



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ**

**Σύγκριση συγκολλήσεων χαλύβδινων τμημάτων μεταξύ πλαισίων
Go-Kart**

**Διπλωματική Εργασία
Ιωάννης Τρανός**

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Καθηγητής

Αθήνα, 2024

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 22/07/2024

Σπ. Παπαευθυμίου, Καθηγητής(Υπογραφή)
Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής(Υπογραφή)
Π. Τσακνρίδης, Επίκουρος Καθηγητής(Υπογραφή)

Πίνακας Περιεχομένων

<i>Πίνακας Περιεχομένων</i>	2
<i>Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων</i>	4
<i>Ευχαριστίες</i>	7
<i>Σύνοψη</i>	8
<i>Abstract</i>	8
<i>Εισαγωγή</i>	9
1. Θεωρητικό Μέρος	10
1.1. Οι χάλυβες	10
1.1.1. Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες	10
1.1.2. Κραματομένοι χάλυβες	10
1.2. Διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας Σιδήρου – Ανθρακα	11
1.2.1. Φερρίτης (α).....	12
1.2.2. Ωστενίτης (γ).....	12
1.2.3. Σεμεντίτης (Fe ₃ C).....	13
1.2.4. δ-φερρίτης	14
1.2.5. Μαρτενσίτης	14
1.2.6. Μπαινίτης.....	15
1.3. Μετασηματισμοί φάσεων χαλύβων	15
1.3.1. Μετασηματισμός Ωστενίτη – φερρίτη	16
1.3.2. Περλιτικός Μετασηματισμός	19
1.3.3. Μαρτενσιτικός Μετασηματισμός.....	20
1.3.4. Μπαινιτικός Μετασηματισμός	21
1.4. Κραματικά Στοιχεία στους Χάλυβες	23
Άνθρακας (C):.....	24
Χρόμιο (Cr):	24
Νικέλιο (Ni):	24
Μαγγάνιο (Mn):	24
Φώσφορος (P):	25
Θείο (S):	25
Μολυβδαίνιο (Mo):	25
Άζωτο (N):	25
Κοβάλτιο (Co):.....	25
Βολφράμιο (W), Βανάδιο (V), Τιτάνιο (Ti), Νιόβιο (Nb):	25
1.5. Θερμικές Κατεργασίες	26
1.5.1. Ανόπτηση	26

1.5.2.	Βαφή	29
1.5.3.	Επαναφορά.....	30
1.6.	Ο Χάλυβας 4130.....	30
	Χημική Σύνθεση	31
	Μηχανικές Ιδιότητες	31
	Συγκολλησιμότητα.....	31
	Μικροδομή.....	31
1.7.	Συγκόλληση τόξου χάλυβα 4130 σε αδρανή ατμόσφαιρα	32
1.7.1.	Gas Tungsten Arc Welding(GMAW)/TIG	32
1.7.2.	Οι μέθοδοι MIG/MAG.....	34
2.	Πειραματικό μέρος.....	35
2.1.	Μεθοδολογία	35
2.2.	Μεταλλογραφική προετοιμασία	35
2.2.1.	Κοπές	35
2.2.2.	Λειάνσεις	36
2.2.3.	Χημική προσβολή	37
2.3.	Μετρήσεις μηχανικών ιδιοτήτων	37
2.3.1.	Σκληρομέτρηση κατά Vickers	37
3.	Αποτελέσματα.....	39
3.1.	Μηχανικές Ιδιότητες	39
3.2.	Οπτική μικροσκοπία	40
3.2.1.	Δομικοί σωλήνες.....	40
3.2.2.	Μελέτη συγκολλήσεων	43
4.	Συζήτηση των αποτελεσμάτων.....	52
4.1.	Δομικοί Σωλήνες.....	52
4.2.	Θερμικά επηρεασμένες ζώνες.....	52
4.3.	Μελέτη συγκολλήσεων.....	52
5.	Συμπεράσματα	53
6.	Βιβλιογραφία.....	54

Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

Εικόνα 1. Μετασταθές Διάγραμμα Σιδήρου-Ανθρακα(8)	11
Εικόνα 2 Οπτική μικροσκοπία πλήρους φερριτικής μικροδομής (8)	12
Εικόνα 3. Τυπική μικροδομή Ωστενίτη (9).....	13
Εικόνα 4. Μορφολογία Μαρτενσίτη (17)	15
Εικόνα 5. Καμπύλη ψύξης συγκόλλησης για τον προσδιορισμό των παρακάτω μορφολογιών (22)...	17
Εικόνα 6. Αναπαράσταση της πυρήνωσης του αλλοτριόμορφου φερρίτη (23).....	18
Εικόνα 7. Widmanstätten φερρίτης πυρηνωμένος στα όρια του πρώην Ωστενίτη σε περλιτική μήτρα. (33).....	18
Εικόνα 8. Σχηματισμός Α) υποευτηκτοειδούς περλίτη, Β) ευτηκτοειδούς περλίτη, Γ) υπερευτηκτοειδούς περλίτη (31).....	20
Εικόνα 9. Μορφολογίες σε μικροσκόπιο από ανώτερο και κατώτερο μπαινίτη αντίστοιχα.	22
Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση σταδίων μετασχηματισμού του ανώτερου μπαινίτη (16).....	22
Εικόνα 11. Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων του μετασχηματισμού του κατώτερου μπαινίτη (16).....	23
Εικόνα 12. Μικροφωτογραφίες ενός χάλυβα 1080 που ωστενιτοποιήθηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες και στη συνέχεια μετασχηματίστηκε σε φερρίτη στους 726°C. Η επάνω εικόνα, (a) είναι από ωστενιτοποίηση του χάλυβα στους 751°C, (b) στους 787°C, (c) στους 871°C και (d) στους 954°C. Η ωστενιτοποίηση στους 751°C οδήγησε σε σφαιροειδοποιημένα καρβίδια, λίγος περλίτης είναι ορατός όταν ωστενιτοποιείται στους 787°C, ο χάλυβας είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου περλιτικός όταν ωστενιτοποιείται στους 871°C και πλήρως περλιτικός όταν ωστενιτοποιείται στους 954°C (48)	28
Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου TIG(61).....	33
Εικόνα 14. Τυπική διάταξη εξοπλισμού της μεθόδου TIG(62)	33
Εικόνα 15. Τυπική διάταξη εξοπλισμού της μεθόδου MIG(62)	34
Εικόνα 17. Σκαρίφημα του σασί.	35
Εικόνα 18. Struers Laborol-5	37
Εικόνα 18 Μέθοδος σκληρομέτρησης Vickers(63)	38
Εικόνα 19. Σκληρότητα δομικών σωλήνων (Κατά Vickers).	39
Εικόνα 20. Συγκολλημένοι σωλήνες σκληρότητα (Μέτρηση σε Vickers).	39
Εικόνα 21. Σύγκριση σκληροτήτων των χαλύβων που συγκολλήθηκαν(HV 0.5).	40
Εικόνα 22. Δομικοί σωλήνες οπίσθιου τμήματος(back).Στην φωτογραφία Α) Α και Β)Β. Παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή και στις 2 περιπτώσεις με λίγο πιο χονδρόκοκη στην δεύτερη και ο προσανατολισμός των κόκκων λόγω της κατεργασίας διέλασης. Πολύ μικρή διαφορά στη σκληρότητα.	40
Εικόνα 23. Δομικοί σωλήνες αριστερού τμήματος(left) στο Α και Β σασί αντίστοιχα. Παρατηρούνται γραμμές διέλασης και στις δύο περιπτώσεις. Η χαμηλότερη σκληρότητα στο ΟΤΚ μπορεί να εξηγηθεί από την πιο χονδρόκοκη δομή του φερρίτη. Η μικροδομή είναι επίσης φερριτοπερλιτική	41
Εικόνα 24. Δομικοί σωλήνες κεντρικού τμήματος(mid) με πολύ κοντινές σκληρότητες. Ενώ φαίνεται χονδρότερη μικροδομή στο Α, στην πραγματικότητα οι κόκκοι φερρίτη είναι πεπλατυμένοι λόγω της παραμόρφωσης που εισήχθη κατά τη διέλαση και είναι πολύ κοντά σε μέγεθος μεταξύ τους. Οι γραμμές διέλασης στο Α είναι λιγότερες και πιο δυσδιάκριτες	41

- Εικόνα 25. Δομικοί σωλήνες δεξιού τμήματος(right) στο A)A και B)B σασί. Οι γραμμές διέλασης είναι πολύ πιο φανερές για το A σε σχέση με το κεντρικό της ίδιας εταιρίας καθώς και με της B τόσο για το δεξί όσο και για το κεντρικό τμήμα. Έντονη διαφορά στις σκληρότητες και στο μέγεθος κόκκου μεταξύ των δύο. 41
- Εικόνα 26. Δομικοί σωλήνες εμπρόσθιου τμήματος(front) στο A)A και B)B σασί. Οι μικροδομές αν και οι δύο είναι φερριτοπερλιτικές έχουν διαφορά στο μέγεθος και το σχήμα κόκκου. Οι κόκκοι του B είναι εντόνως παραμορφωμένοι σε σχέση με της A που εξηγούν και τη διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ τους σε συνδυασμό με το μέγεθος κόκκου. 42
- Εικόνα 27. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος C στο A σασί. Αρκετά πιο χονδρόκοκη δομή παρατηρείται στο Base metal 1(BS1). Το BS2 φαίνεται να έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα εμφανίζει όμως αυξημένη σκληρότητα σε σχέση με το BS1 που μπορεί να αποδοθεί στη διαφορά του μεγέθους κόκκων. Παρατηρούνται επίσης διασκορπισμένα καρβίδια(Fe_3C)..... 43
- Εικόνα 28. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος C στο A σασί. Βελονοειδής μορφολογία μαρτενσίτη στην HAZ1 με τυχαίους προσανατολισμούς που εξηγεί και την πολύ αυξημένη σκληρότητα. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε μικρότερο μέγεθος κόκκων, όμως πολύ χαμηλότερη σκληρότητα καθώς εδώ η μικροδομή είναι μπεινιτική. Η διαφορά μεταξύ των δομών μπορεί να αποδοθεί στη συμπεριφορά τους κατά την απόψυξη λόγω εμβαπτότητας μιας και πιθανότατα πρόκειται για 2 διαφορετικά υλικά. 43
- Εικόνα 29. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος C στο A σασί. Παρατηρούνται κόκκοι αλλοτριόμορφου φερρίτη στη ζώνη τήξης. Φανερή HAZ και πόροι στην ατελή συγκόλληση. Στη συγκόλληση με το BS1 παρατηρείται κιονοειδής δομή εν αντιθέσει της ισοαξονικής στην συγκόλληση με το BS2. 44
- Εικόνα 30. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος C στο B σασί. Έντονη φερριτοπερλιτική μικροδομή στο BS1 συγκριτικά με το BS2. Οι διαφορές μεταξύ BS1 κ BS2 στα μεγέθη κόκκων, πιθανότατα στη χημική τους σύσταση και στη σκληρότητα. Έχουμε ανισορροπία γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης 44
- Εικόνα 31. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος C στο B σασί. Όπως και στην περίπτωση της A, έχουμε πολύ μεγάλη αύξηση της σκληρότητας στο BS1, ενώ στο BS2 υπάρχει πτώση αυτής(σε αντίθεση με της A). Μαρτενσιτική μικροδομή μόνο στο BS1 με ελαφρά διασπορά καρβιδίων Fe_3C και στις 2 περιπτώσεις. Ξεκάθαρη διαφορά των 2 υλικών γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης..... 45
- Εικόνα 32. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος C στο B σασί. Φανερή ΘΕΖ στο BS2. Η συγκόλληση επίσης δεν είναι πλήρης όμως έχει διεισδύσει πιο πολύ στο BS2. Δεν παρατηρούνται άλλες αστοχίες στη συγκόλλησης..... 45
- Εικόνα 33. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο A σασί. Υπάρχουν διαφορές στην αναμενόμενη σκληρότητα βάση προηγούμενων μετρήσεων ειδικά στο BS1. Φαίνονται οι γραμμές διέλασης στο BS2 κ παρόμοια φερριτοπερλιτική δομή μεταξύ των 2 με τη κύρια διαφορά στην παραμόρφωση της μικροδομής του BS2. Γενικά δεν υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης των συγκολληθέντων τεμαχίων..... 46
- Εικόνα 34. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο A σασί. Βλέπουμε 2 παρόμοιες βελονοειδείς δομές με σχετικά κοντινές σκληρότητες. Μικροδομή μπεινιτικού φερρίτη που συναντήθηκε και σε προηγούμενες μικροφωτογραφίες..... 46
- Εικόνα 35. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο A σασί. Αστοχία συγκόλλησης λόγω ατελούς τήξης/μη επαρκούς διείσδυσης. Η επιφάνεια του συγκολλημένου τμήματος BS2 (μαύρη γραμμή) είναι αναλογικά πολύ μικρότερη σε σχέση με του BS1 (μπλε γραμμή). Μικρή διείδυση και στα 2 μέταλλα βάσης. 47
- Εικόνα 36. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο B σασί. Έντονη διαφορά γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης. Αρκετά πιο λεπτομερής η δομή κόκκων στο BS2 με

μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ τους. Οι αναμενόμενες σκληρότητες βάση μετρήσεων στους δομικούς σωλήνες είναι πολύ παραπλήσιες με των μετρήσεων στα συγκεκριμένα μέταλλα βάσης.... 47

Εικόνα 37. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο B σασί. Παρόμοιες δομές με αυτή στην περίπτωση της A, καθώς παρατηρείται πάλι η δομή του παινιτικού φερρίτη. Μικρή διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ των ΘΕΖ. 48

Εικόνα 38. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο B σασί. Ατέλεια συγκόλλησης λόγω ατελούς τήξης. Ωστόσο, συγκριτικά με το A μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας προς συγκόλληση του BS2 έχει ενσωματωθεί στη ζώνη τήξης, και φαίνεται πως έχει γίνει καλύτερη προετοιμασία πριν τη συγκόλληση στην συγκεκριμένη επιφάνεια. Τέλος, έχουμε καλύτερη αναλογία συγκολλημένων επιφανειών BS1/BS2. Η διείδυση ειδικότερα στο BS1 είναι αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με το A. 48

Εικόνα 39. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του Hub στο A σασί. Αρκετά πιο χονδρόκοκη δομή στο BS1, ενώ φαίνεται να είναι πολύ πιο φτωχό σε άνθρακα σε σχέση με το BS2. Έντονη διαφορά γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης και διαφορές στη σκληρότητα. 49

Εικόνα 40. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του Hub στο A σασί. Παρατηρούμε 2 τελείως διαφορετικές μικροδομές. Ελαφρά αύξηση της σκληρότητας στην HAZ1 λόγω εκλέπτυνσης της μικροδομής χωρίς αλλαγή στη μορφολογία. Στην HAZ2 τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά με πολύ μεγάλη αύξηση στη σκληρότητα και βελονοειδή πλέον μορφολογία..... 49

Εικόνα 41. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του Hub στο A σασί. Ατέλεια μη πλήρωσης στη ρίζα της μονοπλευρούς συγκόλλησης και ελαφρά ανεπαρκής πλήρωση στο κυκλωμένο τμήμα. Μικρή διείδυση και στα 2 μέταλλα βάσης..... 50

Εικόνα 42. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του Hub στο B σασί. Πολύ μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα των 2 υλικών, στο μέγεθος κόκκων τους και στην περιεκτικότητα τους σε άνθρακα με το BS2 να έχει τη χαμηλότερη. Προφανώς πρόκειται για 2 διαφορετικά υλικά. 50

Εικόνα 43. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του hub στο B σασί. Βελονοειδής μικροδομή στην HAZ1 με πολύ αυξημένη σκληρότητα εν αντιθέσει με την HAZ2 στην οποία έχουμε μικρή αύξηση στη σκληρότητα χωρίς την εμφάνιση ισοαξονικών κόκκων όπως στο BS2 από το οποίο προέρχεται..... 51

Εικόνα 44. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του Hub στο B σασί. Εδώ έχουμε μία επιτυχημένη πλήρη συγκόλληση, χωρίς δομικές ατέλειες και πολύ καλή διείδυση και στα 2 μέταλλα βάσης. 51

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο νιώθω την ανάγκη να γράψω λίγα λόγια για να αναγνωρίσω ανθρώπους, οι οποίοι συνέβαλαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Έτσι, δράττομαι της ευκαιρίας να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, που είναι σπουδαίοι επιστήμονες και καθηγητές, τους κ.κ. Dr.-Ing. Σπύρο Παπαευθυμίου, Δρ. Γεώργιο Φούρλαρη και Δρ. Πέτρο Τσακίριδη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου Dr.-Ing. Σπύρο Παπαευθυμίου για την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας μου.

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Ευάγγελο Γαβαλά που μου έδειξε εμπιστοσύνη, καθώς και την ευκαιρία να δουλέψω πάνω σε αυτό το θέμα καθώς μου παραχώρησε το υπό εξέταση υλικό.

Ευχαριστώ ειλικρινά τον Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργό και υποψήφιο Διδάκτωρ ΕΜΠ Βασίλειο Λουκαδάκη για την εκπαίδευση και βοήθεια στην μεταλλογραφική προετοιμασία.

Θέλω να ευχαριστήσω και τον Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργό και υποψήφιο Διδάκτωρ ΕΜΠ Σπυρίδων Χασκή για την βοήθεια που έλαβα στις τεχνικές ανάλυσης χαλύβων, στη καθοδήγηση και στις συζητήσεις που είχαμε επί των αποτελεσμάτων μεταλλογραφίας και οπτικής μικροσκοπίας καθώς και τον Αλέξανδρο Μπάνη για το χρόνο που διέθεσε προς καθοδήγηση κ επιμέλεια της εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά και τους φίλους μου για την στάση και υποστήριξη τους απέναντι μου καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Σύνοψη

Αντικείμενο μελέτης αποτέλεσαν δύο, σύγχρονης κατασκευής, σκελετοί Kart στους οποίους παρατηρήθηκαν από τις αντίστοιχες ομάδες που τα χρησιμοποιούν σε αγώνες, έντονες διαφορές στην τελική απόδοση του συνόλου καθώς και προβλήματα μετά την λήξη τους. Πιο συγκεκριμένα ο ένας εκ των δύο (B-Πορτοκαλί), ο οποίος θεωρείται ανώτερος, πέρα από τους ταχύτερους χρόνους, παρουσιάζει και λιγότερες παραμορφώσεις με τη λήξη του κάθε αγώνα σε σχέση με τον ανταγωνιστή (A-Μπλε). Επίσης, ο A σκελετός πολύ συχνά αστοχούσε κατά την διάρκεια επαναφοράς του στις αρχικές του διαστάσεις (καλιμπράρισμα), διαδικασία στην οποία έπρεπε να υπόκειται με μεγαλύτερη συχνότητα. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι φυσιολογικές και αναμενόμενες, καθώς το σύστημα απόσβεσης κραδασμών που αξιοποιείται σε τέτοιου τύπου οχήματα, αποτελεί ο σκελετός, ο οποίος απορροφά πολύ πιο άμεσες και έντονες δυνάμεις από ένα όχημα που χρησιμοποιεί παραδοσιακές αναρτήσεις τύπου Coilover. Ένα τέτοιο σύστημα μειώνει δραστικά την καταπόνηση στον σκελετό του οχήματος, αλλά αυξάνει το βάρος, την πολυπλοκότητα, το κόστος και τον χρόνο κατασκευής, συντήρησης και συναρμολόγησης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται χάλυβες Cr-Mo, οι οποίοι παρουσιάζουν σε εντονότερο βαθμό ελαστική παραμόρφωση από κοινούς ανθρακούχους χάλυβες. Παρακάτω αναλύονται τέτοιου τύπου χάλυβες, δίνοντας έμφαση στον 4130, οι μέθοδοι συγκόλλησης αλλά και συγκριτικά αποτελέσματα, μηχανικών και μικροσκοπικών αναλύσεων από σημεία μηχανικής καταπόνησης μέσω ληφθέντων δοκιμίων από σημεία στα οποία παρατηρούνται συχνότερα αστοχίες, καθώς και αντίστοιχων συγκολλημένων τμημάτων. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών και τις μικροφωτογραφίες μπόρέσαμε να συμπεράνουμε πως πρωταγωνιστικό ρόλο για τις διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ τους είναι οι συγκολλήσεις.

