η περιοχή κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σχετίζεται με την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί πριν από την θραύση και ορίζεται ως δυσθραυστότητα.

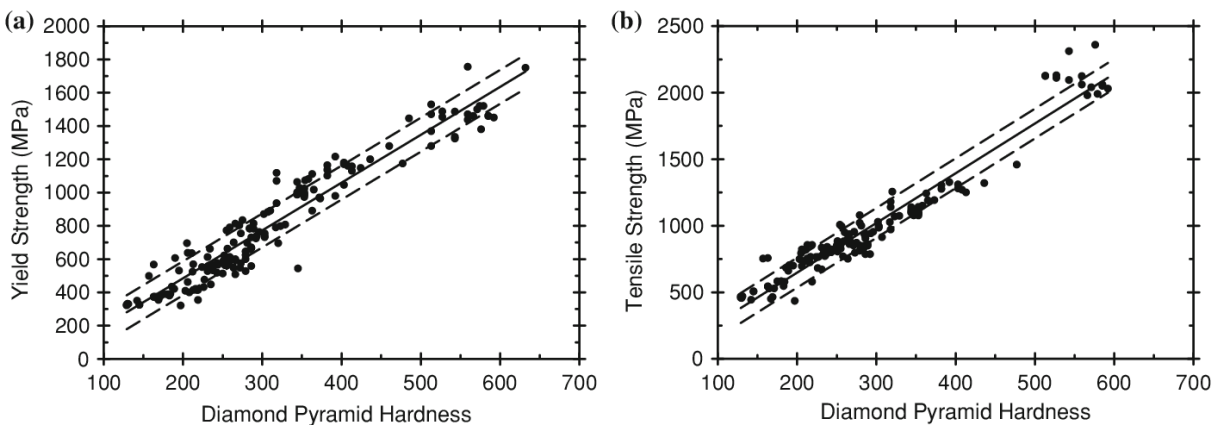
Σκληρότητα

Ως σκληρότητα ορίζεται το μέτρο της αντίστασης του υλικού στην τοπική πλαστική παραμόρφωση. Οι μετρήσεις της σκληρότητας πραγματοποιούνται με το εξεταζόμενο υλικό να τοποθετείται σε οριζόντια θέση και να δέχεται την δεισδύση από ένα άλλο, σκληρότερο σώμα, το οποίο ονομάζεται δεισδυτής ή εντυπωτής. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος που δημιούργησε ο δεισδυτής στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Υπάρχουν τρεις βασικές δοκιμές σκληρομέτρησης, οι οποίες διέπονται από την ίδια βασική αρχή λειτουργίας, όπως προαναφέρθηκε, αλλά διαφέρουν κυρίως ως προς τον τύπο του δεισδυτή και τα επιβαλλόμενα φορτία. Αυτές είναι:

- Η μέθοδος Brinell: Χρησιμοποιεί σφαιρικό δεισδυτή από χάλυβα ή καρβίδιο του βολφραμίου. Το φορτίο ποικίλει από 500-3000kg και παραμένει στην επιφάνεια για 10-30s.
- Η μέθοδος Rockwell: Χρησιμοποιεί αδαμάντινους κώνους ή χαλύβδινες σφαίρες με φορτίο 60-150kg και στην περίπτωση της επιφανειακής Rockwell τα φορτία κυμαίνονται από 15-45kg.
- Η μέθοδος Vickers: Η πιο συνηθισμένη εκδοχή της μεθόδου είναι αυτή της μικροσκληρότητας, η οποία απαιτεί καλύτερη προετοιμασία της επιφάνειας, καθώς το εξεταζόμενο υλικό θα πρέπει να υποβληθεί σε λείανση και στίλβωση. Ο δεισδυτής είναι αδαμάντινη πυραμίδα συ [2]γκεκριμένης γεωμετρίας και το επιβαλλόμενο φορτίο είναι πολύ μικρότερο από τις άλλες μεθόδους, καθώς κυμαίνεται από 1 μέχρι 1000g.

Οι δοκιμές σκληρότητας χρησιμοποιούνται κυρίως επειδή αποτελούν μια απλή μέθοδο, όπου δεν απαιτείται εξειδικευμένη προετοιμασία για το υλικό, είναι μη-καταστροφική μέθοδος, ενώ έχει αμέση συσχέτιση με τη μικροδομή, και άλλες μηχανικές ιδιότητες όπως το όριο διαρροής, τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή και το όριο θραύσης. Παρακάτω, από τα διαγράμματα της Εικόνας 7 φαίνεται η συσχέτιση των δοκιμών σκληρότητας με τις τιμές του ορίου διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής, για υποευθηκτοειδείς μη-ωστενιτικούς χάλυβες και για όλο το εύρος πιθανόν μικροδομών. [2]



Εικόνα 9. Συσχέτιση Ορίου Διαρροής και Μέγιστης Εφελκυστικής Αντοχής με την Σκληρότητα. Η ευθεία γραμμή προέκυψε από εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης, ενώ οι διακεκομμένες αναφέρονται στο τυπικό σφάλμα ± 1 [2]

Μηχανισμοί Σκλήρωσης

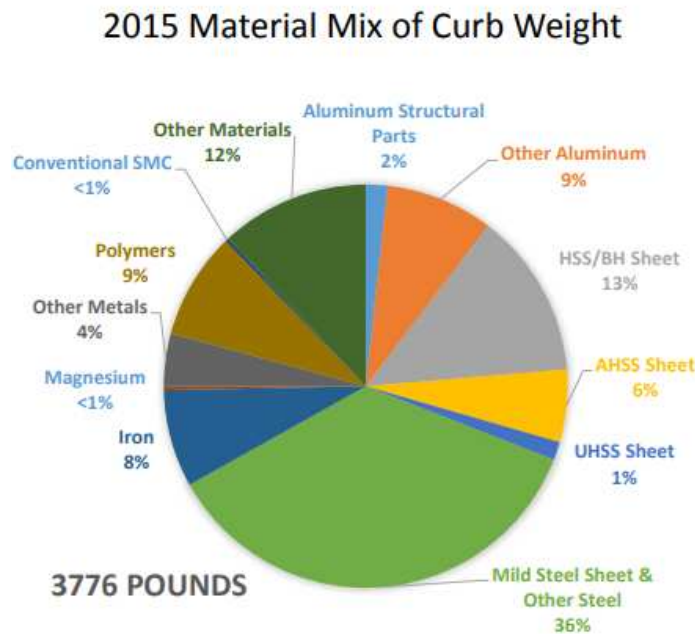
Σκοπός των μηχανισμών σκλήρωσης είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, πρωτίστως με την αύξηση της σκληρότητας. Οι μηχανισμοί σκλήρωσης εξαρτώνται άμεσα από την δημιουργία και την μετακίνηση των διαταραχών εντός του κρυσταλλικού πλέγματος του κράματος. Οι βασικοί μηχανισμοί σκλήρωσης έχουν, ως εξής [3, 4]:

- Σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος: Όταν ένα κραματικό στοιχείο προστίθεται στο βασικό μέταλλο, για να σχηματίσει στερεό διάλυμα, τότε οι πιθανές θέσεις που καταλαμβάνει εντός του πλέγματος, είναι είτε αντικατάσταση, είτε παρεμβολής. Και στις δύο περιπτώσεις, αυτά τα άτομα σχηματίζουν τοπικά πεδία καταπόνησης, παρεμποδίζοντας τις μετακινήσεις των διαταραχών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική αντοχή και σκληρότητα του κράματος, αν και μπορεί ταυτόχρονα να μειωθεί η ολκιμότητα.
- Σκλήρυνση λόγω της επίδρασης του μεγέθους των κόκκων: Οι κόκκοι εμφανίζονται με διαφορετικό κρυσταλλικό προσανατολισμό σε σχέση με τους γειτονικούς κόκκους, κάτι το οποίο αποτελεί εμπόδιο στην μετακίνηση των διαταραχών, οι οποίες τείνουν να συσσωρεύονται σε αυτά τα όρια των κόκκων. Ελάττωση του μεγέθους των κόκκων, και άρα αύξηση του αριθμού τους ανά μονάδα όγκου στο κράμα, συνεπάγεται, αύξηση των ορίων τους, και άρα μεγαλύτερη παρεμπόδιση στην ολίσθηση και την μετακίνηση των διαταραχών, με αποτέλεσμα της αύξηση της αντοχής του υλικού.
- Σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης: Ως αποτέλεσμα της ψυχρηλασίας (κύλιση, κάμψη κ.λπ.), οι διαταραχές στο χάλυβα γίνονται πιο πυκνές, εμποδίζοντας τη σχετική τους κίνηση. Η σκλήρυνση λόγω της ενδοτράχυνσης συνήθως αυξάνει το YS, το UTS και τη σκληρότητα, αλλά συχνά έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα.
- Σκλήρυνση με κατακρήμνιση : Η μικροδομή τους χάλυβα συνήθως αποτελείται από μια φερριτική ή ωστενιτική μήτρα, ενώ συχνά περιέχει άλλες φάσεις, οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από λεπτομερή σωματίδια (π.χ. σεμεντίτης, νησίδια μαρτενσίτη, καρβίδια/νιτρίδια) έως ελασματοειδή φύλλα (π.χ. περλίτης). Αυτά τα στοιχεία της μικροδομής μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις συνολικές ιδιότητες του υλικού και επεξηγούν μερικούς από τους πολλούς τρόπους αύξησης της αντοχής.
- Σκλήρυνση με μετασχηματισμούς φάσεων: Κατά την επεξεργασία παραγωγής χάλυβα, συχνά μπορούν να πραγματοποιηθούν μετασχηματισμοί φάσεων που ενισχύουν την σκλήρυνση δημιουργώντας μικροδομές με σημαντικές ποσότητες σκληρών φάσεων, όπως μαρτενσίτης ή μπαινίτης. Τέτοιοι μετασχηματισμοί συμβαίνουν σε κατεργασίες όπως η θερμή έλαση, ο γαλβανισμός εν θερμώ ή η συνεχής ανόπτηση, κατά τις οποίες ο ωστενίτης θα μετατραπεί σε αυτές τις σκληρότερες φάσεις κατά την ψύξη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτός ο μηχανισμός είναι θεμελιώδης για την ανάπτυξη προηγμένων χάλυβων υψηλής αντοχής και επιτρέπει την κατασκευή των διφασικών χάλυβων (DP), πλαστικότητα που προκαλείται από μετασχηματισμό (TRIP) και άλλους χάλυβες AHSS.

1.2. Η χρήση των χαλύβων στην αυτοκινητοβιομηχανία

Βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή ενός κατάλληλου υλικού στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η επίδοση, ο τρόπος παραγωγής του, το κόστος, και η επίτευξη των κανονισμών ασφαλείας. Ακριβώς για αυτούς τους λόγους ο χάλυβας αποτελεί το βασικό υλικό που αξιοποιείται στην γραμμή παραγωγής της. Η χρήση χάλυβα είναι διαδεδομένη, καθώς επιτρέπει την επίτευξη επιθυμητών προτύπων αντοχής και ασφάλειας, με σχετικά χαμηλό κόστος έναντι άλλων υλικών.

Από το διάγραμμα 1.1, φαίνεται ότι σε σχέση με το συνολικό βάρος, το ποσοστό που καταλαμβάνουν συνολικά, όλοι οι τύποι χαλύβων ανέρχεται στο 56%. Σε αυτό το ποσοστό, περιλαμβάνονται ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων, οι αναρτήσεις και φυσικά η λαμαρίνα από την οποία κατασκευάζονται οι πόρτες, το δάπεδο, η οροφή και τα καπό της μηχανής και του χώρου αποσκευών.



Εικόνα 10. Κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται στο αμάξωμα [40]

Δεδομένου του ότι οι κανονισμοί γίνονται ολοένα και πιο αυστηροί, απαιτείται ο σχεδιασμός μιας βελτιστοποιημένης και ισορροπημένης λύσης που θα στοχεύει στην μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης, την ανάπτυξη νέων συστημάτων πρόωσης του κινητήρα και βεβαίως στην μείωση του βάρους. Αν και οι δύο πρώτοι παράγοντες ευθύνονται για παραπάνω από το 50% της ενεργειακής κατανάλωσης, το βάρος αποτελεί εξίσου σημαντική παράμετρο, καθώς μείωσή του σημαίνει μείωση στην απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα αισθητό στην περίπτωση της αστικής μετακίνησης, ενώ αποτελεί σημαντικό μέρος της κατανάλωσης, ανεξαρτήτως συνθηκών οδήγησης [5].

1.2.1. Κανονισμοί στην οικονομία καυσίμου

Τα πρότυπα των κανονισμών επικεντρώνονται στη μείωση του GHG ή του διοξειδίου των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), στην βελτίωση της οικονομίας καυσίμου (ή στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου), και άλλα επικεντρώνονται σε συνδυασμούς των δύο.

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας το 2019 ανήλθε περίπου στις 600 quadrillion Btu, ενώ ο τομέας των μεταφορών προβλέπεται να σημειώσει αύξηση κατά σχεδόν 40% μεταξύ 2018 και 2050. Η κατανάλωση καυσίμου που σχετίζεται με την επιβατική κινητικότητα αντιπροσωπεύει το 61% της συνολικής ενέργειας μεταφοράς παγκοσμίως, σύμφωνα με την κατανάλωση το 2012 [6].

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), προκειμένου να προσαρμοστεί αποτελεσματικά σε αυτή την κατάσταση, έχει πρότυπα που στοχεύουν συγκεκριμένα στη μείωση των εκπομπών CO₂, ενώ δεσμεύεται ότι το 2021 το όριο θα κυμαίνεται στα 95g/km (συνολική μείωση στο 42% σε σχέση με αυτή του 2005). Αυτοί οι κανονισμοί είναι οι αυστηρότεροι παγκοσμίως, καθώς άλλοι μεγάλοι παραγωγοί, όπως οι ΗΠΑ, η Ιαπωνία και η Κίνα έχουν μεγαλύτερη ανοχή. (121, 117, και 119 g/km αντιστοίχως) [7]

Η μείωση βάρους θεωρείται βασικός παράγοντας για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών. Ακόμη, έχει υπολογιστεί ότι για κάθε 10% του βάρους που εξαλείφεται από το συνολικό βάρος ενός οχήματος, η οικονομία καυσίμου βελτιώνεται κατά 7% και επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 5% [8] Σε άλλη έρευνα, η οποία διενεργήθηκε από την DG Climate Action (2015), αναφέρεται ότι για την ίδια μείωση βάρους, και αν ληφθεί υπόψη η ανάλογη μείωση της ισχύος του κινητήρα η μείωση του CO₂ ανέρχεται στο 6,5%.

1.2.2. Κανονισμοί στην ασφάλεια των επιβατών

Οι τυπικές δοκιμές για την ασφάλεια στα νέα επιβατικά οχήματα καθορίζονται κυρίως από το Euro-NCAP και το US-NCAP (όπου το NCAP ορίζεται ως New Car Assessment Programme). Οι αυστηρές αξιολογήσεις ασφαλείας κατά τη σύγκρουση πραγματοποιούνται από τους κανονισμούς των North American και E.U, οι οποίοι προσομοιάζουν πραγματικά συμβάντα σύγκρουσης. Σε αυτές τις προσομοιώσεις, αξιολογείται η προστασία των επιβατών για διαφορετικά σχέδια αυτοκινήτων και συνθήκες συντριβής. Χαρακτηριστική δοκιμή είναι αυτή της μετωπικής σύγκρουσης, καθώς έχει τις σοβαρότερες επιπτώσεις σε σχέση με τους άλλους τύπους συγκρούσεων. Όπως ορίζεται από το EU-NCAP MPOB (Mobile Progressive Deformable Barrier) Τα αποτελέσματα αυτών αντικατοπτρίζονται από την τελική κατάσταση των ανδρείκελων και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της προστασίας στους εμπρός επιβάτες και για την αξιολόγηση της ασφαλείας διαφορετικών σχεδίων αυτοκινήτων [9].

Σε περίπτωση σύγκρουσης, ένα καλά σχεδιασμένο όχημα, θα πρέπει να μπορεί να απορροφά αποτελεσματικά την ενέργεια κρούσης, με τον χάλυβα να θεωρείται, σε αυτή την περίπτωση, ένα από τα καλύτερα υλικά. Η απορροφούμενη ενέργεια υπολογίζεται με βάση την περιοχή που καλύπτεται κάτω από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης. Ο χάλυβας υψηλής αντοχής παρέχει καλύτερη απόδοση κατά την σύγκρουση, λόγω του υψηλότερου ρυθμού εργοσκήρυσης και του υψηλότερου ορίου διαρροής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το χαλύβδινο υλικό να έχει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή καταπόνησης. [10]

Επομένως, και συνοψίζοντας από τα παραπάνω, αν και τα πολυμερή ενισχυμένα με αλουμίνιο, τα κράματα μαγνησίου και τα ανθρακονήματα ανταγωνίζονται τον χάλυβα για πολλές εφαρμογές, ωστόσο ο χάλυβας προσφέρει στις αυτοκινητοβιομηχανίες έναν ισχυρό, οικονομικό και περιβαλλοντικά υπεύθυνο τρόπο για να καλύψει τις ανάγκες τους για εφαρμογές στο σκελετό του αμαξώματος, μαζί με πολλά εξαρτήματα ανάρτησης / πλαισίου και κινητήρα.

1.2.3. Κατηγοριοποίηση χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας

Γενικά, οι χάλυβες αυτοκινήτων μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος γίνεται με βάση την μεταλλουργική σκοπιά, και σύμφωνα με αυτή, περιλαμβάνονται:

- Οι χάλυβες Χαμηλής Αντοχής (Low Strength Steels)
- Οι συμβατικοί χάλυβες Υψηλής Αντοχής (HSS – High Strength Steels)
- Προηγμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (Advanced High Strength Steels) [7]

Συμβατικοί Χάλυβες Χαμηλής και Υψηλής Αντοχής

Οι συμβατικοί χάλυβες, χαμηλής αντοχής (με όριο θραύσης 280MPa) και υψηλής αντοχής (με όριο θραύσης 280-1000MPa) είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται κατά μεγαλύτερο ποσοστό στην αυτοκινητοβιομηχανία, και επομένως απαιτείται μια σύντομη περιγραφή αυτών. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη εισαγωγή των βασικών συμβατικών χαλύβων, στους οποίους συγκαταλέγονται: οι Μαλακοί Χάλυβες (Mild Steels), οι Απαλλαγμένοι από Στοιχεία Παρεμβολής (Interstitial Free - IF) και ο υψηλής αντοχής Χάλυβες με Σκλήρυνση κατά την Βαφή (Bake Hardenable -BH) και οι χάλυβες Υψηλής αντοχής-χαμηλής κραμάτωσης (High Strength – Low alloyed Steels).

Μαλακός Χάλυβας (Mild Steel)

Ο συμβατικός μαλακός χάλυβας χαρακτηρίζεται από απλή φερριτική μικροδομή, με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χαμηλή κραμάτωση, που τον καθιστούν διαμορφώσιμο και του προσδίδουν χαμηλή αντοχή. Παράγονται ευρέως και χρησιμοποιούνται λόγω χαμηλού κόστους. Μαλακοί χάλυβες έχουν χρησιμοποιηθεί από καιρό για πολλές εφαρμογές σε οχήματα, συμπεριλαμβανομένης της δομής του αμαξώματος, του πώματος και άλλων βοηθητικών εξαρτημάτων.

Χάλυβες Απαλλαγμένοι από Στοιχεία Παρεμβολής (IF)

Αυτοί οι χάλυβες περιέχουν πολύ μικρό ποσοστό σε άζωτο ή άνθρακα, σχηματίζοντας νιτρίδια και καρβίδια με άλλες κραματικές προσθήκες, όπως το νιόβιο ή το τιτανίου, για τη δημιουργία διάφορων κατακρημνισμάτων. Άρα, αυτός ο τύπος χάλυβα εμφανίζει χαμηλό όριο διαρροής με υψηλή ολκιμότητα, καθώς και μήτρα απαλλαγμένη από στοιχεία παρεμβολής ακριβώς λόγω της δημιουργίας των κατακρημνισμάτων. Ακόμη, λόγω του ότι ο άνθρακας είναι δεσμευμένος και όχι με την μορφή στερεού διαλύματος, οι χάλυβες IF δεν εμφανίζουν γήρανση και είναι ιδανικοί για γαλβανιζέ προϊόντα που

παράγονται με βαθιά κύλανση εν ψυχρώ. Τα στοιχεία της δομής του αμαξώματος που απαιτούν υψηλή διαμόρφωση και χαμηλή ολκιμότητα κατασκευάζονται με αυτόν τον τύπο χάλυβα.

Χάλυβες με σκλήρυνση κατά την Βαφή (BH)

Παρόλο που έχουν μια απλή φερριτική μικροδομή, οι χάλυβες BH υποβάλλονται σε σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος, εμφανίζοντας αυξημένη αντοχή. Έχουν μια πιο περίπλοκη χημεία σε σχέση με τους μαλακούς χάλυβες ή τους χάλυβες IF. Για την διατήρηση του άνθρακα υπό την μορφή στερεού διαλύματος χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές, ενώ ο άνθρακας διαφορίζεται κατά το ψήσιμο της βαφής. Η διαδικασία αυτή αυξάνει το όριο διαρροής των χαλύβων BH, διατηρώντας παράλληλα την εξαιρετική διαμόρφωση. Οι χάλυβες BH έχουν υψηλή αντοχή σε βαθουλώματα και συχνά επιλέγονται για τις εξωτερικές επιφάνειες του αμαξώματος, όπως οι πόρτες, το καπό και το πορτπαγκάζ.

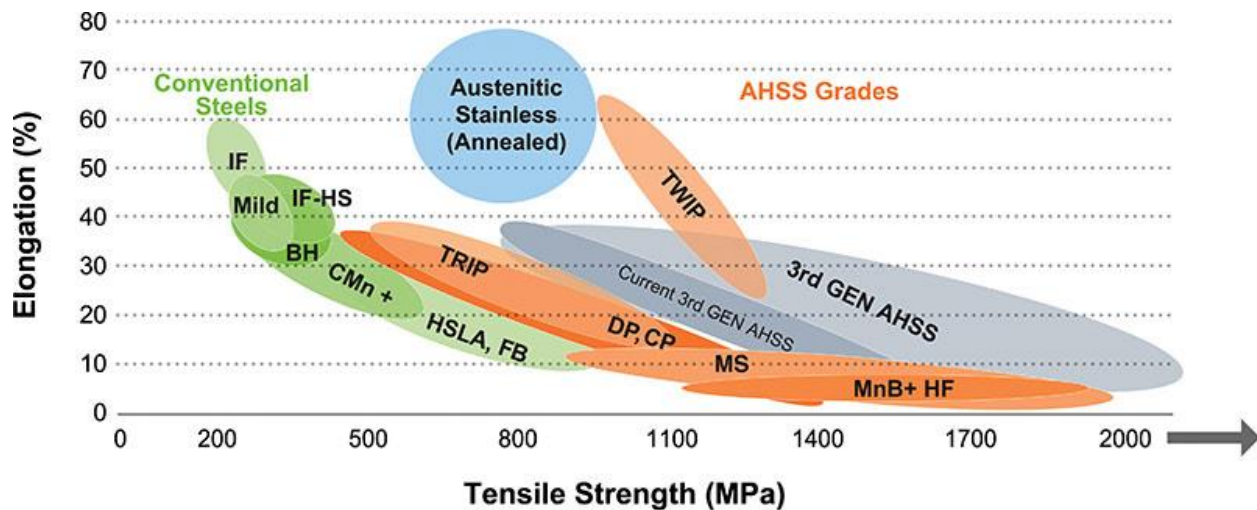
Χάλυβες HSLA

Οι χάλυβες HSLA ήταν από τους πρώτους χάλυβες υψηλής αντοχής (HSS) που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές αυτοκινήτων. Η μικροδομή τους χαρακτηρίζεται από φερριτική μήτρα και δευτερεύουσες φάσεις, όπως περλίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη, και διασκορπισμένα καρβίδια, ενώ έχουν χαμηλές κραματικές προσθήκες. Αυτή η σύνθετη δομή σε συνδυασμό με την ελάττωση του μεγέθους των κόκκων, για αυξημένη αντοχή, δίνουν στην HSLA το όνομά της. Οι χάλυβες HSLA είναι συνήθως σχεδιασμένοι για να πληρούν τις τεχνικές προδιαγραφές και είναι συνήθως σκληροί, ανθεκτικοί στη διάβρωση, διαμορφώσιμοι και συγκολλησιμοι. Πολλά βοηθητικά εξαρτήματα αυτοκινήτων, τεμάχια της δομής του αμαξώματος, εξαρτήματα ανάρτησης και πλαισίου, καθώς και τροχοί, είναι κατασκευασμένα από χάλυβες HSLA.

1.3. Χάλυβες AHSS – Μικροδομή και Ιδιότητες

Σε αυτήν την οικογένεια χαλύβων περιλαμβάνονται πολυφασικοί χάλυβες που περιέχουν μπαινίτη, μαρτενσίτη ή/και παραμένον ωστενίτη. Η χημική τους σύσταση επιλέγεται προσεκτικά και αυτή η σύνθετη μικροδομή παράγεται από ελεγχόμενες θερμικές κατεργασίες. Μέσω διαφόρων μηχανισμών σκλήρωσης επιτυγχάνεται ένα μεγάλο εύρος σε αντοχή, σκληρότητα, ολκιμότητα και κόπωση.

Στους χάλυβες AHSS, περιλαμβάνονται οι διφασικοί χάλυβες (DP), οι χάλυβες Φερριτικής-μπαινιτικής μικροδομής (FB), οι χάλυβες Θερμής Διαμόρφωσης (HF), οι Σύνθετης Μικροδομής (CP), οι χάλυβες TRIP και οι χάλυβες που σχηματίζουν διδυμίες κατά την Παραμόρφωση (TWIP).

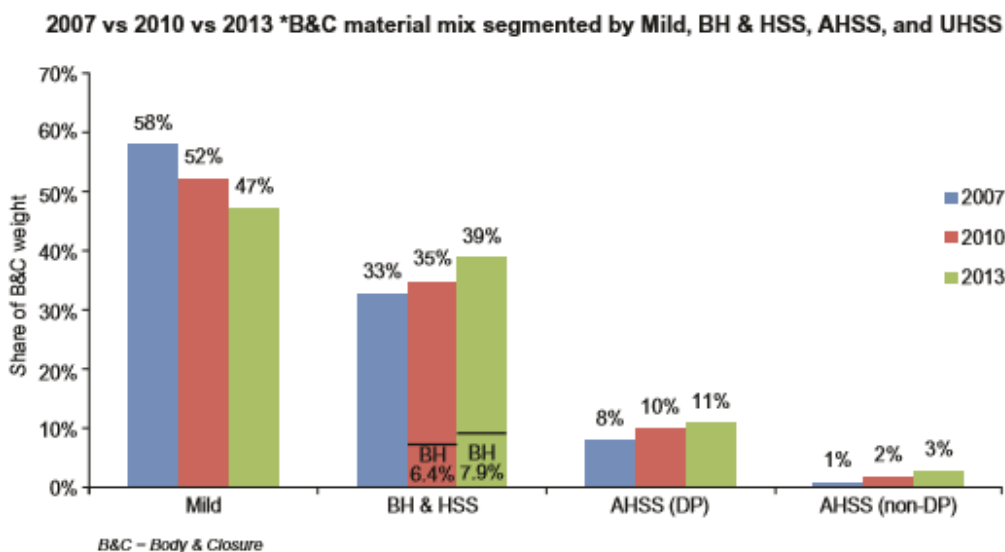


Εικόνα 11. Διάγραμμα Τάσης-Επιμήκυνσης διάφορων τύπων χαλύβων, προς σύγκριση με τους χάλυβες AHSS [8]

Μια πρώτη διάκριση μεταξύ των χαλύβων, στο διάγραμμα, είναι με βάση την εφελκυστική τους αντοχή, χάλυβες με όριο θραύσης από 270 έως 1000MPa, ορίζονται ως υψηλής αντοχής, ενώ για ανώτερες τιμές ορίζονται ως χάλυβες υπερύψηλης αντοχής. Η πρώτη γενιά των AHSS περιλαμβάνει υψηλής αντοχής ψυχρής διαμόρφωσης χάλυβες με πολυφασική μικροδομή και μητρική φάση φερρίτη καθώς και βελτιωμένη διαμορφωσιμότητα σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής. Η δεύτερη γενιά, περιλαμβάνει χάλυβες με ωστενιτική μήτρα, όπως οι χάλυβες TWIP, οι οποίοι παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, αλλά αυξημένο κόστος, λόγω υψηλής κραμάτωσης. Η τρίτη γενιά αποτελεί αντικείμενο έρευνας, και σκοπός της είναι να κάλυψει αυτό το κενό, όσον αφορά την εξισορρόπηση αντοχής-επιμήκυνσης, την μείωση του κόστους παραγωγής και την βελτιωμένη συγκολλησιμότητα, μεταξύ της πρώτης και δεύτερης γενιάς των χαλύβων AHSS.

Ακόμη, όσον αφορά τους κανόνες ασφαλείας, στους οποίους αντικατοπτρίζονται οι επιδόσεις των υλικών, αυτοί διαχωρίζονται σε δύο βασικές περιοχές του αμαξώματος: το εμπρόσθιο και πίσω μέρους του

αυτοκινήτου, το οποίο δέχεται την κρούση, και το κλουβί ασφαλείας, το οποίο οφείλει να προστατεύει τους επιβάτες από αυτήν. Και ακριβώς σε αυτές τις περιοχές του αυτοκινήτου, γίνεται η επιλογή για την τοποθέτηση των διαφόρων τύπων AHSS. Το εμπρόσθιο και το πίσω μέρος του αυτοκινήτου απαιτούν υλικά με υψηλή απορρόφηση ενέργειας κατά την κρούση, υψηλό βαθμό ενδοτράχυνσης, αντοχή και ολκιμότητα. Αυτά τα κριτήρια συμπίπτουν με την επιλογή διφασικών χαλύβων, χαλύβων σύνθετης μικροδομής και χαλύβων TRIP. Επιπλέον, ο χώρος των επιβατών, κατά την κρούση θα πρέπει να παραμείνει άθικτος, επομένως, προτιμούνται χάλυβες με υψηλό όριο διαρροής και υψηλής εφελκυστικής αντοχής, όπως οι μαρτενσιτικοί και οι διφασικοί χάλυβες (UTS>980 MPa), οι οποίοι δεν θα παραμορφωθούν κατά την κρούση.



Εικόνα 12. Η τάση στην χρήση των διαφορετικών τύπων χαλύβων ανά τις χρονιές 2007, 2010, 2013 [41]]

Όσον αφορά, για την τάση με την οποία χρησιμοποιούνται οι διαφορετικοί τύποι, χαρακτηριστική είναι η έρευνα που διενεργήθηκε από τον A. Abraham (2015), όπου σύμφωνα με αυτή, ένα μέσο ελαφρύ αυτοκίνητο, και σε σύγκριση προηγούμενες χρονιές, η χρήση του μαλακού χάλυβα (mild steel) είχε μειωθεί, ενώ όλες οι κατηγορίες χαλύβων υψηλής αντοχής εμφάνισαν αύξηση. Αυτοί οι παραπάνω τύποι χαλύβων, συνδυάζουν αυτές τις ιδιότητες με το ελαφρύ βάρος και το χαμηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις για μείωση των ρύπων, και καλή επίδοση εντός των κανόνων ασφαλείας. Για τους παραπάνω λόγους, έρευνα από την DuckerWorldwide προβλέπει ότι το 50% ενός μέσου αμαξώματος (BIW) θα είναι κατασκευασμένο από χάλυβες AHSS, στις επόμενες δεκαετίες. [11]

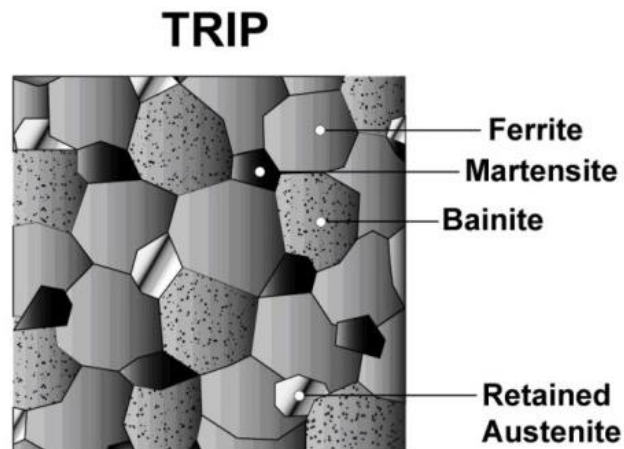
1.4. Γενικά για τους Χάλυβες TRIP

Οι χάλυβες TRIP παρουσιάζουν μια μικροδομή η οποία αποτελείται από 50-60% αλλοτριόμορφο φερρίτη, μπαινίτη και παραμένον ωστενίτη εμπλουτισμένο με άνθρακα. Η βασική χημική τους σύσταση αποτελείται από 0.2% C, 1.5% Mn και 1-2% Si.

1.4.1. Ιστορική Ανασκόπηση

Το φαινόμενο TRIP προσδιορίστηκε πρώτη φορά από τους Zackey and Parker την δεκαετία του '60, για την ταξινόμηση των κραμάτων που συνδυάζουν υψηλή αντοχή με ολκιμότητα μέσω του μηχανισμού παραμόρφωσης του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Αυτό έγκειται στην καθυστέρηση του σχηματισμού λαιμού, λόγω της σκλήρυνσης μέσω ενδοτράχυνσης. Στην δικιά τους έρευνα, είχε γίνει χρήση χαλύβων υψηλής κραμάτωσης μετασταθούς ωστενίτη, οι οποίοι όμως δεν ήταν εμπορικά βιώσιμοι.

Την δεκαετία του 1990, η εταιρεία Nippon Steel ανέπτυξε μια νέα διαδικασία παραγωγής, χρησιμοποιώντας χάλυβα με προσθήκη πυριτίου και μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα. Η μικροδομή του προϊόντος αποτελούνταν από μήτρα φερρίτη, μπαινίτη και μετασταθή ωστενίτη. Έκτοτε, η έρευνα προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση που συνέστησε η εταιρεία, με μια ποικιλία χαλύβων που εμφανίζουν το φαινόμενο TRIP, έχοντας χαμηλή προσθήκη σε κραματικά στοιχεία, υψηλή αντοχή και διαμορφωσιμότητα.



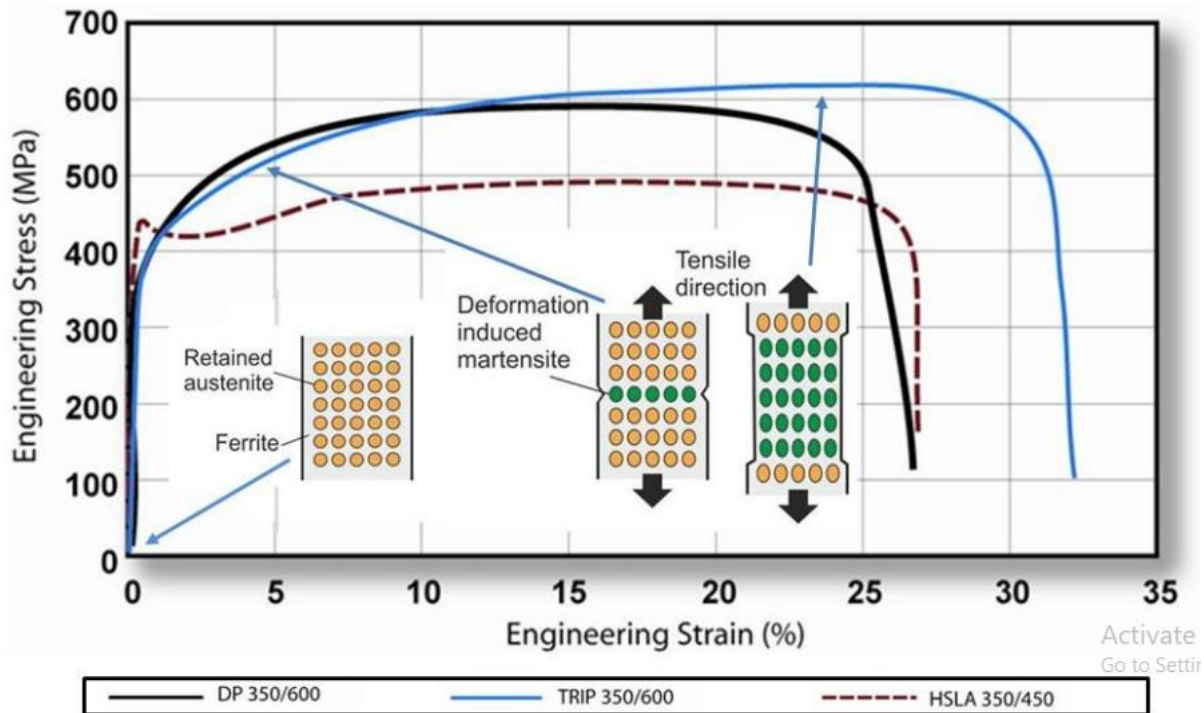
Εικόνα 13. Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής μικροδομής χάλυβα TRIP

Οι χάλυβες TRIP, λόγω της πολύπλοκης μικροδομής τους και του φαινομένου TRIP, κατά το οποίο ο παραμένον ωστενίτης μετασχηματίζεται, σταδιακά, κατά την πλαστική παραμόρφωση σε μαρτενσίτη, εμφανίζουν υψηλό βαθμό ενδοτράχυνσης, υψηλή απορρόφηση ενέργειας, καθώς και σκλήρωση κατά την έμφυση. [12] Ακόμη, εμφανίζουν υψηλή αντοχή στην κόπωση, και επομένως χρησιμοποιούνται σε μέρη του αυτοκινήτου που υπόκεινται σε υψηλούς κύκλους φόρτισης [13]. Μειονεκτήματα, αυτών των χαλύβων απαντώνται στην περιορισμένη ελαστικότητα, τοπικά και στα άκρα, αυξάνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης ρωγμών, ενώ οι απαιτήσεις σε υψηλή κραμάτωση οδηγούν σε χαμηλή ικανότητα συγκόλλησης. Επιπλέον, οι μεταβολές στην μικροδομή, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην περίπτωση επεξεργασίας και κυρίως επιδιόρθωσης των επιμέρους τμημάτων.

1.5. Το φαινόμενο TRIP σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα

Το φαινόμενο TRIP (Transformation-Induced Plasticity), ή μετασχηματισμός λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, βελτιστοποιεί την σκληρότητα και την ολκιμότητα μέσω του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, κατά την πλαστική παραμόρφωση.

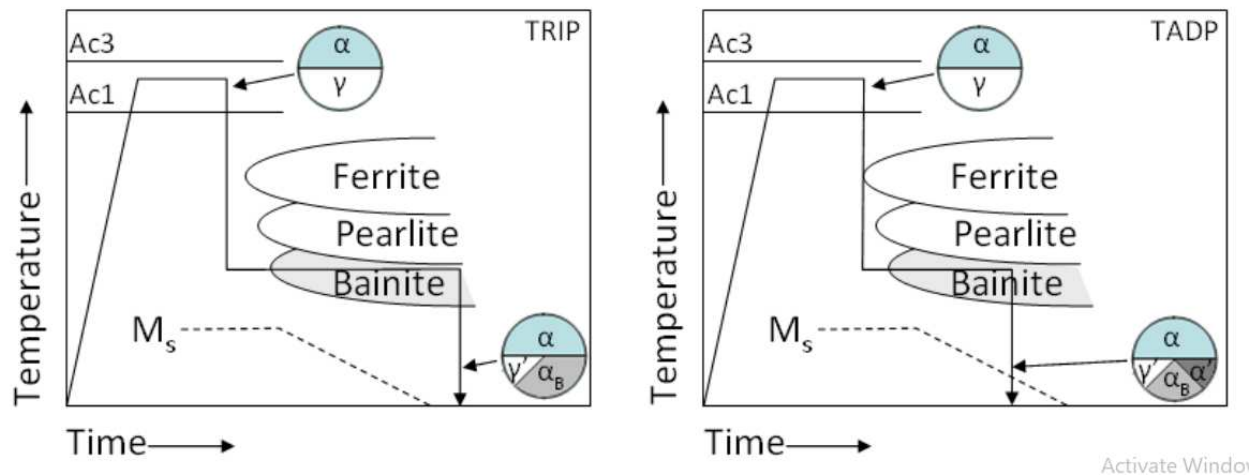
Είναι γνωστό ότι ο ωστενίτης παραμορφώνεται και μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη σε θερμοκρασίες πάνω από την M_s αλλά κάτω από την M_d , όταν ασκηθεί πέραν μιας κρίσιμης τιμής τάσης ή / και παραμόρφωσης (stress and strain) ανάλογα με τη μετασταθή του κατάσταση (κάτι το οποίο κυρίως ορίζεται από την περιεκτικότητα του σε άνθρακα). Το φαινόμενο TRIP συμβαίνει τοπικά, με τον σχηματιζόμενο μαρτενσίτη να σκληραίνει την περιοχή του υλικού στην οποία συμβαίνει ο μετασχηματισμός και επομένως αποτρέπει το περαιτέρω strain localization στην περιοχή λειτουργώντας ως εμπόδιο στην ανάπτυξη ευρύτερου δικτύου διαταραχών. Το φαινόμενο εξελίσσεται σταδιακά σε όλο το υλικό, προσδίδοντας υψηλό βαθμό ενδοτράχυνσης και πολύ ομοιόμορφη επιμήκυνση. Ακόμη, η ολκιμότητα του υλικού παραμένει ανεπηρέαστη, ή αυξάνει παρά την αυξημένη σκληρότητα. [14]



Εικόνα 14. Σχηματική απεικόνιση της αλλαγής στην μικροδομή σε χάλυβες TRIP, σε συγκριτικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης με τους χάλυβες DP και HSLA [42]

1.6. Θερμικές Κατεργασίες Χαλύβων TRIP και ανάπτυξη της μικροδομής

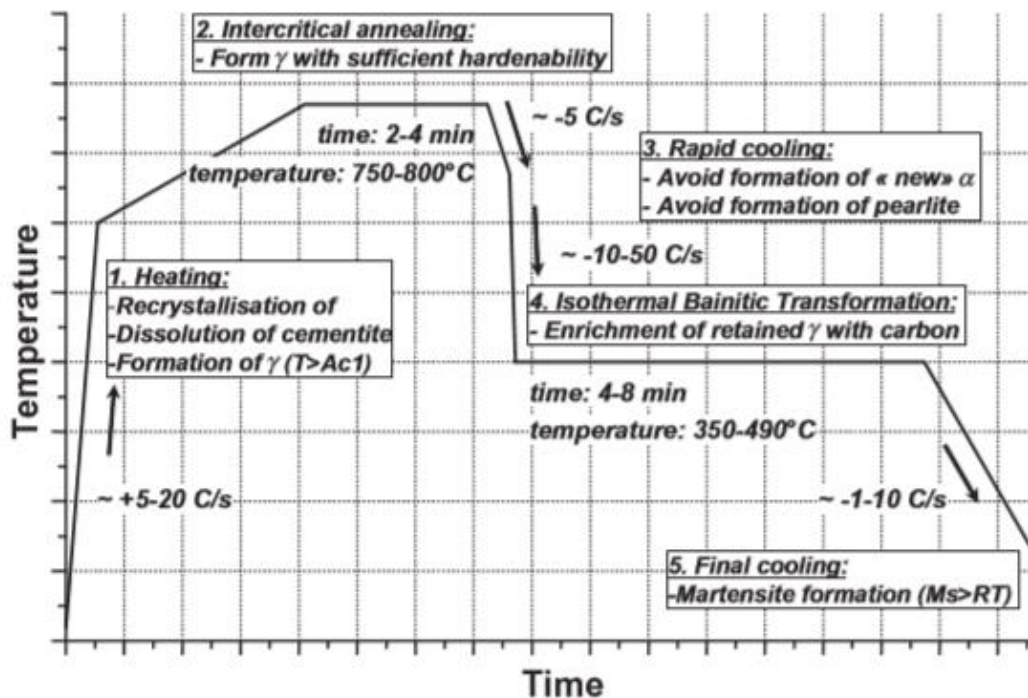
Η μικροδομή στους χάλυβες TRIP μπορεί να δημιουργηθεί μέσω θερμής και ψυχρής έλασης. Κατά την θερμή έλαση ο χάλυβας εμφανίζει πλήρη ωστεντική μικροδομή, ενώ σταδιακά ψύχεται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, μέχρι το πέρας της διαδικασίας. Ο ρυθμός ψύξης ελέγχεται έτσι ώστε ο ωστενίτης να μετασχηματιστεί πρώτα σε αλλοτριόμορφο φερρίτη και μετά σε μπαινίτη. Στην περίπτωση που ο χάλυβας θα παραχθεί με ψυχρή έλαση, απαιτείται μια θερμική κατεργασία δύο σταδίων, για να παραχθεί η κατάλληλη μικροδομή. Αρχικά, το υλικό θερμαίνεται μέχρι την διφασική περιοχή $\alpha+\gamma$, ώστε να παραχθεί ένα μίγμα ωστενίτη-φερρίτη, και στην συνέχεια, μέρος του υπολειπόμενου ωστενίτη καταναλώνεται, και σχηματίζεται μπαινίτης σε κατώτερη θερμοκρασία. Στόχος της θερμικής κατεργασίας είναι η ανακατανομή του άνθρακα στον παραμένον ωστενίτη, και άρα της σταθεροποίησης του, μέσω του μετασχηματισμού φάσεων, οι οποίες θα οδηγήσουν η ανακατομή των α και γ φερρογόνων στοιχείων της κραμάτωσης,



Εικόνα 15. Τα στάδια παραγωγής και η ανάπτυξη της μικροδομής των χάλυβων TRIP

Πιο αναλυτικά, οι ψυχρά ελασμένοι, χαμηλά κραματομένοι χάλυβες TRIP υπόκεινται στην παρακάτω θερμική κατεργασία, όπως αναπαρίσταται από το διάγραμμα. Στο σχήμα διακρίνονται πέντε βασικά στάδια, η γρήγορη θέρμανση, η ενδοκρίσιμη απόπτηση, η γρήγορη απόψυξη, η ισοθερμοκρασιακή βαφή και τέλος η απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. [15]

Στόχος της θερμικής κατεργασίας είναι η δημιουργία τριών φάσεων στην μικροδομή: φερρίτη, μπαινίτη και παραμένοντος ωστενίτη, με τον τελευταίο να είναι σταθεροποιημένος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μαρτενσίτης και καρβίδια είναι πιθανό να σχηματιστούν και να εμφανίζονται σε μικρό ποσοστό.



Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση των πέντε βασικών σταδίων επεξεργασίας χάλυβα TRIP ψυχρής έλασης, χαμηλής κραμάτωσης

1.6.1. 1^ο στάδιο: Γρήγορη θέρμανση

Κατά το πρώτο στάδιο, λαμβάνουν χώρα κατά σειρά:

- Η Ανακρυστάλλωση του φερρίτη
- Η διαλυτοποίηση του σεμεντίτη πρώτα στον φερρίτη, ενώ μετά την A_{c1} διαλύεται και στον ωστενίτη. Η διαδικασία θεωρείται γρήγορη μόνο όταν ο σεμεντίτης απαντάται στην περλιτική μορφολογία.
- Σχηματισμός ωστενίτη όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει την A_{c1} .

Η διαδικασία ξεκινάει με τον αρχικό χάλυβα να έχει παραμορφωμένη μικροδομή κατά την φορά της έλασης με τις παρούσες φάσεις να είναι επιμηκυσμένες φερριτοπερλιτική μορφολογία καθώς και διεσπαρμένα καρβίδια.

Η παραμορφωμένη μικροδομή εξαφανίζεται με την γρήγορη θέρμανση στην ενδοκρίσιμη θερμοκρασία. Η δημιουργία πυρήνων και η ανάπτυξη του ωστενίτη συμβαίνει αρχικά στα όρια φερρίτη-περλίτη και εν συνεχεία, αναπτύσσεται εις βάρος του περλίτη μέχρι την πλήρη διαλυτοποίησή του. Ύστερα, η ανάπτυξη του ωστενίτη συνεχίζεται στους γειτονικούς κόκκους ισαξονικού φερρίτη, με ένα μεγάλο μέρος των καρβιδίων να διαλυτοποιούνται σε αυτόν.

Αύξηση της ταχύτητας θέρμανσης καθυστερεί την διαδικασία ανακρυστάλλωσης, γιατί η πυρηνοποίηση του ωστενίτη δεν επιθυμεί την μετακίνηση των ορίων των κόκκων του φερρίτη. Έτσι, σχηματίζονται λιγότεροι πυρήνες ωστενίτη.

Μερικές επιπλέον παράμετροι που μπορούν να επιδρούν είναι: η μορφολογία του σεμεντίτη (blocky ή στον περλίτη), το γεγονός ότι ο ωστενίτης θα αποκτήσει το ποσοστό του Mn που προϋπήρχε στον περλίτη, και την υπερθέρμανση σε σχέση με την θερμοκρασία Ac1. [16] [17]

1.6.2. 2^ο στάδιο: Ενδοκρίσιμη ανόπτηση

Οι παράμετροι που επιδρούν σε αυτό το στάδιο, είναι η χημική σύσταση και η θερμοκρασία ανόπτησης που θα επιλεγεί. Αυτό το στάδιο καθορίζει το κλάσμα όγκου, την χημική σύσταση και την μορφολογία του ωστενίτη, από τον οποίο θα προκύψουν ο μαινίτης και ο παραμένων ωστενίτης, κατά την συνέχεια.

Ο αρχικός ενδοκρίσιμος ωστενίτης περιέχει περισσότερο άνθρακα σε σχέση με το ποσοστό που θα είχε σε φάση ισορροπίας, στην οποία όμως φτάνει για σύντομους χρόνους ανόπτησης. Αρχικά, ο σχηματισμός ωστενίτη καθορίζεται από την διάχυση άνθρακα και ακολούθως από την διάχυση Mn και Si, η οποία είναι μια πιο αργή διαδικασία.

Στα όρια των φάσεων φερρίτη/ωστενίτη θα έχουν διαχωριστεί στοιχεία που χαρακτηρίζονται ως α-φερογόνα και ως γ-φερογόνα, όπου εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Επίσης, σε αυτό το στάδιο, ο πρότερος σεμεντίτης θα πρέπει να έχει διαλυτοποιηθεί πλήρως.

Συνήθως, η ενδοκρίσιμη ανόπτηση γίνεται σε θερμοκρασίες που θα παράγουν 50% φερρίτη και 50% ωστενίτη. Αυτή η θερμοκρασία επιλέγεται πειραματικά είτε απευθείας από το διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη. Για την πρόβλεψη των θερμοκρασιών μετασχηματισμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες εξισώσεις, όπως η εξίσωση κατά Andrews, για μικροκραματωμένους χάλυβες με λιγότερο από 0.6%κβ C [18]:

$$A_{c_1} = 723 - 16,9(\%wtNi) + 29,1(\%wtSi) + 6,38(\%wtW) + 10,7(\%wtMn) + 16,9(\%wtCr) + 290(\%wtAs)$$

Ενώ η θερμοκρασία Ac3, μπορεί να υπολογιστεί, για χάλυβες TRIP, από την εξίσωση κατά Park [19]

$$A_{c_3} = 955 - 350(\%wtC) - 25(\%wtMn) + 51(\%wtSi) + 106(\%wtNb) + 100(\%wtTi) + 68(\%wtAl) - 11(\%wtCr) - 33(\%wtNi) - 16(\%wtCu) + 67(\%wtMo)$$

Είναι ένα σημαντικό στάδιο, καθώς καθορίζει τις συνθήκες στις οποίες θα συμβεί ο μαινιτικός μετασχηματισμός, καθώς καθορίζει το κλάσμα όγκου, την χημική σύσταση και την ομοιογένεια του ωστενίτη από την οποία θα προκύψει αυτή η φάση. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες σχηματίζεται μεγαλύτερο κλάσμα όγκου ωστενίτη, αλλά με μειωμένη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Το ίδιο ισχύει και αντιστρόφως, για χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Στην αρχική φάση του μετασχηματισμού, η ταχύτητα θέρμανσης αποτελεί έναν παράγοντα καθορισμού του όγκου του ωστενίτη, αλλά με το πέρασμα του χρόνου, οι διάφορες ταχύτητες δεν δείχνουν κάποια αλλαγή στην επίδραση.

Ακόμη, με το πέρασμα του χρόνου, τα στοιχεία διαφορίζονται, με τις περιεκτικότητες τους να διαφέρουν από αυτές εντός ισορροπίας, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε πιο σταθερό παραμένον ωστενίτη στην τελική μικροδομή, μετά το στάδιο του μπεινιτικού μετασχηματισμού. [17] [16]

1.6.3. 3^ο στάδιο – Γρήγορη απόψυξη

Η γρήγορη απόψυξη από στην θερμοκρασία μπεινιτικού μετασχηματισμού έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία νέου φερρίτη που αναπτύσσεται στον προϋπάρχον ενδοκρίσιμο φερρίτη. Αυτός ο φερρίτης ονομάζεται επιταξιακός και είναι μια μετασταθής φάση του φερρίτη.

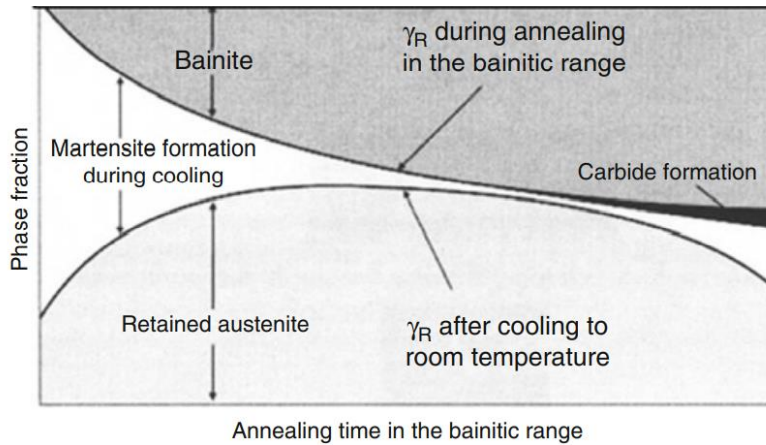
Σε αυτό το στάδιο, το κλάσμα όγκου του φερρίτη αυξάνεται και παρατηρείται επίσης ο περαιτέρω εμπλουτισμός σε άνθρακα στα διαφασικά όρια ωστενίτη-φερρίτη. [16]

1.6.4. 4^ο στάδιο – Ισοθερμοκρασιακός Μπεινιτικός Μετασχηματισμός

Αυτό το στάδιο χαρακτηρίζεται ως το πιο κρίσιμο καθώς καθορίζει τρεις βασικές παραμέτρους της φάσης του παραμένον ωστενίτη: το ποσοστό άνθρακα, το κλάσμα όγκου και το μέγεθος του στην τελική μικροδομή.

Κατά το στάδιο της μπεινιτικής βαφής σχηματίζεται το κλάσμα του μπεινίτη, του οποίου η μορφολογία εξαρτάται από: α) το κλάσμα όγκου και την χημική σύσταση του ενδοκρίσιμου ωστενίτη, β) την θερμοκρασία και τον χρόνο της βαφής.

Λόγω του φαινομένου της μερικής αντίδρασης που σχετίζεται με τον μπεινιτικό μετασχηματισμό, ο ωστενίτης μπορεί να παραμείνει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο μπεινιτικός φερρίτης αναπτύσσεται μη διαχυσιακά, ενώ η περίσσεια άνθρακα αποβάλλεται στον γειτονικό ωστενίτη. Όσο η μπεινιτική αντίδραση προχωρά, τόσο περισσότερο εμπλουτίζεται με άνθρακα ο γειτονικός ωστενίτης. Όμως, για σύντομους χρόνους, ο εμπλουτισμός δεν επαρκεί και επομένως ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη κατά την βαφή. Από την άλλη, αύξηση του χρόνου παραμονής έχει ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη ανάπτυξη του μπεινίτη, και άρα το κλάσμα όγκου του παραμένον ωστενίτη θα μειώνεται αναλόγως. Άρα, η βέλτιστη ποσότητα παραμένον ωστενίτη θα προκύψει για ενδιάμεσους χρόνους παραμονής.



Εικόνα 17. Σχηματικό διάγραμμα ανάπτυξης της μικροδομής κατά το στάδιο της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής σε χάλυβες TRIP. [Nina Fonstein,]

Στην περίπτωση κραματικών προσθηκών, πυριτίου, αλουμινίου και φωσφόρου η κατακρήμνιση των καρβιδίων καθυστερεί και ο άνθρακας παραμένει διαλυμένος στον ωστενίτη. Επομένως, η σταθερότητα του ωστενίτη αυξάνει και δεν θα μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη κατά την απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ακόμη, οι κραματικές προσθήκες έχουν επίπτωση στην θερμοκρασία έναρξης του μπαινιτικού μετασχηματισμού, η οποία μπορεί να υπολογιστεί μέσω εμπειρικών σχέσεων. Ενδεικτικά, οι Bhadeshia, Steven και Haynes προσδιόρισαν την θερμοκρασία B_s , ως εξής [20]:

$$B_s = 830 - 270(\%wtC) - 90(\%wtMn) - 37(\%wtNi) - 70(\%wtCr) - 83(\%wtMo)$$

1.6.5. 5^ο στάδιο – Γρήγορη απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Στο τελευταίο στάδιο της θερμικής κατεργασίας των χάλυβων TRIP, γίνεται η απόψυξη από την ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βάση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με την βαφή σε νερό. Μέσω αυτής, σταθεροποιείται η μικροδομή που σχηματίστηκε στα προηγούμενα στάδια. Κατά βάσει, ο υπερκορεσμός σε άνθρακα στον ωστενίτη, αλλά και οι κατάλληλες κραματικές προσθήκες, αποτρέπουν τον μετασχηματισμό του σε μαρτενσίτη, καθώς με αυτόν τον τρόπο, η θερμοκρασία M_s πέφτει αρκετά κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία M_s , εξαρτάται από τις κραματικές προσθήκες, με τον άνθρακα, το μαγγάνιο, το νικέλιο, το χρώμιο και το μολυβδαίνιο, να έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις. Η θερμοκρασία έναρξης, μπορεί να εκτιμηθεί, από την ακόλουθη εξίσωση, όπως αναπτύχθηκε από τους Steven και Haynes [21]:

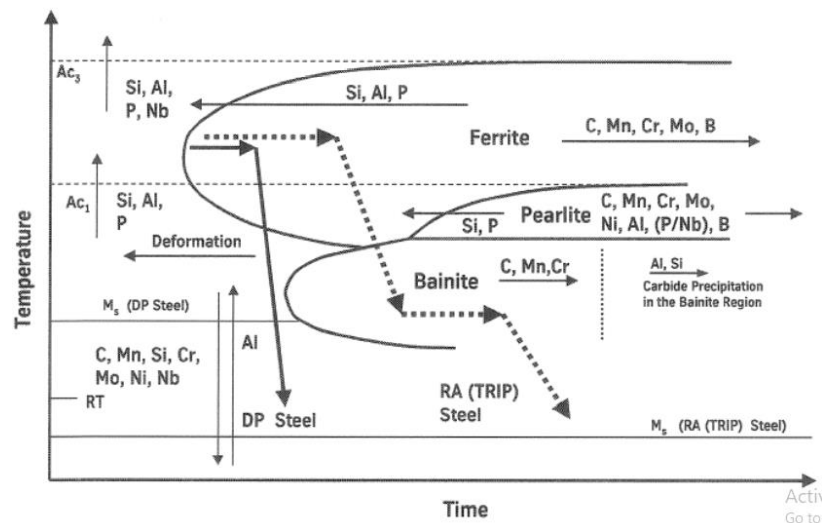
$$M_s = 539 - 474(\%wtC) - 33(\%wtMn) - 17(\%wtNi) - 17(\%wtCr) - 21(\%wtMo)$$

Ενώ, ακόμη, στην περίπτωση που οι χάλυβες TRIP περιέχουν αλουμίνιο, το οποίο είναι από τα λίγα κραματικά στοιχεία που αυξάνουν την θερμοκρασία έναρξης του μαρτενιτικού μετασχηματισμού, η εμπειρική εξίσωση, όπως υπολογίστηκε από τους Imai et. Al, μπορεί να αποδοθεί ως εξής [22]:

$$M_s = 539 - 423(\%wtC) - 30.4(\%wtMn) - 7.5(\%wtSi) + 30(\%wtAl)$$

1.7. Οι κραματικές προσθήκες

Οι βασικές κραματικές προσθήκες στους χάλυβες TRIP είναι το Mn, Si, Al, P, Mo, Cr, Ni, Nb κ.α. Γενικά, αυτές οι κραματικές προσθήκες επιδρούν στον μετασχηματισμό φάσεων, και κατ' επέκταση στην μικροδομή και τις τελικές ιδιότητες. Η αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό με παράλληλη διατήρηση της ολκιμότητας, η συνακόλουθη βελτίωση της δυσθραυστότητας, καθώς και ο επηρεασμός της εμβαιπτότητας είναι μερικές από αυτές τις ιδιότητες. Η επίδραση των κραματικών προσθηκών, στην μετάθεση των θερμοκρασιών όπου θα συμβούν οι μετασχηματισμοί φάσεων, απεικονίζεται στον σχηματικό διάγραμμα TTT, της Εικόνας X, με την ακόλουθη θερμική κατεργασία που υποβάλλονται.