Abstract

The object of the study were two Kart frames of modern construction, in which strong differences in the final performance of the whole were observed by the respective teams that use them in racing competitions. More specifically, one of the two (B-Orange), which is considered superior, in addition to the fastest times, also presents less distortions at the end of each race compared to the competitor (A-Blue). Also, the A chassis very often failed during resetting to its original dimensions (calibration), a process to which it had to undergo with greater frequency. These deformations are normal and expected, as the shock absorption system used in this type of vehicle is the frame, which absorbs much more direct and intense forces than a vehicle that uses traditional coilover suspensions. Such a system drastically reduces the stress on the vehicle frame, but increases the weight, complexity, cost and time of construction, maintenance and assembly. For this reason, Cr-Mo steels are used, which exhibit a stronger elastic deformation than common carbon steels. Below, such steel types are being analyzed, mainly focusing on 4130, the welding methods as well as comparative results of mechanical and microscopic analyses of mechanical stress where failures are most often observed, as well as corresponding welded parts, from samples that were cut from the chassis. Using the results of the tests and the microphotographs we were able to conclude that the leading role for the differences presented between them are the welds.

Εισαγωγή

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται τόσο στην αυτοκινητοβιομηχανία όσο και στον μηχανοκίνητο αθλητισμό έρχονται αντιμέτωποι με μία πληθώρα δυνάμεων. Καλούνται να υποστηρίξουν πολυάριθμους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης και όλα τα γνωστά είδη τάσεων (εφελκυστικές, διατμητικές κλπ.) Ο 25CrMo4 ή αλλιώς 4130, είναι ένας μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα χαμηλής κραμάτωσης χάλυβας, που χρησιμοποιείται συχνά για εξαρτήματα με υψηλά φορτία στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, τη βιομηχανία και την αεροπορία. Μεταξύ άλλων, κατασκευάζονται βίδες, στροφαλοφόροι άξονες, κλωβοί ασφαλείας (Roll Cages), εξαρτήματα πλαισίου και πλαίσια οχημάτων. Λόγω της χημικής του σύστασης, ο 4130 είναι κατάλληλος για σκλήρυνση και έχει αντοχή εφελκυσμού άνω των 650 N/mm² όταν είναι σκληρυμένος. Προτιμάται για την καλή συγκολλησιμότητα και την ευκαμψία του.(1)

1. Θεωρητικό Μέρος

1.1. Οι χάλυβες

Ως χάλυβες ορίζουμε τα κράματα σιδήρου-άνθρακα με περιεκτικότητα σε επί τοις 100 κατά βάρος άνθρακα (C) από 0,025% έως 2,1%. Χαρακτηριστικό αυτών, είναι πως κατά την απόψυξή τους από την κατάσταση τήγματος έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος, περνούν μέσα από την μονοφασική περιοχή του ωστενίτη, ενώ το ίδιο μπορεί να συμβεί και με αναθέρμανση του στερεού χάλυβα σε κατάλληλη θερμοκρασία έτσι ώστε να μετατραπεί σε ωστενίτη (ωστενιτοποίηση). (2)

Η ταξινόμηση των χαλύβων πραγματοποιείται (3):

- Ανάλογα με την χημική τους σύσταση, όπου διακρίνονται σε κοινούς (ή ανθρακούχους) και κραματωμένους.
- Ανάλογα τον προορσμό τους, όπου διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χυτοχάλυβες.
- Ανάλογα με τη χρήση τους, όπου χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες όπως είναι οι δομικοί χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι πυρίμαχοι χάλυβες, οι χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών και οι ανοξειδωτοι χάλυβες

1.1.1. Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες

Περιέχει, εκτός από άνθρακα, <1% κ.β. μαγγάνιο (Mn) και πολύ μικρές ποσότητες <0,05% κ.β. θείου (S), πυριτίου (Si), φωσφόρου (P) και οξυγόνου (O), που συνήθως αποτελούν ακαθαρσίες από τη διαδικασία παραγωγής του σιδήρου.

1.1.2. Κραματωμένοι χάλυβες

Περιέχει υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων

και μπορεί να ανήκει στις παρακάτω υποκατηγορίες:

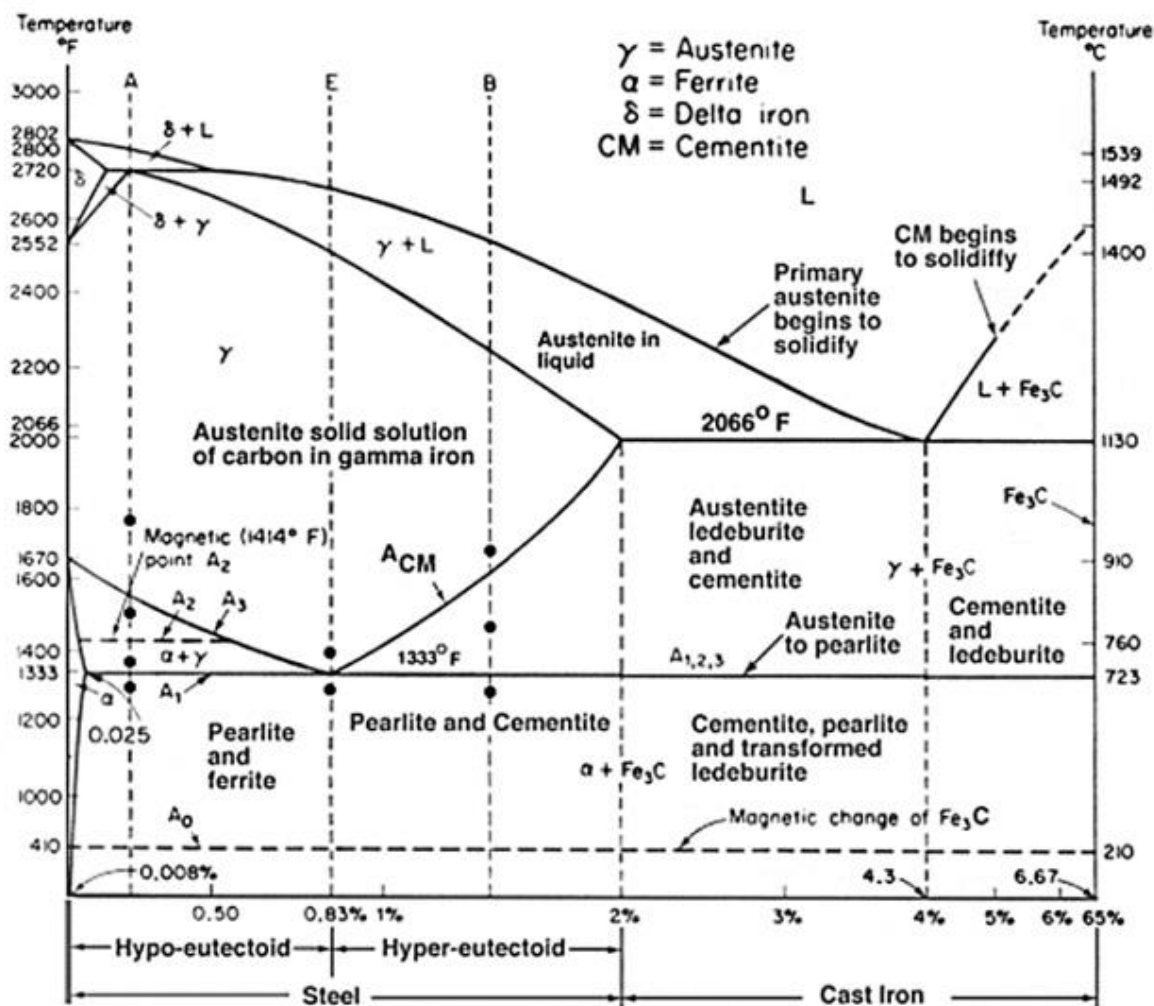
- Ελαφρά κραματωμένος με προσμείξεις <2%, όπως δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.
- Μέτρια κραματωμένος με προσμείξεις από 2% έως 10%.
- Ισχυρά κραματωμένος με προσμείξεις >10%, όπως ανοξειδωτοι χάλυβες, εργαλειοχάλυβες, ταχυχάλυβες και χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging).

Ειδικότερα χάλυβες της πρώτης κατηγορίας, μπορούν να ταξινομηθούν και με βάση την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (C) ως εξής:

- Ευτηκτοειδείς: Με περιεκτικότητα σε άνθρακα ίση με 0,80%.
- Υπερευτηκτοειδείς : Με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,80-2,00%.
- Υποευτηκτοειδείς : Με περιεκτικότητα σε άνθρακα <0,80%, οι οποίοι με τη σειρά τους υποδιαιρούνται σε:
 - Μαλακούς χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,10-0,25%.
 - Χάλυβες μεσαίου ποσοστού C, 0,25-0,60%.
 - Χάλυβες υψηλού ποσοστού C, 0,60-2,10%.(4),(5),(6),(7)

1.2. Διάγραμμα θερμοδυναμικής ισορροπίας Σιδήρου – Άνθρακα

Το διάγραμμα σιδήρου – άνθρακα ή αλλιώς μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη παρουσιάζει μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον το οποίο απεικονίζει τους άξονες της θερμοκρασίας (°C) και των ποσοστών του σιδήρου (Fe) με τον άνθρακα (C). Στον άξονα-χ μετριέται το ποσοστό του άνθρακα, σε βάρος του σιδήρου, από 0% όπου βρίσκεται ο καθαρός σίδηρος μέχρι 6,67% όπου αντιστοιχεί στη χημική σύνθεση του σεμεντίτη (Fe₃C). Οι χάλυβες έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι εμφανίζουν φαινόμενα αλλοτροπίας ή αλλιώς πολυμορφισμού που σχηματίζει ο σίδηρος με την παρουσία άνθρακα.



Εικόνα 1. Μετασταθές Διάγραμμα Σιδήρου-Άνθρακα(8)

Για την καλύτερη κατανόηση των χαλύβων χρειάζεται η μελέτη του μετασταθούς διαγράμματος σιδήρου-σεμεντίτη που περιγράφει τις φάσεις του για κάθε θερμοκρασία.

Σε τρία σημεία έχουμε τριφασική ισορροπία

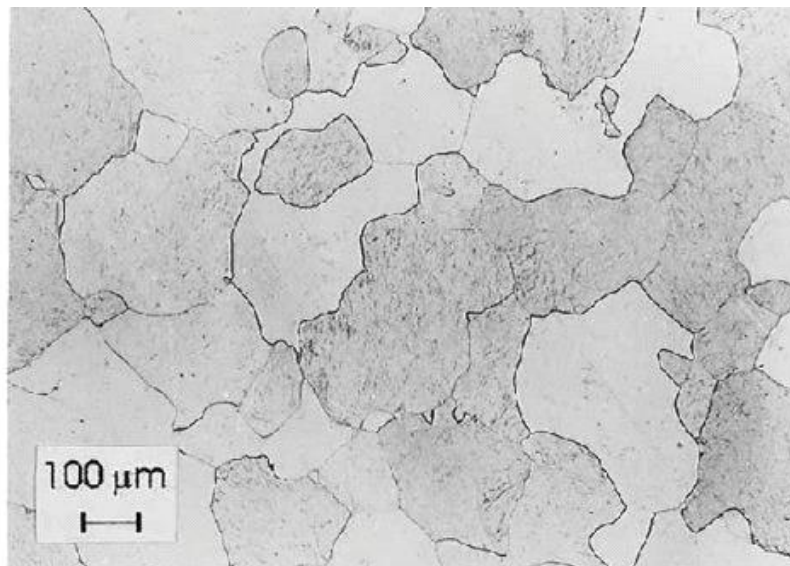
- Περιτηκτικό σημείο στους 1492°C, όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση $L(0.51\%) + \delta(0.10\%) \rightarrow \gamma(0.18\%)$
- Ευτηκτικό σημείο στους 1130°C, όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση $L(4.2\%) \rightarrow \gamma(2.11\%) + Fe_3C(6.67\%)$

- Ευτηκτοειδές σημείο στους 723°C), όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση $\gamma(0.8\%) \rightarrow \alpha(0.025\%) + \text{Fe}_3\text{C} (6.67\%)$

Από το διάγραμμα φάσεων φαίνονται τέσσερις διαφορετικές στερεές φάσεις οι οποίες είναι: α-φερρίτης ή απλώς φερρίτης, ωστενίτης (γ), σεμενίτης (Fe_3C) και δ-φερρίτης και περιγράφονται παρακάτω.

1.2.1. Φερρίτης (α)

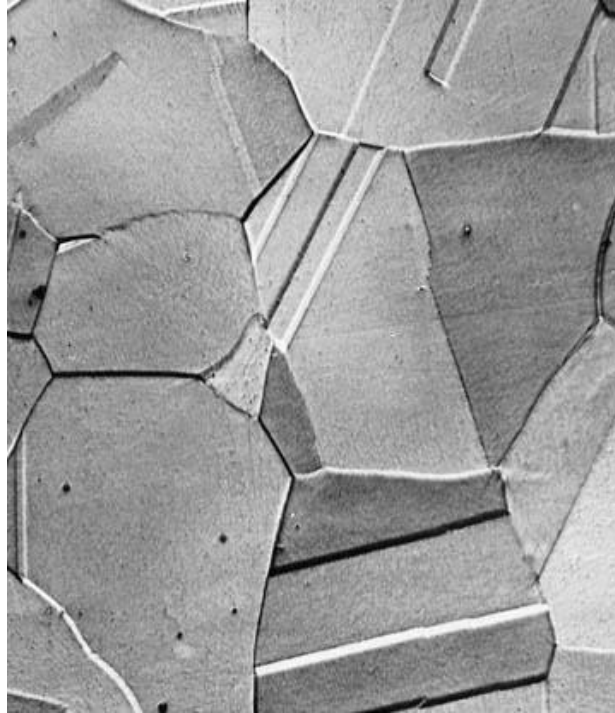
Η φάση αυτή είναι στερεό διάλυμα παρεμβολής του α -Fe και είναι κρυσταλλωμένη στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (Body-Centered Cubic, BCC), με διαλυμένο άνθρακα σε θέσεις παρεμβολής, σε ποσοστό μέχρι 0,025% στους 723°C. Ο συντελεστής ατομικής πλήρωσης (Atomic Packing Factor ή APF) ισούται με 0,68. Η διαλυτότητα του C στον α -Fe μειώνεται στο 0,008% στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία (τη θερμοκρασία Curie, 771°C), ο φερρίτης παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά γι' αυτό και χαρακτηρίζεται ως σιδηρομαγνητικό υλικό, ενώ πάνω από αυτήν χάνει αυτή την ιδιότητα και γίνεται παραμαγνητικό. Η σκληρότητά του κυμαίνεται από 70-200 HV.



Εικόνα 2 Οπτική μικροσκοπία πλήρους φερριτικής μικροδομής (8)

1.2.2. Ωστενίτης (γ)

Πρόκειται για στερεό διάλυμα παρεμβολής του γ -Fe, που κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (Face-Centered Cubic, FCC), με διαλυμένο άνθρακα έως και 2,1% κ.β. στους 1147°C και συντελεστή ατομικής πλήρωσης (APF) ίσο με 0,74. Ο ωστενίτης είναι παραμαγνητικό και θερμοδυναμικά ευσταθής σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από 910 °C έως 1400 °C.



Εικόνα 3. Τυπική μικροδομή Ωστενίτη (9)

1.2.3. Σεμεντίτης (Fe₃C)

Ο σεμεντίτης είναι μια μεσομεταλλική ένωση παρεμβολής του άνθρακα στο σίδηρο και δεν αποτελεί ξεχωριστή φάση. Το κρυσταλλικό του πλέγμα είναι ορθορομβικό (Hexagonal Close Packing, HCP) και η σύσταση σε C είναι απόλυτα καθορισμένη σε ποσοστό 6,67% κ.β. (25% κατά άτομο). Όπως οι περισσότερες μεσομεταλλικές ενώσεις, έτσι και το καρβίδιο του σιδήρου (σεμεντίτης) είναι ένωση πολύ σκληρή και εύθραυστη. Η σκληρότητά του κυμαίνεται από 850-1100 HV.

Η ευτηκτοειδής αντίδραση αφορά σε χάλυβες και λαμβάνει χώρα στην $A_1 = 723^{\circ}\text{C}$ με μετασχηματισμό του ωστενίτη ($C=0,8\%$) σε φερρίτη ($C=0,025\%$) και σεμεντίτη ($C=6,67\%$). Η έντονη παρουσία του σεμεντίτη οφείλεται στο γεγονός ότι η διαλυτότητα του ωστενίτη είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στο φερρίτη και κατά την ευτηκτοειδή αντίδραση ο ωστενίτης αποβάλλει άνθρακα στα όρια των κόκκων του. Το μίγμα φάσεων που προκύπτει καλείται περλίτης, ο οποίος αναπτύσσεται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη και επιτυγχάνεται με χαμηλό ρυθμό ψύξης. Ο περλίτης αποκτά μορφή παράλληλων πλακών φερρίτη και σεμεντίτη και αποτελεί εμφανώς σκληρότερο μίγμα φάσεων από τον αρχικό φερρίτη. Σημειώνεται πως ένας υποευτηκτοειδής χάλυβας ($C < 0,8\%$) θα αποτελείται από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη κατά την διάβαση της A_1 .(10)

1.2.4. δ-φερρίτης

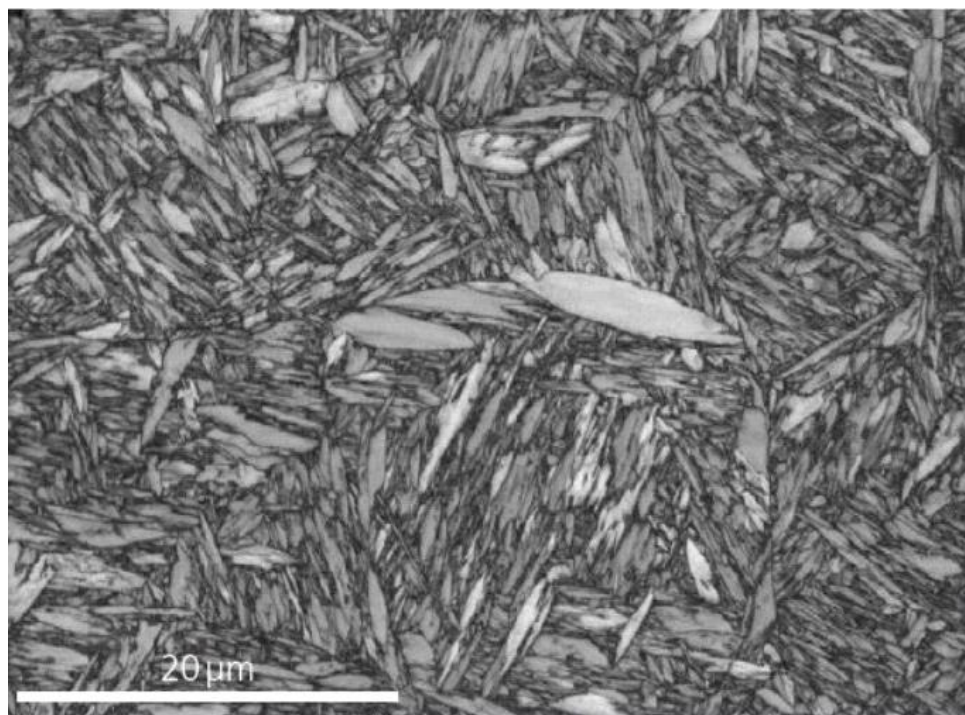
Πρόκειται για στερεό διάλυμα παρεμβολής του δ-Fe, που κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα BCC, με διαλυμένο άνθρακα στο πλέγμα έως περίπου 0,10% στους 1495°C. Η διαλυτότητα του C στο δ-Fe είναι μεγαλύτερη από ότι στον α-Fe, λόγω της διαστολής της μοναδιαίας κυψελίδας που παρουσιάζεται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Ο συντελεστής ατομικής πλήρωσης (APF) ισούται με 0,68. (11),(12),(13),(14).