Εικόνα 18. Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης των κραματικών στοιχείων στις καμπύλες TTT

Κραματικές προσθήκες εκτός του άνθρακα, μπορούν να προστεθούν στο κράμα, προκειμένου:

- Να σταθεροποιηθεί και να βελτιστοποιηθεί το κλάσμα όγκου του παραμένων ωστενίτη
- Να προβλεφθεί η κατακρίμνηση του σεμεντίτη
- Τα αυξηθεί η σκληρότητα του φερρίτη και
- Να επιταχυνθεί η αντίδραση σχηματισμού του μαινίτη και άρα να αποφευχθεί ο σχηματισμός του περλίτη πριν την μαινιτική αντίδραση.

Πίνακας 1. Τυπικές χημικές συστάσεις (%κβ) χάλυβων TRIP [43]

C	Si	Mn	Al	P	Nb	Mo	Cu	Cr	Ni
0.38	1.53	0.83		0.007					
0.11	0.59	1.55	1.5	0.012					
0.2	1.48	1.44	0.04	0.004	0.109				
0.14	1.49	1.51	0.04	0.0012			0.51		
0.15	1.52	1.51					0.51	0.39	
0.15	1.55	1.5					0.51		0.41

1.7.1. Επιπτώσεις των κραματικών στοιχείων

Βασική προϋπόθεση στην επιλογή των κραματικών στοιχείων αποτελεί η ικανότητά τους να σταθεροποιούν τον ωστενίτη, ενώ ταυτόχρονα συμφέρουν οικονομικά. Η τάση στην παραγωγή, κατευθύνεται προς την δημιουργία προϊόντων με χαμηλή κραμάτωση, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται οι τρέχουσες γραμμές παραγωγής. Σε αντίθεση με την παλαιότερη γενιά χαλύβων TRIP, οι καινούργιοι χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες δεν περιέχουν νικέλιο και περίπου 1.5-2%κβ μαγγάνιο. Ο ρόλος των πιο κοινών κραματικών προσθηκών περιγράφεται παρακάτω.

Ο άνθρακας είναι το η πιο σημαντική κραματική προσθήκη που επιδρά στην σταθερότητα του παραμένον ωστενίτη. Ακόμη, επιδρά στο θερμοκρασιακό εύρος που σχηματίζεται ανώτερος και κατώτερος μπαινίτης, ενώ κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση ορίζει το κλάσμα ωστενίτη το οποίο θα παραμείνει σε θερμοκρασία δωματίου, και επομένως αποτελεί το κύριο μέσο ισχυροποίησης του χάλυβα.

Αύξηση στην περιεκτικότητα του άνθρακα μειώνει την θερμοκρασία μετάβασης από ανώτερο σε κατώτερο μπαινίτη, ενώ επίσης μειώνει και την κινητική της αντίδρασης του. Επίσης, υπάρχει περιορισμός στο ποσοστό, μέχρι 2%, καθώς διαφορετικά προκαλεί προβλήματα στην συγκολλησιμότητα.

Το μαγγάνιο σταθεροποιεί τον ωστενίτη, όπως και ο άνθρακας, και επίσης προλαμβάνει τον σχηματισμό του περλίτη επιτρέποντας αργότερους ρυθμούς ψύξης από την ενδοκρίσιμη ανόπτηση στην ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή. Το μαγγάνιο επίσης μειώνει την θερμοκρασία M_s , αλλά καθυστερεί τον σχηματισμό μπαινίτη.

Αύξηση της περιεκτικότητας σε μαγγάνιο δημιουργεί σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος, αναστέλλοντας σε υπερβολικό ποσοστό, τον σχηματισμό φερρίτη κατά το αρχικό στάδιο ψύξης και επομένως, ο ωστενίτης, δεν εμπλουτίζεται επαρκώς σε άνθρακα. Επιπλέον, για να αποκτηθεί μεγαλύτερο κλάσμα όγκου παραμένον ωστενίτη, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος παραμονής στην ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή. Τέλος, το μαγγάνιο επιταχύνει την κατακρήμιση καρβιδίων, ενώ δρα ανταγωνιστικά στην αντίδραση με το πυρίτιο και επομένως λιγότερος άνθρακας θα καταναλωθεί στην μπαινιτική αντίδραση. Άρα, η αυξημένη χρήση του μαγγανίου θα πρέπει να αποφεύγεται.

Το μολυβδαίνιο δρα ως σταθεροποιητής του φερρίτη, με σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος, ενώ επίσης καθυστερεί την ανάπτυξη του περλιτικού μετασχηματισμού. Επομένως, προσθήκη μολυβδαινίου μειώνει την απαιτούμενη ταχύτητα απόψυξης προς σχηματισμό μπαινίτη. Ακόμη, δεν σχηματίζει οξειδίο στην επιφάνεια των χαλύβων, και άρα αυτή η προσθήκη προτιμάται για γαλβανισμό.

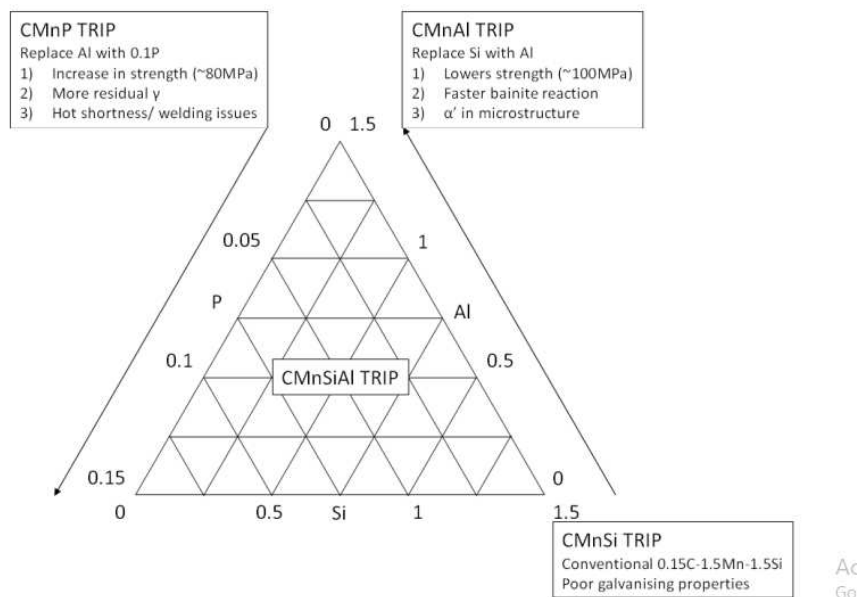
Το πυρίτιο είναι α-φερογόνο, αλλά επίσης διατηρεί τον εμπλουτισμού του ωστενίτη σε άνθρακα, καθώς δεν διαλυτοποιείται στον σεμεντίτη και άρα παρεμποδίζει την κατακρήμιση του. Το πυρίτιο επίσης δημιουργεί σκλήρωση λόγω στερεού διαλύματος στον φερρίτη και επομένως επιδρά στην συνολική σκληρότητα του υλικού, καθώς αυτή η φάση θεωρείται μαλακή. Το πυρίτιο προστίθεται σε ποσοστό περίπου από 1.5-2.5%κβ και όσο αυξάνεται η περιεκτικότητά του, τόσο αυξάνεται και το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη.

Μειονέκτημα της αυξημένης περιεκτικότητας σε πυρίτιο αποτελεί ο σχηματισμός οξειδίων στην επιφάνεια κατά την θερμή έλαση, ενώ προκαλεί προβλήματα στον γαλβανισμό των ψυχρά ελασμένων χαλύβων.

Το χρώμιο έχει παρόμοια συμπεριφορά με το πυρίτιο, καθώς επίσης αυξάνει την σταθερότητα του ωστενίτη κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση. Ακόμη, μειώνει την κινητική της μπαινιτικής αντίδρασης.

Ο χαλκός σταθεροποιεί τον ωστενίτη και βοηθάει στον σχηματισμό παραμένων ωστενίτη. Εκτός από την σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος, τα κατακρημνίσματα ε-Cu στον φερρίτη, μπορούν να αυξήσουν την συνολική σκληρότητα του κράματος. Επομένως, ο χαλκός μπορεί να αντικαταστήσει μερικώς το πυρίτιο, καθώς έχει παρόμοιες επιπτώσεις στις ιδιότητες της μικροδομής.

Το αλουμίνιο και **ο φώσφορος** παρεμποδίζουν την κατακρήμιση σεμεντίτη, επομένως μπορούν να αντικαταστήσουν μερικώς το πυρίτιο. Βασικό πλεονέκτημα του αλουμινίου είναι ο καλύτερος γαλβανισμός ενώ επίσης αυξάνει την κινητική της μπαινιτικής αντίδρασης. Όμως, το αλουμίνιο, σε αντίθεση με το πυρίτιο, δεν σκληραίνει τον φερρίτη, και άρα χάλυβες με προσθήκη αλουμινίου εμφανίζουν χαμηλότερη αντοχή. Ο φώσφορος επιλέγεται για την αντικατάσταση του πυριτίου ή/και του αλουμινίου, ενώ επίσης ενισχύει τον φερρίτη, καθώς 0.1% προσθήκη φωσφόρου οδηγεί σε αύξηση 75MPa στην αντοχή του φερρίτη. Παρακάτω, στην Εικόνα X, φαίνεται η συνδυαστική επίδραση των κραματικών στοιχείων, στην σκληρότητα και την ικανότητα επικάλυψης. [23]



Εικόνα 19. Επίδραση του συνδυασμού συστάσεων των χάλυβων TRIP στην σκληρότητα και την επικαλυψιμότητα

Μικροκραματικές προσθήκες γίνονται στην περίπτωση αύξησης της αντοχής, διατηρώντας χαμηλό το ποσοστό άνθρακα, προκειμένου να μην επηρεαστεί η συγκολλησιμότητα. Τα στοιχεία Ti, Nb, καθώς και το V με προσθήκη αζώτου προστίθεται για σκλήρωση μέσω κατακρήμισης. [24]

1.8. Φυσική Μεταλλουργία Χαλύβων TRIP

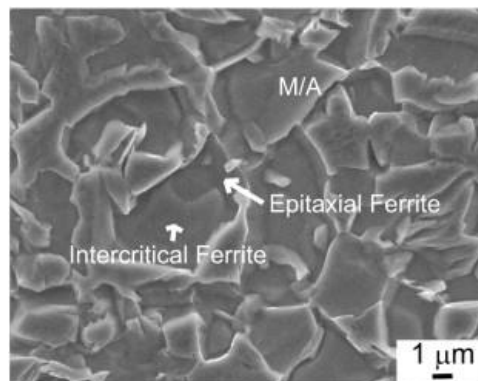
Η φυσική μεταλλουργία προσπαθεί να εξηγήσει τους συνδυαζόμενους παράγοντες που επιδρούν στις τελικές ιδιότητες των χαλύβδινων κραμάτων. Σε αυτούς περιλαμβάνονται η χημική σύσταση, η κατεργασία, η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες. Μεταβάλλοντας κάθε παράγοντα, μπορεί να προκύψει μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων, τα οποία εν τέλει θα βρουν εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των χαλύβων αποτελεί η παρουσία διαφορετικών φάσεων στην μικροδομή, όπως προκύπτουν από τις θερμικές κατεργασίες, επομένως σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση των επιμέρους φάσεων που απαντώνται από την σκοπιά της φυσικής μεταλλουργίας.

1.8.1. Φερρίτης

Ο φερρίτης αποτελεί στερεό διάλυμα παρεμβολής άνθρακα στον σίδηρο, χωροκεντρωμένης κυβικής δομής, παρουσιάζοντας μέγιστη διαλυτότητα σε άνθρακα κατά την ευτηκτοειδή αντίδραση (0.02% στους 723°C) ενώ μέχρι την θερμοκρασία δωματίου, η διαλυτότητα του άνθρακα μειώνεται, φτάνοντας το 0.008%. Οι μορφές με τις οποίες συναντάται στους χάλυβες TRIP, ως αποτέλεσμα των θερμικών κατεργασιών που υφίστανται, είναι τρεις: ως ενδοκρίσιμος ή υπολειπόμενος ή πολυγωνικός, ως επιταξιακός ή αλλοτριόμορφος και ως μπαινιτικός φερρίτης.

Ο ενδοκρίσιμος φερρίτης σχηματίζεται κατά το στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και παραμένει με το πέρας της διαδικασίας. Το ποσοστό του στην τελική μικροδομή εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο σε αυτό το πρώτο στάδιο της παραγωγής, ενώ ιδεατά εμφανίζεται κατά 50% στην τελική μικροδομή, χωρίς να ξεπερνά το 60-80% [25]. Αύξηση του κλάσματος όγκου του φερρίτη, κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση, έχει ως συνέπεια την μείωση του κλάσματος όγκου του μπαινίτη και άρα μείωση της σκληρότητας. Ακόμη, χάλυβες με αυξημένο ποσοστό σε Al, εμφανίζουν μεγαλύτερο κλάσμα φερρίτη, σε σχέση με τους χάλυβες CMnSi. Σαν μορφολογία, οι κόκκοι του είναι ισαξονικοί, και επειδή χαρακτηρίζεται από αρκετές γωνίες, αναφέρεται, στην βιβλιογραφία, ως πολυγωνικός.

Ο επιταξιακός φερρίτης δημιουργείται κατά την απόψυξη από το στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης, και μέχρι το στάδιο της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής. Η μετακίνηση των ορίων των φάσεων α-γ-α έχει ως αποτέλεσμα την ανακατανομή των κραματικών στοιχείων προς τον ωστενίτη, με τον πολυγωνικό φερρίτη να αναπτύσσεται πάνω στον πολυγωνικό φερρίτη, όταν η απόψυξη προς την μπαινιτική βαφή γίνεται με μέτριους ρυθμούς.



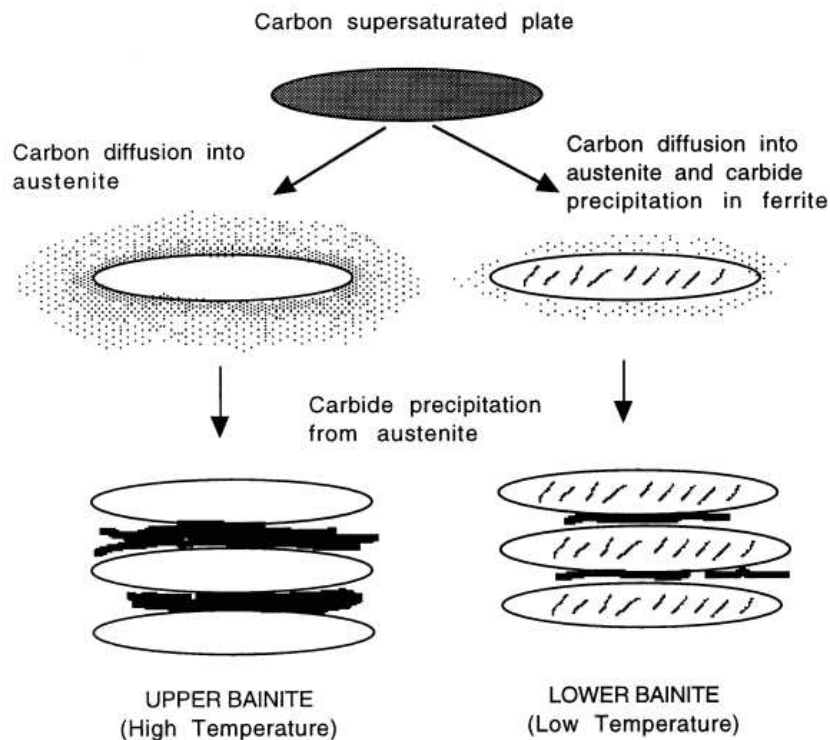
Εικόνα 20.. Μικροδομή δοκιμίου, έπειτα από ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 900°C και ρυθμό απόψυξης 50°C/s. Διακρίνεται τα μικρογραφικά συστατικά του ενδοκρίσιμου φερρίτη (IF), του επιταξιακού φερρίτη (EF) και του νησιδίου μαρτενσίτη-ωστενίτη (M/A) [44]

1.8.2. Μπαινίτης

Σε θερμοκρασίες κατώτερες του περλιτικού μετασχηματισμού και ανώτερες του μαρτενσιτικού, εμφανίζεται το μικρογραφικό συστατικό του μπαινίτη. Στους χάλυβες TRIP, αυτή η μορφολογία αποτελείται από τον μπαινιτικό φερρίτη, και τον υπολειπόμενο ωστενίτη, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζεται και σεμενίτης. Στα αντίστοιχα διαγράμματα TTT, ο μπαινίτης σχηματίζεται κάτω από την καμπύλη του περλίτη και για ορισμένη θερμοκρασία έναρξης του μετασχηματισμού, Bs.

Ανάλογα με την θερμοκρασία που λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός, δημιουργείται ανώτερος ή κατώτερος μπαινίτης, συναρτήσει του ποσοστού άνθρακα σε αυτόν. Γενικά, η μικροδομή του μπαινίτη αποτελείται από φερρίτη και καρβίδια, αλλά η διάκριση μεταξύ των δύο μορφολογιών είναι απαραίτητη, λόγω της διαφοράς στις τελικές μηχανικές ιδιότητες. Ο κατώτερος μπαινίτης, που λαμβάνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, κατά το στάδιο της ενδοκρίσιμης μπαινιτικής βαφής, αλλά και για συντομότερους χρόνους παραμονής, εμφανίζει μεγαλύτερη πυκνότητα ατελειών, και άρα μεγαλύτερη σκληρότητα σε σχέση με τον ανώτερο μπαινίτη.

Βασική διαφορά μεταξύ τους είναι η μορφή με την οποία απαντούνται τα καρβίδια στις δύο μορφολογίες: Ο ανώτερος μπαινίτης είναι απαλλαγμένος από καρβίδια, ενώ αυτά βρίσκονται ενδιάμεσα των πλακιδίων, ενώ στον κατώτερο μπαινίτη τα καρβίδια σχηματίζονται και στο εσωτερικό του. Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη την μικροκραμάτωση των χάλυβων TRIP, με προσθήκη στοιχείων όπως το πυρίτιο ή το αλουμίνιο που επιβραδύνουν τον σχηματισμό σεμενίτη, τότε η μπαινιτική μορφολογία θα αποτελείται, και στις δύο περιπτώσεις, από μπαινιτικό φερρίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη εμπλουτισμένο σε άνθρακα. [26]



Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση της μετάβασης από ανώτερο σε κατώτερο μπαινίτη. Από Bhadeshia (2001)

1.8.3. Ωστενίτης

Ο ωστενίτης, στην τελική μικροδομή, εμφανίζεται κυρίως σε δυο μορφολογίες, ως χονδρομερείς κόκκοι (blocky type) ή ως εναλλασόμενα υμένια (film type). Ως χονδρομερείς κόκκοι εμφανίζεται ενδιάμεσα των φάσεων, ως λεπτά φιλμ, παρουσία μαρτενσίτη και ενδιάμεσα της μπαινιτικής μορφολογίας καθώς και νησίδα παραμένων ωστενίτη στην μαλακή φερριτική μήτρα ή στα όρια των κόκκων [27, 28].

Η μορφολογία του παραμένων ωστενίτη, αποτελεί ένδειξη της σταθερότητάς του, τόσο κατά την βαφή στην θερμοκρασία δωματίου, όσο και κατά την περαιτέρω μηχανική καταπόνηση, όπου στόχος είναι σταδιακός μετασχηματισμός του σε μαρτενσίτη.

Λόγω του ότι πρόκειται για μια μετασταθή φάση, η σταθεροποίησή του στην θερμοκρασία δωματίου εξαρτάται από δύο μηχανισμούς, την θερμοδυναμική και την μηχανική σταθεροποίηση. Η πρώτη εξασφαλίζεται με τις θερμικές κατεργασίες και τις κατάλληλες κραματικές προσθήκες, προλαμβάνοντας τον ολικό μετασχηματισμό του ωστενίτη στις υπόλοιπες φάσεις. Η μηχανική σταθερότητα εξαρτάται από τις κραματικές προσθήκες, κυρίως τον άνθρακα και το μαγγάνιο, την μορφολογία, το μέγεθος κόκκου και τον κρυσταλλογραφικό προσαναλισμό αναφορικά με την διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Ακόμη, ένας επιπλέον παράγοντας είναι η αντοχή των φάσεων που περικλείουν των παραμένων ωστενίτη. Ο λόγος για τον οποίο παράγεται ο παραμένων ωστενίτης είναι για να εξασφαλιστεί ο σταδιακός μετασχηματισμός του σε μαρτενσίτη, κατά την επιβολή τάσεων [29].

Συνοψίζοντας, η μηχανική σταθερότητα του ωστενίτη, εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Ποσοστό του άνθρακα στον παραμένων ωστενίτη. Η συγκέντρωση του άνθρακα είναι συνήθως 6-9 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με το ποσοστό της κραμάτωσης στον χάλυβα. Το ποσοστό, πρέπει να είναι αρκετά υψηλό, ώστε να είναι θερμοδυναμικά σταθερός, αλλά και μεταξύ ενός εύρους τιμών, ώστε να είναι και μηχανικά σταθερός [30]. Συνήθως, κόκκοι παραμένων ωστενίτη με ποσοστό σε άνθρακα που κυμαίνεται μεταξύ 1.0-1.5%κβ αποτελούν την βέλτιστη λύση. Διαφορετικά, είτε θα μετασχηματιστούν γρήγορα, με την επιβολή μικρών τάσεων, είτε θα αποτραπεί τελείως ο μετασχηματισμός τους [31, 32].
- Μέγεθος κόκκου του παραμένων ωστενίτη. Η σταθεροτητα του παραμένων ωστενίτη μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους λόγω της μείωσης της πυκνότητας των πυρήνων μαρτενσίτη, καθώς και της χημικής σταθεροποίησης. Το βέλτιστο μέγεθος κόκκου κυμαίνεται μεταξύ 0.1-1μm [33].
- Η μορφολογία των κόκκων του παραμένων ωστενίτη. Το μεγαλύτερο ποσοστό του παραμένων ωστενίτη στους χάλυβες TRIP εμφανίζεται με την μορφή νησιδίων. Αυτά τα νησίδα παράγονται, όταν έχει συμβεί ο μετασχηματισμός του μπαινίτη και του μαρτενσίτη. Στην περίπτωση όπου ο παραμένων ωστενίτης εμφανίζεται ως εναλλασόμενα υμένια, τα οποία εμφανίζονται κυρίως εντός της μπαινιτικής μορφολογίας, η μηχανική σταθερότητα μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλή, κάτι που δεν θα επιτρέψει τον περαιτέρω μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη.
- Φάσεις που περιβάλλουν τον παραμένων ωστενίτη. Στην μικροκλίμακα, η παραμόρφωση της πολυφασικής δομής των χάλυβων TRIP είναι μια περίπλοκη διαδικασία. Οι γειτονικές φάσεις, ανάλογα με την αντίσταση που επιδρούν κατά την παραμόρφωση, επιδρούν στην παραμόρφωση που θα υποστεί εν τέλει ο παραμένων ωστενίτης. Για παράδειγμα, όταν η γειτονική φάση είναι ο φερρίτης, η πλαστική παραμόρφωση θα συμβεί πρώτα σε αυτόν, μετατοπίζοντας,

στην συνέχεια, το φορτίο στον παραμένον ωστενίτη, ο οποίος θα παραμορφωθεί, θα μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη και θα σκληρώνει το υλικό [28]. Όταν ο μπαινίτης αποτελεί την φάση που περικλείει τον παραμένον ωστενίτη, η οποία πρόκειται για μια σκληρότερη φάση, τότε κατά την καταπόνηση, μεγαλύτερες τάσεις απορροφούνται από τον μπαινίτη, με τον παραμένον ωστενίτη να μετασχηματίζεται σε παρατεταμένους χρόνους ή και καθόλου.

1.8.4. Μαρτενσίτης

Ο μαρτενσίτης σχηματίζεται στην τελική μικροδομή, όταν το μέρος του υπολειπόμενου ωστενίτη δεν είχε σταθεροποιηθεί, και κατά το πέρας της τελικής απόψυξης. Το ποσοστό του μαρτενσίτη εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία βαφής και τις κραματικές προσθήκες που επιδρούν στην θερμοκρασία M_s . Το αλουμίνιο, είναι ένα από τα λίγα στοιχεία κραμάτωσης που αυξάνει την θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, επομένως, χάλυβες TRIP με ισχυρή κραμάτωση σε Al, θα εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό σε μαρτενσίτη, σε σχέση με τους τους αντίστοιχους χάλυβες που έχουν κραματωθεί μόνο με πυρίτιο.

Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα, εμφανίζεται κυρίως ως πλακοειδής μαρτενσίτης, με διδυμίες (twinned plate martensite), στην περίπτωση υψηλής περιεκτικότητας, αλλά και ως νησίδες ωστενίτη-μαρτενσίτη (austenite-martensite islands) ενδιάμεσα στην μπαινιτική μορφολογία ή διασπερμένες στην φερριτική μήτρα, όταν το ποσοστό άνθρακα στον μαρτενσίτη είναι χαμηλό.

2. Πειραματικό Μέρος

2.1. Περιγραφή Υλικού

Για την πειραματική διαδικασία μας δόθηκε λάμα χάλυβα TRIP CMnSiAl ονομαστικής αντοχής 700MPa και χημικής σύστασης, όπως αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα.. Οι αρχικές διαστάσεις του ελάσματος ήταν 190x40x1,25mm.

Πίνακας 2. Χημική σύσταση του δοθέντος δείγματος (%κβ)

C	Mn	Si	Al
0.2	2.5	0.5	1

2.2. Πειραματική Διαδικασία

Στο αρχικό δείγμα πραγματοποιήθηκε έλαση σε έλαστρο συμμετρικής έλασης, με κυλινδρικά ράουλα, τύπου Laminoir/Mod.M. 100/55, κατά την διεύθυνση του μήκους με σκοπό την ελάττωση της διατομής του κατά 50%. Κατά αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ομοιογένεια κατά την απόψυξη και άρα ομοιόμορφη μικροδομή μετά το πέρας των προβλεπόμενων θερμικών κατεργασιών.

Η μείωση έγινε σταδιακά, σε έξι πάσα, με το δείγμα να περιστρέφεται κάθε φορά ανά 180°, και αυτό λόγω του ότι έπρεπε να αποφευχθεί η ανομοιογένεια του πάχους καθώς και η ενδοτράχυνση του υλικού. Το τελικό πάχος ήταν 0.6mm.

Με την χρήση του δισκοτόμου τύπου Struers Discotom έγινε η κοπή της λάμας. Αρχικά, αυτή κόπηκε σε δύο ίσα μέρη, τα οποία τοποθετήθηκαν σε φούρνο αδρανούς ατμόσφαιρας, και υπό θερμοκρασία ανόπτησης, ενώ έπειτα έγινε η χρήση αυτών όποτε κρινόταν απαραίτητο.

Στην συνέχεια, η κάθε λάμα τοποθετήθηκε σε φούρνο, υπό ατμόσφαιρα αργού, για την αποφυγή της απανθράκωσης, και σε θερμοκρασία 930°C με βήμα 0,25°C/s. Τα δύο δείγματα αποψύχθηκαν αργά έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος, προκειμένου να προσομοιαστούν καταστάσεις ισορροπίας και να ληφθεί τελικά μια φερριτοπερλιτική μικροδομή από την οποία θα προκύψουν όλες οι επικείμενες θερμικές κατεργασίες. Ακόμη, με βάση αυτήν την αρχική μικροδομή, έγινε η μέτρηση του άνθρακα, μέσω ποσοτικής μεταλλογραφίας, ενώ τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία προσδιορίστηκαν μέσω της τεχνικής EDS, του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Για την ευκολότερη διαχείριση των δοκιμίων κατά τις θερμικές κατεργασίες καθώς και κατά την μεταλλογραφική προετοιμασία της επιφάνειας, αυτά κόπηκαν σε διαστάσεις περίπου 20x10x0,6mm. Η μεγαλύτερη πλευρά είναι παράλληλη προς την διεύθυνση της έλασης, ώστε τα δείγματα που θα προκύψουν, να είναι αντιπροσωπευτικά της αρχικής λάμας.

Οι θερμικές κατεργασίες βασίζονται στην μεταβολή των θερμοκρασιών και των χρόνων της μπαινιτικής βαφής, ενώ επίσης, η θερμοκρασία και ο χρόνος ενδοκρίσιμης ανόπτησης παραμένουν σταθερά. Μέσω αυτών θα προκύψουν διάφορες μικροδομές τύπου χάλυβα TRIP, οι οποίες θα οδηγηθούν προς εξέταση, αρχικά στο οπτικό και στην συνέχεια στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Η λήψη μικρογραφιών, με την αντίστοιχη λήψη της χημικής σύστασης κάθε φάσης, και σε συνδυασμό με την μικροσκληρομέτρηση Vickers, θα υποδείξουν την επίδραση της μικροδομής στις μηχανικές ιδιότητες. Ακόμη, στο διαφασικό δοκίμιο, μέσω της μεθόδου grid-point count υπολογίστηκε το ποσοστό των φάσεων ενδοκρίσιμου φερρίτη και μαρτενσίτη, ενώ υπολογίστηκε θεωρητικά το όριο διαρροής και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής. Ως αποτέλεσμα, έγινε παρατήρηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δειγμάτων, ως προς τις επιπτώσεις των συνδυασμών θερμοκρασίας-χρόνου της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής, στις μηχανικές τους ιδιότητες.

2.3. Θερμικές Κατεργασίες

- Για την φερριτοπερλιτική μικροδομή

Τα δύο αρχικά δοκίμια τοποθετήθηκαν σε φούρνο της Thermowatt, υπό υπερπίεση αργού, προκειμένου να αποφευχθεί η απανθράκωση αυτών. Η θερμοκρασία ανόπτησης επιλέχθηκε βάσει του διαγράμματος Fe-Fe₃C στους 930°C, με βήμα 0,25°C/s και για χρόνο παραμονής 2 λεπτών, ώστε να αναπτυχθεί ένας λεπτόκοκκος ωστενίτης. Στην συνέχεια, μέσω της αργής απόψυξης θα προκύψει μια φερριτοπερλιτική μικροδομή. Αυτή η μικροδομή θα αποτελέσει την βάση για όλες τις επικείμενες θερμικές κατεργασίες.

- Για την θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης

Για την διερεύνηση της επίδρασης του σταδίου της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής απαιτείται η θερμοκρασία και ο χρόνος ενδοκρίσιμης ανόπτησης να παραμένουν σταθεροί. Σε διαφορετική περίπτωση, η αυξομείωση του κλάσματος όγκου του αρχικού ωστενίτη, μεταβάλλει και τις μετέπειτα φάσεις του μπαινίτη και του παραμένων ωστενίτη.

Επομένως, επιλέχθηκε η θερμοκρασία των 800°C, με χρόνο παραμονής τα 5min, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη ενός ισομερούς κλάσματος ωστενίτη/φερρίτη 50/50.

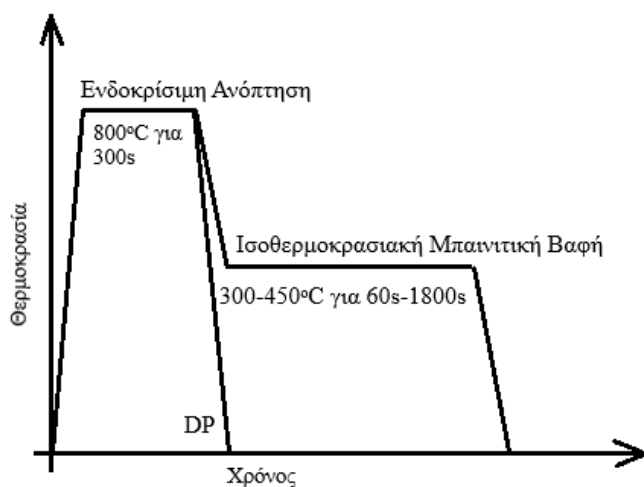
- Για την μεταβολή της θερμοκρασίας μπαινιτικής βαφής

Κατά το πρώτο στάδιο, δίνεται ο χρόνος για να δημιουργηθεί μια λεπτόκοκκη μικροδομή ωστενίτη/φερρίτη, όπου το κλάσμα όγκου του ωστενίτη θα έχει εμπλουτιστεί με άνθρακα, ενώ οι υπόλοιπες μικροπροσθήκες θα έχουν καταμεριστεί κατάλληλα. Κατά το δεύτερο στάδιο, τα διαφορετικά κλάσματα και μορφολογίες του μπαινίτη, θα εμπλουτίσουν με διαφορετικό τρόπο, σε άνθρακα, τον παραμένων ωστενίτη, ο οποίος θα προκύψει κατά την βαφή σε νερό.

Για τον σχηματισμό διαφορετικών κλασμάτων και μορφολογιών μπαινίτη, επιλέχθηκαν οι θερμοκρασίες μπαινιτικής βαφής των 300,350 και 400°C, με χρόνους κράτησης 1,2,5 και 30min, και τέλος βαφή σε νερό για να τερματιστεί ο μετασχηματισμός.

- Για την δημιουργία διφασικού χάλυβα (DP)

Η δημιουργία του διφασικού χάλυβα αφορά μόνο το πρώτο στάδιο της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και είναι χρήσιμο καθώς μέσω αυτού μπορεί να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το κλάσμα όγκου και η αρχική χημική σύσταση από την οποία δημιουργήθηκαν οι φάσεις του μπαινίτη και του παραμένων ωστενίτη. Άρα, η προαναφερθείσα θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης, των 800°C θα χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την διαδικασία, σε συνδυασμό με την συνακόλουθη απότομη ψύξη σε νερό.



Εικόνα 22. Σχηματικό διάγραμμα με τις Θερμικές Κατεργασίες που υπέστησαν τα δοκίμια

2.4. Προετοιμασία Δοκιμίων

Σκοπός της προετοιμασίας των δοκιμίων για την μεταλλογραφική εξέταση αυτών, είναι η λήψη μιας λείας και επίπεδης επιφάνειας από την οποία μπορεί να παρατηρηθεί λεπτομερώς η μικροδομή. Τα δοκίμια είναι μεγέθους 2x1x0.6cm, το οποίο επιτρέπει την εύκολη διαχείρισή τους κατά την διαδικασία.

Τα δοκίμια έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν την αρχική λάμα σε σμίκρυνση, με την μεγάλη πλευρά να είναι επίσης παράλληλη στην πλευρά της έλασης. Ακόμη, τα δοκίμια θα εξεταστούν κατά αυτή την παράλληλη τομή προς την κύριο άξονα της λάμας, προκειμένου να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της θερμικής κατεργασίας. Πέραν της μικροδομής, μπορεί να παρατηρηθεί μια πιθανή απανθράκωση της επιφάνειας καθώς και η ύπαρξη ζώνωσης λόγω των προηγούμενων εργοστασιακών κατεργασιών. Γενικά, η ζώνωση στις μετρήσεις, δεν θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη καθώς η διαφοροποίηση που απαντάται τοπικά στα μεγέθη των κόκκων συνεπάγεται ανισοτροπία στην μηχανική συμπεριφορά. Ως προς την επακόλουθη διαφορά στην χημική σύσταση, σε σχέση με άλλες περιοχές του δείγματος, μια αντιπροσωπευτική χημική ανάλυση της επιφάνειας θα πρέπει να γίνει σε άλλη τοποθεσία.

- Κοπή δοκιμίων

Για την κοπή των δοκιμίων έγινε η χρήση δισκοτόμου, όπου για μεταλλικά δοκίμια χρησιμοποιείται δίσκος από οξειδία αλουμινίου, ενώ κατά την διαδικασία, η επιφάνεια κοπής ψύχεται με νερό. Η ταχύτητα με την οποία γίνεται η κοπή μπορεί να επηρεάσει την επιφάνεια, με το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα της μη ολοκληρωμένης ψύξης, οπότε πρέπει να τηρείται μια αργή και σταθερή ταχύτητα.

Με το πέρας της κοπής, τα δοκίμια θα τοποθετηθούν σε πακέτα των τεσσάρων, και θα καλουπωθούν σε ρητίνη, προκειμένου να γίνει ταυτόχρονα η περαιτέρω προετοιμασία τους.

- Ονομασία Δοκιμίων

Για μεγαλύτερη ευκολία τα δοκίμια ονομάστηκαν με βάση τις παραμέτρους των θερμικών κατεργασιών και την τελική μικροδομή που απέκτησαν. Στην περίπτωση όπου η ΘΚ περιλαμβάνει ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή, το δοκίμιο 400-1 υποδηλώνει στο πρώτο σκέλος την θερμοκρασία κράτησης και στο δεύτερο, αναφέρεται ο χρόνος κράτησης σε λεπτά. Τα δοκίμια που υπέστησαν τις υπόλοιπες θερμικές κατεργασίες, ονομάστηκαν με βάση την μικροδομή τους. Έτσι, αυτά ονομάστηκαν FP (Ferritic-Perlitic) DP (Dual-phase) και AR (As-Received), το οποίο αναφέρεται ως το αρχικό δοκίμιο.

- Λείανση

Η φάση της λείανσης είναι η κύρια διεργασία με την οποία αποκαλύπτεται η τελική μικροδομή του δοκιμίου. Αυτό γίνεται μέσω της χρήσης περιστρεφόμενου δίσκου, των λειαντικών χαρτιών και της ταυτόχρονης ροής νερού. Τα λειαντικά χαρτιά είναι από καρβίδια του πυριτίου (SiC), τα οποία μαζί με την ταυτόχρονη ροή του νερού, απομακρύνουν ένα μέρος της επιφάνειας μαζί με τις υπάρχουσες ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο το λειαντικό χαρτί εναλλάσσεται με το επόμενο, το οποίο θα είναι μεγαλύτερης πυκνότητας σε κόκκους ανά τετραγωνική ίντσα, και άρα πιο λεπτόκοκκο. Το δείγμα στην περίπτωση της χειρωνακτικής επεξεργασίας θα πρέπει να συγκρατείται οριζοντίως και να περιστρέφεται ανά 90°, σε σχέση με το προηγούμενο χαρτί, προκειμένου να εξουδετερώνονται κάθε φορά οι γραμμές λείανσης. Αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί για τα χαρτιά λείανσης 80, 180, 360, 600, 800, 1200, 2000 και 3000 (grains/in²), σε περιστρεφόμενο δίσκο μέχρι 2000rpm, και μέχρις ότου να διακρίνεται στο οπτικό μικροσκόπιο μια πλήρως ανακλώμενη επιφάνεια.

- Καθαρισμός δοκιμίων

Κατά την λείανση δεν απαιτείται ιδιαίτερος καθαρισμός μεταξύ της εναλλαγής των χαρτιών λείανσης, καθώς σε αυτό το στάδιο υπάρχει η συνεχής παροχή νερού που απομακρύνει το μεγαλύτερο μέρος των ακαθαρσιών. Όμως, κατά την μετάβαση στην φάση της στίλβωσης, επιβάλλεται ένας καλός καθαρισμός, που θα προετοιμάσει την επιφάνεια για μια λεπτομερέστερη απόξεση. Ο καθαρισμός αυτός περιλαμβάνει την τοποθέτηση του δοκιμίου κάτω από χλιαρό νερό, την απομάκρυνσή του με βαμβάκι, την χρήση του βαμβακιού με αιθανόλη, και τέλος τον καταιονισμό της επιφάνειας αποκλειστικά με αιθανόλη. Η αιθανόλη απομακρύνεται γρήγορα από την επιφάνεια με χρήση ήπιας ροής αέρα, μέσω σεσουάρ. Η χρήση πεπιεσμένου αέρα σε αυτή την περίπτωση αντενδείκνυται καθώς ενδέχεται να μεταφέρει σταγονίδια ελαίου.

- Στίλβωση

Κατά την στίλβωση, απομακρύνεται περαιτέρω η στρώση της επιφάνειας που έχει διαταραχθεί από την λείανση. Με το πέρας αυτής, θα έχει παραχθεί μια λεία επιφάνεια που θα επιτρέψει στην χημική προσβολή να φανερώσει την αντίθεση μεταξύ των συστατικών της μικροδομής. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η χρήση βελουδίνων πανιών, τοποθετημένων σε περιστροφικούς δίσκους, στα οποία προστίθεται αδαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου 6 και 1 μm, μαζί με λειαντικό μέσο. Η διαχείριση των δοκιμίων γίνεται όπως και στο προηγούμενο στάδιο, αλλά με τον δίσκο να είναι ρυθμιζόμενος στα 100-150rpm και να αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας. Πριν, μετά, και ανάμεσα στα δύο στάδια γίνεται καλός καθαρισμός των δοκιμίων.

- Χημική Προσβολή

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την δημιουργία της χρωματικής αντίθεσης στην εξεταζόμενη επιφάνεια του δοκιμίου, όπως αυτό θα απεικονίζεται στο οπτικό μικροσκόπιο και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η χημική προσβολή βασίζεται στην ηλεκτρολυτική δράση που λαμβάνει χώρα, όταν το διάλυμα έρχεται σε επαφή με την μεταλλική επιφάνεια. Τα συστατικά αυτής δημιουργούν διαφορετικό ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των διαφορετικών κόκκων και των ορίων τους, των περιεχόμενων φάσεων και λοιπών στοιχείων της δομής. Στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, έγινε χρήση του Nital 2%, με την παραμονή της επιφάνειας σε αυτό για 7-8s και μέχρις ότου να φανερωθεί η μικροδομή στο οπτικό μικροσκόπιο.

2.5. Μελέτη Μικροδομής

2.5.1. Οπτικό Μικροσκόπιο

Η εξέταση ενός υλικού με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου επιτρέπει μία πρώτη ποιοτική και ποσοτική περιγραφή της δομής του, υποδεικνύοντας την επιτυχή λείανση και στίλβωση του δοκιμίου. Περαιτέρω, και μέσω αυτής, είναι δυνατό να γίνει μια πρώτη περιγραφή του μεγέθους των κόκκων, της κατανομής, της πυκνότητας και του τύπου των φάσεων, καθώς και τις ατέλειες της δομής.

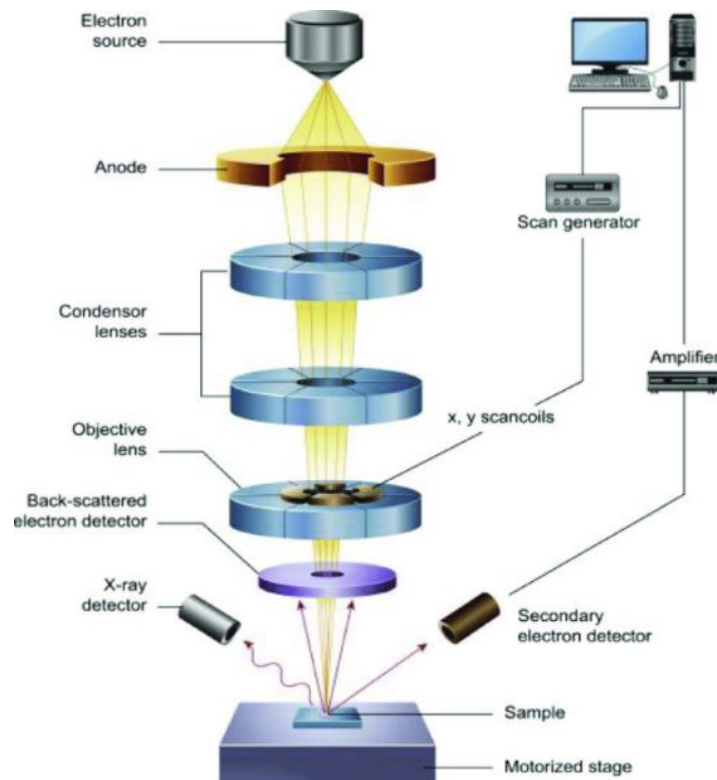
Στην περίπτωση της μεταλλογραφικής εξέτασης, γίνεται χρήση ορθού οπτικού μικροσκοπίου ανακλώμενου φωτός, με το δείγμα να τοποθετείται σε οριζόντια θέση μεταξύ των μεγεθυντικών φακών και της μετακινούμενης τράπεζας.

Σε πρώτη φάση εξετάζεται η επιφάνεια με το πέρας της λείανσης και στίλβωσης, η οποία θα πρέπει να αντανακλά πλήρως το φως, αλλά και να είναι απαλλαγμένη από ακαθαρσίες. Στην συνέχεια, και για την δημιουργία της χρωματικής αντίθεσης μεταξύ των διαφόρων στοιχείων της μικροδομής, γίνεται προσβολή, ενώ ο βαθμός αυτής ελέγχεται με επανεξέταση. Σαν τελικό αποτέλεσμα, η μικροδομή θα πρέπει να είναι ευδιάκριτη, κατά την χρήση όλων των μεγεθυντικών φακών.

2.5.2. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, με σκοπό την αλληλεπίδραση αυτής με την επιφάνεια του δείγματος. Από τα άτομα των στοιχείων του δείγματος εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια, καθώς και ακτίνες X. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων αντιστοιχεί στην απεικόνιση με τις χρωματικές ενδείξεις λευκό έως μαύρο, ή αν είναι αντίστοιχα σε κοντινή ή μακρινή απόσταση η επιφάνεια από την πηγή. Επομένως, τα δευτερογενή ηλεκτρόνια αποδίδουν εικόνες τοπογραφίας της επιφάνειας των δοκιμίων.

Αντίστοιχα, τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια δίνουν πληροφορίες για την χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της επιφάνειας. Στις λαμβανόμενες μικρογραφίες τα άτομα με μικρό ατομικό βάρος φαίνονται μαύρα και με την αύξηση του βάρους, το χρώμα κυμαίνεται από γκρι έως λευκό. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ανιχνεύει χημικά στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 5. Απαραίτητα στοιχεία όπως ο άνθρακας ή το άζωτο, παραμένουν στα όρια ανίχνευσης, ωστόσο οι ανίχνευση περιοχών με άτομα χαμηλού βάρους υποδεικνύει την ύπαρξη καρβιδίων και νιτρίδιων. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι μια ποιοτική και ποσοτική ανάλυση.



Εικόνα 23. Σχηματική Απεικόνιση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM)

Χημική Ανάλυση μέσω τεχνικής EDS

Η τεχνική EDS βασίζεται στην συλλογή των ακτινών X που εκπέμπονται από τα άτομα του δοκιμίου, όταν αυτά αποδιειγείρονται μετά από τον βομβαρισμό τους από την δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Το σύστημα EDS είναι προσαρμοσμένο στο μικροσκόπιο SEM και αποτελείται, κατά βάσει, από τον ανιχνευτή ακτινών X, τον ψύκτη, και το λογισμικό για ανάλυση του ενεργειακού φάσματος. Μετά την συλλογή τους από τον ανιχνευτή, οι ακτίνες X μετατρέπονται εν τέλει σε ανάλογο σήμα τάσης και απεικονίζονται σε διάγραμμα μετρήσεων ακτινών X και τάσεων. Με βάση την ενέργειά τους, είναι δυνατό να προσδιοριστούν τα χημικά στοιχεία, οι ποσότητές τους, καθώς και η κατανομή τους στο δείγμα. Μπορούν να ανιχνευθούν όλα τα στοιχεία με ατομικό αριθμό 4 έως 92, αν και όλα τα μηχανήματα δεν είναι εξοπλισμένα για ανίχνευση στοιχείων με ατομικό βάρος μικρότερο του 10.

2.5.3. Υπολογισμός Φάσεων

Το διφασικό δοκίμιο WQ εμφανίζει μικροδομή προευντηκτοειδούς φερρίτη και μαρτενσίτη, επομένως, ο προσδιορισμός της φάση του φερρίτη γίνεται σχετικά εύκολα.

Το ποσοστό της φάσης του φερρίτη υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας ImageJ και με βάση την μέθοδο grid point count, χρησιμοποιώντας πλέγμα 300 σημείων. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E562, στην συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται καταμέτρηση των κόκκων που συμπίπτουν με την τομή των κάθετων και παράλληλων γραμμών. Βάση αυτής, κάθε σημείο μπορεί να λάβει τις τιμές 1, 0.5 ή 0 αν ισχύουν οι αντίστοιχες περιπτώσεις: α) ο κόκκος του φερρίτη βρίσκεται εντός του εκάστοτε τετραγώνου, β) ο κόκκος του φερρίτη βρίσκεται στα όρια, γ) ο κόκκος βρίσκεται εκτός του τετραγώνου.

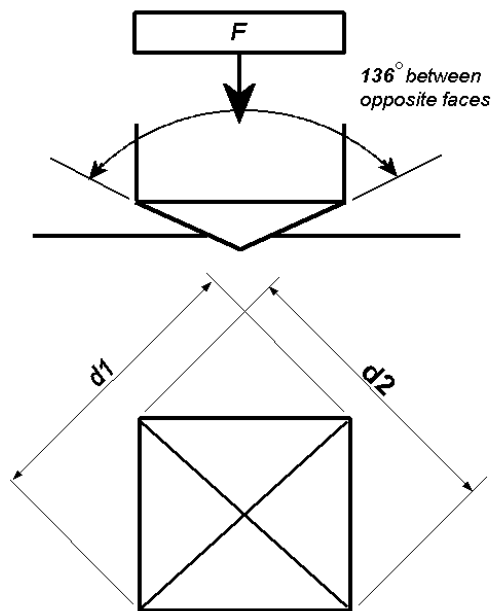
Οι υπόλοιπες φάσεις που θα προκύψουν κατά τις θερμικές κατεργασίες, δηλαδή ο μπαινίτης και ο ωστενίτης δεν δύναται να υπολογιστούν μέσω των μικρογραφιών, καθώς είναι δύσκολο να γίνει οπτικά ο διαχωρισμός τους.

2.6. Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς

2.6.1. Δοκιμή Μικροσκληρομέτρησης

Οι δοκιμές σκληρότητας Vickers μπορούν να κυμαίνονται από $9807 \times 10^{-3} \text{N}$ έως 1176.8N (ή από 1gf έως 120kgf). Στις δοκιμές μικροσκληρότητας χρησιμοποιούνται μικρότερα βάρη, της τάξης των $9.8 \times 10^{-3} \text{N}$ μέχρι τα 9.8N (ή από 1 έως 1000gf).

Και στις δύο περιπτώσεις, γίνεται δεισδυση μιας αδαμάντινης πυραμίδας, συγκεκριμένης γεωμετρίας, από μιας βαθμονομημένη συσκευή, στην επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου. Το αποτύπωμα των διαγωνίων μετράται με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου μετά την απομάκρυνση της πυραμίδας. Για κάθε δοκιμή υποθέτουμε ότι δεν λαμβάνει χώρα ελαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 24. Σχηματική αναπαράσταση της σκληρομέτρησης Vickers. Πάνω: το προφίλ της αδαμάντινης πυραμίδας. Κάτω: Το αποτύπωμα και η μέτρηση των διαγωνίων από το μικροσκόπιο.

Η σκληρότητα δίνεται από τον αριθμό Vickers, και προκύπτει από την δύναμη δια την επιφάνεια του αποτυπώματος που παρατηρείται. Ο υπολογισμός αυτού υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$HV = 1854.4 \cdot P/d^2$$

Όπου: P =δύναμη σε gf / d = το μήκος της διαγωνίου του αποτυπώματος σε μm . (ή σε kgf/mm)

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενδέχεται να υπάρξουν διάφορα σφάλματα στις μετρήσεις, τα οποία καταλήγουν σε μεγάλη απόκλιση του μήκους των διαγωνίων, λόγω σφάλματος κατά την διαδικασία και λόγω του ανθρώπινου παράγοντα.

Η δοκιμή μικροσκληρομέτρησης είναι χρήσιμη στην εκτίμηση των υλικών, στον ποιοτικό έλεγχο εργοστασίων, καθώς και στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης. Αν και είναι μια εμπειρική μέθοδος, τα αποτελέσματά της μπορούν να συσχετιστούν με την εφελκυστική αντοχή, ενώ υποδεικνύουν την αντοχή στην φθορά και την ολκιμότητα ενός υλικού.

Αυτή η τεχνική της μικροσκληρομέτρησης χρησιμοποιείται έναντι της κλασικής Vickers, στην περίπτωση όπου το υλικό είναι μικρό ή/και λεπτό. Ακόμη, επειδή ενδέχεται να υπάρχει τοπικά διαφοροποίηση της σκληρότητας, αλλά και για λόγω μείωσης τους σφάλματος, θα πρέπει να ληφθούν αρκετές μετρήσεις, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικές για όλο το δείγμα.

Για την διεξαγωγή της διαδικασίας, το δείγμα θα πρέπει να τοποθετηθεί με την επιφάνεια παράλληλη προς το έδαφος και κάθετη προς τον διεσδυτή. Όταν ο διεσδυτής έρθει σε επαφή με την επιφάνεια, θα έχει αναπτύξει μια επιτάχυνση μεταξύ 15 και 70μm/s, και θα παραμείνει σε αυτή για 10 με 15s, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπεται η παραμονή για ±2s. Καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας η μηχανή θα πρέπει να προστατεύεται από οποιαδήποτε δόνηση.

2.7. Όριο Διαρροής και Μέγιστη Εφελκυστική Αντοχή (YS – UTS)

Η μονοαξονική δοκιμή εφελκυσμού αποτελεί βασική δοκιμή στην οποία υποβάλλονται οι χάλυβες TRIP. Αυτό συμβαίνει καθώς το φαινόμενο που παρουσιάζουν μπορεί να παρατηρηθεί καλύτερα μέσω αυτής. Λόγω περιορισμών, στην παρούσα διπλωματική, έγινε μια προσπάθεια για εκτίμηση των τιμών του ορίου διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής των δοκιμίων. Προφανώς γίνεται δεκτό ότι οι τιμές που θα προκύψουν είναι ενδεικτικές, και δίνουν μόνο ένα μέρος της εικόνας, καθώς ο βαθμός παραμόρφωσης στον οποίο θα υπάρξουν αυτές παραμένει άγνωστος.

Η εκτίμηση έγινε δεδομένου του ότι το όριο διαρροής και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή είναι ανάλογα της σκληρότητας. Ο υπολογισμός έγινε με βάσει τις παρακάτω εξισώσεις, όπως διατυπώθηκαν από τους Cahoon et al [34, 35]

$$YS_{0.2\%} = \frac{VHN}{3} \cdot (0.1)^{n'-2}$$

$$TS, S_u = \frac{VHN}{2.9} \cdot \left[\frac{n}{0.217} \right]^n, \text{ όπου } n = \text{strain hardening coeff} = n' - 2$$

Όπου $n \approx 0.175$ για χάλυβες TRIP 700 (St. Traint et al, 2004) [36]

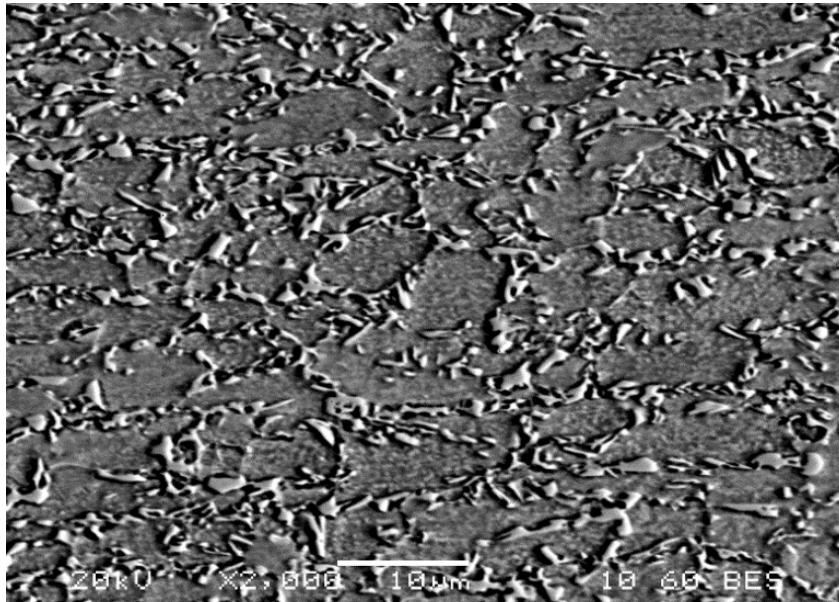
2.8. Αποτελέσματα

2.8.1. Μελέτη Μικροδομής

Παρακάτω παρατίθενται οι μικρογραφίες, όπως ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Τα δείγματα έχουν διαχωρίζονται ανάλογα με την θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί. Για τις θερμικές όπου εξετάζεται η ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή, οι εικόνες έχουν κατηγοροποιηθεί ανάλογα με τον χρόνο παραμονής σε κάθε IBT προκειμένου να παρατηρηθεί με μεγαλύτερη ευκολία το φαινόμενο του μπαινιτικού μετασχηματισμού.

Δοκίμιο AR

Το δοκίμιο AR (As-Received) αποτελεί το δείγμα το οποίο δεν έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία. Στο μικροσκόπιο βλέπουμε την μικροδομή, όπως αναπτύχθηκε κατά την εργοστασιακή παραγωγή και είναι υπό ανάπτυξη προϊόν. Η μικροδομή εμφανίζει τα τυπικά μικρογραφικά συστατικά των χαλύβων TRIP, με την φερριτική μήτρα να εμπεριέχει την μπαινιτική μορφολογία και νησίδια παραμένων ωστενίτη, μαρτενσίτη ή των μικτών φάσεων, τα οποία βρίσκονται στα όρια των κόκκων.



Εικόνα 25. Μικρογραφία SEM για το δοκίμιο AR. Μεγέθυνση x2000

Στο δοκίμιο AR πραγματοποιήθηκαν γενικευμένες ημιποσοτικές χημικές ανάλυσεις, των οποίων οι μέσες τιμές κάθε στοιχείου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Σε κάθε δοκίμιο, πραγματοποιήθηκαν γενικές χημικές αναλύσεις, καθώς αυτές θα χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς για τις διακυμάνσεις που θα εμφανίζουν τα στοιχεία στα συστατικά της μικροδομής εξαιτίας του διαφορισμού τους.

Πίνακας 3. Γενική χημική ανάλυση του δοκιμίου AR

Στοιχείο	Al	Si	Mn	Fe
Weight% (+/- 0.1)	0.80	0.45	1.78	96.96

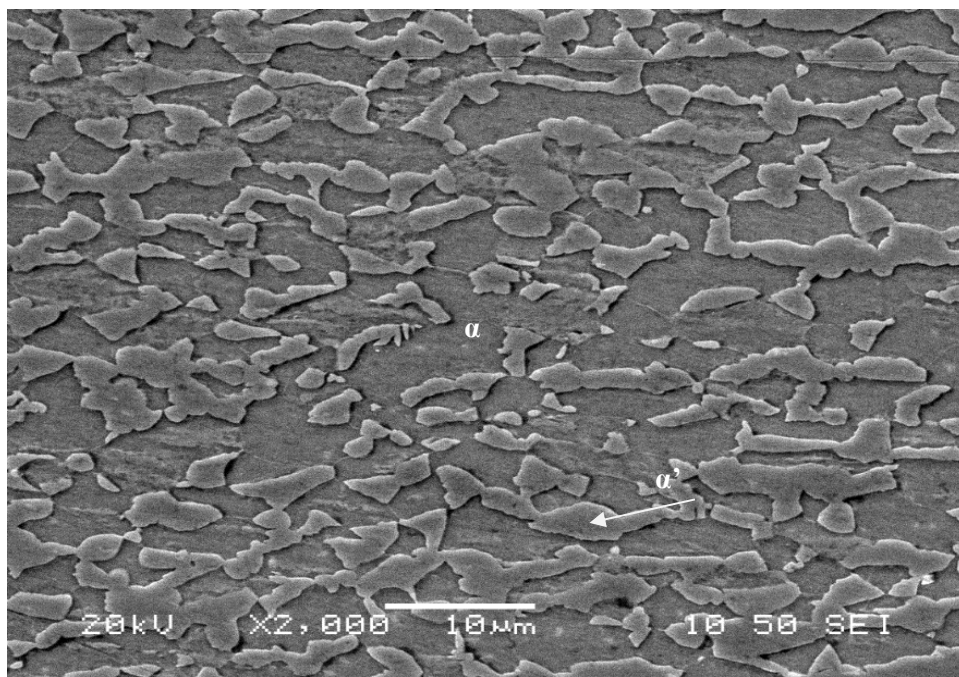
Δοκίμιο WQ

Η μικροδομή του δοκιμίου WQ προέκυψε ύστερα από την παραμονή στην ενδοκρίσιμη ανόπτηση των 800°C για 5min. Σε αυτό το στάδιο αναπτύχθηκε ο πολυγωνικός φερρίτης, που αποτελεί την μήτρα της μικροδομής (σκουρόχρωμη περιοχή), ενώ ο μετασταθής ωστενίτης μετασχηματίστηκε σε μαρτενσίτη κατά την απότομη απόψυξη με την βαφή σε νερό. Τα κλάσματα όγκου που προέκυψαν από αυτήν την μικτή μικροδομή φερρίτη-μαρτενσίτη, υπολογίστηκαν μέσω της μεθόδου grid point count 300 σημείων, με την κάθε φάση να αποτελεί το 50% της μικροδομής, όπως φαίνεται σχετικά στην Εικόνα 27.