1.2.5. Μαρτενσίτης

Ο μαρτενσίτης είναι μετασταθής φάση του χάλυβα που σχηματίζεται κατά την ταχύτατη απόψυξη του ωστενίτη (γ-Fe) σύμφωνα με τα διαγράμματα TTT. Από πλευράς δομής, είναι ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα στον φερρίτη. Στο μικροσκόπιο παρουσιάζεται με τη μορφή πλακοειδών σχηματισμών ή βελόνων (16).

Η μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη δεν πραγματοποιείται με διάχυση, λόγω της απότομης ψύξης που ακολουθεί την ωστενιτοποίηση. Ο μηχανισμός αυτής της μετατροπής στηρίζεται στη διάτμηση, δηλαδή στην εφαρμογή διατμητικών τάσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη, με αποτέλεσμα τη βίαιη αλλαγή της κρυσταλλικής δομής από εδροκεντρωμένη κυβική BCC σε χωροκεντρωμένη τετραγωνική (Body-Centered Tetragonal, BCT), χωρίς να αλλάξει το ποσοστό του διαλυμένου άνθρακα στη νέα φάση. Η σκληρότητα του κυμαίνεται από 700-1000HV. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού σε αντιδιαστολή με το μηχανισμό διάχυσης είναι τα εξής:

- Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μετασχηματισμός «διάτμησης» και όχι «διάχυσης». Δηλαδή δεν πραγματοποιείται με κλασικό μηχανισμό πυρηνοποίησης και ανάπτυξης.
- Οι αποστάσεις που διανύουν τα άτομα είναι κλάσματα της διατομικής απόστασης, ενώ κατά τη διάχυση οι αποστάσεις αυτές είναι ακέραια πολλαπλάσια της διατομικής.
- Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός μπορεί να γίνει και σε θερμοκρασία λίγο πιο πάνω από 0 K (απόλυτο μηδέν), ενώ ο μετασχηματισμός διάχυσης σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες και συγκεκριμένα πάνω από 0.3Tf, Tf = σημείο τήξεως του υλικού).
- Η ταχύτητα διάχυσης είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ η ταχύτητα του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι σχεδόν σταθερή και πολύ υψηλή. Φθάνει την ταχύτητα του ήχου στο σίδηρο (5000 m/s). Ο χρόνος ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι της τάξης των 10^{-7} s.
- Το ποσοστό του παραγόμενου μαρτενσίτη εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά κάτω από μια θερμοκρασία έναρξης, που συμβολίζεται Ms, και ολοκληρώνεται σε μια θερμοκρασία τέλους, που συμβολίζεται Mf (Ms > Mf). Στην τελευταία θερμοκρασία έχει μετατραπεί όλος ο ωστενίτης σε μαρτενσίτη (100% μετατροπή). Κατά τη διάχυση, όμως, το ποσοστό μετατροπής εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από το χρόνο παραμονής στην εκάστοτε θερμοκρασία.
- Μετά από το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό δεν υπάρχουν αλλαγές στη χημική σύσταση, δηλαδή ο μαρτενσίτης περιέχει ποσοστό άνθρακα όσο και ο ωστενίτης από τον οποίον προήλθε. Αντίθετα, κατά τη διάχυση οι νέες φάσεις έχουν διαφορετική σύσταση από τις παλαιές.
- Η μαρτενσιτική δομή παρουσιάζει μεγάλη κρυσταλλογραφική συνάφεια με το μητρικό πλέγμα, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει κατά τη διάχυση.



Εικόνα 4. Μορφολογία Μαρτενσίτη (17)

1.2.6. Μπαινίτης

Ο μπαινίτης είναι μικρογραφικό συστατικό, που βρίσκεται συχνότερα σε κραματωμένους χάλυβες παρά σε κοινούς ανθρακούχους και σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό του άνθρακα. Ο σχηματισμός του μπαινίτη μελετάται καλύτερα με τη χρήση διαγραμμάτων TTT, όταν ο χάλυβας θερμανθεί σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν ψυχθεί σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550 °C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη (περίπου 250 °C). Η δομή του αποτελείται από λεπτά πλακίδια φερρίτη, καθώς και σωματίδια καρβιδίου (κυρίως σεμεντίτη). Ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού διακρίνουμε τον μπαινίτη σε ανώτερο μπαινίτη (upper bainite), που πραγματοποιείται μεταξύ 400 και 500 °C, και κατώτερο μπαινίτη (lower bainite), που πραγματοποιείται μεταξύ 250 και 400 °C. Η σκληρότητα κυμαίνεται από 450-700HV.(10),(13),(14),(15)

1.3. Μετασχηματισμοί φάσεων χαλύβων

Οι μετασχηματισμοί φάσεις περιλαμβάνουν ορισμένες τροποποιήσεις στη μικροδομή. Μέσω αυτών προκύπτουν διάφορες φυσικές ιδιότητες (θερμοηλεκτρικές, μηχανικές, μαγνητικές και άλλες). Διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

(18).

- Αυτούς που εξαρτώνται από τη διάχυση και δεν προκαλείται αλλαγή στη χημική σύσταση ή το πλήθος των φάσεων (αλλοτροπικός μετασχηματισμός, η ανακρυστάλλωση και ανάπτυξη κόκκων)
- Αυτούς που εξαρτώνται από τη διάχυση με αλλαγή στη χημική σύσταση των φάσεων ή/και στο πλήθος (όπως ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός του περλίτη)

- Αυτούς, που είναι ανεξάρτητοι της διάχυσης και παράγουν μία μετασταθή φάση μέσω μικρών μετατοπίσεων όλων των ατόμων της κρυσταλλικής δομής (π.χ μαρτενσιτικός μετασχηματισμός)

Οι μετασχηματισμοί φάσεις ολοκληρώνονται σε 2 στάδια. Το πρώτο ονομάζεται πυρήνωση, δηλαδή ο σχηματισμός μικροσκοπικών πυρήνων ή σωματιδίων της νέας φάσης. Ευνοϊκές θέσεις σχηματισμού αποτελούν κυρίως τα όρια των κόκκων(ομογενής) και διάφορες ατέλειες(ετερογενής). Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται ανάπτυξη, κατά το οποίο οι πυρήνες αυξάνονται σε μέγεθος.

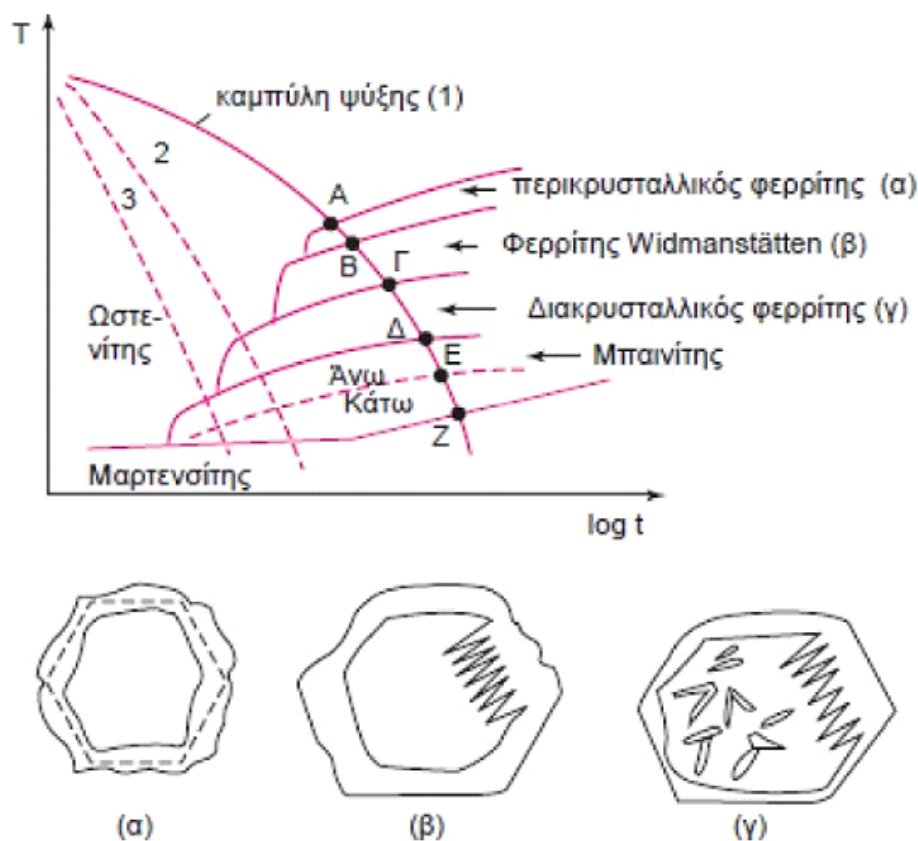
Για να ξεκινήσει αυτό το στάδιο πρέπει να ξεπεραστεί το εμπόδιο της ελεύθερης ενέργειας. Η νέα φάση αναπτύσσεται εις βάρος της αρχικής (19),(20).

1.3.1. Μετασχηματισμός Ωστενίτη – φερρίτη

Είναι βασικός αλλοτροπικός μετασχηματισμός στους χάλυβες. Πραγματοποιείται αλλαγή στην κρυσταλλική δομή και χαρακτηρίζεται εξ ολοκλήρου από μεταβολές λόγω διάχυσης. Επειδή η ολοκλήρωση ενός διαχυτικού μετασχηματισμού στερεάς κατάστασης απαιτεί πάρα πολύ χρόνο (ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες) για να ολοκληρωθεί, το σύστημα θεωρείται ότι πρακτικά παραμένει σε κατάσταση εκτός ισορροπίας (χρειάζεται δηλαδή άπειρος χρόνος για την ολοκλήρωση του μετασχηματισμού) (19). Ο φερρίτης μπορεί να διαφέρει ως προς τη μορφολογία του ανάλογα με τη χημική του σύσταση, τη μέγιστη θερμοκρασία καθώς και το ρυθμό απόψυξης του.

1.3.1.1. Μορφολογίες φερρίτη

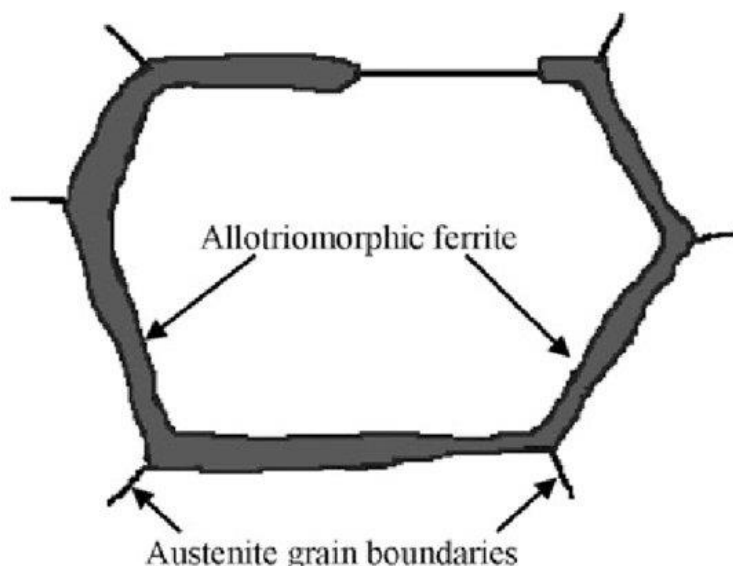
Στους χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα(<0.2%), η μορφολογία του φερρίτη εξαρτάται από την ταχύτητα απόψυξης του από την ωστενιτική περιοχή στη θερμοκρασία δωματίου. Εν μέσω αργής απόψυξης επικρατεί θερμοδυναμική ισορροπία και αρκετός χρόνος για τη διάχυση του άνθρακα για τον σχηματισμό περλίτη και προευτηκτοειδούς φερρίτη. Κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων, βαφής και άλλων διεργασιών που περιλαμβάνουν ταχεία απόψυξη δεν επικρατεί θερμοδυναμική ισορροπία και αντί για περλίτη μπορεί να σχηματιστεί μπαινίτης, μαρτενσίτης κ.α. Αυτές μπορούν να μελετηθούν σε ένα διάγραμμα CCT(Continuous Cooling Transformation)



Εικόνα 5. Καμπύλη ψύξης συγκόλλησης για τον προσδιορισμό των παρακάτω μορφολογιών (22)

1.3.1.2. Αλλοτριόμορφος ή Περικρυσταλλικός Φερρίτης

Σχηματίζεται κατά την απόψυξη του ωστενίτη μεταξύ των κρίσιμων θερμοκρασιών A3 και A1 (περίπου 800°C). Αναπτύσσεται στα όρια των κόκκων με κατεύθυνση προς το εσωτερικό τους, γι' αυτό και στη βιβλιογραφία συναντάται ως grain boundary ferrite. Η πυρήνωση του φερρίτη υπακούει σε μια σχέση προσανατολισμού μεταξύ μητρικής (ωστενίτης) και θυγατρικής (φερρίτης) φάσεως η οποία ονομάζεται Kurdjumov-Sachs (K-S). Συνήθως, κατέχει μεγαλύτερο μέγεθος έναντι των υπολοίπων παρακάτω μορφολογιών όπως μπορεί να φανεί στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Αναπαράσταση της πυρήνωσης του αλλοτριόμορφου φερρίτη (23)

1.3.1.3. Widmanstätten φερρίτης

Σχηματίζεται κατά την γρήγορη απόψυξη του ωστενίτη κάτω από την A3. Στη βιβλιογραφία συναντάται και ως sideplate ferrite. Αναπτύσσεται με τη μορφή πλακιδίων ή λωρίδων (βελονών) εξαρτώμενος από τη διάχυση του άνθρακα στον ωστενίτη. Όταν η πυρήνωση των κόκκων ξεκινά στα όρια του ωστενίτη ονομάζεται πρωτογενής (primary Widmanstätten) και δευτερεύων (secondary Widmanstätten) όταν ξεκινά από τον αλλοτριόμορφο φερρίτη με κατεύθυνση προς το εσωτερικό των κόκκων(10). Η ανάπτυξή του οφείλεται στην πλευρική κίνηση των ημισυνεκτικών διεπαφών με μικρά βήματα στη διεπαφή. Ο Widmanstätten φερρίτης διατηρεί τον προσανατολισμό των κόκκων με τον ωστενίτη (Kurdjumov-Sachs) και τα διαφασικά όρια μεταξύ τους είναι συνεκτικά/ημισυνεκτικά. Λόγω της μορφολογίας του παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα από τον αρχικό φερρίτη και είναι συνήθως ανεπιθύμητος, διότι μειώνει τη δυσθραυστότητα(24).



Εικόνα 7. Widmanstätten φερρίτης πυρήνωμένος στα όρια του πρώην Ωστενίτη σε περλιτική μήτρα. (33)

1.3.1.4. Βελονοειδής φερρίτης- Μπαινιτικός Φερρίτης

Ο μηχανισμός σχηματισμού βελονοειδούς φερρίτη από ωστενίτη θυμίζει εκείνον του ανώτερου μπαινίτη. Συνήθως συναντάται σε συγκολλήσεις με σκοπό την πρόσδοση υψηλής αντοχής και σκληρότητας, οι οποίες οφείλονται στην ύφανση μικρών βελόνων μεταξύ τους βελόνων. Η διαφορά του με τα άλλα είδη φερρίτη, βρίσκεται στις περιοχές όπου γίνεται η πυρήνωση της κάθε μικροδομής. Ο βελονοειδής αρχίζει να σχηματίζεται ετερογενώς μέσα στον κόκκο σε μη μεταλλικά εγκλείσματα της μήτρας. Όταν αυτά απουσιάζουν, παρατηρείται ο σχηματισμός μπαινιτικής μικροδομής (μπαινιτικού φερρίτη).

Ο μπαινιτικός και ο βελονοειδής φερρίτης, έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά κατά το μετασχηματισμό τους και είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους κατά την ανάπτυξη από τον ωστενίτη. Αύξηση στα όρια κόκκου του ωστενίτη φαίνεται να προάγει το σχηματισμό μπαινίτη έναντι του βελονοειδούς φερρίτη. Η ανάπτυξη του βελονοειδούς φερρίτη ακολουθεί τη σχέση προσανατολισμού με την ωστενιτική μήτρα που εκφράστηκε από τον KS-NW (25). Ο βελονοειδής φερρίτης παρουσιάζει αυξημένη συχνότητα ορίων κόκκων με μεγάλη γωνία μεταξύ των γειτονικών πλακών. Μεγάλο κλάσμα όγκου βελονοειδούς φερρίτη επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο σταδίων συνεχούς ψύξης (26),(27).

1.3.2. Περλιτικός Μετασχηματισμός

Ο περλίτης αναπτύσσεται μέσω διάχυσης (διαχυσιακός μετασχηματισμός) και ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις, την πυρήνωση και την ανάπτυξη.

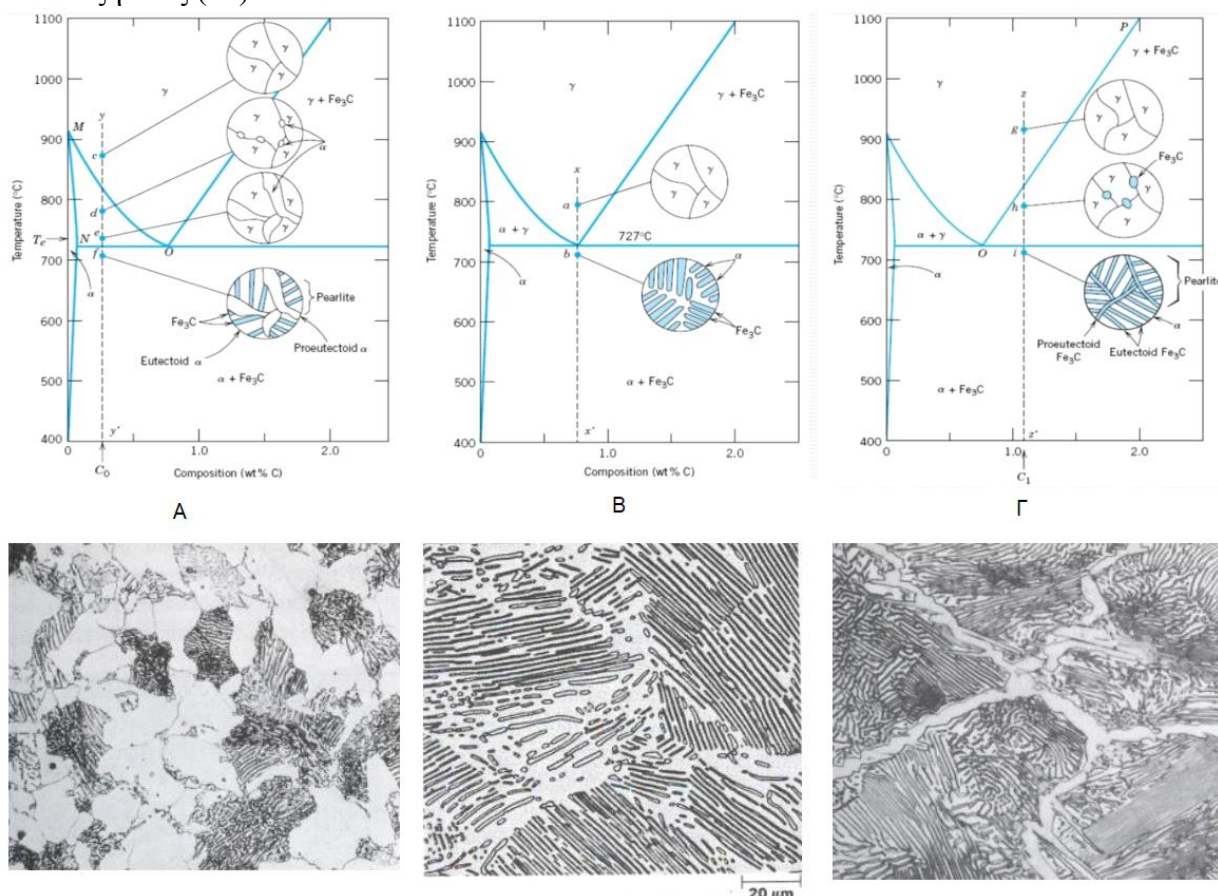
Ο μηχανισμός του μετασχηματισμού περλίτη αποτελείται από 3 στάδια. Όντας μη ανεξάρτητη φάση, είναι απαραίτητη η φύτρωση των δύο φάσεων από τις οποίες αποτελείται και ανάπτυξη τους.