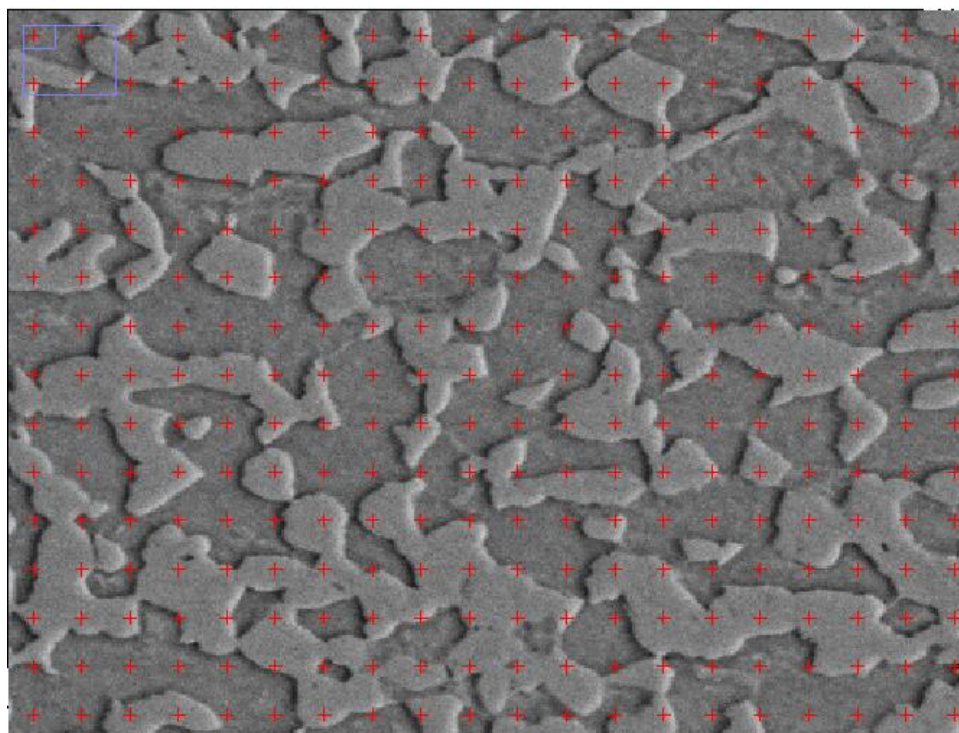
Αναλύσεις από το EDS για τις δύο φάσεις παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, για μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στους κόκκους που επισημαίνονται στην μικρογραφία της Εικόνας 26. Παρατηρείται ότι το ποσοστό μαγγανίου είναι αυξημένο στην φάση του μαρτενσίτη, καθώς το μαγγάνιο ως γ-φερογόνο θα έχει κατανεμηθεί στον πρότερο μετασταθής ωστενίτη. Παρομοίως, το αλουμίνιο, το οποίο είναι α-φερογόνο και βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι το πυρίτιο σε αυτόν τον τύπο χάλυβα, βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό στον ενδοκρίσιμο φερρίτη. Η παρουσία αλουμινίου στον προϋπάρχον ωστενίτη, αποτελεί αιτία της μορφολογία του μπαινιτικού φερρίτη στα δοκίμια που θα υποστούν τα στάδια της ισοθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής.

Πίνακας 4. Σημειακές στοιχειακές αναλύσεις EDS στις φάσεις του φερρίτη (α) και μαρτενσίτη (α') σε σύγκριση με την γενική στοιχειακή ανάλυση, για το δοκίμιο WQ

Γενική χημική ανάλυση			Φάση φερρίτη (α)		Φάση μαρτενσίτη (α')	
Στοιχείο	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.17	2.38	1.2	2.44	0.74	1.51
Si	0.47	0.93	0.34	0.66	0.40	0.79
Mn	1.92	1.92	1.60	1.60	2.15	2.16
Fe	96.44	94.78	96.87	95.30	96.71	95.54
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 26. Μικρογραφία SEM για το δοκίμιο WQ. Μεγέθυνση x2000. Επισημαίνονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α) και μαρτενσίτη (α')



Εικόνα 27. Η μέθοδος grid point count σε μεγέθυνση της αριστερής μικρογραφίας

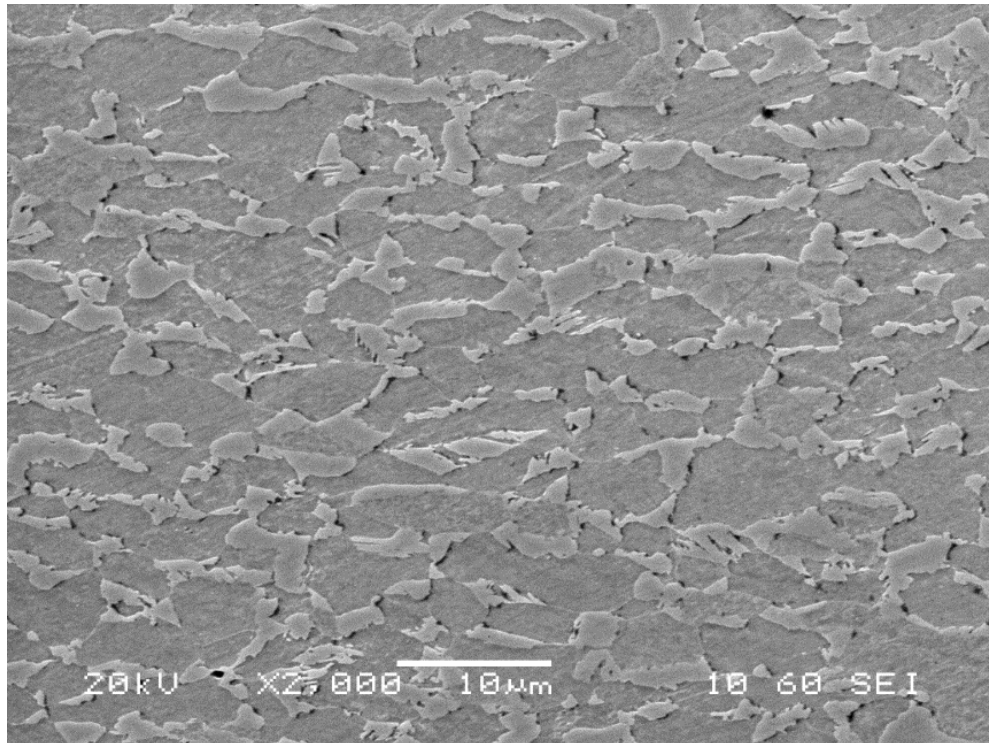
Δοκίμιο 300-1

Το δοκίμιο 300-1 αναφέρεται στο δοκίμιο που υπέστη ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 5min και μπαινιτική βαφή στους 300°C για 1min. Εξαιτίας του σύντομου χρόνου και της χαμηλής θερμοκρασίας, ο μετασχηματισμός του μπαινιτικού φερριτη δεν αναπτύχθηκε πλήρως, με την μορφολογία του να παρουσιάζεται τμηματικά, παρουσία άλλων φάσεων, πιθανόν μαρτενσίτη. Οι ευμεγέθεις κόκκοι αποδίδονται ως μαρτενσίτες, ενώ μικρότερα νησίδια, λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε άνθρακα, θα έχουν σταθεροποιηθεί, και αποδίδονται ως ωστενίτες. Παρακάτω, παρατίθενται οι σχετικές μικρογραφίες του δοκιμίου 300-1, όπως ελήφθησαν από το SEM, με τα συστατικά της μικροδομής τους.

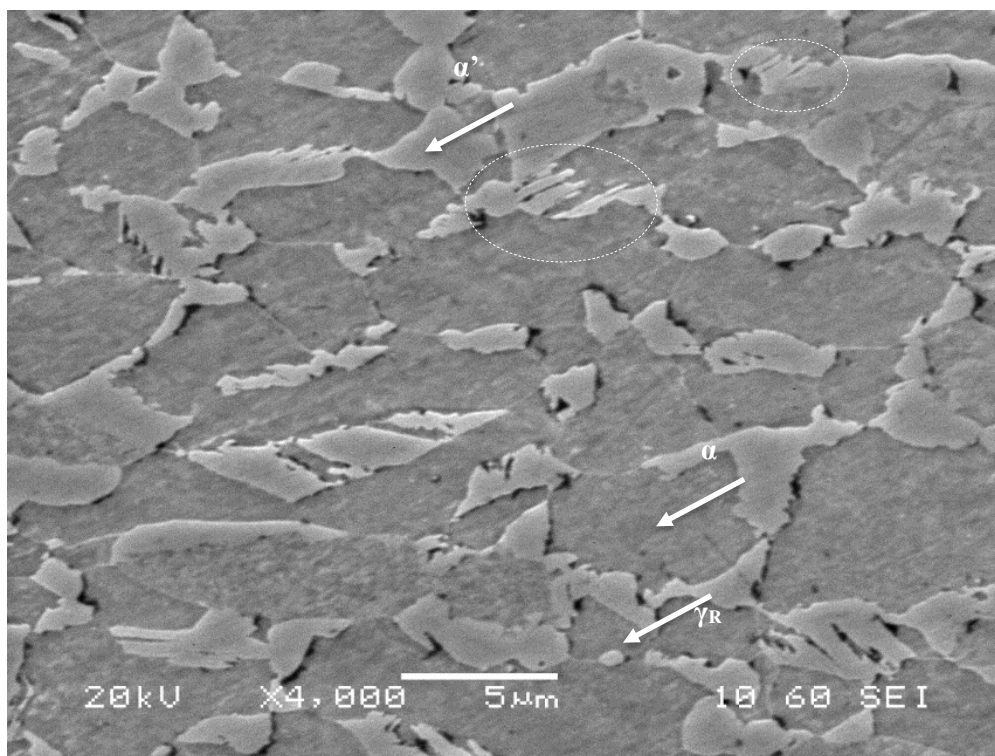
Ακόμη, από τις στοιχειακές αναλύσεις, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα X, για τις φάσεις που απεικονίζονται στην Εικόνα X, με εξαίρεση την μπαινιτική μορφολογία που δεν είναι επαρκώς ανεπτυγμένη. Παρατηρείται ότι, η διαφορά στις περιεκτικότητες, προκύπτει λόγω του μεγέθους των κόκκων, καθώς, μικρότεροι κόκκοι, όπως ο σταθεροποιημένος ωστενίτης, θα εμφανίζει υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο, σε σχέση με τους ευμεγέθεις κόκκους του μαρτενσίτη.

Πίνακας 5. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των συστατικών της μικροδομής του δοκιμίου 300-1

Element	Φερρίτης (α)		Παραμένων ωστενίτης (γ _R)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.07	2.17	0.81	1.66	0.56	1.15
Si	0.48	0.95	0.25	0.49	0.36	0.7
Mn	1.51	1.51	2.31	2.32	2.16	2.17
Fe	96.94	95.37	96.63	95.53	96.93	95.98
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 28. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-1. Μεγέθυνση x2000



Εικόνα 29. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-1. Μεγέθυνση x 4000. Επισημαίνονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και παραμένον ωστενίτη (γ_R), καθώς και περιορισμένη ανάπτυξη της μπαινιτικής μορφολογίας

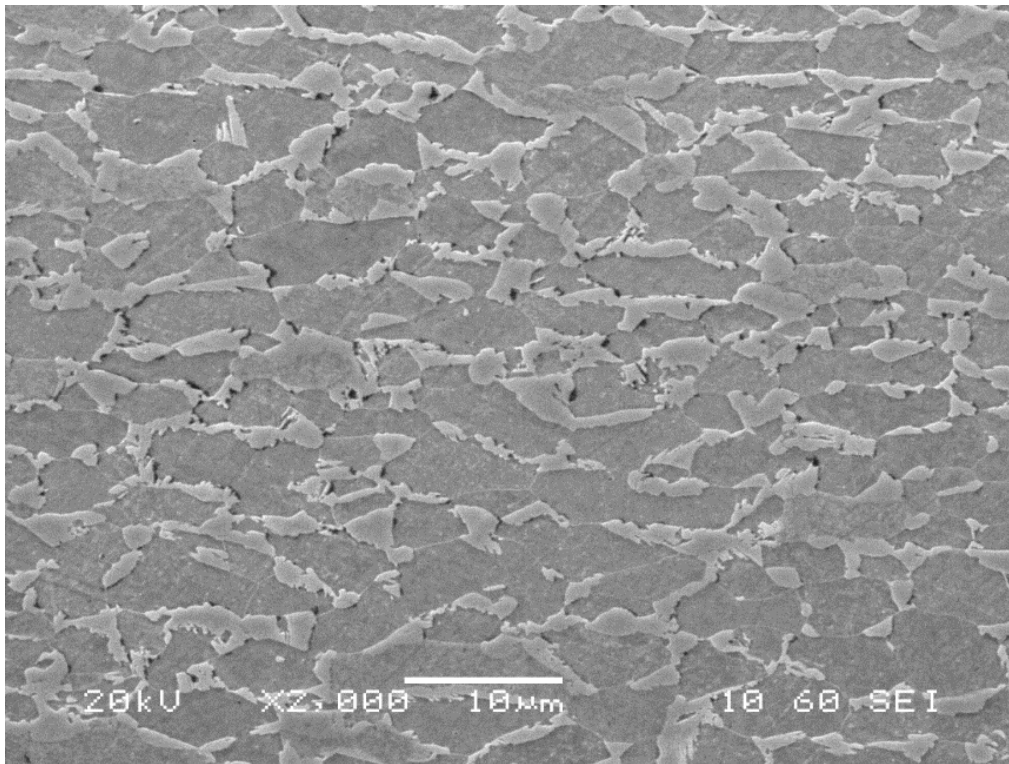
Δοκίμιο 300-2

Το δοκίμιο 300-2 αναφέρεται στο δοκίμιο που έχει υποστεί ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C, για 5 min και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 300°C για 2min. Αν και η κινητική της μπαινιτικής αντίδρασης αυξάνει λογαριθμικά και για σύντομους χρόνους σημειώνεται η μεγαλύτερη αλλαγή, ωστόσο, από τις Εικόνες X1, X2 παρατηρείται ότι αυτό το χρονικό διάστημα δεν ήταν αρκετό για την ανάπτυξη της μπαινιτικής μορφολογίας. Το δοκίμιο 300-2 εμφανίζει παρόμοια μικροδομή με αυτή του δοκιμίου 300-1, όπου τα ευμεγέθη συστατικά αποδίδονται ως μαρτενσίτες, τα λεπτομερή νησίδια ως παραμένως ωστενίτης, ενώ η μπαινιτική μορφολογία παρατηρείται, επίσης, σε πολύ αρχικό στάδιο ανάπτυξης.

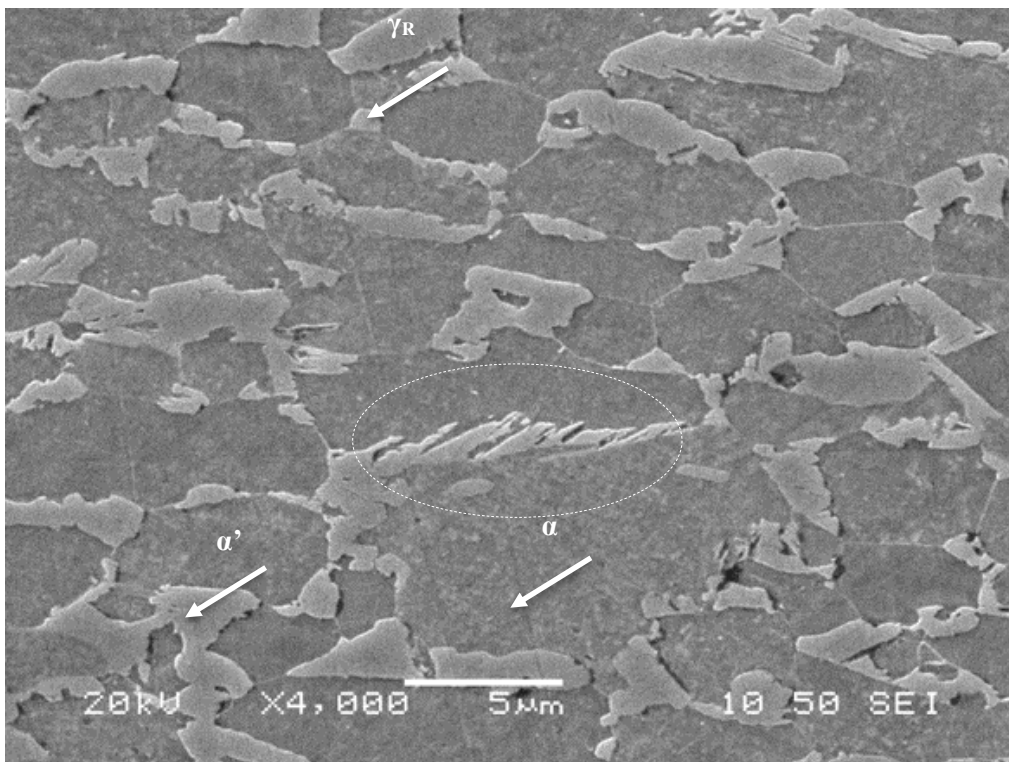
Στοιχειακές αναλύσεις EDS, πραγματοποιήθηκαν για τις φάσεις, των οποίων το μέγεθος είναι ικανό να ανιχνευθεί από την δέσμη ηλεκτρονίων. Στον πίνακα X, παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις φάσεις του φερριτη, παραμένων ωστενίτη και μαρτενσίτη, όπως αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 31. Παρατηρείται επίσης, ότι όπως και στο δοκίμιο 300-1, το μέγεθος των κόκκων, επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επίσης, λόγω του μικρότερου μεγέθους, οι στοιχειακές αναλύσεις δεν αναφέρονται στην ακριβή τοποθεσία ενός πλακιδίου ωστενίτη ή μαπινιτικού φερριτη αλλά σε ευρύτερη περιοχή αυτών.

Πίνακας 6. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των φάσεων του δοκιμίου 300-2

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Παραμένων ωστενίτης (γ _R)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.04	2.12	0.84	1.72	1.04	2.12
Si	0.58	1.13	0.55	1.07	0.58	1.13
Mn	1.44	1.43	2.00	2.00	1.44	1.43
Fe	96.94	95.31	96.62	95.21	96.94	95.31
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 30. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-2. Μεγέθυνση x2000



Εικόνα 31. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-02. Μεγέθυνση x4000. Απεικονίζονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α'), του παραμένον ωστενίτη (γ_R) και η μπαινιτική μορφολογία.

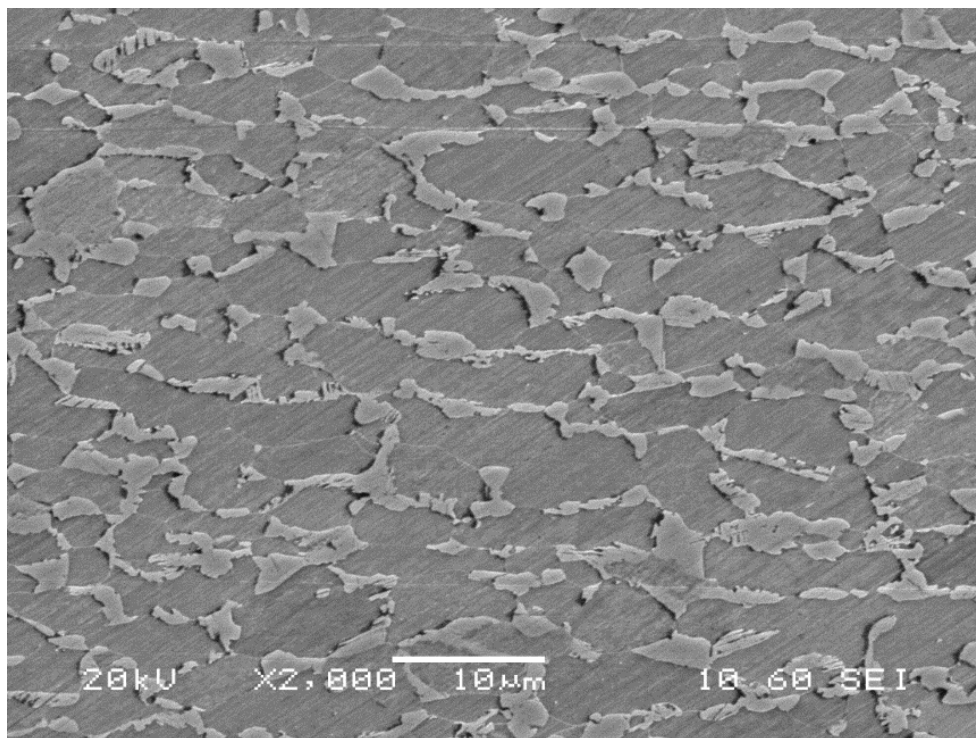
Δοκίμιο 300-5

Το δοκίμιο 300-5 υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία με ενδοκρίσιμη απόπτηση στους 800°C, για 5min, και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 300°C για 5min. Αυτό το δοκίμιο εμφανίζει την πιο λεπτομερή μπαινιτική μορφολογία σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια αυτής της θερμοκρασίας μπαινιτικής βαφής. Δεδομένης της χαμηλής θερμοκρασίας των 300°C, τα 5min ήταν αρκετός χρόνος, ώστε να αναπτυχθεί η μπαινιτική μορφολογία. Ακόμη, εμφανίζονται περισσότερα νησίδα, σε σχέση με τα δοκίμια μικρότερων χρόνων, που μπορούν να αποδοθούν ως φάσεις παραμένων ωστενίτη, καθώς τα φαινόμενα της διάχυσης σε αυτό τον χρόνο, ενδεχομένως επέτρεψαν την σταθεροποίηση του ωστενίτη, κατά την βαφή με νερό.

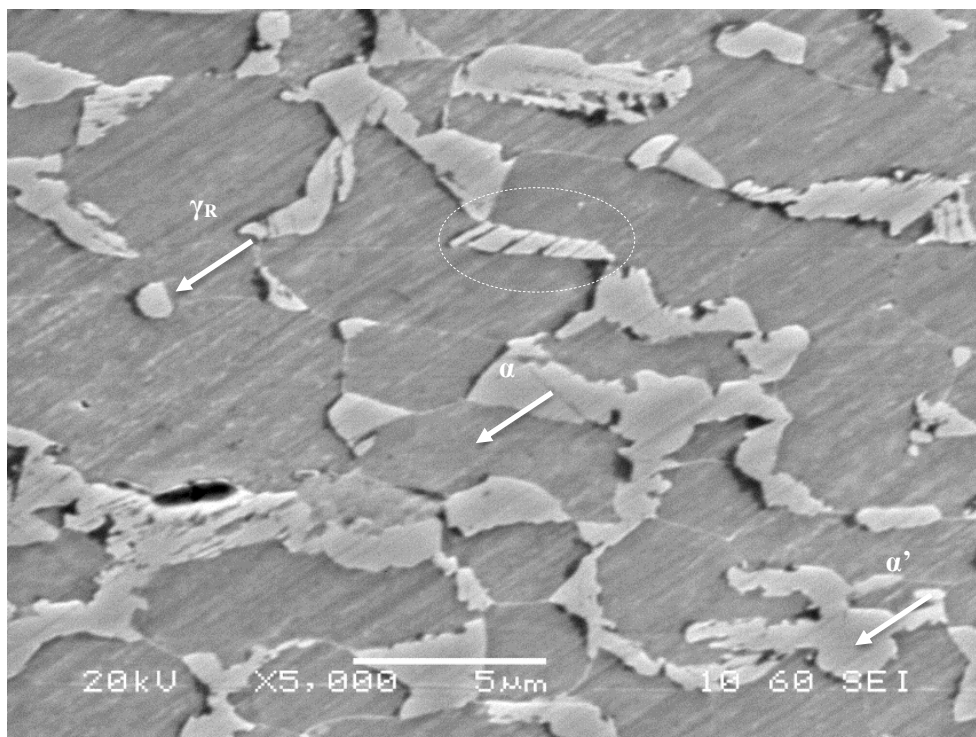
Από τις στοιχειακές αναλύσεις των φάσεων, πλην της μπαινιτικής μορφολογίας, η οποία λόγω μεγέθους δεν υποβλήθηκε σε ανάλυση, παρατηρείται ο καταμερισμός των στοιχείων σε αυτές. Το αλουμίνιο εμφανίζεται σε υψηλότερο ποσοστό στην φάση του φερρίτη, και σε χαμηλότερο στον παραμένων ωστενίτη. Το μαγγάνιο εμφανίζεται υψηλότερο στον παραμένων ωστενίτη, ενώ έχει επίσης υψηλό ποσοστό και στην φάση του μαρτενσίτη. Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω, στον πίνακα X.

Πίνακας 7. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των φάσεων του δοκίμιου 300-5

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Παραμένων ωστενίτης (γ _R)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.26	2.55	0.55	1.12	1.09	2.23
Si	0.35	0.68	0.15	0.29	0.21	0.41
Mn	1.51	1.51	3.48	3.51	2.98	2.98
Fe	96.89	95.26	95.82	95.08	95.72	94.37
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 32. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-5. Μεγέθυνση x2000



Εικόνα 33. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-5. Μεγέθυνση x5000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), παραμένον ωστενίτη (γ_R), μαρτενσίτη (α') και μπαινιτικής μορφολογίας

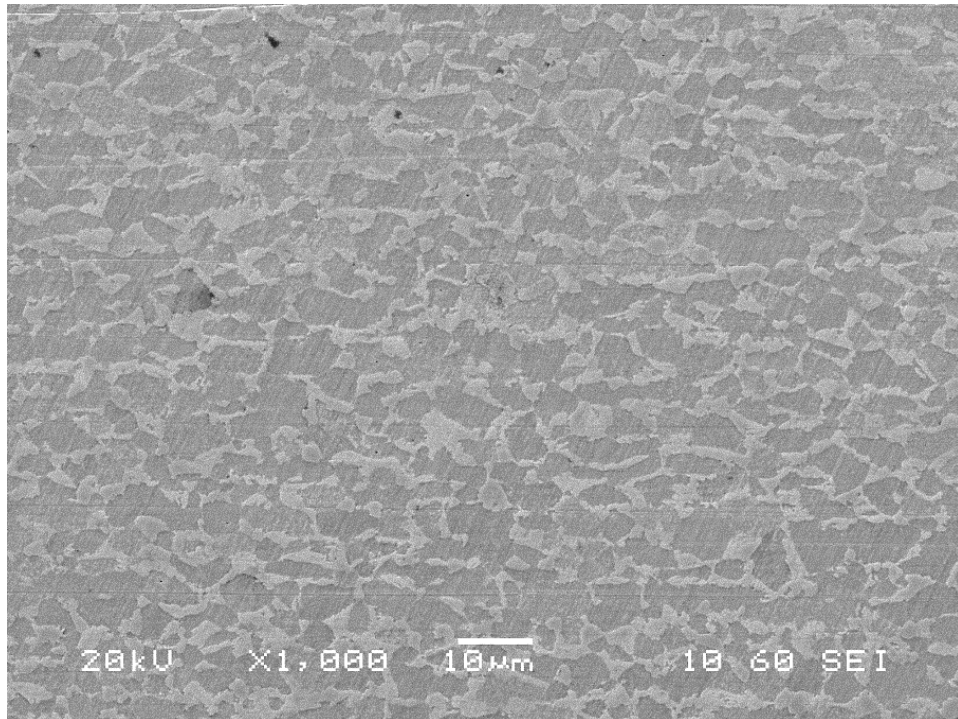
Δοκίμιο 300-30

Το δοκίμιο 300-30 αναφέρεται στην θερμική κατεργασία της ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 800°C για 5min, και σε ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 300°C, με χρόνο παραμονής τα 30min. Αυτό το παρατεταμένο διάστημα παραμονής, δεν φαίνεται να έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω ανάπτυξη της μπαινιτικής μορφολογίας. Η μικροδομή που παρουσιάζει το δοκίμιο 300-30 είναι παρόμοια με αυτές των προηγούμενων δοκιμίων για την μπαινιτική βαφή των 300°C.

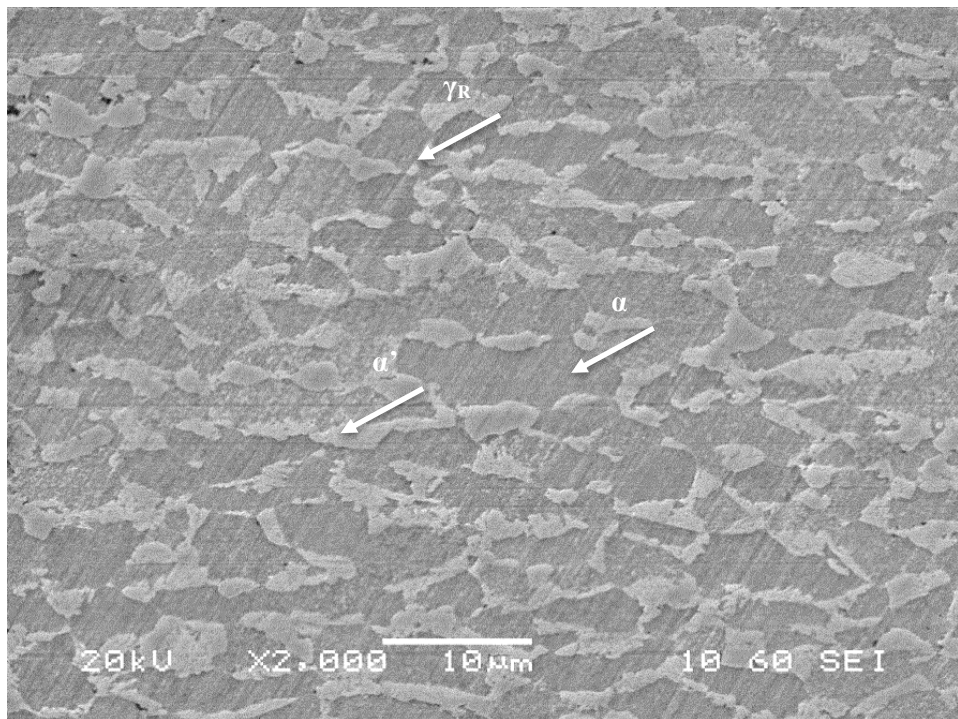
Παρακάτω, παρατείνονται τα αποτελέσματα από τις στοιχειακές αναλύσεις των φάσεων, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα X.