Ο περλίτης εφόσον δεν αποτελεί ανεξάρτητη φάση απαιτεί την φύτρωση και των δύο φάσεων, που τον συνιστούν, ώστε στην συνέχεια να αναπτυχθεί. Η φύτρωση του περλίτη γίνεται πάντα στα όρια των κρυστάλλων του ωστενίτη. Η φύτρωση του σεμεντίτη ξεκινάει επίσης πρώτη. Τα 3 στάδια έχουν ως εξής:

- Σχηματισμός φύτρου σεμεντίτη, ο οποίος καταναλώνει πολύ άνθρακα από τον κρύσταλλο του ωστενίτη
- Σχηματισμός φύτρου φερρίτη ως απόρροια του πρώτου σταδίου(χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα εντός του κρυστάλλου φερρίτη. Ο ωστενίτης έχει πολύ μεγαλύτερη διαλυτότητα σε άνθρακα από τον φερρίτη). Τα φύτρα βρίσκονται πάντα σε επαφή μεταξύ τους και αναπτύσσονται υπό την μορφή πλακιδίων στο εσωτερικό του ωστενιτικού κόκκου.
- Οι φάσεις γεφυρώνουν ή διακλαδίζονται η μια πάνω στην άλλη, λόγω της ύπαρξης των εμπλουτισμένων σε άνθρακα ζωνών και το ευτηκτοειδές προϊόν επεκτείνεται κατά μήκος του ορίου κόκκων. Ταυτόχρονα τα πλακίδια αναπτύσσονται πλευρικά εντός του μητρικού κόκκου ωστενίτη σε μία μη συνεκτική διεπιφάνεια. Κάθε πλακίδιο του σεμεντίτη και του φερρίτη καταναλώνει ή αποβάλλει αντίστοιχα άνθρακα από και προς τον κόκκο του ωστενίτη, με αποτέλεσμα αυτά να αναπτύσσονται συνεργατικά σε μια κοινή διεπιφάνεια με τη μητρική φάση γ.

Κάθε τέτοια αποικία αποτελείται από δύο αλληλοδιεισδυόμενους μονοκρυστάλλους της φάσης (α) και (β), έχοντας μια σχέση κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού η μία με την άλλη και με τον κόκκο γ από τον οποίο αναπτύσσονται αλλά όχι και με τον κόκκο γ στον οποίο αναπτύσσονται (29).

Κάθε αναπτυσσόμενο πλακίδιο εφάπτεται με ένα πλακίδιο της δεύτερης φάσης και με τον κρύσταλλο του ωστενίτη. Τα όρια με τον ωστενίτη αποτελούν ευνοϊκά σημεία για τον σχηματισμό νέων φύτρων της δεύτερης φάσης λόγω της διαφοράς στην περιεκτικότητα του άνθρακα που δημιουργείται τοπικά στον κόκκο του ωστενίτη. Εν συνεχεία ακολουθεί η ανάπτυξη τους (30).



Εικόνα 8. Σχηματισμός Α) υποευτηκτοειδούς περλίτη, Β) ευτηκτοειδούς περλίτη, Γ) υπereυτηκτοειδούς περλίτη (31)

1.3.3. Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός

Ο μαρτενσίτης στους χάλυβες είναι μία μετασταθής χωροκεντρωμένη τετραγωνική φάση (BCT) που θεωρείται υπέρκορεσμένο στερεό διάλυμα άνθρακα σε χωροκεντρωμένο φερρίτη. Τα άτομα του άνθρακα παραμένουν στη θέση τους (οκταεδρικές θέσεις) σε προτιμητέες θέσεις εντός του μαρτενσίτη, οδηγώντας στην τετραγωνικότητα της φάσης. Κατά την απότομη απόψυξη, τα άτομα άνθρακα και σιδήρου προσανατολίζονται ξαφνικά από το στερεό διάλυμα FCC του ωστενίτη στο BCT του μαρτενσίτη με μία προτιμητέα σχέση προσανατολισμού με τη μητρική φάση, ενώ τα διαφασικά όρια είναι ημισυνεκτικά. (10),(16),(29)

Με βάση τα Διαγράμματα TTT, οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για να σχηματιστεί μαρτενσίτης είναι οι ακόλουθες τρεις:

- Ο μαρτενσίτης σχηματίζεται μόνο αν ο χάλυβας έχει ωστενιτική μικροδομή
- Η ταχύτητα απόψυξης από την ωστενιτική κατάσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη ταχύτητα απόψυξης, η οποία ονομάζεται 'κρίσιμη ταχύτητα μαρτενσιτικής βαφής (Ms). Αυτή η ταχύτητα επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε κραματικά στοιχεία και το μέγεθος του κόκκου του ωστενίτη.

- Η θερμοκρασία πρέπει να κατέβει κάτω από την Ms, χαρακτηριστική για κάθε χάλυβα. Τότε αρχίζει να μετασχηματίζεται ο πρώτος κόκκος ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Η θερμοκρασία ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ονομάζεται Mf. Οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες δύνανται να ελαττωθούν με την προσθήκη κραματικών στοιχείων. Αν η Mf βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε μπορεί να παραμείνει μία ποσότητα ωστενίτη που δεν έχει μετασχηματιστεί και ονομάζεται υπολειπόμενος ή παραμένων ωστενίτης (34),(35),(36).

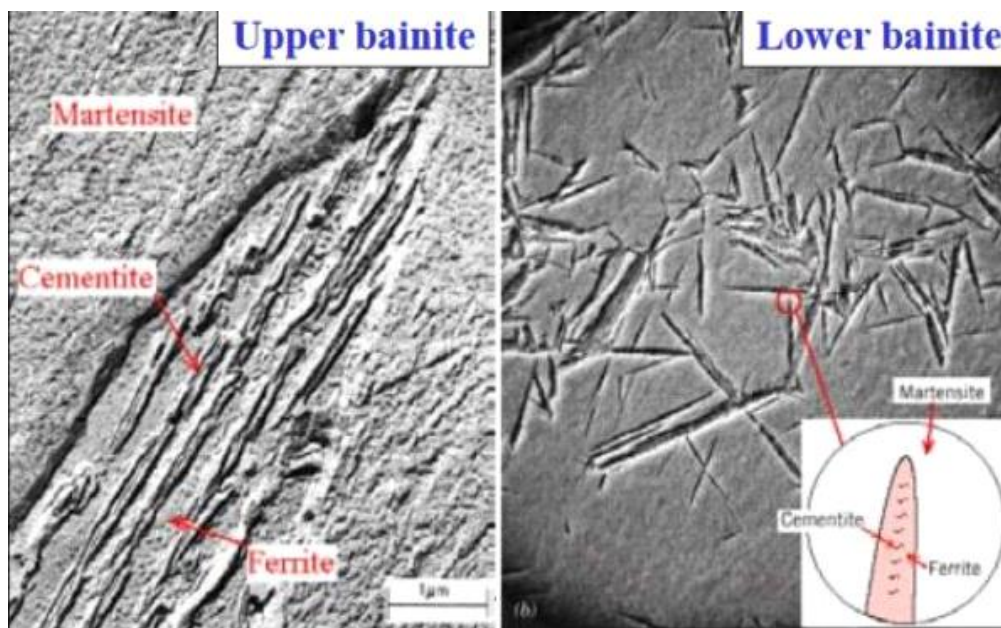
Παρατηρείται στη μορφή πλακοειδούς μαρτενσίτη σε παράλληλες δέσμες πάχους 0,1μ, που περιέχουν μεγάλο πλήθος διαταραχών, ή με τη μορφή βελονοειδούς μαρτενσίτη, όπου οι εσωτερικές περιοχές δεν είναι παράλληλες, αλλά παρουσιάζουν απόλυτα καθορισμένες γωνίες. Σε χάλυβες με <0,4% άνθρακα, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή λωρίδων, ενώ σε χάλυβες >0,6% άνθρακα, ο δημιουργούνται πιο λεπτά πλακίδια. Σε χάλυβες με περιεχόμενο άνθρακα μεταξύ 0,4-0,6% άνθρακα παρατηρούνται φακοειδείς λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι διατμητικός και δεν παρουσιάζεται καθόλου το φαινόμενο της διάχυσης καθώς δεν υπάρχει επαρκής χρόνος λόγω της τάχιστης απόψυξης. Δεν χρειάζεται θερμική ενεργοποίηση, γι' αυτό το λόγο λέγεται αθερμικός και δεν εξαρτάται από το χρόνο(19). Τα άτομα κινούνται ελάχιστα σε σχέση με τα γειτονικά τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο η FCC-γ φάση μετασχηματίζεται σε BCT μαρτενσίτη. Όλα τα άτομα άνθρακα αποτελούν προσμίξεις παρεμβολής δίνοντας τη δυνατότητα γρήγορου μετασχηματισμού σε θερμοκρασίες με υψηλότερους ρυθμούς διάχυσης. Τα φύτρα σχηματίζουν πυρήνες που αναπτύσσονται με την ταχύτητα του ήχου εντός της μήτρας του ωστενίτη (16),(20),(29),(38),(39),(64).

1.3.4. Μπαινιτικός Μετασχηματισμός

Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός συνδυάζει στοιχεία διαχυσιακού και διατμησιακού χαρακτήρα και σχηματίζεται στην ενδιάμεση θερμοκρασιακά περιοχή από αυτές του περλίτη και του μαρτενσίτη και στη μορφή του μοιάζει με του μαρτενσίτη από επαναφορά.

Ο Edgar C. Bain το 1930 ήταν ο πρώτος που ονόμασε έτσι την διαφορετική μικροδομή που είχε ήδη παρατηρηθεί από το 1912, χωρίς όμως να την έχει αναλύσει σε βάθος. Αργότερα το 1939 ο Robert Franklin Mehl, διαχώρισε το μπαινίτη σε ανώτερο και κατώτερο.

Ο άνω μπαινίτης σχηματίζεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 400-550°C και αποτελείται από παράλληλα πλακίδια φερρίτη που διαχωρίζονται από συνεχείς λεπτές λωρίδες σεμεντίτη. Αν η ποσότητα του άνθρακα είναι χαμηλή τότε σχηματίζονται σωματίδια αντί για λωρίδες. Δε σχηματίζονται προευνθηκτοειδείς φάσεις μαζί με το μπαινίτη. Ο άνω μπαινίτης αναπτύσσεται σε ομάδες παράλληλων πλακιδίων που ονομάζονται μπαινιτικές δεσμίδες (bainite sheaves). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μεταξύ 250-400°C, σχηματίζεται ο κατώτερος μπαινίτης στον οποίο ο σεμεντίτης αναπτύσσεται και εντός των πλακιδίων του μπαινιτικού φερρίτη με απευθείας καθίζηση από τον ωστενίτη. Ο φερρίτης έχει τη μορφή στενόμακρων βελόνων και τα σωματίδια σεμεντίτη έχουν λεπτότερη διασπορά που εξηγεί και την αυξημένη αντοχή μαζί με την αυξημένη ολκιμότητα σε σχέση με τον ανώτερο μπαινίτη.(20),(36),(40),(64)

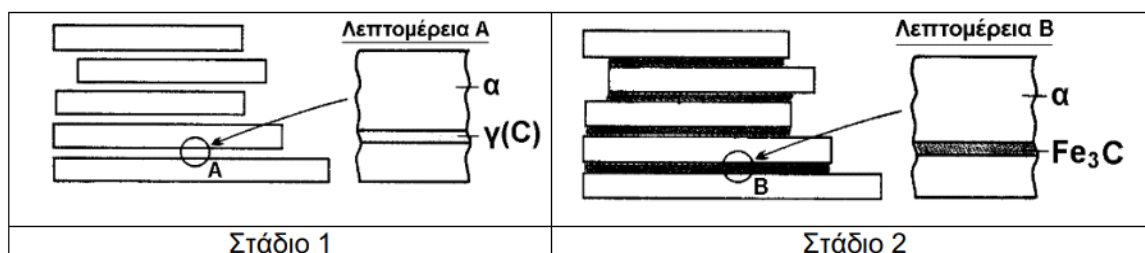


Εικόνα 9. Μορφολογίες σε μικροσκόπιο από ανώτερο και κατώτερο μαινίτη αντίστοιχα.

Σύμφωνα με ερευνητές που έκαναν ποσοτική ανάλυση στο μαινίτη, η μερική πυρήνωση που συνδέεται με την ανάπτυξη του φερρίτη είναι πιο ευνοϊκή, με την προϋπόθεση μιας υψηλότερης συγκέντρωσης σε άνθρακα και μίας χαμηλότερη θερμοκρασίας αντίδρασης. Αυτή η μερική πυρήνωση θεωρείται υπεύθυνη για τις ποικίλες διατάξεις των λεπτών κατασκευαστικών μονάδων μέσα σε ένα πλακίδιο ή βελόνα μαινίτη. Τα νέα πλακίδια διατάσσονται παράλληλα στα αρχικά με τα οποία μοιράζονται παρόμοιο κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό. Σε αυτήν την περίπτωση η σχηματιζόμενη λεπτοκρυσταλλική μικροδομή αποτελείται από σχεδόν παράλληλα μικρότερα πλακίδια ή/και υπομονάδες, και έτσι σχηματίζεται ο ανώτερος μαινίτης (39).

Η ανάπτυξη του άνω μαινίτη γίνεται στα εξής 2 στάδια:

- Πυρήνωση φύτρων και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων φερρίτη είτε στα όρια των κόκκων του ωστενίτη είτε εντός των κόκκων του μητρικού ωστενίτη, εμπλουτίζοντάς τον παράλληλα με άνθρακα και καθιστώντας τον υπερκορεσμένο.
- Φύτρωση κατακρημισμάτων σεμεντίτη στη διεπιφάνεια φερρίτη-ωστενίτη λόγω κορεσμού(26).

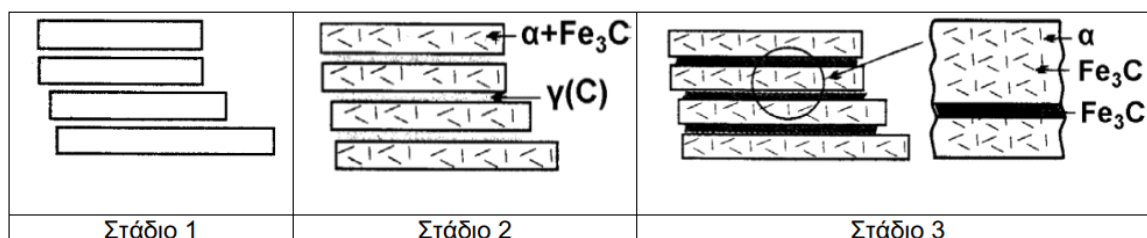


Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση σταδίων μετασχηματισμού του ανώτερου μαινίτη (16)

Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία ή όσο υψηλότερο το ποσοστό σε άνθρακα, τόσο λεπτότερα είναι τα φερριτικά πλακίδια και ο σχηματισμός σεμεντίτη στα φερριτικά υπό-όρια (29).

Η μορφολογία του κατώτερου μπαινίτη είναι σχετικά ανεξάρτητη από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα και ακολουθεί τα εξής 3 στάδια:

- Πυρήνωση και η ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων φερρίτη στην ωστενιτική περιοχή σε καθορισμένες προτιμητέες διευθύνσεις μέσα στα οκταεδρικά επίπεδα του FCC κρυσταλλικού πλέγματος, έπειτα από διάτμηση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη. Λόγω της χαμηλής διαχυσιμότητας του άνθρακα σε αυτές τις θερμοκρασίες, τα φερριτικά πλακίδια είναι πολύ λεπτά.
- Κατακρήμνιση σεμεντίτη εντός του φερρίτη με ταυτόχρονο εμπλουτισμο του ωστενίτη σε άνθρακα, σε χαμηλότερο ποσοστό απ' ό,τι στον ανώτερο μπαινίτη. Η συγκέντρωση του άνθρακα στη διεπιφάνεια φερρίτη-ωστενίτη, κορεννύει τον ωστενίτη σε μία 'υπερκορεσμένη' ζώνη
- Ο σεμεντίτης κατακρημνίζεται μέσα από τον κεκορεσμένο ωστενίτη μεταξύ των φερριτικών πλακιδίων(υπερκορεσμένη ζώνη). Η διεπιφάνεια κατά μήκος των φερριτικών πλακιδίων αποτελεί τη θέση μέγιστου υπερκορεσμού στα μέτωπα των οποίων πραγματοποιείται φύτρωση των καρβιδίων.



Εικόνα 11. Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων του μετασχηματισμού του κατώτερου μπαινίτη (16)

Η τυπική διαφασική μορφολογία του άνω μπαινίτη είναι ως 'πακέτο' βελόνων και του κατώτερου μπαινίτη ως 'πακέτο' πλακών. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες μεταβατικές μορφολογίες, που υποδεικνύουν ότι από τον ανώτερο μπαινίτη στον κατώτερο, οι μορφολογίες αλλάζουν βαθμιαία και δεν υπάρχει ουσιώδης διαφορά μεταξύ τους (39). Ο μπαινίτης μπορεί να σχηματιστεί από τον ωστενίτη με διάφορες θερμικές κατεργασίες. Συνήθως χρησιμοποιείται θερμομηχανική κατεργασία (π.χ. θερμή έλαση) ακολουθούμενη από συνεχή απόψυξη. Η λεπτομερής μικροδομή σε συνδυασμό με τα μικρά κατακρημνίσματα προσδίδουν στο μπαινίτη υψηλή σκληρότητα, ενώ επιτρέπει μερική κίνηση διαταραχών, διατηρώντας έτσι κάποια ολκιμότητα. Αυτές οι ιδιότητες παρατηρούνται και στον μαρτενσίτη από επαναφορά, όντας όμως οικονομικά πιο ασύμφορη διαδρομή. Επιπλέον, δεν ψαθυροποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και έχει καλή αντοχή σε κόπωση. (40),(42),(42)

1.4. Κραματικά Στοιχεία στους Χάλυβες

Τα κραματικά στοιχεία διαμορφώνουν μαζί με τις θερμικές και μηχανικές κατεργασίες την μικροδομή και τις ιδιότητες του χάλυβα. Η συνεργιστική δράση των κραματικών στοιχείων επηρεάζει τη θερμοδυναμική και την κινητική των μετασχηματισμών των φάσεων στους χάλυβες. Γι' αυτό και η προσθήκη ενός μεμονωμένου στοιχείου στο κράμα, δεν οδηγεί από μόνη της σε ασφαλή συμπεράσματα για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων αν δεν ληφθεί υπόψη η επίδραση των υπόλοιπων στοιχείων. Τα συνηθέστερα κραματικά στοιχεία είναι:

Ανθρακας (C):

Αποτελεί το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο στους χάλυβες συμβάλλοντας σημαντικά στην ισχυροποίησή τους. Είναι απαραίτητο για το σχηματισμό μικρογραφικών συστατικών όπως περλίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη, καθώς επίσης και του σεμεντίτη ή άλλων καρβιδίων. Μικροδομές που αποτελούνται από ένα ή περισσότερα μικρογραφικά συστατικά μπορεί να έχουν μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Αύξηση της περιεκτικότητάς του αυξάνει τη σκληρότητα, την αντοχή και την εμβαιπτότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα.

Χάλυβες με 0.8% C ονομάζονται ευτηκτοειδείς. Χάλυβες με περιεκτικότητα από 0.025% έως 0.8% ονομάζονται υποευτηκτοειδείς και χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.8% μέχρι 2.1% ονομάζονται υπερευτηκτοειδείς.

Τέλος ο άνθρακα έχει την τάση να παρουσιάζει διαφορισμό λόγω διάχυσης, σε σχετικά μεγαλύτερο βαθμό από άλλα κραματικά στοιχεία.

Χρώμιο (Cr):

Είναι ισχυρό καρβιδιογόνο και προκαλεί αύξηση της σκληρότητας, της εμβαιπτότητας και ισχυροποίηση του χάλυβα. Προσφέρει αντοχή σε οξειδωση και διάβρωση λόγω των οξειδίων του χρωμίου που σχηματίζει. Είναι το σημαντικότερο μαζί με το νικέλιο στοιχείο των ανοξειδωτων χάλυβων.