Πίνακας 8. Αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων, μέσω EDS, των φάσεων φερρίτη, παραμένων ωστενίτη και μαρτενσίτη, για το δοκίμιο 300-30

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Παραμένων ωστενίτης (γ _R)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.14	2.33	0.85	1.74	0.77	1.58
Si	0.36	0.71	0.51	1.00	0.29	0.57
Mn	1.44	1.44	2.40	2.41	2.00	2.01
Fe	97.05	95.51	96.23	94.85	96.94	95.84
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 34. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-30. Μεγέθυνση x1000



Εικόνα 35. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 300-30. Μεγέθυνση x2000. Απεικονίζονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και παραμένων ωστενίτη (γ_R)

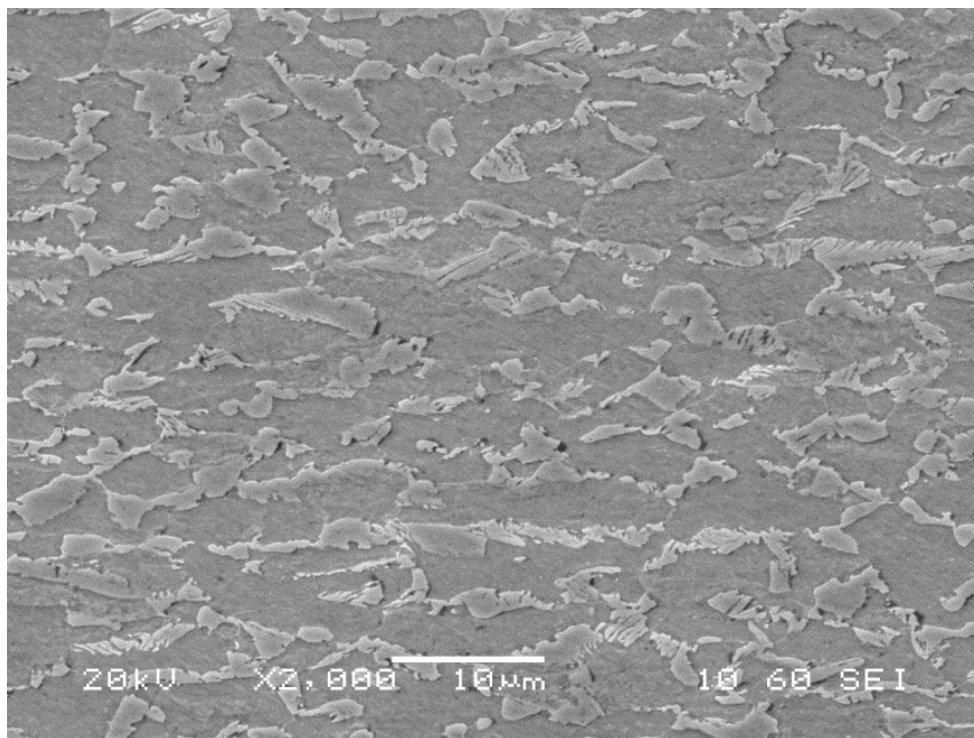
Δοκίμιο 350-1

Το δοκίμιο 350-1 υπέστη την θερμική κατεργασία που περιλαμβάνει την ενδοκρίσιμη ανόπτηση των 800°C για 5 min, και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 350°C, για 1 min. Από τις μικρογραφίες των παρακάτω εικόνων, παρατηρείται ότι ακόμη και για αυτόν τον σύντομο χρόνο παραμονής, η αυξημένη θερμοκρασία μπαινιτικής βαφής είναι ικανή για την ανάπτυξη της μπαινιτικής μορφολογίας. Επομένως, και σε σύγκριση με τα προηγούμενα δοκίμια των 300°C, για χρόνους από 1 μέχρι 5 min, το 350-1, εμφανίζει λεπτομερέστερη μπαινιτική μορφολογία στην μικροδομή. Γενικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μικρότερο αριθμό φύτρων και πάχυνση των υπάρχοντων, επομένως η διαφορά στην μορφολογία της μικροδομή, στην συγκεκριμένη περίπτωση, οφείλεται στο ότι στην χαμηλή θερμοκρασία των 300°C, είτε η κινητική της μπαινιτικής αντίδρασης είναι αργή, είτε η μορφολογία είναι τόσο λεπτομερής που δεν καθίσταται ορατή.

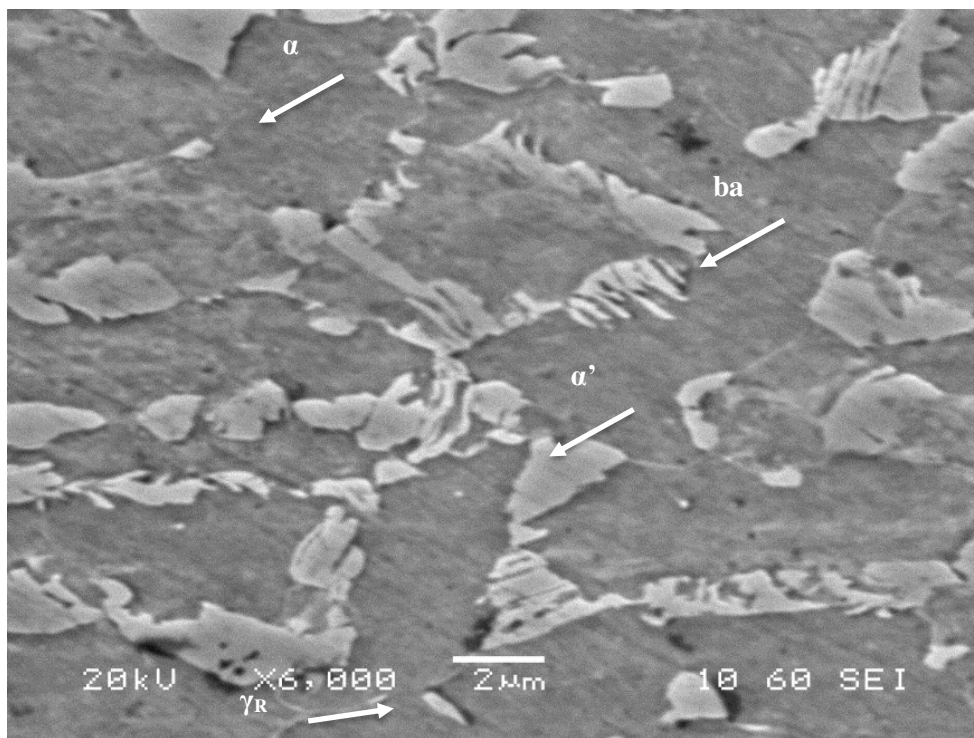
Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της μπαινιτικής βαφής, η μορφολογία του μπαινιτικού φερρίτη είναι αρκετά ανεπτυγμένη, κάτι που επιτρέπει την στοιχειακή ανάλυση και σε αυτή την φάση. Βέβαια, το πάχος της δέσμης καλύπτει μια μεγάλη περιοχή, η οποία υπερκαλύπτει τα εναλλασσόμενα φύλλα, τα οποία εμπεριέχουν και τον παραμένον ωστενίτη, και άρα, η μέτρηση θα δίνει ενδιάμεσες τιμές των δύο αυτών συστατικών. Από τον πίνακα X των σχετικών στοιχειακών αναλύσεων, παρατηρείται ότι ο μπαινίτης έχει αυξημένες τιμές αλουμινίου, κάτι το οποίο οφείλεται στα φυλλάρια φερρίτη, αλλά ταυτόχρονα έχει αυξημένο ποσοστό μαγγανίου, που αποδίδεται στον παραμένον ωστενίτη, ο οποίος βρίσκεται ενδιάμεσα αυτών. Το υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο απαντάται στον μαρτενσίτη.

Πίνακας 9. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω της EDS, των φάσεων φερρίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη, του δοκιμίου 350-1

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Μπαινίτης (ba)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.12	2.28	1.20	2.44	0.94	1.92
Si	0.51	0.99	0.26	0.50	0.28	0.55
Mn	1.20	1.20	1.65	1.65	2.32	2.32
Fe	97.18	95.54	96.90	95.41	96.46	95.21
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 36. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-1. Μεγέθυνση x2000



Εικόνα 37. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-1. Μεγέθυνση x6000. Απεικονίζονται οι φάσεις του φερρίτη(α), παραμένον ωστενίτη (γR), μαρτενσίτης (α') και μπαινίτης (ba)

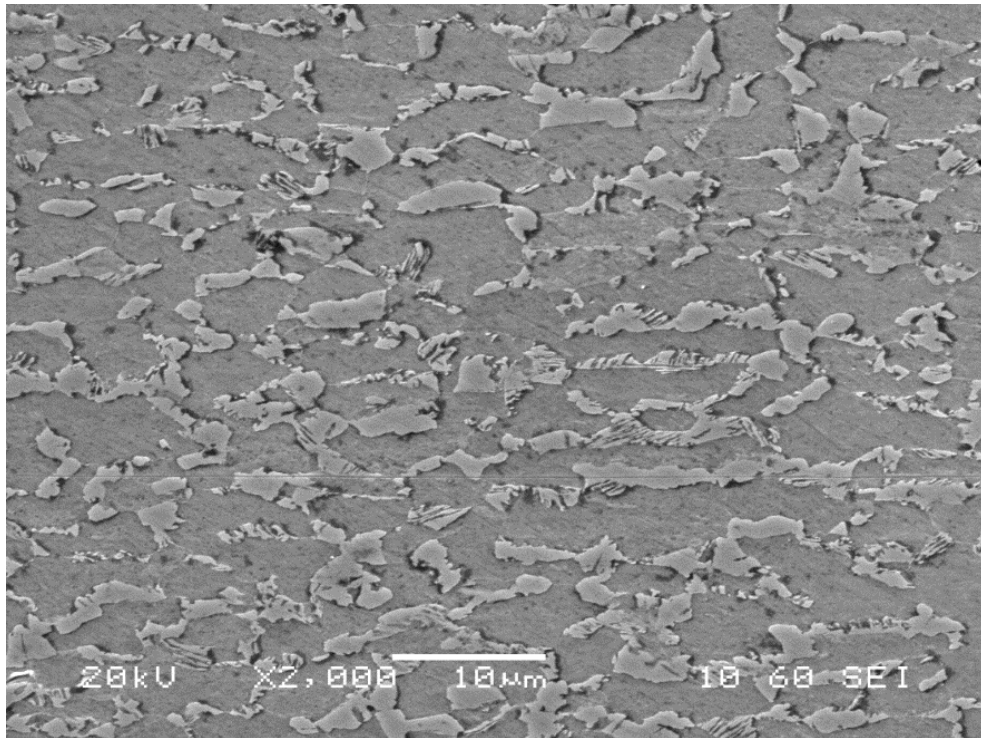
Δοκίμιο 350-2

Το δοκίμιο 350-2 υποβλήθηκε σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5 min και μπαινιτική βαφή στους 350°C για 2 min. Σε σχέση με το προηγούμενο δοκίμιο, που είχε χρόνο παραμονής 1 min, το δοκίμιο 350-2 εμφανίζει μεγαλύτερη ανάπτυξη της μπαινιτικής μορφολογίας. Ακόμη, τα ευμεγέθη συστατικά του μαρτενσίτη είναι λιγότερα σε αριθμό, ενώ τα νησίδα του παραμένων ωστενίτη, στα όρια του πολυγωνικού φερρίτη έχουν αυξηθεί.

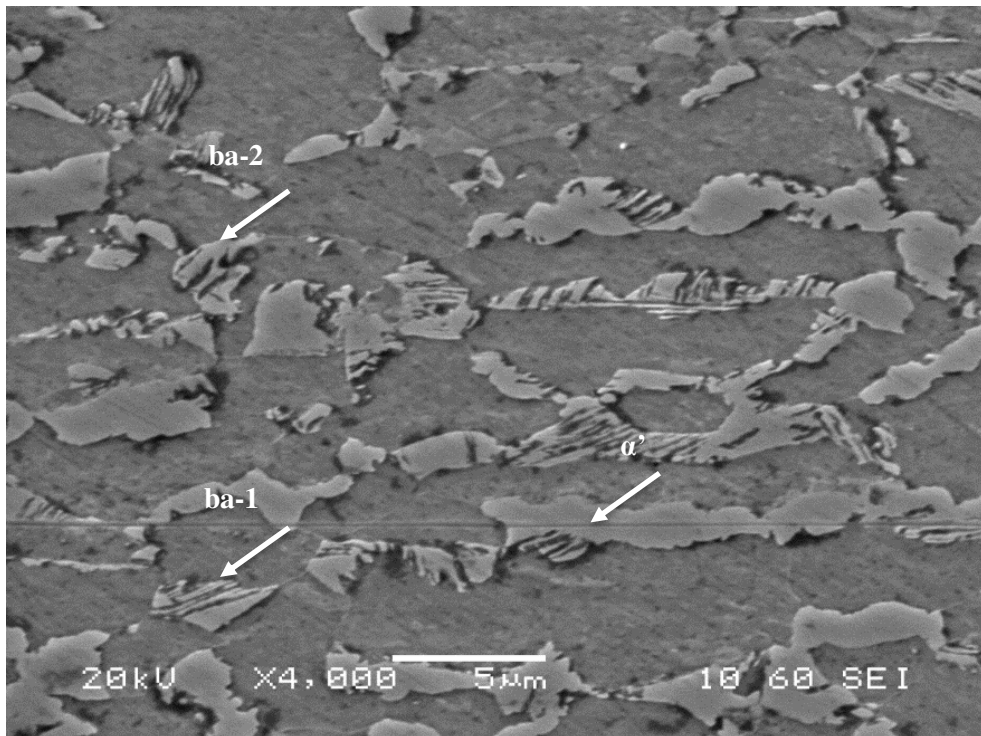
Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων, για τις φάσεις του μπαινίτη και μαρτενσίτη, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα X. Παρατηρείται ότι, στην μπαινιτική μορφολογία, τα ποσοστά των στοιχείων, διαφέρουν μεταξύ τους. Ένας λόγος για τον οποίο συμβαίνει κάτι τέτοιο, αποτελεί το μέγεθος των εναλλασσόμενων πλακιδίων, και αν υπερτερούν σε σχέση με τον ενδιάμεσο παραμένων ωστενίτη. Ενώ, επίσης, πάχυνση του μπαινιτικού φερρίτη, συνεπάγεται περαιτέρω εμπλουτισμός του ωστενίτη, κάτι που τον καθιστά πιο σταθερό. Πράγματι, στον μπαινίτη 2, ο οποίος εμφανίζει πιο μεγαλύτερα φυλλάρια μπαινιτικού φερρίτη, σημειώνεται αυξημένο ποσοστό σε μαγγάνιο. Βέβαια, το υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο υπολογίζεται, ξανά, στον μαρτενσίτη.

Πίνακας 10. Στοιχειακές αναλύσεις EDS των φάσεων μπαινίτη και μαρτενσίτη

Στοιχείο	Μπαινίτης (ba)-1		Μπαινίτης (ba)-2		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	0.91	1.86	0.81	1.65	0.86	1.76
Si	0.40	0.78	0.35	0.70	0.24	0.46
Mn	1.79	1.80	2.48	2.49	2.33	2.34
Fe	96.90	95.56	96.35	95.16	96.57	95.44
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 38. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-2. Μεγέθυνση x2000



Εικόνα 39. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-2. Μεγέθυνση x4000. Επισημαίνονται οι μπαινιτικές μορφολογίες (ba 1/2) και η φάση του μαρτενσίτη (α')

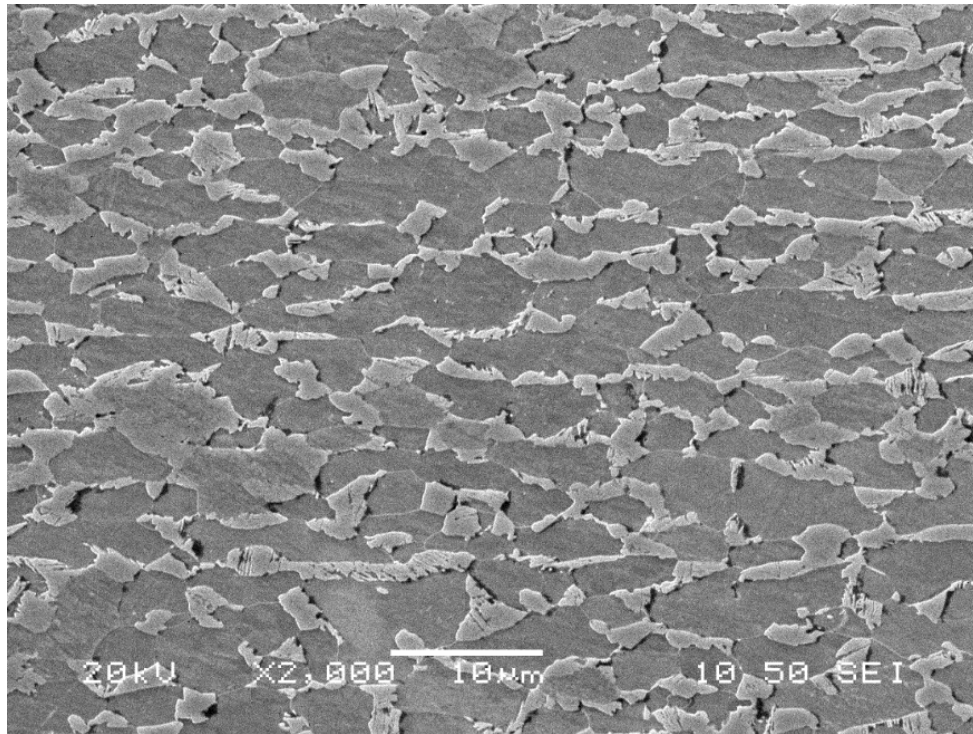
Δοκίμιο 350-5

Το δοκίμιο 350-5 αναφέρεται στην θερμική κατεργασία της ενδοκρίσιμης ανόπτησης των 800°C για 5min, ακολουθούμενη από την ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή των 350°C για 5min. Σε αυτό τον χρόνο παραμονής, φαίνεται η μπαινιτική αντίδραση να έχει προχωρήσει, με το κλάσμα όγκου αυτής της φάσης να είναι μεγαλύτερο, σε σχέση με τα δοκίμια 350-1 και 350-2. Ακόμη, τα νησίδα παραμένουστος ωστενίτη εμφανίζονται περισσότερο, καθώς είναι διασκορπισμένα στα όρια του πολυγωνικού φερρίτη.

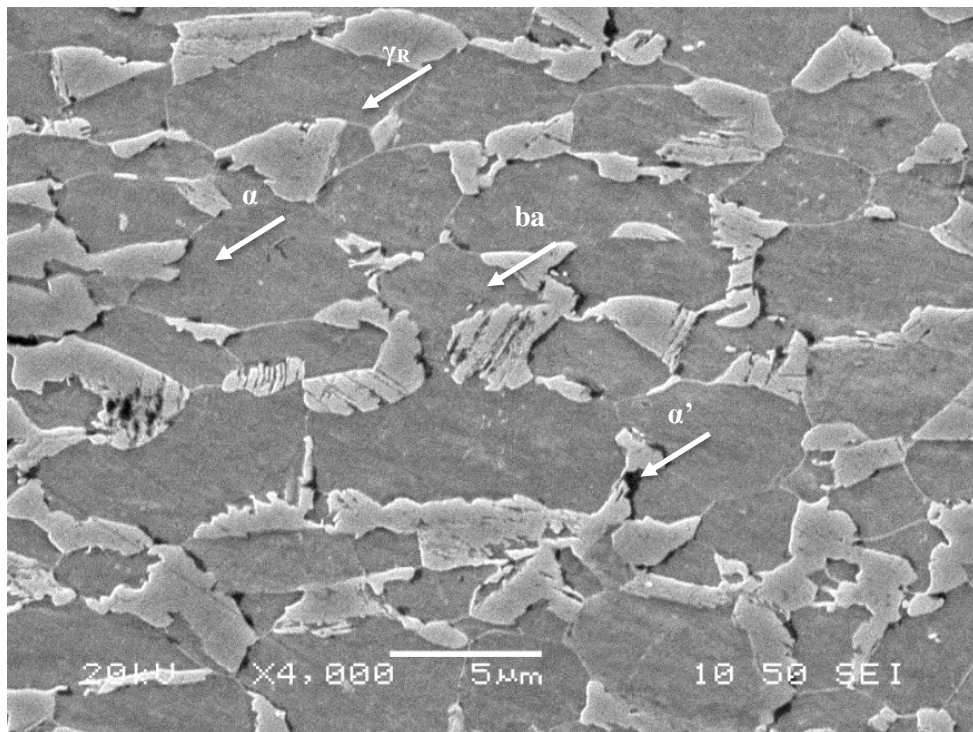
Ο Πίνακας 11 αναγράφει τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων, μέσω της τεχνικής EDS, για το δοκίμιο 350-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις φάσεις του φερρίτη, λεπτομερή μπαινίτη και ευμεγέθη νησίδα μαρτενσίτη. Από τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι ο μπαινίτη, έχει παρόμοια, και χαμηλότερα ποσοστά, σε αλουμίνιο, με το μαγγάνιο να είναι υψηλότερο στον μαρτενσίτη και χαμηλότερη τιμή, όπως αναμένεται. Η λεπτομερής μορφολογία του μπαινιτικού φερρίτη, συνεπάγεται το ότι ο παραμένουστος ωστενίτης υπερτερεί στην μπαινιτική μορφολογία. Ο μαρτενσίτης και ο παραμένουστος ωστενίτης, θα εμφανίζουν παρόμοια σύσταση από τα στοιχειακές αναλύσεις, με μόνη διαφορά την περιεκτικότητα σε άνθρακα, η οποία δεν είναι ανιχνεύσιμη.

Πίνακας 11. Στοιχειακές αναλύσεις των στοιχείων των φάσεων φερρίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη, του δοκιμίου 350-5

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Μπαινίτης (ba)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.24	2.53	1.03	2.10	1.00	2.04
Si	0.47	0.91	0.35	0.68	0.23	0.46
Mn	1.17	1.17	2.24	2.24	2.53	2.53
Fe	97.12	95.39	96.38	94.98	96.25	94.98
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 40. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-5. Μεγέθυνση x2000



Εικόνα 41. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-5. Μεγέθυνση x4000. Απεικονίζονται τα μικρογραφικά συστατικά του φερρίτη (α), μπαϊνίτη (ba), μαρτενσίτη (α') και παραμένον ωστενίτη (γ_R)

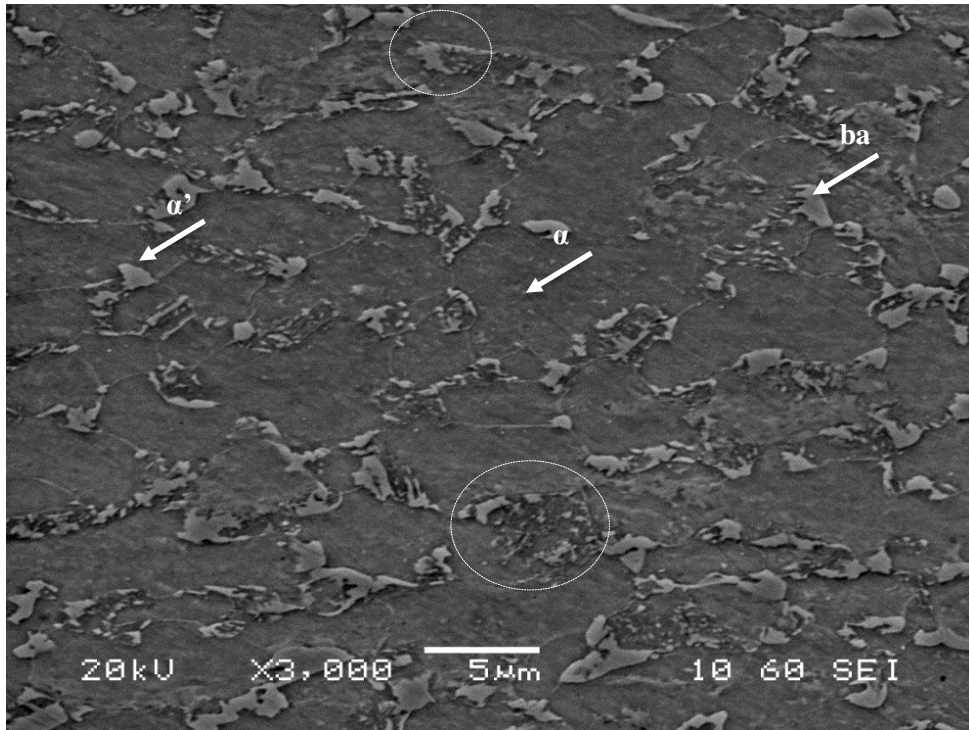
Δοκίμιο 350-30

Το δοκίμιο 350-30 υπέστη ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 350 για 30min. Για τα 30min παραμονής, ο μπαινιτικός μετασχηματισμός έχει προχωρήσει αρκετά, τόσο ώστε η μπαινιτική μορφολογία που είχε σχηματιστεί στην προηγούμενη θερμική κατεργασία, να έχει αποσυντεθεί. Ακόμη, σε ορισμένες μπαινιτικές μορφολογίες, η ανάπτυξη έχει φτάσει σε τέτοιο σημείο, όπου ευνοήθηκε η ανάπτυξη καρβιδίων. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται λόγω του εξαιρετικά παρατεταμένου χρόνου παραμονής και είναι ανεπιθύμητο για την μικροδομή των χαλύβων TRIP. Τα ευμεγέθη νησίδια του μαρτενσίτη έχουν, εμφανώς, ελλατωθεί, ενώ τα λεπτομερή νησίδια παραμένων ωστενίτη παραμένουν στα όρια του πολυγωνικού φερρίτη.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα Χ, των στοιχειακών αναλύσεων του δοκιμίου 350-30, παρατηρείται ότι τα ποσοστά πυριτίου και αλουμινίου είναι παρόμοια για τον φερρίτη και την φάση του μπαινίτη, ενώ το υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο παρατηρείται στον μαρτενσίτη. Πράγματι, η αποσύνθεση του μπαινίτη, συνάδει με τα αποτελέσματα, καθώς ο παραμένων ωστενίτης, θα αντικατασταθεί από την ανάπτυξη καρβιδίων.

Πίνακας 12. Στοιχειακές αναλύσεις των φάσεων φερρίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη, του δοκιμίου 350-30

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Μαρτενσίτης (α')		Μπαινίτης(ba)	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.16	2.37	0.71	1.46	1.06	2.17
Si	0.47	0.92	0.35	0.70	0.55	1.08
Mn	1.23	1.23	2.37	2.38	2.20	2.19
Fe	97.14	95.49	96.56	95.46	96.19	94.56
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 42. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 350-30. Μεγέθυνση x3000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α'), μπαϊνίτη (ba) καθώς και οι περιοχές των μπεινιτικών κόκκων που εμφανίζουν κατακρημνίσματα σεμεντίτη

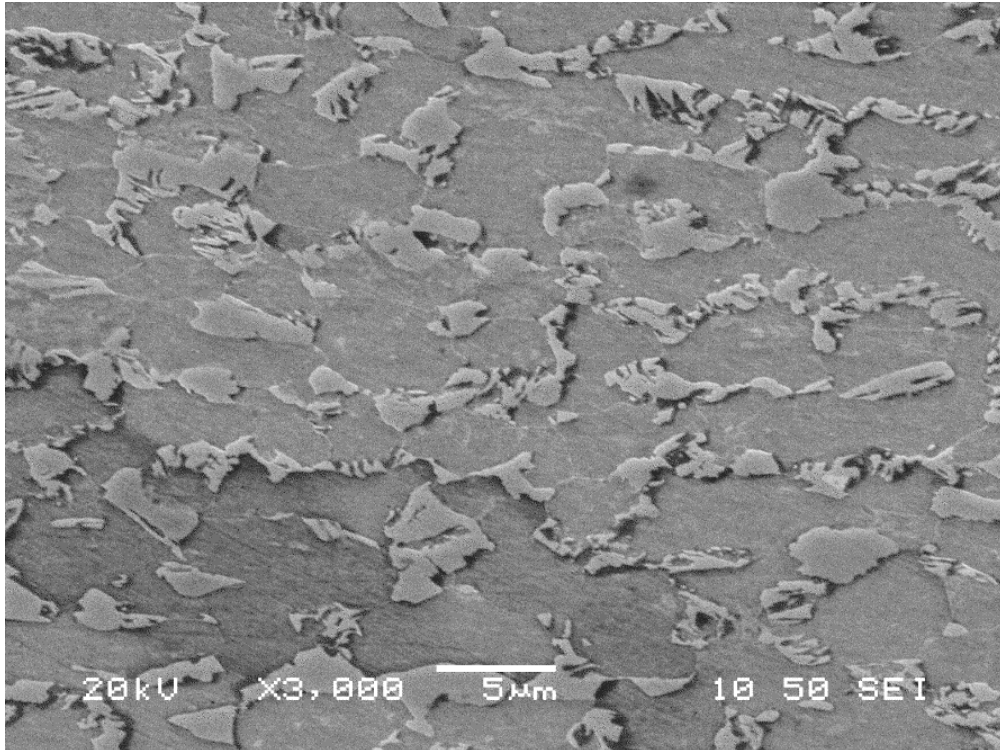
Δοκίμιο 400-1

Το δοκίμιο 400-1 αναφέρεται στο δοκίμιο της θερμικής κατεργασίας με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C, για 5min, και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 400°C για 1min, με συνακόλουθη βαφή σε νερό. Λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας, η μπαινιτική αντίδραση έχει προχωρήσει, ακόμη και στο 1^ο λεπτό, εμφανίζοντας την πιο λεπτομερή μικροδομή σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια, για τους ίδιους χρόνους παραμονής. Ακόμη, το κλάσμα όγκου του μπαινίτη, είναι αυξημένο, καθώς όπως προβλέπεται και από τα διαγράμματα TTT, αυτή η θερμοκρασία είναι πιο κοντά στην μύτη της καμπύλης του μπαινίτη. Τέλος, τα ευμεγέθη σωματίδια, υπερτερούν των νησιδίων, που μπορούν να αποδοθούν ως παραμένων ωστενίτης, στα όρια των κόκκων.