Σχηματίζει καρβίδια του χρωμίου, τα οποία αυξάνουν τις αντιτριβικές ιδιότητες του χάλυβα.

Το χρώμιο αυξάνει επίσης και την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες υπό φορτίο και για το λόγο αυτό συναντάται στους εργαλειοχάλυβες. Τα καρβίδια σχηματίζουν στερεό διάλυμα με τον ωστενίτη αργά, συνεπώς είναι απαραίτητος επαρκής χρόνος θέρμανσης πριν τη βαφή.

Χρησιμοποιείται συνήθως σε ποσοστά έως και 25%

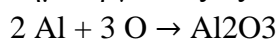
Νικέλιο (Ni):

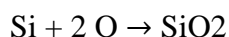
Αυξάνει την ολκιμότητα και την δυσθραυστότητα. Μειώνει τη θερμοκρασία ψαθυρής θραύσης και γι' αυτό χρησιμοποιείται στους κρυσταλλικούς χάλυβες. Δεν σχηματίζει καρβίδια, παραμένει στο στερεό διάλυμα προσδίδοντας στο φερρίτη σκληρότητα και αντοχή. Σε περιεκτικότητα >7% σταθεροποιεί την ωστενιτική δομή σε θερμοκρασία δωματίου. Σε συνδυασμό με το χρώμιο, το νικέλιο παράγει κράματα χάλυβων με καλύτερη σκληρότητα, υψηλότερη αντοχή σε κρούση και καλύτερη αντίσταση στην κόπωση από ό,τι μπορεί να επιτευχθεί στους ανθρακούχους χάλυβες.

Μαγγάνιο (Mn):

Συναντάται συνήθως σε όλους τους βιομηχανικούς χάλυβες σε περιεκτικότητες πάνω από 0.2% κ.β.. Προστίθεται κυρίως στο τήγμα του μετάλλου για αποξείδωση καθώς διευκολύνει στην κατεργασία εν θερμώ, και για αποθείωση αφού σχηματίζει τα σουλφίδια MnS που βελτιώνουν την κατεργασιμότητα του χάλυβα. Η προσθήκη Mn οδηγεί επίσης σε σημαντική αύξηση της εμβαιπτότητας του χάλυβα. Συνεισφέρει ακόμη στη σκληρότητα και την αντοχή, όμως σε χαμηλότερο βαθμό από τον άνθρακα. Αν αυξηθεί το ποσοστό του μαγγανίου, μειώνεται η ολκιμότητα και η συγκολλησιμότητα, όχι όμως στον ίδιο βαθμό που το πετυχαίνει ο άνθρακας. Το μαγγάνιο έχει μικρότερη τάση στο μακρο-διαφορισμό συγκριτικά με τα υπόλοιπα κοινά στοιχεία. Είναι χρήσιμο στην ποιότητα της επιφάνειας για μεγάλο εύρος περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Πυρίτιο (Si), Αλουμίνιο (Al): Προστίθενται για την αποξείδωση (deoxidation) των χάλυβων δημιουργώντας οξείδια σύμφωνα με την εξίσωση.(45)





Στους πλήρως καθησυχασμένους χάλυβες (killed carbon steels, πλήρως αποξειδωμένοι), το πυρίτιο ανέρχεται έως 0.6%. Μεγαλύτερες περιεκτικότητες οδηγούν σε μείωση της κατεργασιμότητας.

Φώσφορος (P):

Βελτιώνει σημαντικά την κατεργασιμότητα των χάλυβων διαμόρφωσης. Πάνω από κάποιο όριο(περίπου 0.1%), μειώνει την ολκιμότητα, τη δυσθραυστότητα και την αντοχή σε κρούση.

Θείο (S):

Μειώνει σημαντικά την ολκιμότητα, τη δυσθραυστότητα, την αντοχή σε κρούση και τη συγκολλησιμότητα. Δημιουργεί προβλήματα στην μηχανική κατεργασία, αφού αυξάνει την τάση ρωγμάτωσης κατά τη βαφή των χάλυβων. Γενικά η περιεκτικότητά του στους χάλυβες περιορίζεται κάτω από 0.05%.

Μολυβδαίνιο (Mo):

Είναι ισχυρά καρβιδιογόνο που αυξάνει ταυτόχρονα και την εμβαιπτότητα των χάλυβων. Τα καρβίδια του(MoC,Mo₂C) σχηματίζονται κατά την επαναφορά μετά τη βαφή, προκαλώντας δευτερογενή σκλήρυνση του χάλυβα.

Η προσθήκη μολυβδαίνιου στους ανοξείδωτους χάλυβες βελτιώνει περαιτέρω την αντοχή σε διάβρωση. Χρησιμοποιείται συνήθως σε περιεκτικότητες <0.7%, συνήθως μεταξύ 0.1-0.3%.

Άζωτο (N):

Είναι στοιχείο παρεμβολής όπως και ο άνθρακας. Αυξάνει τη σκληρότητα και την αντοχή και μειώνει την ολκιμότητα. Χρησιμοποιείται για την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας.

Κοβάλτιο (Co):

Είναι το μοναδικό κραματικό στοιχείο που μειώνει την εμβαιπτότητα. Δεν σχηματίζει καρβίδια και επηρεάζει ελάχιστα τη σκληρότητα του χάλυβα. Παρεμποδίζει την επαναδημιουργία αταξιών κατά την ανόπτηση ή επαναφορά του χάλυβα και συμβάλλει στη διατήρηση της μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες.

Βολφράμιο (W), Βανάδιο (V), Τιτάνιο (Ti), Νιόβιο (Nb):

Είναι καρβιδιογόνα μικροκραματικά στοιχεία (0.05-0.15%) και αυξάνουν τη σκληρότητα, ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν την ανάπτυξη των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα V, Nb και Ti αποτελούν κύρια συστατικά στους μικροκραματωμένους χάλυβες υψηλής αντοχής (HSLA steels).

Τα κραματικά στοιχεία ανάλογα με το αν σταθεροποιούν τον φερρίτη ή τον ωστενίτη διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Σταθεροποιητές ωστενίτη: C, N, Ni, Mn, Co, Cu. Τα στοιχεία αυτά επεκτείνουν το ωστενιτικό πεδίο στο διάγραμμα φάσεων. Μειώνουν τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενιτικού μετασχηματισμού (Ms) με τη μεγαλύτερη επίδραση να την έχει ο άνθρακας.

Σταθεροποιητές φερρίτη: Si, Al, P, Cr, Mo, W, Nb, Sn, Sb. Περιορίζουν το ωστενιτικό πεδίο στο διάγραμμα φάσεων.(46)

Όμως και τα στοιχεία Cr, Mo, Al, Si, W, V που είναι σταθεροποιητές φερρίτη, μειώνουν την Ms λόγω της παρεμπόδισης της ολίσθησης των αταξιών που απαιτείται για το σχηματισμό του μαρτενσίτη. Η σχετική επίδραση των κραματικών στοιχείων στη θερμοκρασία Ms δίνεται από διάφορες εμπειρικές σχέσεις με γνωστότερη τη σχέση του Andrews:

$$Ms(^{\circ}C) = 539 - 423C - 30.4Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 7.5Mo + 10Co - 7.5Si$$

όπου στα κραματικά στοιχεία αντιστοιχούν οι % κ.β. περιεκτικότητες.(47)

1.5. Θερμικές Κατεργασίες

Οι θερμικές κατεργασίες είναι σημαντικές για την ανάπτυξη μηχανικών ιδιοτήτων σε μεταλλικά κράματα που απαιτούνται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Σημαντικότερες εξ'αυτών, η ανόπτηση, η βαφή και η επαναφορά. Η ανόπτηση χρησιμοποιείται γενικά για τη μείωση της σκληρότητας και των εσωτερικών τάσεων, την βελτίωση της κατεργασιμότητας και πλαστικότητας, καθώς και την ομογενοποίηση της χημικής σύστασης, κυρίως στους χυτοσιδήρους. Η βαφή των χαλύβων έχει στόχο τη σκλήρυνσή τους με σχηματισμό μαρτενσίτη και η επαναφορά εφαρμόζεται μετά από βαφή και έχει ως στόχο την ανάκτηση της δυσθραυστότητας μέσω μικρής μείωσης της σκληρότητας.

1.5.1. Ανόπτηση

Είναι η διαδικασία κατά την οποία το υλικό παραμένει για μία παρατεταμένη χρονική περίοδο σε υψηλή θερμοκρασία και ακουούτως βραδεία απόψυξη του. Εφαρμόζεται για την αποκατάσταση τάσεων, την παραγωγή επιθυμητών μικροδομών με ανάλογα χαρακτηριστικά και την αύξηση της ελατότητας, ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας.

Τα πιο σημαντικά είδη ανόπτησης χάλυβα 4130 αποτελούν οι:

- Ανόπτηση κατεργασίας
- Πλήρης ανόπτηση
- Ανόπτηση σφαιροποίησης
- Ανόπτηση εξομάλυνσης
- Αποτακική ανόπτηση

Όλες οι προαναφερθούσες αποτελούνται από 3 στάδια:

1. Θέρμανση στην επιθυμητή θερμοκρασία
2. Παραμονή σε αυτή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα
3. Απόψυξη, συνήθως έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

1.5.1.1. Ανόπτηση κατεργασίας

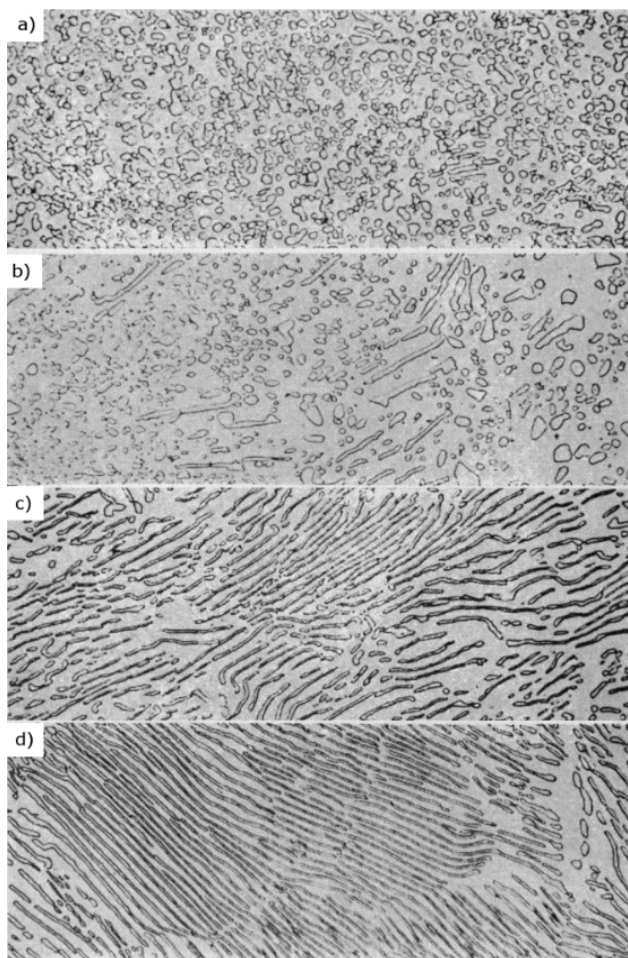
Χρησιμοποιείται για την αναίρεση των επιπτώσεων της ψυχρηλασίας, δηλαδή, την αύξηση της ολκιμότητας και την ελάττωση της σκληρότητας ενός προηγουμένως ενδοτραχυμένου μετάλλου. Αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση δύναται να συμβούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Συνήθως προτιμάται μια λεπτοκρυσταλλική δομή, επομένως τερματίζεται σύντομα, πριν οι κόκκοι αναπτυχθούν εντόνως.

1.5.1.2. Πλήρης ανόπτηση

Εφαρμόζεται συχνά σε χαμηλής και μεσαίας σε περιεκτικότητα C χάλυβες, πριν την μηχανική τους επεξεργασία ή όταν πρόκειται να υποβληθούν σε μορφοποίηση η οποία θα δημιουργήσει έντονη πλαστική παραμόρφωση. Το κράμα θερμαίνεται 15-40°C πάνω από τις καμπύλες A₁ και A₃ μέχρι έως ότου επέλθει ισορροπία. Εν συνεχεία ο φούρνος απενεργοποιείται και μαζί με το κράμα αποψύχεται σε διάρκεια αρκετών ωρών μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ως αποτέλεσμα της ανόπτησης στη μικροδομή έχουμε χονδρόκοκκο περλίτη, μαζί με όποια προευτηκτοειδή φάση, στην περίπτωση του 4130 αυτή του φερρίτη.

1.5.1.3. Ανόπτηση σφαιροποίησης

Η συγκεκριμένη κατεργασία έχει ως στόχο της σφαιροποίηση του σεμεντίτη προς ελάττωση της σκληρότητας και την αύξηση της διαμορφωσιμότητας, κατεργασιμότητας και ολκιμότητας. Αυτό συμβαίνει σε θερμοκρασία περίπου 700°C (λίγο χαμηλότερη της ευτηκτοειδούς, 727°C) και για χρόνο που διαρκεί 18-24 ώρες, μέσω της διάχυσης άνθρακα. Τα λεπτά στρώματα σεμεντίτη που συναντώνται στη μορφολογία του περλίτη διαχέονται σταδιακά μέχρι την δημιουργία σφαιριδίων σεμεντίτη σε μία συνεχή μήτρα φερρίτη. Κινητήρια δύναμη αυτού του φαινομένου είναι η μείωση της περιοχής του ορίου α-Fe₃C. Αυτή η δομή ονομάζεται σφαιροειδίτης, δεν θεωρείται ξεχωριστή φάση και όλοι οι χάλυβες μπορούν να ανοπτηθούν για να την αποκτήσουν.



Εικόνα 12. Μικροφωτογραφίες ενός χάλυβα 1080 που ωστενιτοποιήθηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες και στη συνέχεια μετασχηματίστηκε σε φερρίτη στους 726°C. Η επάνω εικόνα, (a) είναι από ωστενιτοποίηση του χάλυβα στους 751°C, (b) στους 787°C, (c) στους 871°C και (d) στους 954°C. Η ωστενιτοποίηση στους 751°C οδήγησε σε σφαιροειδοποιημένα καρβίδια, λίγος περλίτης είναι ορατός όταν ωστενιτοποιείται στους 787°C, ο χάλυβας είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου περλιτικός όταν ωστενιτοποιείται στους 871°C και πλήρως περλιτικός όταν ωστενιτοποιείται στους 954°C (48)

1.5.1.4. Ανόπτηση εξομάλυνσης

Πολλές φορές, χάλυβες που έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση, όπως έλαση ή σφυρηλασία αποτελούνται από κόκκους περλίτη (συν όποια προευτηκτοειδή φάση), οι οποίοι έχουν ακανόνιστο σχήμα, είναι σχετικά μεγάλοι, καθώς και με σημαντική διακύμανση ως προς το μέγεθός τους. Εφαρμόζεται για τη μείωση του μεγέθους των κόκκων και των φυλλιδίων φερρίτη/σεμεντίτη εντός του περλίτη. Λεπτόκοκκοι περλιτικοί χάλυβες είναι συνήθως πιο δύσθραυστοι από τους αντίστοιχους χονδρόκοκκους. Για το σκοπό αυτό, ο χάλυβας θερμαίνεται 55-85°C πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 , για ορισμένο χρονικό διάστημα και ανάλογα την περιεκτικότητά του σε άνθρακα, μέχρι να γίνει πλήρης ωστενιτοποίησή του. Εν συνέχεια ακολουθεί αργή απόψυξη στον ατμοσφαιρικό αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.5.1.5. Αποτατική Ανόπτηση

Κατά την αποτατική ανόπτηση, ο χάλυβας θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία από 580-650°C και στη συνέχεια ακολουθεί αργή απόψυξη. Εσωτερικές τάσεις συσσωρεύονται στα υλικά κατά τη διαδικασία παραγωγής τους είτε από κατεργασίες πλαστικής παραμόρφωσης,

ανομοιόμορφη ψύξη είτε από μετασχηματισμούς φάσεων διαφορετικής πυκνότητας. Η εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων πραγματοποιείται μέσω της διάχυσης των ατόμων.

Στην περίπτωση που οι παραμένουσες τάσεις δεν απαλειφθούν είναι δυνατόν να προκληθεί στρέβλωση ή παραμόρφωση του αντικειμένου. Η αποτατική ανόπτηση δε μεταβάλλει την κρυσταλλική δομή του χάλυβα επειδή πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία.

1.5.2. Βαφή

Βαφή είναι η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, που περιλαμβάνει ένα στάδιο θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα σε θερμοκρασία ίδια με αυτή της πλήρους ανοπτήσεως (ωστενιτοποίηση) ακολουθούμενο από ένα στάδιο ταχείας ψύξης, με εμφάπτιση του χάλυβα σε κάποιο μέσο ψύξης (νερό, λάδι, αέρας). Στόχος της βαφής είναι η βελτίωση της σκληρότητας και της αντοχής του χάλυβα, αποκτώντας έπειτα από βαφή έως και την τριπλάσια σκληρότητα.

Στο στάδιο της ωστενιτοποίησης, το δοκίμιο πρέπει να παραμείνει σε κατάλληλη θερμοκρασία και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ώστε η δομή του να μετατραπεί πλήρως σε ωστενιτική, αποφεύγοντας τις υψηλές θερμοκρασίες, διότι μεγεθύνουν υπερβολικά τον κόκκο του και μειώνοντας έτσι την αντοχή. Επίσης, όταν η δομή του ωστενίτη είναι λεπτόκοκκη και ομογενής, τότε και η τελική δομή είναι επίσης λεπτόκοκκη, παρουσιάζοντας τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των λεπτοκρυσταλλικών υλικών. Για την αποφυγή της οξειδωσης και της ενανθράκωσης του χάλυβα κατά την ωστενιτοποίηση, χρησιμοποιούνται κλίβανοι με προστατευτική ατμόσφαιρα (π.χ. Ar, κενό) είτε τήγματα ουδέτερων αλάτων και ανθρακούχων αλάτων, όπου λόγω ισορροπίας δεν υπάρχει διάχυση του άνθρακα.

Στο επόμενο στάδιο, το δοκίμιο αποψύχεται απότομα με εμφάπτιση σε υγρό μέσο σχηματίζοντας μαρτενσίτη. Η ταχύτητα απόψυξης είναι σημαντική τόσο για το βαθμό σκλήρυνσης, όσο και για τυχόν αστοχίες (ρωγμές), που δύναται να προκύψουν λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Όσο πιο απότομη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό του μετασχηματιζόμενου Μαρτενσίτη, άρα και η σκληρότητα του υλικού, με συνέπεια τη δραματική μείωση της δυσθραυστότητας και με κίνδυνο την εμφάνιση ρωγμών. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από τη δραστηριότητα του ψυκτικού μέσου. (49),(50),(51)

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές στις τεχνικές βαφής οι οποίες είναι:

- Άμεση βαφή
- Χρονική Βαφή
- Επιλεκτική Βαφή
- Βαφή με ψεκασμό
- Διακοπτόμενη Βαφή (52)

Οι τεχνικές βαφής με υγρά μέσα είναι η βαφή με βύθιση ή με ψεκασμό. Η βαφή με βύθιση είναι ο πιο συνήθης. Το μέταλλο αποψύχεται απευθείας από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε θερμοκρασία δωματίου ή και ανώτερη, ανάλογα το επιθυμητό αποτέλεσμα μικροδομής, από την Ms, όπου παραμένει για μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Κατά τη διακοπτόμενη βαφή, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την προσθήκη δεύτερου σταδίου βραδύτερης απόψυξης. Η βαφή μέσω ψεκασμού, γίνεται με ψεκασμό του υγρού επί των περιοχών αυτών του μετάλλου, όπου επιθυμούνται υψηλότεροι ρυθμοί ψύξης. Η πυκνότητα και το υλικό του μέσου ψύξης καθώς και η τοπική κατανομή του στο μέταλλο, είναι οι κύριοι παράγοντες για τη μεταφορά θερμότητας σε αυτό.(53)

1.5.3. Επαναφορά

Μετά τη βαφή, ο μαρτενσίτης είναι πολύ σκληρός και ψαθυρός για να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Εσωτερικές τάσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια βαφής συμβάλλουν στην εξασθένησή του. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασία μικρότερη της ευτηκτοειδούς, από 250°C έως 650°C, για ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι εσωτερικές τάσεις μπορούν να εκτονωθούν και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες της τάξεως των 200°C. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επαναφορά και οδηγεί σε μία δομή γνωστή ως μαρτενσίτης από επαναφορά. Από τους 250°C και πάνω αρχίζει ο άνθρακας να διαχέεται, ενώ από τους 450°C και πάνω αρχίζουν να διαχέονται κ άλλα κραματικά στοιχεία με μικρότερους συντελεστές διάχυσης. (20),(54)

1.5.3.1. Μαρτενσίτης από επαναφορά

Κατά τη διάρκεια της επαναφοράς, ο μονοφασικός υπέρκορος σε άνθρακα μαρτενσίτης μετασχηματίζεται στις δύο σταθερές φάσεις του φερρίτη και του σεμεντίτη. Εξαιρετικά μικρά σωματίδια σεμεντίτη διασκορπίζονται ομογενώς σε μία συνεχή μήτρα φερρίτη μέσω του μηχανισμού διάχυσης. Η δομή του είναι όμοια με αυτή του σφαιροειδίτη με τη διαφορά ότι τα σφαιρίδια σεμεντίτη, είναι πολύ μικρότερα. (20)

1.5.3.2. Στάδια επαναφοράς

Κατά τη διάρκεια της επαναφοράς, ο μαρτενσίτης απορρίπτει την περίσσεια άνθρακα και μετατρέπεται σε φερρίτη και καρβίδια.

Παρακάτω τα στάδια των αλλαγών της δομής που συμβαίνουν σε διάφορες θερμοκρασίες για κοινό ανθρακούχο χάλυβα:

- Το προστάδιο συνάθροισης των ατόμων του άνθρακα και φύτρωσης καρβιδίων μέσα στη μήτρα. (54)
- Το πρώτο στάδιο επαναφοράς της κατακρήμνισης καρβιδίων από 150-230°C.
- Το δεύτερο στάδιο αποτελεί η διάσπαση του υπολειπόμενου ωστενίτη από 230-280°C.
- Το τρίτο στάδιο επαναφοράς είναι ο μετασχηματισμός των καρβιδίων σε σεμεντίτη από τους 260-360°C (54),(55)

Κατά την επαναφορά, ο μαρτενσίτης γίνεται φερρίτης και χάνει σιγά σιγά τη βελονοειδή του μορφή, δηλαδή ανακρυσταλλώνεται. Η ανακρυστάλλωση δικαιολογείται από την παρουσία των εσωτερικών τάσεων στον μαρτενσίτη, που δημιουργούν κατάσταση ανάλογη της ενδοτράχυνσης. Σε θερμοκρασία >600°C, ο σεμεντίτης αρχίζει να σφαιροποιείται.

Στους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες παίρνουμε μια πολύ καλή μικρογραφική δομή, ομογενή και με άριστες μηχανικές ιδιότητες. Η σκληρότητα και ανθεκτικότητα του μαρτενσίτη από επαναφορά μπορεί να είναι σχεδόν ίδια με αυτή του μαρτενσίτη με βελτιωμένη ολκιμότητα και δυσθραυστότητα. (20),(51),(54),(56),

Η σωστή επιλογή μεθόδου θερμικής κατεργασίας ενός χάλυβα εξαρτάται από παραμέτρους όπως η χημική του σύσταση, η κατανομή της μάζας των τεμαχίων και η γεωμετρία τους.

1.6. **Ο Χάλυβας 4130**

Ο χάλυβας 4130 είναι ένας χαμηλής κραμάτωσης μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβας, με το χρώμιο και το μολυβδαίνιο ως κραματικά στοιχεία. Είναι γνωστός για την υψηλή αντοχή, σκληρότητα και την καλή αντίσταση στη διάβρωση και την οξειδωση. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία αεροναυπηγικής, την κατασκευή σκελετών αγωνιστικών οχημάτων, την κατασκευή γεφυρών, πλοίων, κτηρίων και άλλων κατασκευών που απαιτούν υψηλή αντοχή και αντοχή στις χρόνιες καταπονήσεις. Αντίστοιχα πρότυπα

αποτελούν τα BS 25CrMo4 και EN 1.7214. Παρακάτω τα χαρακτηριστικά και ιδιότητες του.(56)

Χημική Σύνθεση

Ανθρακας (C)	0.28-0.33%
Χρώμιο (Cr)	0.8-1.1%
Μολυβδαίνιο (Mo)	0.15-0.25%
Μαγγάνιο (Mn)	0.4-0.6%
Πυρίτιο (Si)	0.15-0.35%
Θείο (S) και Φώσφορος (P)	0.025%

Μηχανικές Ιδιότητες

Εφελκυστική αντοχή (Ultimate Tensile Strength - UTS)	560-670 MPa
Αντοχή διαρροής (Yield Strength)	460-590 MPa
Επιμήκυνση (Elongation):	21-28%
Σκληρότητα (Hardness):	217-235 HB (Brinell), 95(Rockwell B)
Κατεργασιμότητα	: 72%(Ανοπτημένος) Ο χάλυβας 4130 μπορεί να υποβληθεί σε θερμική επεξεργασία για να βελτιώσει τις μηχανικές του ιδιότητες.
Ανόπτηση (Annealing)	Θέρμανση στους 843°C, ακολουθούμενη από αργή ψύξη.
Επαναφορά (Tempering)	Μετά από βαφή σε λάδι ή νερό στους 830-860°C, πραγματοποιείται επαναφορά στους 205-649°C ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες.

Συγκολλησιμότητα

Ο χάλυβας 4130 έχει καλή συγκολλησιμότητα, ιδιαίτερα με τη χρήση μεθόδων TIG και MIG. Συνιστάται προθέρμανση και θερμική επεξεργασία μετά τη συγκόλληση για την αποφυγή ρωγμών από εναπομείνουσες εσωτερικές τάσεις.

Μικροδομή

Η μικροδομή του χάλυβα 4130 συνήθως αποτελείται από φερρίτη και περλίτη. Μετά από θερμική επεξεργασία, μπορεί να παρατηρηθεί μάρτενσιτης, που ενισχύει την αντοχή του υλικού. Οι θερμικές επεξεργασίες και οι διαδικασίες συγκόλλησης επηρεάζουν σημαντικά τη μικροδομή και, συνεπώς, τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Ο χάλυβας 4130 αποτελεί επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε μηχανική καταπόνηση σε βάθος χρόνου, ενώ η σωστή θερμική επεξεργασία και συγκόλληση είναι κρίσιμες για τη διασφάλιση της ακεραιότητας του.(56),(57)

1.7. Συγκόλληση τόξου χάλυβα 4130 σε αδρανή ατμόσφαιρα

Κατά την παραγωγή κατασκευών από τον συγκεκριμένο χάλυβα χρησιμοποιείται πληθώρα μεθόδων αναλόγως την εφαρμογή. Στην κατασκευή πλαισίων(Chassis) για Καρτ χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον οι μέθοδοι TIG και MIG/MAG, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Η σωστή επιλογή προστατευτικού αερίου είναι σημαντική. Τα ηλεκτρόδια με αντίστοιχες αντοχές προτιμώνται για να πληρούν τις απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων του συνδέσμου. Οι συγκολλήσεις με αδρανή ατμόσφαιρα εξασφαλίζουν την προστασία της ζώνης συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα, δηλαδή ουσιαστικά από το οξυγόνο και το άζωτο που επηρεάζουν τη συγκόλληση. Χρησιμοποιούνται τα αέρια Αργό(Ar), Ήλιο(He) και Διοξείδιο του Ανθρακα(CO₂). Από τα τρία αυτά αέρια χρησιμοποιείται περισσότερο το αργό. Το Ήλιο προτιμάται συνήθως σε εφαρμογές με υψηλότερες θερμικές απαιτήσεις(π.χ. μεγαλύτερα πάχη), λόγω της καλής θερμικής του αγωγιμότητας κάνοντας δυνατό μεγαλύτερα βάθος διείδυσης και μεγαλύτερη σε πλάτος ζώνης τήξης. Το Διοξείδιο του άνθρακα προτιμάται επίσης για τη διεισδυτικότητα καθώς και όταν θέλουμε να περιορίσουμε τη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη(ΘΕΖ). Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο αέριο προκαλεί πιτσιλίσματα και διατηρεί ένα πιο ασταθές τόξο. Η ηλεκτροσυγκόλληση σε αδρανή ατμόσφαιρα γίνεται με τρεις μεθόδους:

- T.I.G. (Tungsten Inert Gas)
- M.I.G. (Metal Inert Gas)
- M.A.G. (Metal Active Gas)

1.7.1. Gas Tungsten Arc Welding(GMAW)/TIG

Στερεωμένο στον πυρσό (τσιμπίδα) συγκόλλησης βρίσκεται ένα μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου (σημείο τήξης 3.370°C) στο οποίο καταλήγει το ρεύμα συγκόλλησης από την χρησιμοποιούμενη πηγή ισχύος.

Μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου και του υλικού προς συγκόλληση, σχηματίζεται ένα τόξο το οποίο τήκει το υλικό βάσης και τήκει το πρόσθετο μέταλλο πλήρωσης. Το υλικό πλήρωσης είναι σε μορφή βέργας και προστίθεται χειρωνακτικά ή μηχανοποιημένα. Η μέθοδος εφαρμόζεται και χωρίς προσθήκη υλικού πλήρωσης ως αυτογενής συγκόλληση τόξου.

Παροχή αδρανούς προστατευτικού αερίου ρέει από την τσιμπίδα συγκόλλησης περιμετρικά του πυρακτωμένου ηλεκτροδίου βολφραμίου προστατεύοντας το από την οξείδωση, καθώς επίσης και το λουτρό τήξης από τον αέρα.

Το σύστημα ψύξης του πυρσού για πηγές ρεύματος έως 200A είναι το προστατευτικό αέριο ενώ για μεγαλύτερες πηγές ο πυρσός ψύχεται με σύστημα ψύξης νερού.

Είναι ιδανική για συγκόλληση ελασμάτων μικρού πάχους με μικρή όμως ταχύτητα συγκόλλησης και δεν προτιμάται για μεγάλα ελάσματα, ενώ τα αδρανή αέρια είναι σχετικά ακριβά.

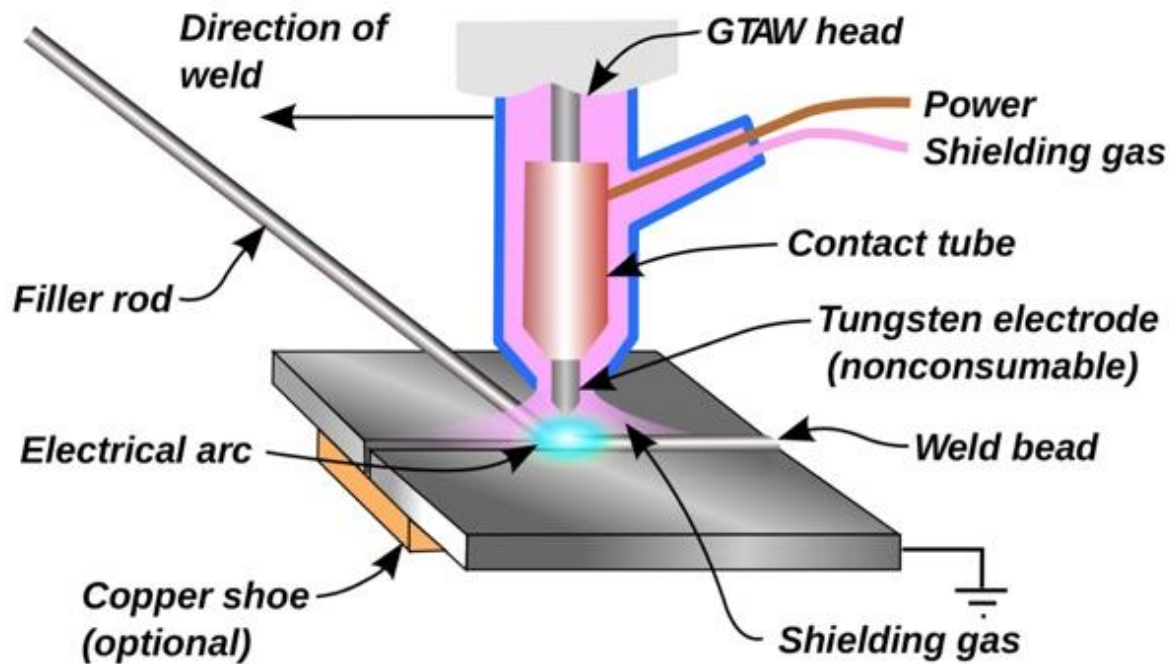
Η μέθοδος συγκόλλησης TIG επιτρέπει τη συγκόλληση χαλύβων και μη σιδηρούχων κραμάτων σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.

Γενικά, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές, η οικονομικά αποδοτική περιοχή της χρήσης της βρίσκεται σε πάχος υλικού από 0.5-5.0mm.

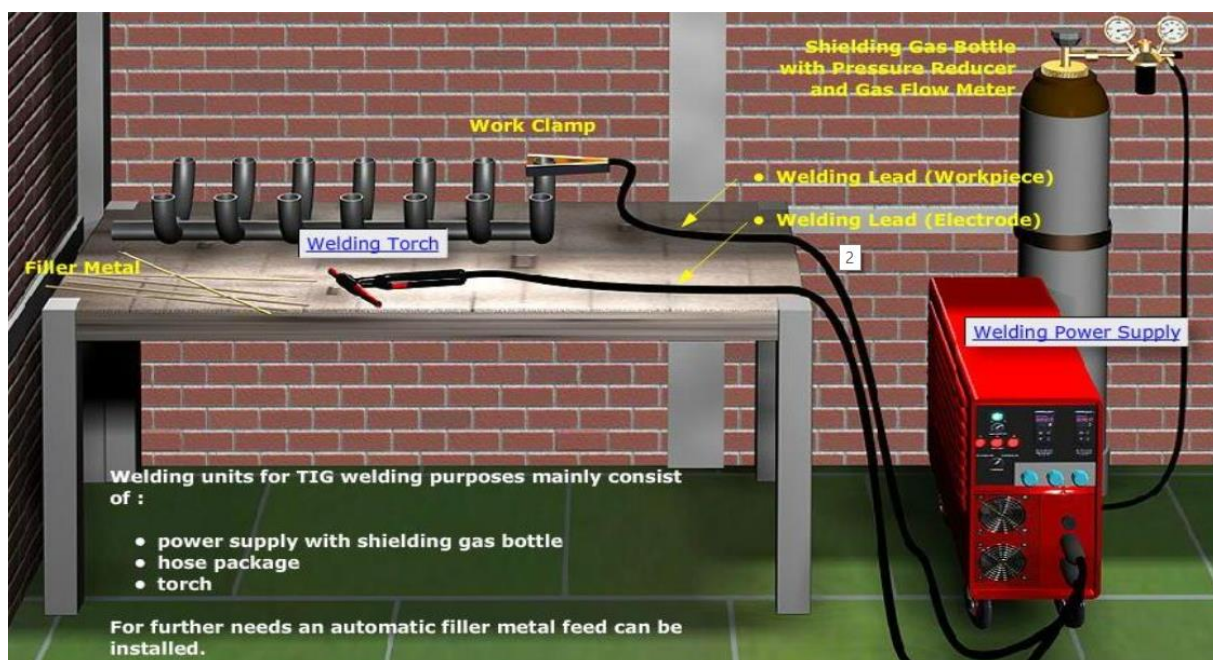
Στην περίπτωση υλικών προς συγκόλληση με μεγαλύτερο πάχος, συνήθως, θα συγκολληθούν μόνο τα κορδόνια της ρίζας με αυτή τη μέθοδο.

Σημαντικά πεδία χρήσης είναι η αεροδυναμική και διαστημική τεχνολογία, μηχανολογικές εφαρμογές μικρών ανοχών, η κατασκευή εξοπλισμού και δοχείων υψηλών απαιτήσεων.

(58),(59),(60)



Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου TIG(61)



Εικόνα 14. Τυπική διάταξη εξοπλισμού της μεθόδου TIG(62)

1.7.2. Οι μέθοδοι MIG/MAG

Η ουσιώδης διαφορά μεταξύ της μεθόδου συγκόλλησης TIG και της μεθόδου MIG, είναι ο διαφορετικός ρόλος και χρήση των ηλεκτροδίων των δύο μεθόδων.

Το ηλεκτρόδιο στη συγκεκριμένη μέθοδο εκτός από το ρόλο τους να παράγουν και να συντηρούν το τόξο, αποτελούν ταυτόχρονα και υλικό πλήρωσης, τήκονται δηλαδή και εναποτίθενται στο λουτρό τήξης, αποτελώντας τελικά μέρος των συγκολλημένων τεμαχίων. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται είναι είτε αδρανή (Inert, Ar, He) είτε ενεργά (Active, CO₂) και επιλέγονται ανάλογα το είδος της εφαρμογής και τις απαιτήσεις. Γενικά τα ενεργά αέρια επιλέγονται όταν θέλουμε υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης και εντονότερη διείσδυση όμως δημιουργούν πιο ασταθές τόξο συγκριτικά με τα αδρανή αέρια και πιτσιλίσματα. Η μέθοδος είναι αρκετά πιο γρήγορη από την TIG, καθώς το ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε κουλούρα εντός της πηγής και τροφοδοτείται αυτόματα. Το πεδίο εφαρμογής καθορίζει την επιλογή συνδυασμού του κατάλληλου σύρματος και προστατευτικού αερίου. Στην περίπτωση συγκολλήσεων ανθρακούχων χαλύβων χρησιμοποιούνται συνήθως ενεργά προστατευτικά αέρια ενώ για υψηλά κραματωμένους ανοξείδωτους χάλυβες (και μη σιδηρούχων μετάλλων/κραμάτων) χρησιμοποιούνται συνήθως αδρανή αέρια (ή μίγματα τους με μικρές προσμίξεις ενεργών αερίων). (58), (59), (59)

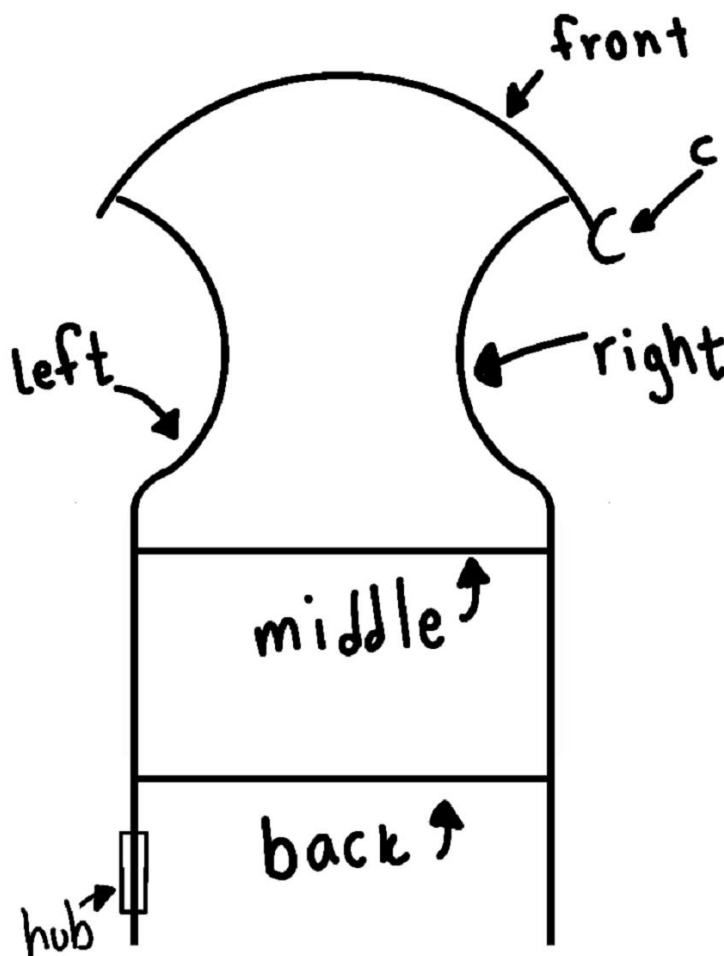


Εικόνα 15. Τυπική διάταξη εξοπλισμού της μεθόδου MIG(62)

2. Πειραματικό μέρος

2.1. Μεθοδολογία

Παρακάτω, αναλυτικά οι διαδικασίες πειραματικών διεργασιών που ακολούθησαν. Είχαμε στη διάθεσή μας δύο σκελετούς από αγωνιζόμενες εταιρείες, η μία εκ των οποίων φαίνεται να έχει ανώτερες συνολικές ιδιότητες. Αυτό φαίνεται τόσο από την καλύτερη απόδοση στους αγώνες όσο και από την διαδικασία καλιμπραρίσματος, όταν αυτό είναι απαραίτητο, μετά από κάποιον αγώνα. Στην περίπτωση του B υπήρξαν επιτυχημένες επαναφορές στην αρχική του κατάσταση, εν αντιθέσει με της A που πολλές φορές ήταν αδύνατη η επαναφορά και έπρεπε να χρησιμοποιηθεί καινούριος σκελετός. Ακολουθεί το σκαρίφημα του καρτ από το οποίο προέκυψαν τα υπό μελέτη δείγματα.