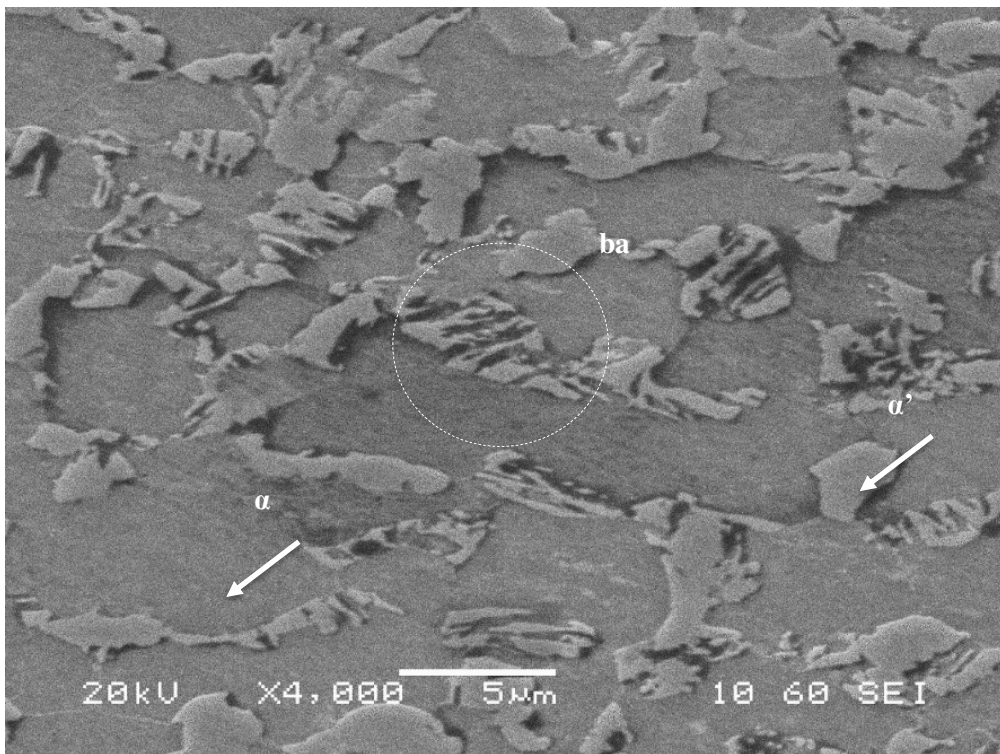
Από την στοιχειακή ανάλυση EDS, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε φάσεις τις μικροδομής, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα X. Ο φερρίτης εμφανίζει αυξημένο ποσοστό αλουμινίου σε σχέση με την γενική χημική ανάλυση, όπως και αναμένεται. Ο μπαινίτης εμφανίζει χαμηλό ποσοστό σε α-φερρογόνα στοιχεία, και το υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο, λόγω του μικρότερου μεγέθους κόκκου, σε σχέση με αυτό του μαρτενσίτη. Το σύνολο των αποτελεσμάτων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13. Στοιχειακές αναλύσεις, μέσω EDS, των φάσεων του φερρίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη, για το δοκίμιο 400-1

Στοιχείο	Γενική χημική ανάλυση		Φερρίτης (α)		Μπαινίτης (ba)		Μαρτενσίτης (α')	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.06	2.15	1.38	2.81	0.79	1.63	0.95	1.94
Si	0.40	0.78	0.43	0.83	0.24	0.48	0.40	0.79
Mn	1.80	1.80	1.43	1.43	2.58	2.59	2.02	2.03
Fe	96.75	95.27	96.76	94.93	96.38	95.30	96.62	95.24
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 43. Μικρογραφία SEM του δοκμίου 400-1. Μεγέθυνση x3000



Εικόνα 44. Μικρογραφία SEM του δοκμίου 400-1. Μεγέθυνση x4000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μπαινίτη, (ba), μαρτενσίτη (α')

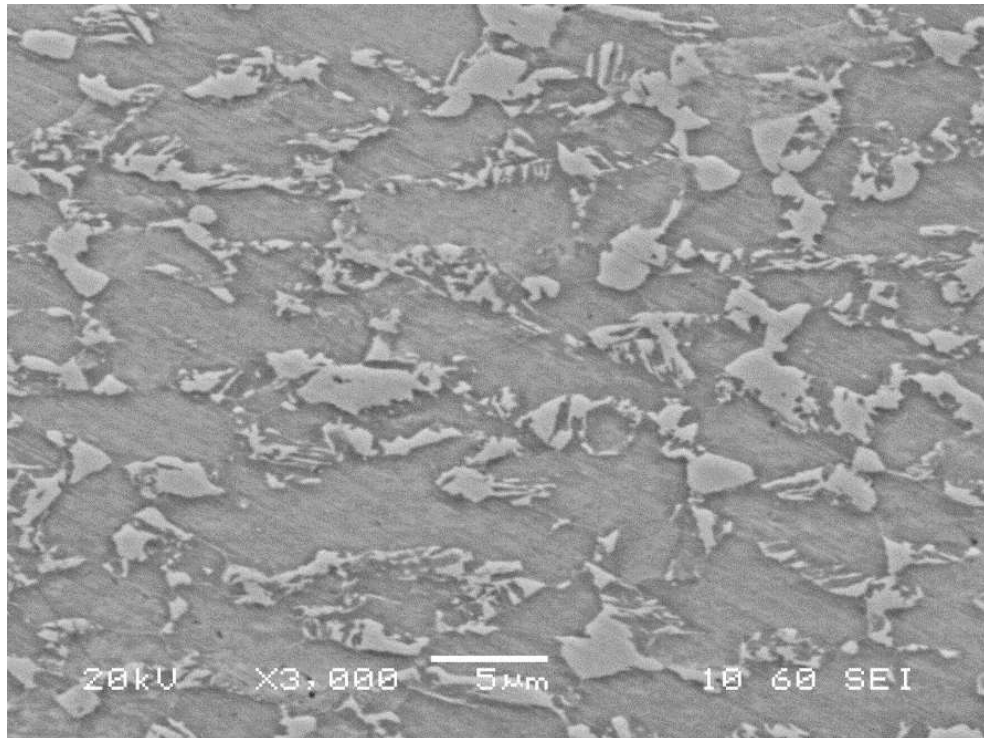
Δοκίμιο 400-2

Το δοκίμιο 400-2 υπεβλήθη σε θερμική κατεργασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 800°C για 5min, και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή για 2min. Η μπαινιτική αντίδραση φαίνεται να έχει προχωρήσει αρκετά, ενώ τα νησίδια παραμένων ωστενίτη στα όρια του πολυγωνικού φερρίτη, είναι περισσότερα σε σχέση με εκείνα που εμφανίζονταν στην μικροδομή του δοκιμίου 400-1. Τα πλακίδια της μπαινιτικής μορφολογίας εμφανίζονται περισσότερα σε αριθμό, επιμηκυμένα και με πάχυνση. Η αυξημένη θερμοκρασία των 400°C, είχε ως αποτέλεσμα τον εκκίνηση του μπαινιτικού μετασχηματισμού σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου του ενδοκρίσιμου ωστενίτη, ενώ αύξηση του χρόνου παραμονής, μειώνει το κλάσμα όγκου του μαρτενσίτη στην τελική μικροδομή.

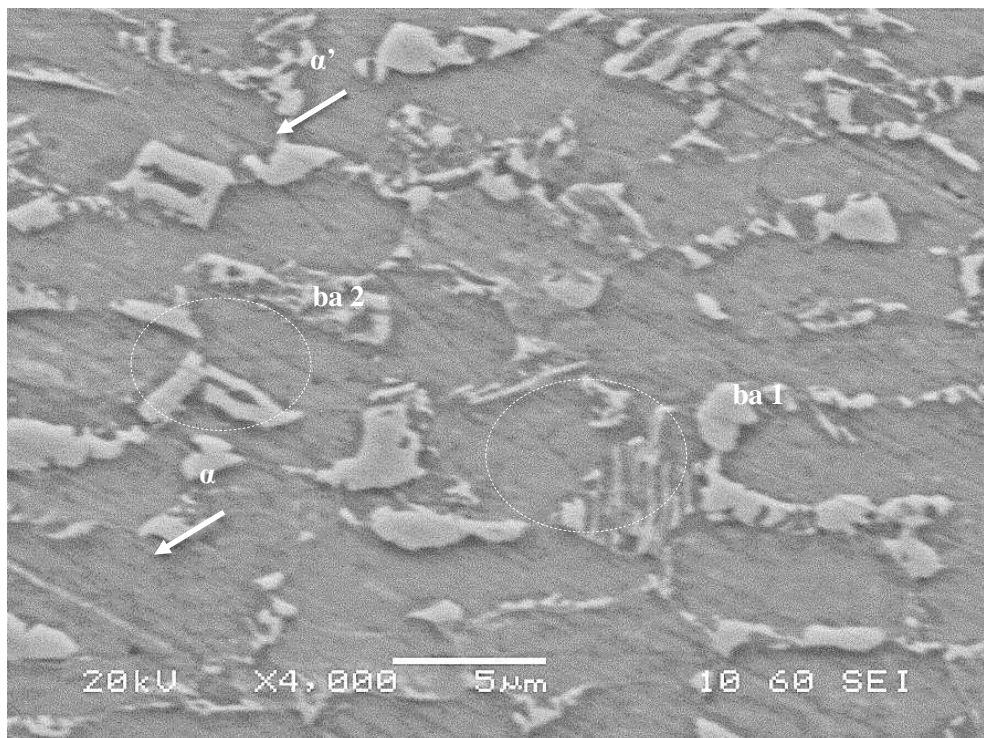
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων, για το δοκίμιο 400-2. Η φάση του φερρίτη εμφανίζει αυξημένο ποσοστό σε αλουμίνιο και χαμηλό σε μαγγάνιο, σε σχέση με την γενική χημική ανάλυση. Ακόμη, έγιναν δύο μετρήσεις σε διαφορετικής μορφολογίας μπαινίτες, για λεπτομερή φυλλάρια και ευμεγέθη πλακίδια μπαινιτικού φερρίτη. Πολυάριθμα εναλλασόμενα φυλλάρια μπαινιτικού φερρίτη και παραμένων ωστενίτη, μειώνουν την απόσταση της διάχυσης, και επομένως στην πρώτη περίπτωση, τα ποσοστά θα εμφανίζονται αυξημένα για όλα τα χημικά στοιχεία

Πίνακας 14. Στοιχειακές αναλύσεις EDS των φάσεων φερρίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη, του δοκιμίου 400-2

Στοιχείο	Γενική		Φερρίτης		Μπαινίτης 2 (λεπτομερές)		Μπαινίτης 1 (μεγάλο πλακίδιο φερρίτη)		Μαρτενσίτης	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.09	2.22	1.21	2.47	0.83	1.70	1.00	2.04	0.75	1.53
Si	0.55	1.08	0.30	0.58	0.47	0.92	0.36	0.71	0.50	0.98
Mn	1.97	1.96	1.38	1.38	2.30	2.30	2.79	2.79	2.80	2.81
Fe	96.39	94.74	97.11	95.57	96.40	95.07	95.85	94.46	95.95	94.68
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 45. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-2. Μεγέθυνση x3000



Εικόνα 46. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-2. Μεγέθυνση x4000. Απεικονίζονται φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και μπαινίτη (ab 1&2)

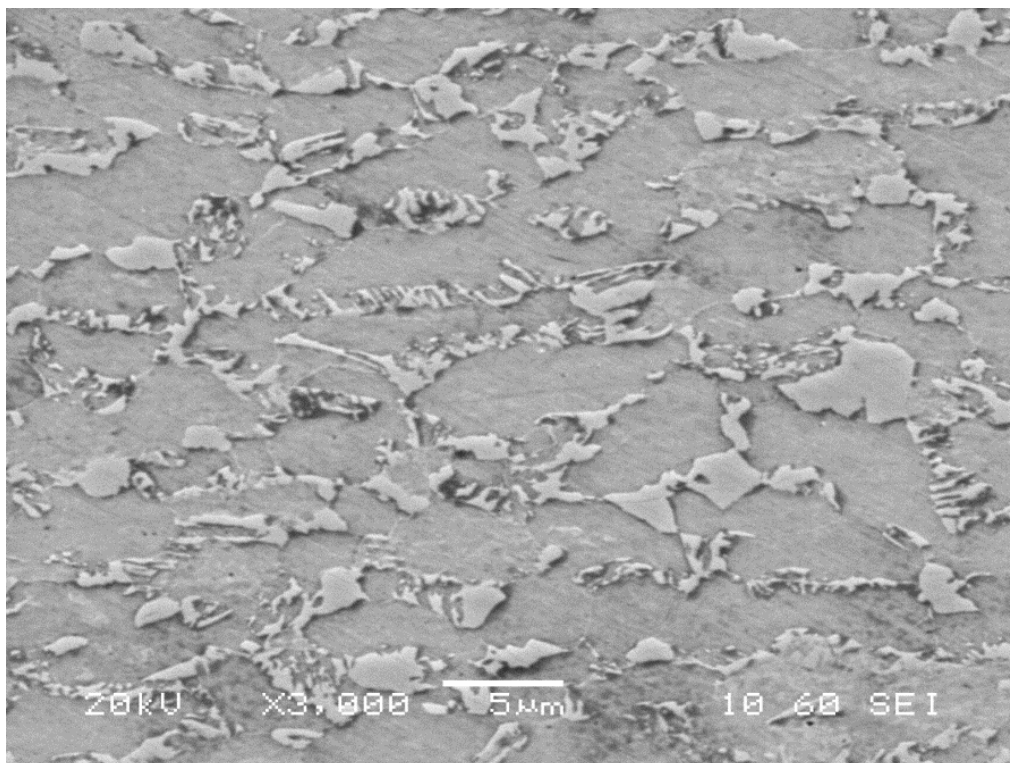
Δοκίμιο 400-5

Το δοκίμιο 400-5 έχει υποστεί ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C, για 5min, και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 400°C για 5min. Η μπαινιτική μορφολογία είναι πιο ανεπτυγμένη σε σχέση με το δοκίμιο 400-2, ενώ επίσης το κλάσμα όγκου του μπαινίτη έχει αυξηθεί, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής στην μπαινιτική βαφή. Ο παρατεταμένος χρόνος, επίσης, οδήγησε στην αύξηση των νησιδίων παραμένων ωστενίτη, καθώς σταθεροποιήθηκε επαρκώς λόγω της αυξημένης διάχυσης.

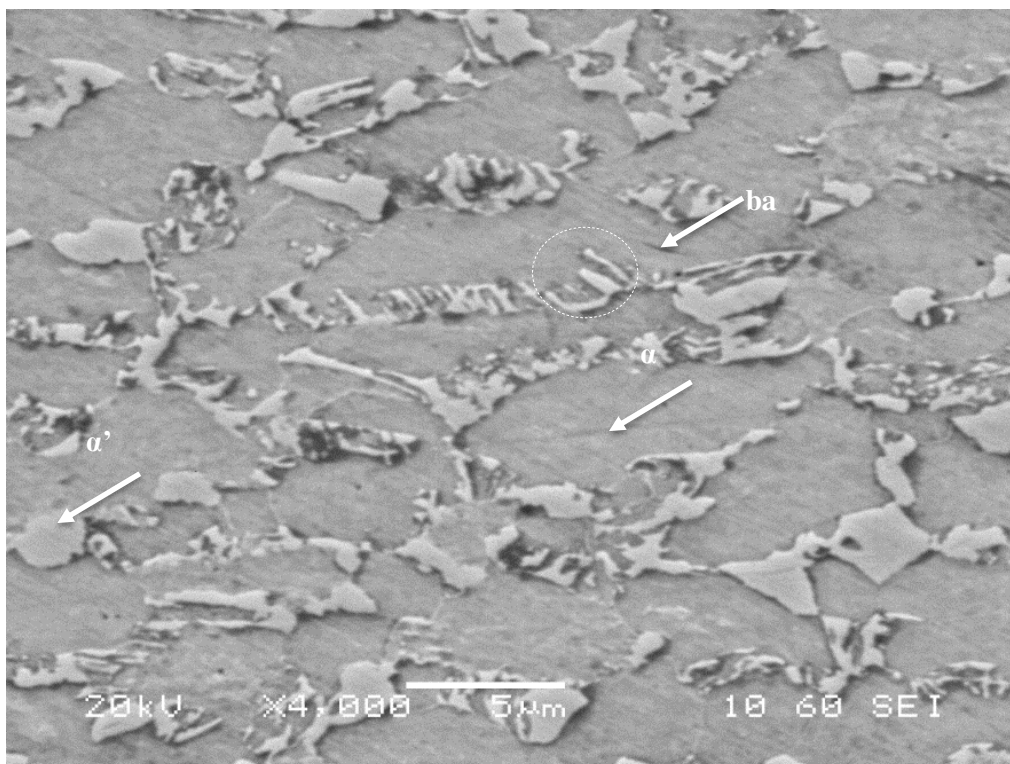
Από τις στοιχειακές αναλύσεις, στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται τα ποσοστά των κραματικών στοιχείων που ανιχνεύθηκαν σε κάθε φάση. Το αλουμίνιο βρίσκεται σε υψηλότερο ποσοστό στον φερρίτη, ενώ υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο ανιχνεύεται στον μαρτενσίτη. Η μορφολογία του μπαινίτη που μετρήθηκε, αποτελείται από ευμεγέθη πλακίδια μπαινιτικού φερρίτη, επομένως, κατά την μέτρηση, η τιμή του ποσοστού του μαγγανίου, είναι υψηλή, αλλά και ενδιαμέση των άλλων δύο φάσεων.

Πίνακας 15. Αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων EDS των φάσεων φερρίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη, το δοκίμιου 400-5

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Μαρτενσίτης (α')		Μπαινίτης (ba) (μεγάλο πλακίδιο φερρίτη)	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	1.38	2.80	1.07	2.18	1.08	2.21
Si	0.36	0.70	0.31	0.60	0.37	0.73
Mn	1.17	1.17	2.76	2.77	1.96	1.96
Fe	97.09	95.34	95.87	94.46	96.58	95.09
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 47. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-5. Μεγέθυνση x3000



Εικόνα 48. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-5. Μεγέθυνση x4000. Διακρίνονται οι μορφολογίες του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και μπαινίτη (ba)

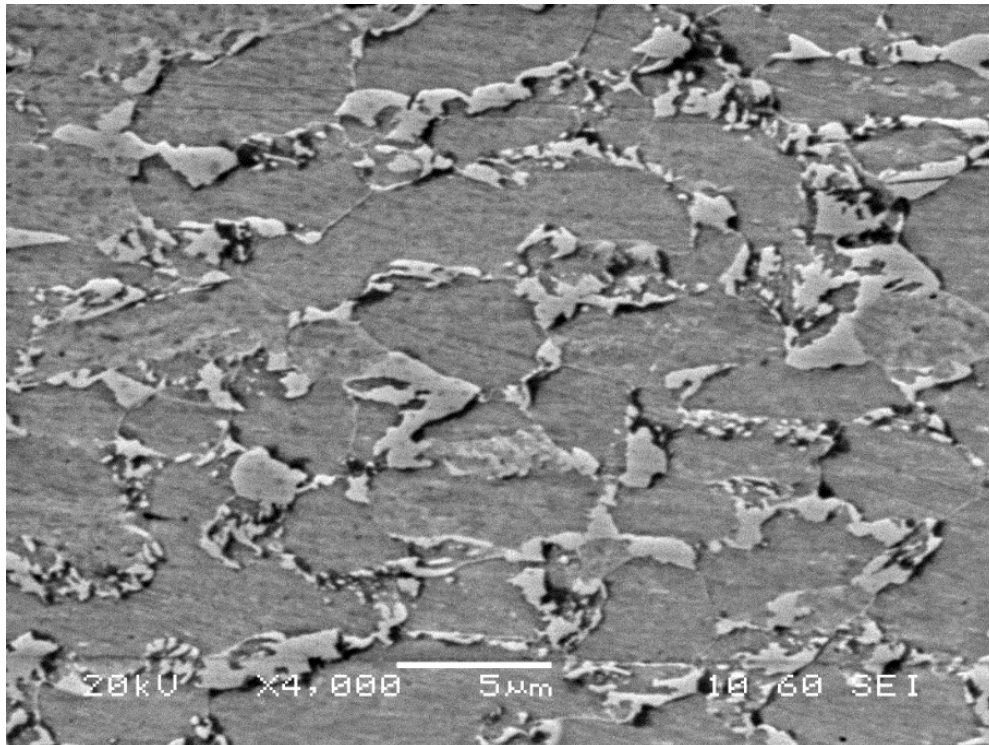
Δοκίμιο 400-30

Το δοκίμιο 400-30 αναφέρεται στο δοκίμιο με την θερμική κατεργασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 800°C για 5min και ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή στους 400 για 30min. Ο παρατεταμένος χρόνος παραμονής σε αυτήν την υψηλή θερμοκρασία, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του κλάσματος του μπαινίτη εις βάρος του παραμένων οστενίτη, ενώ ενδιάμεσα των εναλλασσόμενων φυλλαρίων, ο υπερκορεσμός σε άνθρακα οδήγησε, σε ορισμένους κόκκους την αποσύνθεση του παραμένων οστενίτη, και την δημιουργία καρβιδίων.

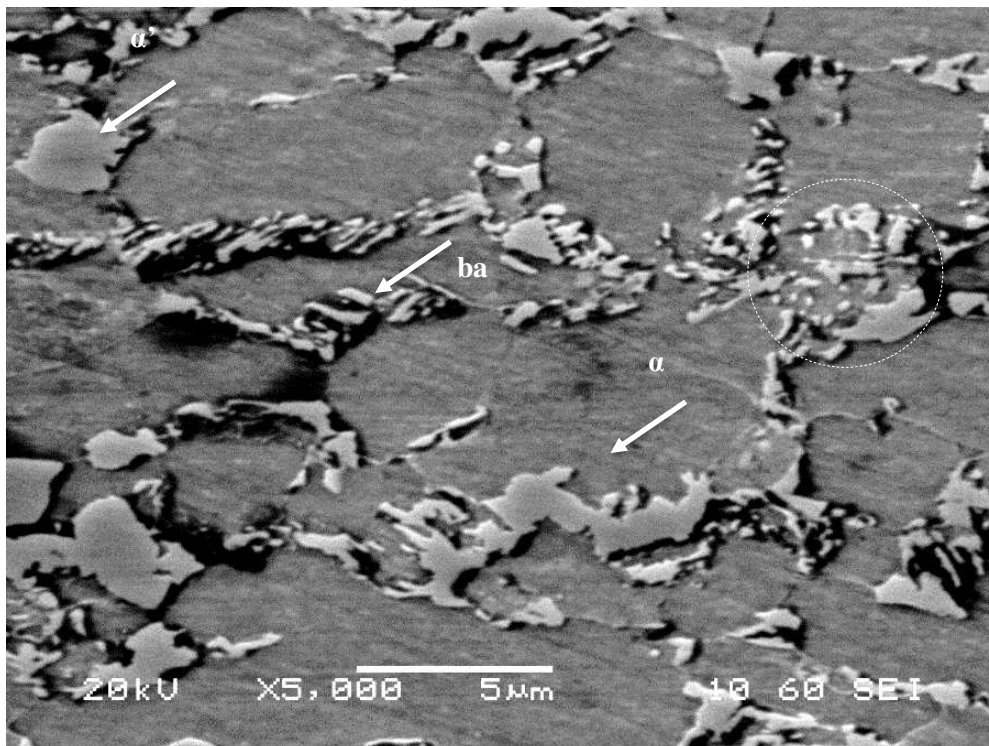
Από τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης, παρατηρείται ότι οι φάσεις του φερρίτη (α) και μαρτενσίτη (α'), έχουν παρόμοια ποσοστά στα στοιχεία της κραμάτωσης, με το ποσοστό του μαγγάνιου να είναι υψηλότερο στην φάση του μαρτενσίτη. Ακόμη, η φάση του μπαινιτικού φερρίτη έχει μειωμένα ποσοστά σε α-φερρογόνα, ενώ σε αυτήν εμφανίζεται το υψηλότερο ποσοστό σε μαγγάνιο. Κάτι τέτοιο, ενδεχομένως, οφείλεται στην μορφολογία του κόκκου, που εμφανίζεται με πάχυνση των λεπτών υμενίων του παραμένων οστενίτη.

Πίνακας 16. Αποτελέσματα στοιχειακών αναλύσεων EDS, των φάσεων φερρίτη, μαρτενσίτη και μπαινίτη, του δοκιμίου 400-30

Στοιχείο	Φερρίτης (α)		Μαρτενσίτης (α')		Μπαινίτης (ab)	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
Al	0.97	1.98	0.94	1.92	0.34	0.70
Si	0.45	0.89	0.46	0.91	0.27	0.54
Mn	1.54	1.54	2.03	2.03	2.62	2.65
Fe	97.04	95.59	96.56	95.14	96.76	96.11
Σύνολο	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



Εικόνα 49. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-30. Μεγέθυνση x4000



Εικόνα 50. Μικρογραφία SEM του δοκιμίου 400-30. Μεγέθυνση x5000. Διακρίνονται οι φάσεις του φερρίτη (α), μαρτενσίτη (α') και μπαινίτη (ba), καθώς και ο σχηματισμός καρβιδίων εντός της μπαινιτικής μορφολογίας

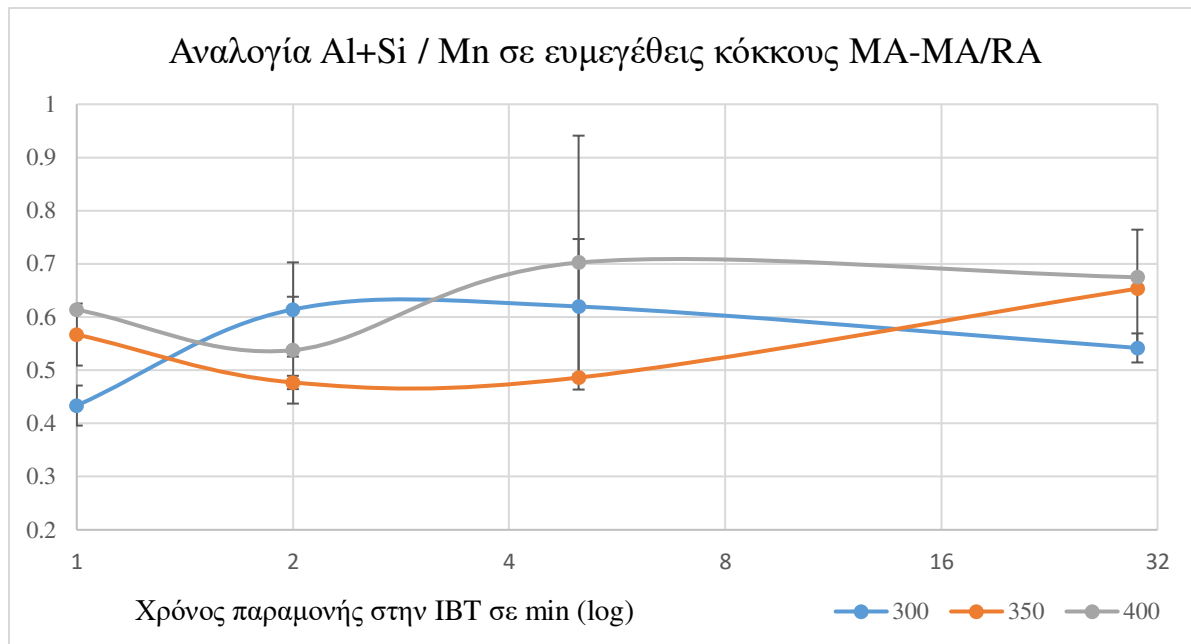
2.8.2. Αποτελέσματα EDS

Μέσω της ημιποσοτικής στοιχειακής ανάλυσης (EDS) μπορεί να παρατηρηθεί η κατανομή των στοιχείων κραμάτωσης στις φάσεις της μικροδομής και επομένως να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα σε σχέση με την εξέλιξη της μικροδομής ανάλογα με τις θερμικές κατεργασίες που έχει υποστεί.

Τα στοιχεία της κραμάτωσης εμφανίζονται σε διαφορετικές αναλογίες σε κάθε φάση λόγω της ιδιότητας τους να διαφορίζονται μεταξύ των φάσεων. Το Mn χαρακτηρίζεται ως γ-φερρογόνο, ευνοεί τον σχηματισμό ωστενίτη και επομένως θα εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή στους κόκκους του παραμένον ωστενίτη. Τα στοιχεία Al και Si αποτελούν α-φερογόνα στοιχεία και θα απαντώνται σε φερριτικούς και μπαινιτικούς κόκκους.

Ο χάλυβας TRIP έχει μια λεπτομερή μικροδομή, οπότε κατά την ημιποσοτική χημική ανάλυση, η προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων θα καλύψει μεγαλύτερη περιοχή από την επιθυμητή. Επομένως, η μέτρηση δεν αποτυπώνει με ακρίβεια αλλά δείχνει την τάση των στοιχείων τα διαφορίζονται μεταξύ των φάσεων. Για αυτό το λόγο, οι μετρήσεις έχουν διαχωριστεί ως προς την μορφολογία των κόκκων που εμφανίζονται στην μικροδομή. Σε αυτούς περιλαμβάνονται κόκκοι που μπορούν να αποδοθούν ως μαρτενσίτες ή μικτές φάσεις μαρτενσίτη – ωστενίτη και κόκκοι που εμφανίζουν μπαινιτική μορφολογία.

Παρακάτω, παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής του λόγου Al + Si / Mn, για κάθε θερμοκρασία και χρόνο παραμονής στην μπαινιτική ισοθερμοκρασιακή βαφή. Ανάλογα με την μορφολογία των κόκκων που μετρήθηκαν, έγινε ερμηνεία της επίδρασης του μεγέθους του κόκκου, της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής, στον διαφορισμό των στοιχείων.



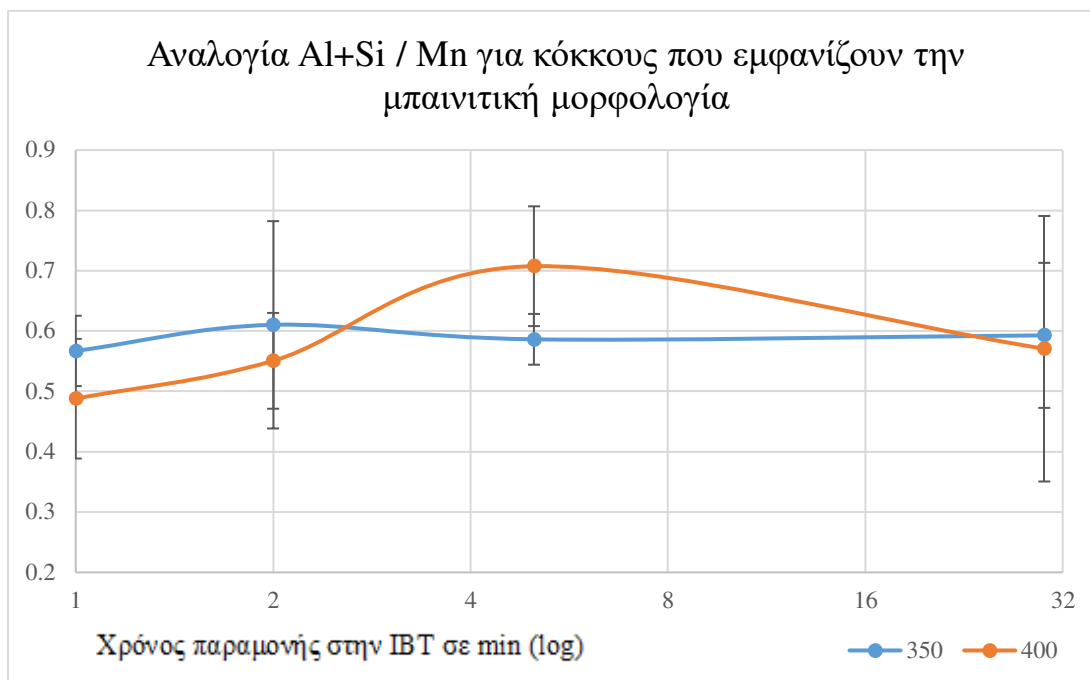
Εικόνα 51. Διάγραμμα μεταβολής του λόγου Al+Si / Mn κατά τις θερμικές κατεργασίες σε κόκκους μαρτενσίτη και μικτών φάσεων μαρτενσίτη/παραμένον ωστενίτη, ενώ αριστερά παρατίθενται το αντίστοιχο μέσο μέγεθος των κόκκων

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε τα εξής:

- Γενικά για το πρώτο λεπτό, θα έπρεπε να ξεκινούν από παρόμοια αναλογία στοιχείων, καθώς σε αυτόν τον σύντομο χρόνο, τα φαινόμενα της διάχυσης δεν είναι έντονα, και τα στοιχεία δεν θα έχουν διαφοριστεί περαιτέρω. Ήδη με το πέρας της ενδοκρίσιμης ανόπτησης, το μαγγάνιο απαντάται στο εξωτερικό του ενδοκρίσιμου ωστενίτη, ενώ το πυρίτιο και αλουμίνιο βρίσκονται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο κέντρο του. Επομένως μικρότεροι κόκκοι που βρίσκονται στα όρια του ενδοκρίσιμου φερρίτη, μπορούν να αποδωθούν ως κόκκοι παραμένων ωστενίτη καθώς θα έχουν σταθεροποιηθεί εξαιτίας της αυξημένης περιεκτικότητας σε μαγγάνιο. Ακόμη, για το δείγμα στους 300°C, σημειώνεται στο διάγραμμα η χαμηλότερη αναλογία, καθώς εμφάνισε υψηλό ποσοστό σε Mn, ενώ επίσης οι κόκκοι που μετρήθηκαν είχαν το μεγαλύτερο μέγεθος, περίπου στα 5μm.
- Τα δοκίμια των 300°C εμφάνισαν τη μέγιστη αναλογία στο 2^ο min, καθώς σημειώθηκε αύξηση στα α-φερογόνα, ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε το μαγγάνιο. Ακόμη, το μέγεθος του κόκκου μειώθηκε σημαντικά, από 5.4μm σε 3μm. Από το 2^ο στο 5^ο min η αναλογία μειώθηκε ελαφρώς αλλά το μέγεθος των κόκκων μειώθηκε περαιτέρω.
- Οι καμπύλες των δοκιμών για την μπαινιτική βαφή στους 350°C, εμφάνισαν μείωση της αναλογίας, ενώ το μέγεθος παρέμεινε σταθερό. Αύξηση του χρόνου παραμονής, για 5min μείωσε το μέγεθος του κόκκου, αλλά η αναλογία παρέμεινε σταθερή, ενώ στα 30min, τα α-φερογόνα σημείωσαν αύξηση.
- Για τα δοκίμια των 400°C, κατά το 1^ο και 2^ο min παραμονής έχουν παρόμοια αναλογία και μέγεθος κόκκου, ενώ κατά το 5^ο min η αναλογία αυξήθηκε, με ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους του κόκκου από 2,6μm στα 1,9.

Στο πρώτο διάγραμμα, μεγαλύτερη επίδραση στην αναλογία α-φερογόνων / γ-φερογόνων φαίνεται ότι έχει το μέγεθος των κόκκων, το οποίο καθορίζεται από τον χρόνο παραμονής, όπου αύξησή του σημαίνει αντίστοιχη μείωση του μεγέθους των κόκκων. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι σχηματίζεται μεγαλύτερο κλάσμα μπαινίτη, και περισσότερα νησίδα παραμένων ωστενίτη, επομένως, οι ευμεγέθεις κόκκοι θα έχουν χαμηλότερη συγκέντρωση σε μαγγάνιο. Το Mn θα εμφανίζει υψηλότερη συγκέντρωση σε λεπτομερέστερους κόκκους οι οποίοι σχηματίζονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, για συντομότερους χρόνους παραμονής, κάτι που αποτελεί και ένδειξη σταθερότητας του παραμένων ωστενίτη.

Το παρακάτω διάγραμμα, σχεδιάστηκε για την αναλογία Al+Si / Mn για κόκκους που εμφανίζουν την μπαινιτική μορφολογία, κατά την ισοθερμοκρασιακή μπαινιτική βαφή των 350 και 400°C. Από το διάγραμμα απουσιάζει η καμπύλη των 300°C καθώς σε αυτήν την θερμοκρασία μπαινιτικής βαφής, τα δοκίμια δεν εμφανίζουν στην μικροδομή την τυπική μπαινιτική μορφολογία, καθώς αυτή είτε απουσιάζει τελείως, είτε βρίσκεται σε τόσο πρώιμο στάδιο που δεν μπορεί να θεωρηθεί ως διακριτή φάση. Επομένως, στο παρακάτω διάγραμμα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κόκκους που εμφάνιζαν την μπαινιτική μορφολογία, προκειμένου να αναλυθούν οι επιπτώσεις της μορφολογίας σε σχέση με τον διαφορισμό των στοιχείων.



Εικόνα 52. Διάγραμμα της μεταβολής του λόγου Al+Si/Mn κατά τις θερμικές κατεργασίες σε κόκκους που εμφανίζουν μπεινιτική μορφολογία, ενώ αριστερά παρατίθενται το μέσο μέγεθος των κόκκων στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι στοιχειακές αναλύσεις

Ακόμη, παρατηρούνται τα εξής:

- Η καμπύλη των 350°C εμφανίζει μέγιστο στο 2^ο λεπτό, αν και η μεταβολή είναι μικρής τάξης, (0.61 έναντι 0.57, ενώ στην συνέχεια η αναλογία παραμένει σχετικά σταθερή για τους υπόλοιπους χρόνους παραμονής. Επομένως, οι διάφοροι χρόνοι παραμονής, για την βαφή στους 350°C δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην μπεινιτική μορφολογία. Όμως, το μέγεθος των κόκκων αυξάνει σταδιακά από το 1^ο min, με μέγιστο μέγεθος στο 5^ο min.
- Στην μπεινιτική μορφολογία, όπως αυτή είναι ευδιάκριτη στην μπεινιτική βαφή των 400°C, η αναλογία εμφανίζει αύξηση όσο αυξάνεται το κλάσμα του μπεινιτικού φερρίτη Αυτό οφείλεται στο ότι, ο ωστενίτης που βρίσκεται ενδιάμεσα του μπεινίτη, έχει εμπλουτιστεί σε άνθρακα, ενώ τα λεπτομερή φυλλάρια του μπεινιτικού φερρίτη είναι αντίστοιχα εμπλουτισμένα με πυρίτιο και αλουμίνιο. Το μέγιστο της καμπύλης εμφανίζεται στο 5^ο λεπτό, άρα σε αυτό το σημείο θα εμφανίζεται το μέγιστο κλάσμα μπεινίτη με το βέλτιστο κλάσμα παραμένων ωστενίτη, ο οποίος θα έχει εμπλουτιστεί επαρκώς σε άνθρακα. Ακόμη, στο 5^ο min εμφανίζεται το μικρότερο μέγεθος κόκκου της μπεινιτικής μορφολογίας.

2.8.3. Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης Vickers. Από τις μετρήσεις υπολογίστηκε ο μέσος όρος καθώς και η τυπική απόκλιση. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε για 15s παραμονής της πυραμίδας στην επιφάνεια και 1000g βάρος.

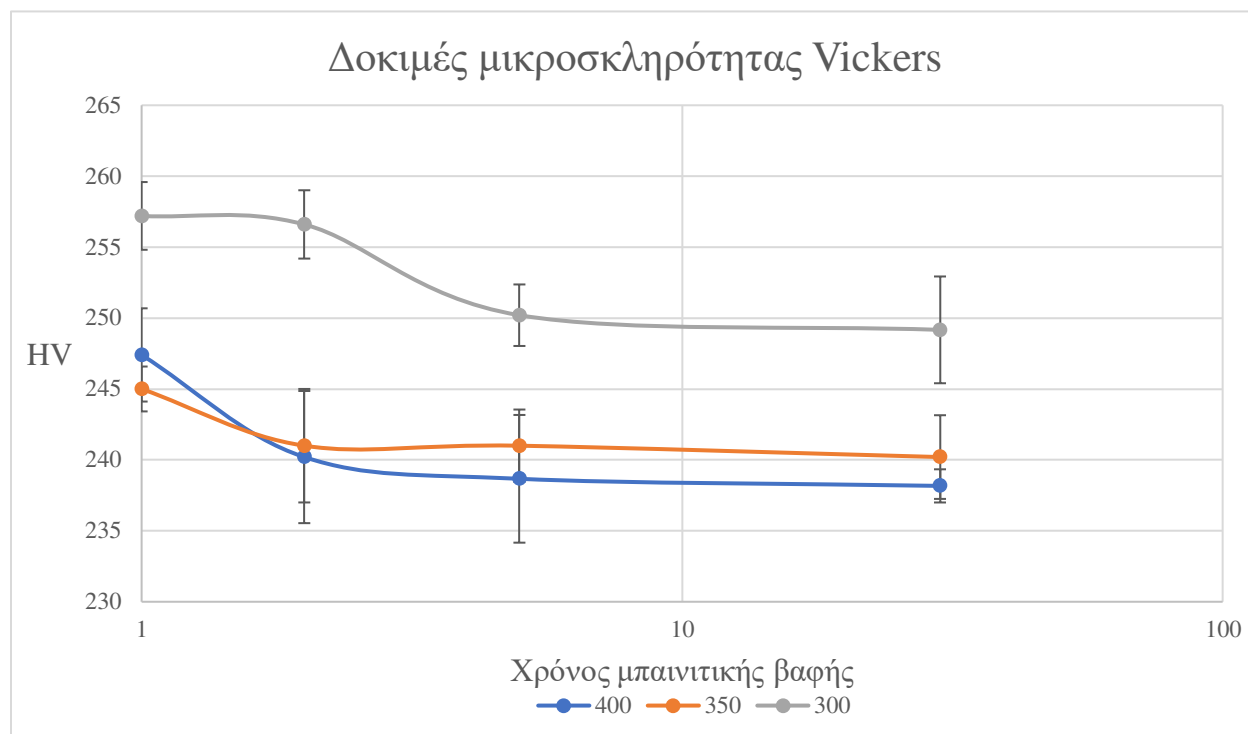
Πίνακας 17. Αποτελέσματα Μικροσκληρομετρήσεων Vickers

Δείγματα χαλύβων TRIP	ΜΟ	Τυπική απόκλιση
AR	238.3	5.2
WQ	264.7	5.7
FP	224.7	3.5
300-1	257.2	2.4
300-2	256.6	2.4
300-5	250.2	2.17
300-30	249.2	3.7
350-1	245	1.5
350-2	241	4
350-5	241	2.5
350-30	240.2	2.9
400-1	247.4	3.3
400-2	240.2	4.6
400-5	238.7	4.5
400-30	238.2	1.2

Από παραπάνω πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Το αρχικό δείγμα του χάλυβα TRIP 700 εμφανίζει την ίδια περίπου τιμή σκληρότητας με το δοκίμιο 400-5, επομένως, αυτή είναι η θερμική κατεργασία την οποία έχει υποστεί. Συγκρίνοντας τις μικρογραφίες των Εικόνων.
- Μεγαλύτερη σκληρότητα εμφανίζει το διφασικό δοκίμιο (WQ), καθώς αποτελείται από φερριτ-μαρτενσίτη, ενώ το δοκίμιο φερριτοπερλιτικής μικροδομής (FP) εμφανίζει την μικρότερη τιμή σκληρότητας.
- Αύξηση στην θερμοκρασία της μπαινιτικής βαφής σημαίνει και σχηματισμός μεγαλύτερου κλάσματος μπαινίτη σε μικρότερους χρόνους παραμονής. Επομένως, η σκληρότητα θα ξεκινά από μικρότερη τιμή, ενώ στην συνέχεια θα εμφανίζει πτωτική τάση.
- Κρατώντας την θερμοκρασία της μπαινιτικής βαφής, και όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής σε αυτήν, εμφανίζεται πτώση στην τιμή της σκληρότητας. Αυτό οφείλεται στον μπαινιτικό μετασχηματισμό, όπου μεγαλύτερο κλάσμα όγκου του μπαινίτη συνεπάγεται μείωση της σκληρότητας, καθώς αυτή η μορφολογία έχει ενδιάμεσες τιμές σκληρότητας του φερριτ και μαρτενσίτη, ενώ τα νησίδα του παραμένον ωστενίτης, , αποτελούν μια μαλακή φάση.

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου, παρακάτω παρατίθενται το σχετικό διάγραμμα των δοκιμών μικροσκληρότητας Vickers, σε σχέση με τον χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία μπαινιτικής βαφής.



Εικόνα 53 Μεταβολή της σκληρότητας Vickers ανάλογα της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής σε κάθε θερμοκή κατεργασία.

Από την εξέταση του παραπάνω διαγράμματος γίνεται αντιληπτό ότι:

- Υπάρχει διαφορά στις τιμές σκληρότητας για την θερμοκρασία των 300°C, σε σχέση με τις κάμπυλες των άλλων δύο θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στην πιθανή ύπαρξη μαρτενσίτη. Η θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υπολογίστηκε θεωρητικά πολύ κοντά στην θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε αυτή η μπαινιτική βαφή.
- Η τιμή της σκληρότητας για τους 300°C μειώνεται μετά τα 5min παραμονής, και αυτό οφείλεται πιθανόν στον αρκετό χρόνο που δόθηκε για σχηματισμό του μπαινίτη. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες, ο μπαινιτικός μετασχηματισμός συμβαίνει σε παρατεταμενους χρόνους.
- Για τις θερμοκρασίες των 350 και 400°C οι τιμές της σκληρότητας ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, με την σκληρότητα να ξεκινάει από υψηλές τιμές και να μειώνεται ήδη από το 2^ο λεπτό.
- Η διαφορά στην τιμή της σκληρότητας για το 1^ο λεπτό, στην μπαινιτική βαφή των 400°C, η οποία σύμφωνα με το υπόλοιπό σκέλος της καμπύλης, θα έπρεπε να βρίσκεται κάτω από αυτή των 350°C, και ενδεχομένως οφείλεται στην μεγάλη τυπική απόκλιση των μετρήσεων του δείγματος 350-1.
- Γενικότερα, παρατηρείται μια πτωτική τάση των τιμών μικροσκληρότητας, μέχρι ενός σημείου, ενώ ύστερα, αυτές διατηρούνται σχετικά σταθερές. Αυτή η μορφολογία των καμπυλών, υποδεικνύει την ανάπτυξη επαρκούς κλάσματος μπαινίτη, το οποίο αντιστοιχεί σε αυξημένη κινητική της αντίδρασης. Σε εκείνο το σημείο, επομένως, σταθεροποιείται ο παραμένων ωστενίτης, ενώ έπειτα, όταν η κινητική της μπαινιτικής αντίδρασης θα έχει εμφανώς επιβραδυνθεί, δεν θα εμφανίζονται περαιτέρω μεταβολές στην μικροδομή, και άρα στην μικροσκληρότητα.

2.8.4. Θεωρητικός Υπολογισμός Ορίου Διαρροής – Μέγιστης Εφελκυστικής Τάσης

Παρακάτω παρατίθενται ο πίνακας που περιλαμβάνει τις μικροσκληρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τις τιμές των ορίων θραύσης και μέγιστης εφελκυστικής αντοχής.

Λόγω του ότι ο υπολογισμός έγινε θεωρητικά, με την παραδοχή ότι οι προβλεπόμενες τιμές της δοκιμής εφελκυσμού είναι ανάλογες της σκληρότητας Vickers, τα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν σχετικά με την επίδραση της μικροδομής συμπίπτουν με αυτά που αναφέρθηκαν στο προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς:

- Αύξηση του χρόνου παραμονής στην μπαινιτική βαφή, μειώνει την αναμενόμενη τιμή των ορίων θραύσης και μέγιστης εφελκυστικής αντοχής.
- Αύξηση της θερμοκρασίας μπαινιτικής βαφής έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της καμπύλης σκληρότητας ανά τον χρόνο παραμονής σε μικρότερες τιμές.

Επιπρόσθετα όμως, παρατηρείται ότι για το αρχικό δείγμα (AR) με ονομαστική αντοχή 700MPa, αυτή υπολογίζεται στα 776,3MPa. Άρα, μέσω των συγκεκριμένων τύπων μπορεί να εκτιμηθεί με μια σχετική ακρίβεια η πρόβλεψη των τιμών του ορίου διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής. Προφανώς, μέσω αυτών των τύπων, δεν μπορεί να προβλεφθεί η αντίστοιχη ολκιμότητα στην οποία υπολογίζονται αυτά τα μεγέθη. Ωστόσο, βάσει των προαναφερθέντων, η παρουσία νησιδίων παραμένων οστενίτη, στην μικροδομή, αντιστοιχεί σε χαμηλότερες τιμές σκληρότητας και άρα των συνακόλουθων μηχανικών ιδιοτήτων, ωστόσο, ο μετασχηματισμός αυτών κατά την μηχανική καταπόνηση συνεπάγεται και την αύξηση της ολκιμότητας.

Πίνακας 18. Θεωρητικό Υπολογισμός του Ορίου Θραύσης και της Εφελκυστικής Αντοχής με βάση της σκληρότητα Vickers.

IBT – 300°C			
Χρόνος (min)	HV	YS (MPa)	TS (MPa)
1	257.2	562	838
2	256.6	560.8	836
5	250.2	546.8	815
30	249.1	544.5	811
IBT – 350°C			
1	245	535	798
2	241	526	785
5	241	526	785
30	240.2	524	782.5
IBT – 400°C			
1	247.4	540.7	805.9
2	240.2	525	782.5
5	238.6	521.6	777.5
30	238.1	520.5	775.8
AR	238.3	520.8	776.3

2.9. Συμπεράσματα

- **Αύξηση της θερμοκρασίας μπεινιτικής βαφής** έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού των φύτρων του μπεινίτη, την πάχυνση των φυλλαρίων και την ανάπτυξη αυτής της φάσης σε συντομότερους χρόνους παραμονής. Μεγαλύτερο κλάσμα μπεινίτη συνεπάγεται και μεγαλύτερη σταθερότητα του παραμένον ωστενίτη. Τα δοκίμια της ισοθερμοκρασιακής μπεινιτικής βαφής των 300°C, εμφάνισε μικροδομή που προσομοιάζει αυτή του διφασικού δοκίμιου (WQ), σε όλους τους χρόνους παραμονής σε αυτή. Η μπεινιτική μορφολογία είτε απουσιάζει, είτε βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας, η οποία βρίσκεται κοντά στην θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Αντιθέτως, για τις ισοθερμοκρασιακές μπεινιτικές βαφές των 350 και 400°C, η μπεινιτική μορφολογία μπορεί να διακριθεί ήδη από το 1^ο λεπτό.
- **Αύξηση του χρόνου παραμονής σε κάθε θερμοκρασία μπεινιτικής βαφής** οδήγησε σε πιο ανεπτυγμένη μπεινιτική μορφολογία, με μεγαλύτερο κλάσμα όγκου στην μικροδομή και επομένως σε μικρότερο κλάσμα όγκου των ευμεγέθων νησιδίων μαρτενσίτη και μικτής φάσης, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες.
- **Παρατεταμένοι χρόνοι παραμονής** οδήγησαν σε υπεργήρανση του παραμένον ωστενίτη. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν τα δοκίμια 350-30 και 400-30, όπου απαντώνται καρβίδια στην μικροδομή. Μεγαλύτερη αποσύνθεση παρατηρείται στους 350°C, επομένως, η μύτη της μπεινιτικής αντίδρασης βρίσκεται κοντά σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος.
- **Η θερμοκρασία και χρόνος παραμονής** στην ισοθερμοκρασιακή μπεινιτική βαφή αποτελούν δύο παραμέτρους που είναι αλληλοεξαρτώμενοι, ενώ διαφορετικοί συνδυασμοί αυτών οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα, αναφορικά με την ανάπτυξη της μπεινιτικής μορφολογίας και το κλάσμα όγκου που απαντάται στην μικροδομή.
- **Οι στοιχειακές αναλύσεις** καταδεικνύουν τον καταμερισμό των α και γ φερρογόνων στα διάφορα μικρογραφικά συστατικά και επομένως αυτές οι φάσεις μπορούν να επιβεβαιωθούν. Αυξημένα ποσοστά σε μαγγάνιο απαντώνται στον παραμένον ωστενίτη και στον μαρτενσίτη, ενώ το αλουμίνιο και το πυριτίο παρατερείται σε αυξημένο ποσοστό στον ενδοκρίσιμο και μπεινιτικό φερρίτη.
- **Η μεταβολή των αναλογιών α προς γ φερρογόνων**, σε συνδυασμό με την επίδραση του μεγέθους των κόκκων, από τα σχετικά διαγράμματα, υποδεικνύουν την ανάπτυξη της μικροδομής, στις διάφορες θερμικές κατεργασίες. Αναφορικά με τα νησίδια μαρτενσίτη – μαρτενσίτη/ωστενίτη, αύξηση του χρόνου παραμονής συνάγεται μείωση του μεγέθους του κόκκου, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε έναρξη μικρότερου μεγέθους. Ακόμη, αυξημένο μαγγάνιο εμφανίζεται σε μικρότερους κόκκους, που βρίσκεται στα όρια του ενδοκρίσιμου φερρίτη, και επομένως αυτοί μπορούν να αποδωθούν ως κόκκοι παραμένον ωστενίτη. Για την μπεινιτική μορφολογία, η αυξημένη αναλογία υποδουκνύει και το αυξημένο ποσοστό μαγγανίου το οποίο αποτελεί ένδειξη σταθερότητας του παραμένον ωστενίτη εντός της μπεινιτικής μορφολογίας.
- **Οι τιμές της μικροσκληρότητας** αντιστοιχούν στην ανάπτυξη της μικροδομής και επιβεβαιώνουν τις παρατηρήσεις των μικρογραφιών. Η παρουσία πολυάριθμων και ευμεγέθων νησιδίων μαρτενσίτη στα δοκίμια των 300°C αντιστοιχούν σε συγκριτικά υψηλότερες τιμές. Τα σημεία των καμπυλών που σημειώνουν ελάχιστο αντιστοιχούν στο σημείο σταθεροποίησης του παραμένοντος ωστενίτη στην μικροδομή. Αυτά τα σημεία αναφέρονται στα δοκίμια 300-5, 350-2 και 400-5.

Ακόμη, το δοκίμιο AR με το δοκίμιο 400-5 εμφάνισαν ίδιες τιμές μικροσκληρότητας, επομένως το αρχικό δοκίμιο, ενδεχομένως να έχει υποστεί την ίδια θερμική κατεργασία.

- **Το βέλτιστο κλάσμα όγκου μπεινιτικής μορφολογίας**, που συνεπάγεται και το βέλτιστο κλάσμα παραμένων ωστενίτη εμφανίζεται σύμφωνα με τις στοιχειακές αναλύσεις και τις δοκιμές μικροσκληρότητας στα δοκίμια 350-2 και 400-5. Το δοκίμιο των 300°C δεν αναφέρεται, καθώς η μπεινιτική μορφολογία ήταν σε πρόωμη στάδιο ή αρκετά λεπτομερής, ώστε να μην μπορεί να θεωρηθεί διακριτή φάση στις μετρήσεις EDS.
- **Θεωρητικοί υπολογισμοί του ορίου διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής** εμφανίζουν παρόμοια τάση συγκριτικά με τις τιμές σκληρότητας. Ακόμη, η χρήση αυτών των τύπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρόβλεψη αυτών των μηχανικών ιδιοτήτων, καθώς η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου (AR) υπολογίστηκε στα 777MPa, έναντι της ονομαστικής εφελκυστικής αντοχής των 700MPa.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Maalekian, «The Effects of Alloying Elements on Steels (I),» Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren, 2007.
- [2] E. C. Pavlina, «Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008.
- [3] D. G. R. William D. Callister Jr, *Materials Science and Engineering: An introduction*, Wiley , 2014.
- [4] Σ. Α. Παπαευθυμίου, *Τεχνολογία Υλικών, Β Έκδοση, Εκπαιδευτικό Υλικό για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού, Αθήνα : Ίδρυμα Ευγενίδου*, 2017.
- [5] «General Motors Internal Report».
- [6] «International Energy Outlook,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: www.iea.org.
- [7] «ICCT,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.theicct.org.
- [8] «WorldAutoSteel,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.worldautosteel.org.
- [9] «EU-NCAP,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.euroncap.com.
- [10] W. J. Witteman, Thesis "Improved Vehicle Crashworthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situations", Eindhoven University of Technology, 1999.
- [11] A. Abraham, «PowerPoint presentation "Future Growth of AHSS",» σε *Great Designs in Steel Semina*, 2011.
- [12] A. Partnership, «“A Special Edition of AHSS Case Studies.” Advanced High-Strength Steel Applications: Design and Stamping Process Guidelines,» 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://a-sp.org/database/custom/01-2010%20-%20AHSS%20Applications%20Guidelines%20-%20Final.pdf>].
- [13] «ArcelorMittal,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.arcelormittal.com/>.
- [14] W. Bleck, X. Guo και Y. Ma, «The TRIP Effect and Its Application in Cold Formable Sheet Steels,» *Steel Research International*, τόμ. 88, αρ. 10, 2017.
- [15] W. Bleck, «Using the TRIP effect - the dawn of a promising group of cold formable steels,» σε *International Conference on TRIP-aided High Strength Ferrous Alloys*, Gent, Belgium, 2002.

- [16] B. D. Cooman, «Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite,» *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, τόμ. 8, pp. 285-303, 2004.
- [17] L. Pei, L. Jun, Qingge Meng, H. Wenbin και X. Dechao, «Effect of heating rate on ferrite recrystallization and austenite formation of cold-roll dual phase steel,» *Journal of Alloys and Compounds* 578, pp. 320-327, 10 june 2013.
- [18] K. Andrews, «Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures,» *Journal of the Iron and Steel Institute*, αρ. 203, 1965.
- [19] S. P. e. al., «Development of Ductile Ultra High Strength Hot Rolled Steels,» Posco Technical Report, 1996.
- [20] H. Bhadeshia, *Bainite in Steel: Theory and Practice*, 3rd Edition, CRC Press, 2015.
- [21] W. a. A. H. Steven, «“The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-Alloy Steels.”,» *Journal of the Iron and Steel Institute*, τόμ. 8, αρ. 183, p. 349–59, 1956.
- [22] N. K. a. K. K. N. Imai, «Effect of Alloying Element and Microstructure on Mechanical Properties of Low-Alloy TRIP-Steels,» *CAMP-ISIJ*, τόμ. 8, pp. 572-575, 1995.
- [23] M. M. T. S. W. W. R. Bode, «Selection and use of coated AHSS for automotive applications,» *Stahl Eisen*, τόμ. 8, pp. 19-24, 2004.
- [24] F.B. Pickering, «Structure-property relationships in steels,» σε *Cahn et al. (Eds.), Materials Science and Engineering*, Wiley, 1993, pp. 45-79.
- [25] H. Bhadeshia, *Bainite in Steels Transformations, Microstructure and Properties*, 2nd Edition,, 1992.
- [26] B. HKDH, «‘BAINITE IN STEELS. Transformation, Microstructure and Properties’, Second Edition,» IOM Communication LTD, 2001, pp. 362-366, 140-141.
- [27] M. D. K. G. Jeong WC, «‘Observation of deformation and transformation behavior of retained austenite in a 0.14C-1.2Si-1.5Mn steel with ferrite bainite austenite structure’»,» *Materials Science Engineering*, τόμ. A165, αρ. (1), pp. 1-8.
- [28] D. F. Jacques P.J. Ladriere J., «‘One the influence of interactions between phases on the mechanical stability of retained austenite in transformation-induced plasticity multiphase steels’»,» *Metall. Mater. Trans*, pp. 2759-2768, 2001.
- [29] K. F. M. S. J. Hidalgo, «Thermal and mechanical stability of retained austenite surrounded by martensite with different degrees of tempering,» *Materials Science &Engineering*, τόμ. A, 2017.
- [30] E. J.-M. L. Z. J. W. E. B. S. v. d. Z. N. v. D. R. Blonde, *Acta Mater*, τόμ. 60, p. 565–577, 2012.

- [31] B. L. J. B. A. P. J. Chiang, «Effect of microstructure on retained austenite stability and work hardening of TRIP steels,» *Materials Science and Engineering*, τόμ. A, αρ. 528, pp. 4516-4521, 2011,.
- [32] P. H. E. P. I. B. Timokhima, «Effect of microstructure on the stability of retained austenite in transformation-induced-plasticity steels,» *Metallurgical and Materials Transactions A*, αρ. 35, pp. 2331-2341, 2004.
- [33] Q. F. F. L. T. P. F. D. PJ Jacques, «Multiscale mechanics of TRIP-assisted multiphase steels: I. Characterization and mechanical testing,» *Acta Materialia*, τόμ. 55, αρ. 11, pp. 3681-3693, 2007.
- [34] W. B. a. A. K. R. Cahoon, «The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements,» *Metall. Trans.*, τόμ. 2, p. p 1979–1983, 1971.
- [35] J. Cahoon, «An Improved Equation Relating Hardness to Ultimate,» *Metall. Trans.*, τόμ. 3, p. p 3040, 1972.
- [36] S. P. A. B. M. R. B. K. C. W. E. Traint, «Alloy design, processing and properties of TRIP steels: A critical comparison,» *International Conference on Advanced High Strength Sheet Steels for Automotive Applications - Proceedings*, pp. pp 79-98, 2004.
- [37] M. Peet, «Bainitic steels and alloys for power plants,» σε *Structural Alloys for Power Plants*, Woodhead Publishing, 2014, pp. 153-187.
- [38] M. C. G.B. Olson, «A mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic,» *Less Common Metals*, pp. 107-118, 1972.
- [39] D. Yalcin, «How do different specimen geometries affect tensile test results?,» 2017.
- [40] DuckerWorldWide. [Ηλεκτρονικό]. Available: www.ducker.com.
- [41] A. Abraham, «Metallic material trends in the North American light vehicle,» σε *Great Designs in Steel Seminar*, 2015.
- [42] A. KONIECZNY, *Advanced High Strength Steels – Formability*. Great Designs in Steel, American Iron and Steel Institute, 2003.
- [43] 1. Hanzaki et al., 2. Hashimoto et al., 2. b. Jacques et al, 2. Jiao et al., 2. 2. Kim et al., 1. Matsumura et al., 1. Sugimoto et al., 2. Sugimoto et al. και S. 2007.
- [44] C. K. W. S. L. Z. J. S. M.J. Santofimia, «Experimental study of the distribution of alloying elements after the formation of epitaxial ferrite upon cooling in a low-carbon steel,» *Materials Characterization*, τόμ. 61, αρ. 10, 2010.