Εικόνα 16. Σκαρίφημα του σασί.

2.2. Μεταλλογραφική προετοιμασία

2.2.1. Κοπές

Τα δοκίμια κόπηκαν με συμβατικό ηλεκτρικό τροχό μπαταρίας 18V μάρκας Makita κ διαμέτρου 125mm. Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες κοπές μικρής διάρκειας, σε συνδυασμό με ψεκασμό WD-40 για χρήση ως ψυκτικού καθώς και λιπαντικού μέσου. Απώτερος σκοπός η αποφυγή υπερθέρμανσης του μετάλλου και παραμόρφωση της μικροδομής του.

2.2.2. Λειάνσεις

Πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό μηχάνημα λείανσης Struers LaboPol-5, αποτελούμενο από έναν κυκλικό δίσκο πάχους 30mm ο οποίος περιστρέφεται και στην επιφάνεια του τοποθετείται κυκλικό υαλόχαρτο του επιθυμητού μεγέθους. Μια κυκλική στεφάνη ασφαλίζει το υαλόχαρτο στη θέση του, η οποία έρχεται κ σφηνώνει στην θηλυκή μήτρα η οποία έχει ελάχιστα μικρότερη διάμετρο προκειμένου να καθίσταται δυνατή η σφήνωση μέσω ελαστικής παραμόρφωσης της στεφάνης. Σε απόσταση 100mm βρίσκεται τοποθετημένο επιστόμιο που παρέχει ψυκτικό μέσο (στην περίπτωση μας νερό) και περιστρέφεται, επιτρέποντας τον καθορισμό της ακτίνας πάνω στην οποία προσπίπτει το παρεχόμενο υγρό. Το μηχάνημα διαθέτει επίσης δύο ταχύτητες οι οποίες επιτρέπουν την περιστροφή 0-600rpm και 0-1500rpm.

Η λείανση γίνεται σε μια σταθερή διεύθυνση προκειμένου να ευθυγραμμιστούν οι αυλακώσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Αφού το δοκίμιο λειανθεί επαρκώς και επιμελώς με συνεχείς ελέγχους κατά την διάρκεια της λείανσης και προσαρμογή του επάνω στην επιφάνεια του υαλόχαρτου με σκοπό την όσο το δυνατόν πιο επίπεδη λείανσή του καθώς και της ασκούμενης πίεσης στην επιφάνειά του, αποσύρουμε το υαλόχαρτο και τοποθετούμε νέο μικρότερης κοκκομετρίας. Σε αυτή τη φάση ακολουθούμε τα ίδια βήματα με την μόνη διαφορά ότι το δοκίμιο πλέον τοποθετείται 90° περιστραμμένο με σκοπό την πιο ομοιόμορφη λείανση καθώς και την απομάκρυνση των "γραμμών" της προηγούμενης.

Οι λειάνσεις ξεκίνησαν χρησιμοποιώντας γυαλόχαρτα μεγέθους 240, 600 και 1000 grit. Όσο μεγαλύτερο το νούμερο, τόσο μικρότερη η κοκκομετρία του. Ξεκινώντας από το «χοντρότερο», η μετάβαση στο λεπτότερο καθοριζόταν από το πότε οι γραμμές του δοκιμίου εξαφανίζονταν, τη θέση των οποίων έπαιρναν κάθετες καθώς και λιγότερο έντονες. Αυτό αποτελεί ένα σημείο αναφοράς για την κατά το δυνατόν πιο ομοιόμορφη λείανση όλης της επιφάνειας του δοκιμίου. Κατόπιν, προχωρήσαμε σε αντικατάσταση των γυαλόχαρτων με βελούδο στίλβωσης, στο οποίο προστίθεται αδαμαντόπαστα εξαιρετικά μικρής κοκκομετρίας, σε συνδυασμό με υγρό στίλβωσης, με την λήξη της οποίας η επιφάνεια γινόταν πλέον σαν καθρέφτης.



Εικόνα 17. Struers Labopol-5

2.2.3. Χημική προσβολή

Αφού ολοκληρώθηκε η στύλωση και με πολύ προσεχτική διαχείριση των δοκιμίων, ώστε να μην χαράξει κανένα ξένο σώμα την επιφάνεια, προχωρήσαμε σε χημικές προσβολές, χρησιμοποιώντας διάλυμα NiTal 2% για όχι περισσότερο από 30 δευτερόλεπτα καθώς η μεγαλύτερη έκθεση στο διάλυμα, θα οδηγούσε σε υπερ- προσβολή του δοκιμίου κ όλη η διαδικασία της λείανσης-στύλωσης θα έπρεπε να επαναληφθεί εκ νέου. Έπειτα, χρησιμοποιήσαμε οπτικό μικροσκόπιο για την παρατήρηση των μικροδομών και τη λήψη των αντίστοιχων φωτογραφιών.

2.3. Μετρήσεις μηχανικών ιδιοτήτων

2.3.1. Σκληρομέτρηση κατά Vickers

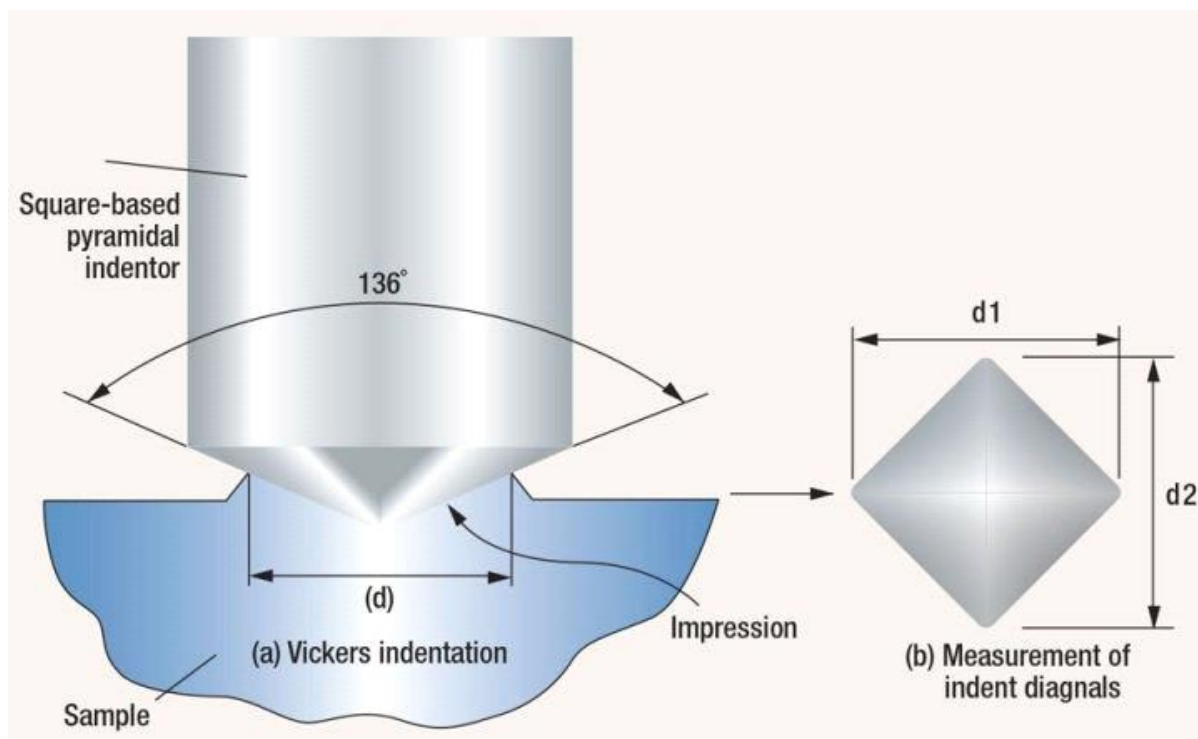
Η μέθοδος σκληρομέτρησης κατά Vickers χρησιμοποιεί σαν εντυπωτή αδαμαντοπυραμίδα τετραγωνικής βάσης και γωνία κορυφής 136ο . Τα φορτία που εφαρμόζονται ξεκινούν από μερικά p και φθάνουν τις μερικές εκατοντάδες kp. Με τη διείδυση της πυραμίδας μέσα στο υλικό δημιουργείται ένα κωνικό αποτύπωμα στην ιδανικότερη περίπτωση αν και τις περισσότερες φορές το αποτύπωμα που δημιουργείται έχει σχήμα ρόμβου και αυτό οφείλεται στην μικροσκοπική ανισοτροπία του υλικού. Η τιμή της σκληρότητας υπολογίζεται μαθηματικά από τον τύπο:

$$HV = 1,854P/d^2$$

Όπου P: η δύναμη που ασκείται σε Kp

d : ο μέσος όρος των διαγωνίων του αποτυπώματος (mm), δηλαδή (d1+d2)/2

Ωστόσο, έχουν δημιουργηθεί κατάλληλοι πίνακες μέσω των οποίων γνωρίζοντας την τιμή του d προκύπτει και η τιμή της σκληρότητας.

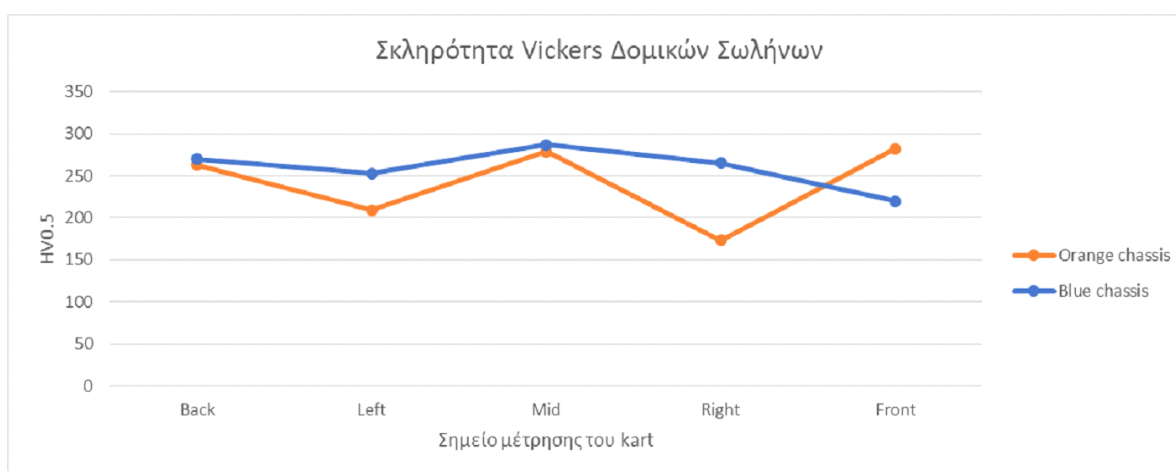


Εικόνα 18 Μέθοδος σκληρομέτρησης Vickers(63)

3. Αποτελέσματα

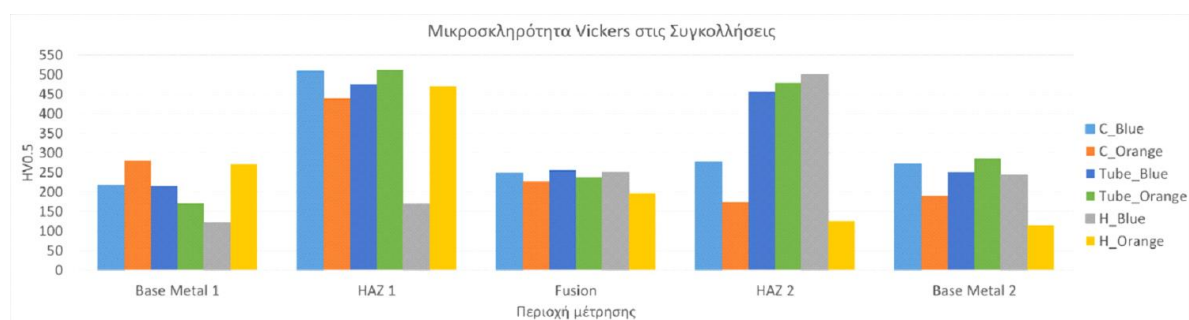
3.1. Μηχανικές Ιδιότητες

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες έγιναν μετρήσεις μικροσκληρότητας Vickers HV0.5 με φορτίο δηλαδή 500 gr. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η τιμή σκληρότητας HV0.5 για τους δομικούς σωλήνες ενώ στο δεύτερο διάγραμμα φαίνεται η τιμή σκληρότητας αφότου ακολούθησε μελέτη της χημικής σύστασης του χάλυβα και αναζήτηση στα εκάστοτε πρότυπα. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται τόσο επαλήθευση των συμπερασμάτων για τον τύπο χάλυβα που μελετάμε, όσο και μια πιθανή προσέγγιση του τύπου κατεργασίας που μπορεί να ακολούθησε, λόγω πιθανής διαφοράς αποτελεσμάτων του ευρισκόμενου προτύπου με αυτά των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 19. Σκληρότητα δομικών σωλήνων (Κατά Vickers).

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η τιμή σκληρότητας HV0.5 για τους σωλήνες όπου συγκολλήθηκαν ενώ στο ακόλουθο σκαρίφημα φαίνονται οι συγκολλήσεις οι οποίες είναι μείζονος σημασίας για την ακεραιότητα του καρτ και μελετήθηκαν.



Εικόνα 20. Συγκολλημένοι σωλήνες σκληρότητα (Μέτρηση σε Vickers).

Ζώνη	C-IPK	Hub-IPK	Tube-IPK	C-OTK	Hub-OTK	Tube-OTK
BS1	216.6	120.8	214.8	280.3	270.6	170.5
HAZ1	508.6	168	475.7	438.8	470	511.6
Fusion	247.9	250.4	256.6	226.7	196.8	238.2
HAZ2	277	500	456.3	174.2	126.4	479.1
BS2	270.9	243	251.1	189.8	114.7	285.4

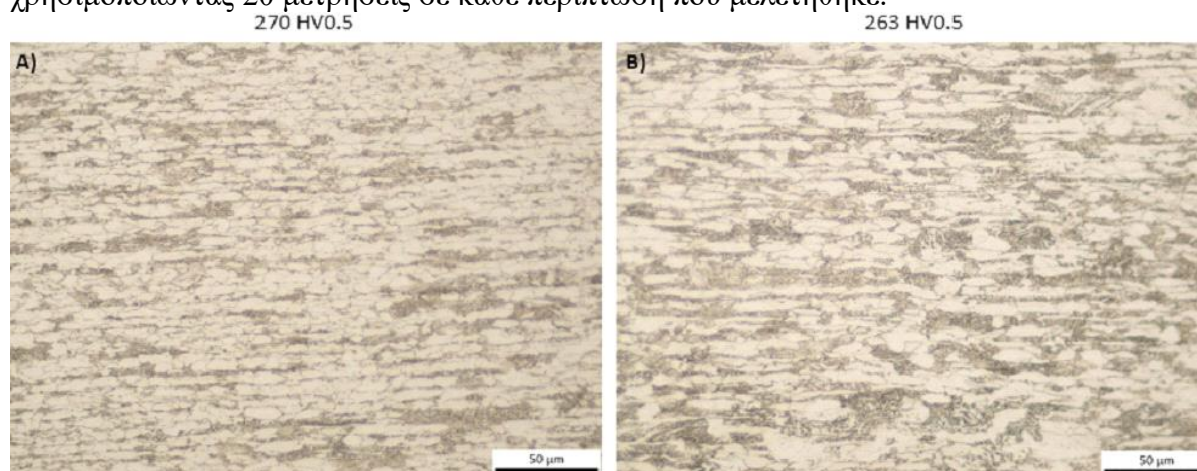
C-Diff(IPK-OTK)	Tube-Diff(IPK-OTK)	Hub-Diff(IPK-OTK)
-63.7	44.3	-149.8
69.8	-35.9	-302
21.2	17.4	53.6
102.8	-22.8	379.6
81.1	-34.3	128.3

Εικόνα 21. Σύγκριση σκληροτήτων των χαλύβων που συγκολλήθηκαν(HV 0.5).

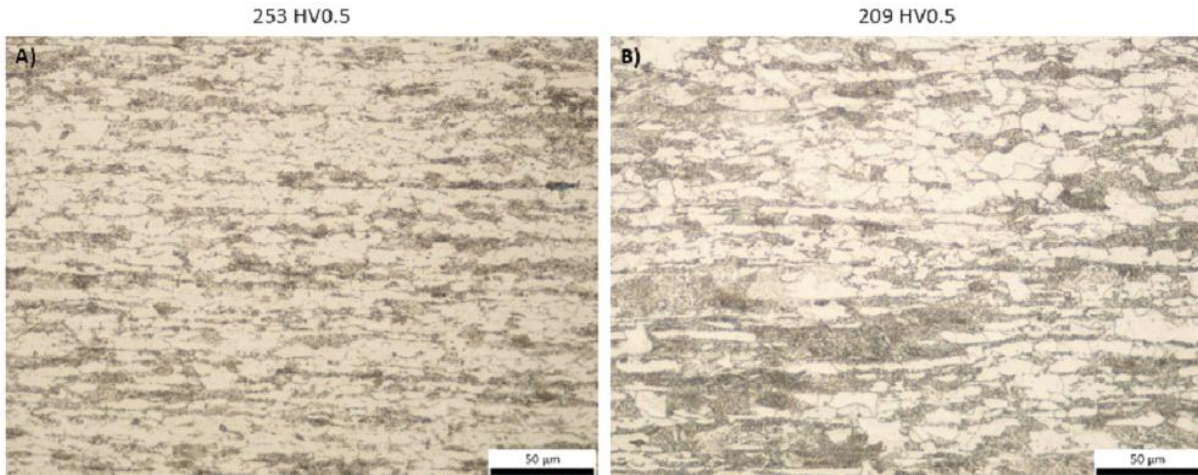
3.2. Οπτική μικροσκοπία

3.2.1. Δομικοί σωλήνες

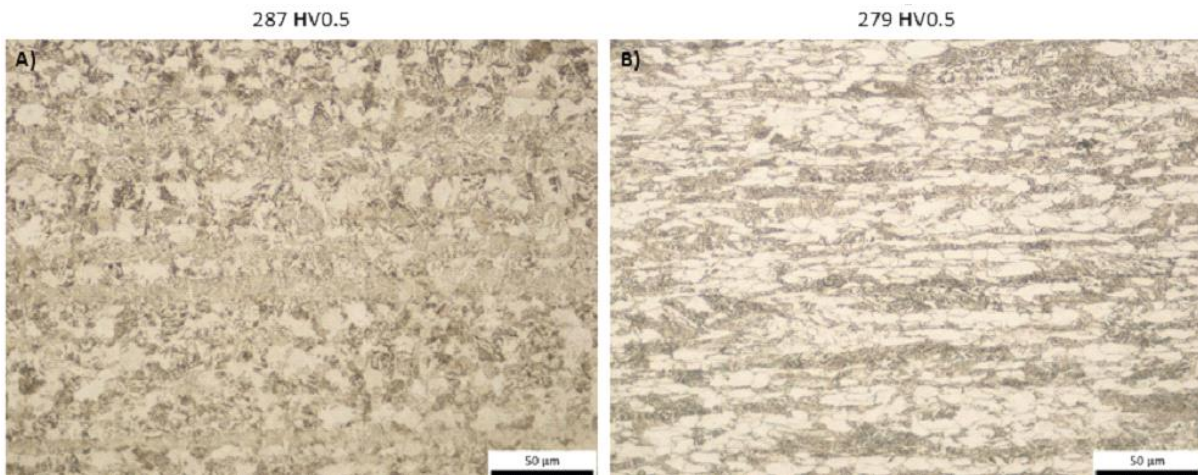
Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες της μικροδομής των δομικών σωλήνων. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό imageJ έγινε μία εκτίμηση του μέσου όρου μεγέθους κόκκων χρησιμοποιώντας 20 μετρήσεις σε κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.



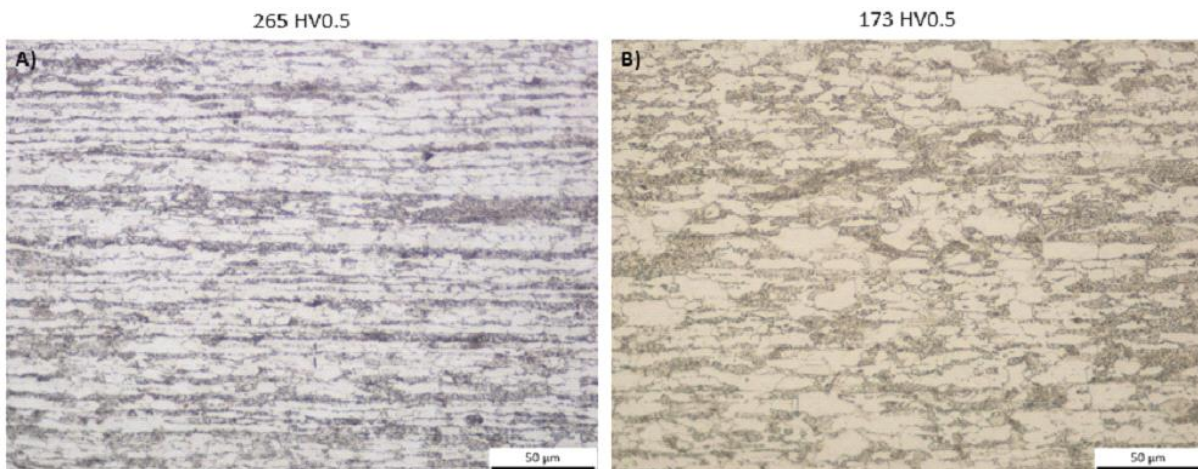
Εικόνα 22. Δομικοί σωλήνες οπίσθιου τμήματος(back).Στην φωτογραφία A) A και B)B. Παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή και στις 2 περιπτώσεις με λίγο πιο χονδρόκοκκη στην δεύτερη και ο προσανατολισμός των κόκκων λόγω της κατεργασίας διέλασης. Πολύ μικρή διαφορά στη σκληρότητα.



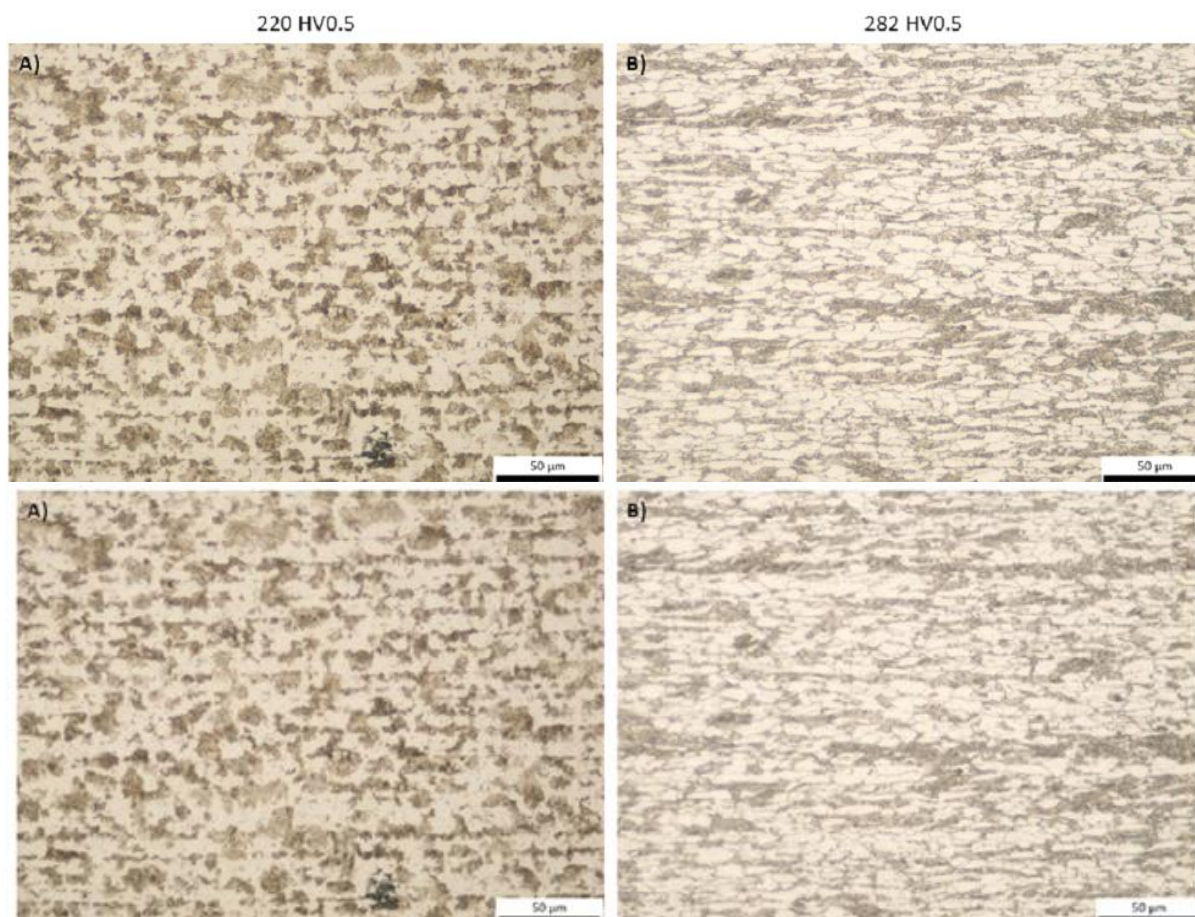
Εικόνα 23. Δομικοί σωλήνες αριστερού τμήματος(left) στο A και B σασί αντίστοιχα. Παρατηρούνται γραμμές διέλασης και στις δύο περιπτώσεις. Η χαμηλότερη σκληρότητα στο ΟΤΚ μπορεί να εξηγηθεί από την πιο χονδρόκοκκη δομή του φερρίτη. Η μικροδομή είναι επίσης φερριτοπερλιτική



Εικόνα 24. Δομικοί σωλήνες κεντρικού τμήματος(mid) με πολύ κοντινές σκληρότητες. Ενώ φαίνεται χονδρότερη μικροδομή στο A, στην πραγματικότητα οι κόκκοι φερρίτη είναι πεπλατυμένοι λόγω της παραμόρφωσης που εισήχθη κατά τη διέλαση και είναι πολύ κοντά σε μέγεθος μεταξύ τους. Οι γραμμές διέλασης στο A είναι λιγότερες και πιο δυσδιάκριτες.



Εικόνα 25. Δομικοί σωλήνες δεξιού τμήματος(right) στο A)A και B)B σασί. Οι γραμμές διέλασης είναι πολύ πιο φανερές για το A σε σχέση με το κεντρικό της ίδιας εταιρίας καθώς και με της B τόσο για το δεξί όσο και για το κεντρικό τμήμα. Έντονη διαφορά στις σκληρότητες και στο μέγεθος κόκκου μεταξύ των δύο.

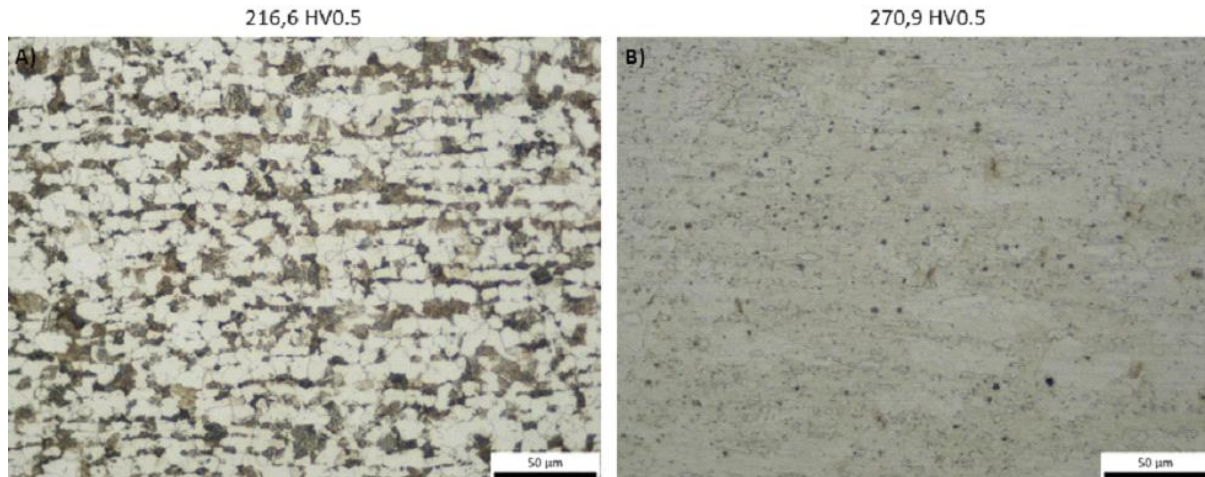


Εικόνα 26. Δομικοί σωλήνες εμπρόσθιου τμήματος(front) στο A)A και B)B σασί. Οι μικροδομές αν και οι δύο είναι φερριτοπερλιτικές έχουν διαφορά στο μέγεθος και το σχήμα κόκκου. Οι κόκκοι του B είναι εντόνως παραμορφωμένοι σε σχέση με της A που εξηγούν και τη διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ τους σε συνδυασμό με το μέγεθος κόκκου.

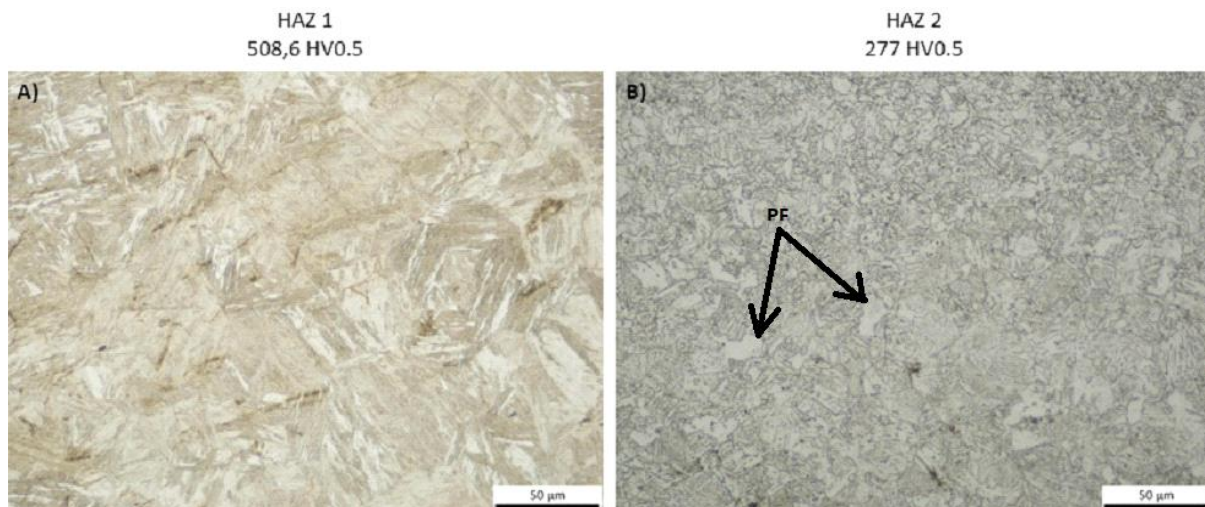
Οι μικροδομές που παρατηρήθηκαν κατά την οπτική μικροσκοπία των μετάλλων είναι αμιγώς φερριτοπερλιτικές. Μόνο το εμπρόσθιο τμήμα της B (282HV) ήταν σκληρότερο, στο οποίο η μικροδομή ήταν αισθητά πιο παραμορφωμένη από του ανταγωνισμού (220HV), ενώ η μικροδομή του είναι επίσης πιο λεπτομερής. Η μεγαλύτερη διαφορά στη σκληρότητα ήταν στους δομικούς σωλήνες του δεξιού τμήματος όπου το δοκίμιο της OTK (173HV) ήταν αρκετά πιο μαλακό από της A (265HV), του οποίου σε αυτή την περίπτωση η μικροδομή του ήταν πιο παραμορφωμένη και με μικρότερο μέγεθος κόκκου. Μικρότερο μέγεθος κόκκου σημαίνει ότι υπάρχουν περισσότερα όρια, άρα υψηλότερη σκληρότητα και η μεγαλύτερη παραμόρφωση σημαίνει μεγαλύτερο ποσοστό διαταραχών εντός των κόκκων, οι οποίες εμποδίζουν τη μετακίνηση ή μία της άλλης(εργοσκλήρυνση). Στο κεντρικό τμήμα ενώ οι σκληρότητες είναι πολύ κοντινές (287HV και 279 αντίστοιχα) οι μικροδομές είναι διαφορετικές ως προς την παραμόρφωση τους. Οι κόκκοι φερρίτη στο B φαίνονται μικρότεροι λόγω λέπτυνσης κατά τη διέλαση του σωλήνα. Στο αριστερό τμήμα έχουμε διαφορά στη σκληρότητα της τάξεως των 44HV, η οποία μπορεί να αποδοθεί στους μεγαλύτερους κόκκους φερρίτη(A~8μm,B~13μm). Παραμόρφωση λόγω επεξεργασίας κατά την παραγωγή των χαλυβδοσωλήνων παρατηρούνται στον ίδιο βαθμό και στους 2 κατασκευαστές. Το ίδιο ισχύει και για το οπίσθιο τμήμα, στο οποίο παρατηρήθηκαν 2 σχεδόν ίδιες μικροφωτογραφίες, ενώ η διαφορά στη σκληρότητα ήταν μόνο 7HV. Τα αποτελέσματα δεν ήταν αναμενόμενα όμως δίνουν κατεύθυνση στην εξέταση του επόμενου παράγοντα, αυτού των συγκολλήσεων όπου πλέον αναμένεται βρεθούν αδυναμίες, καθώς η πλειοψηφία των

σκληροτήτων των μετάλλων βάσης που μελετήθηκε έδειξε ότι το σασί της B, το οποίο και εμφανίζει λιγότερες αστοχίες και παραμορφώσεις κατά τη χρήση του) είναι πιο μαλακό από της A.

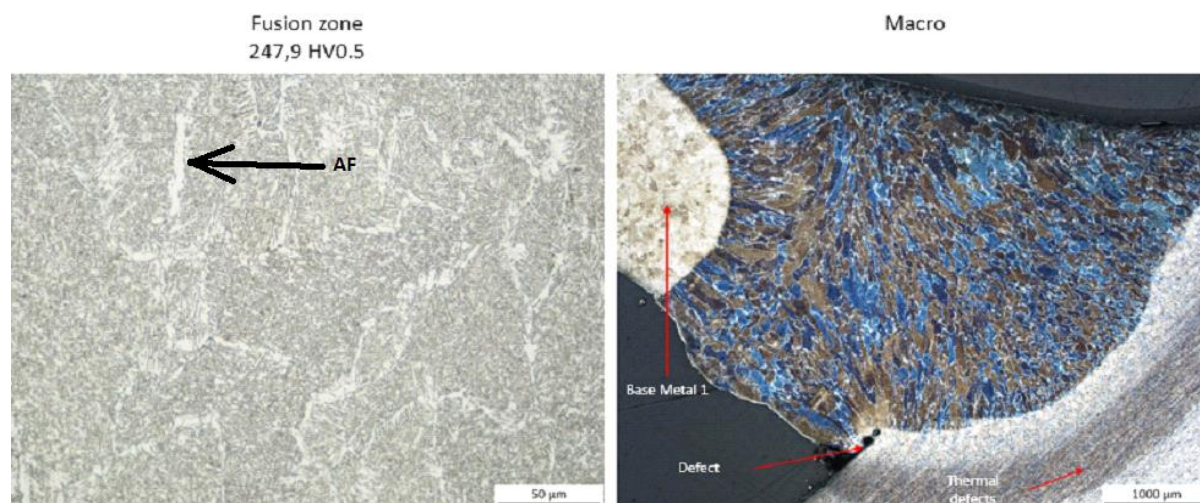
3.2.2. Μελέτη συγκολλήσεων



Εικόνα 27. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος C στο A σασί. Αρκετά πιο χονδρόκοκκη δομή παρατηρείται στο Base metal 1 (BS1). Το BS2 φαίνεται να έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα εμφανίζει όμως αυξημένη σκληρότητα σε σχέση με το BS1 που μπορεί να αποδοθεί στη διαφορά του μεγέθους κόκκων. Παρατηρούνται επίσης διασκορπισμένα καρβίδια (Fe_3C).

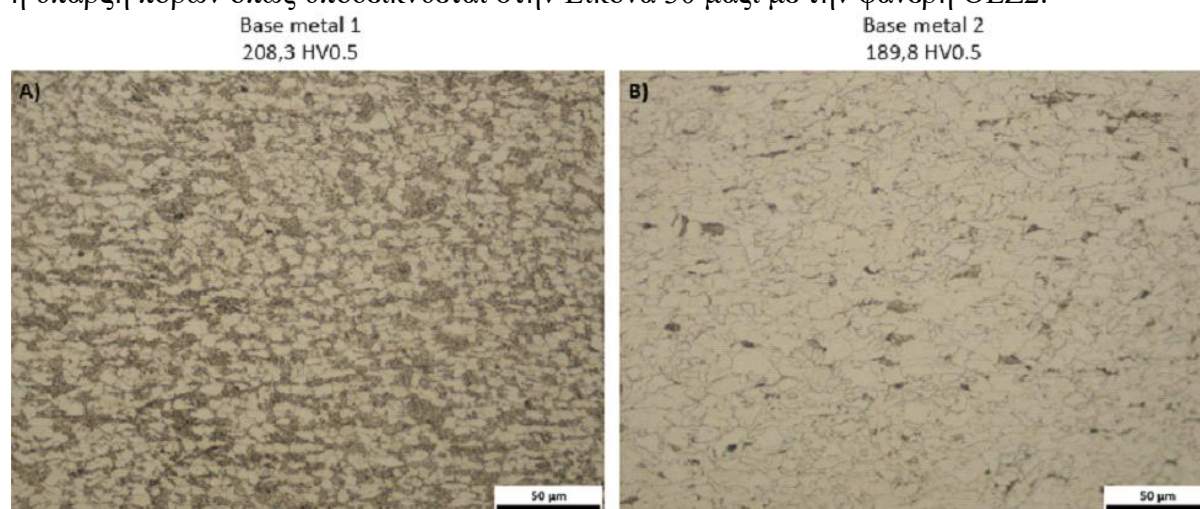


Εικόνα 28. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος C στο A σασί. Βελονοειδής μορφολογία μαρτενσίτη στην HAZ1 με τυχαίους προσανατολισμούς που εξηγεί και την πολύ αυξημένη σκληρότητα. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε μικρότερο μέγεθος κόκκων, όμως πολύ χαμηλότερη σκληρότητα καθώς εδώ η μικροδομή είναι μπαινιτική. Η διαφορά μεταξύ των δομών μπορεί να αποδοθεί στη συμπεριφορά τους κατά την απόψυξη λόγω εμβαπτότητας μας και πιθανότατα πρόκειται για 2 διαφορετικά υλικά.

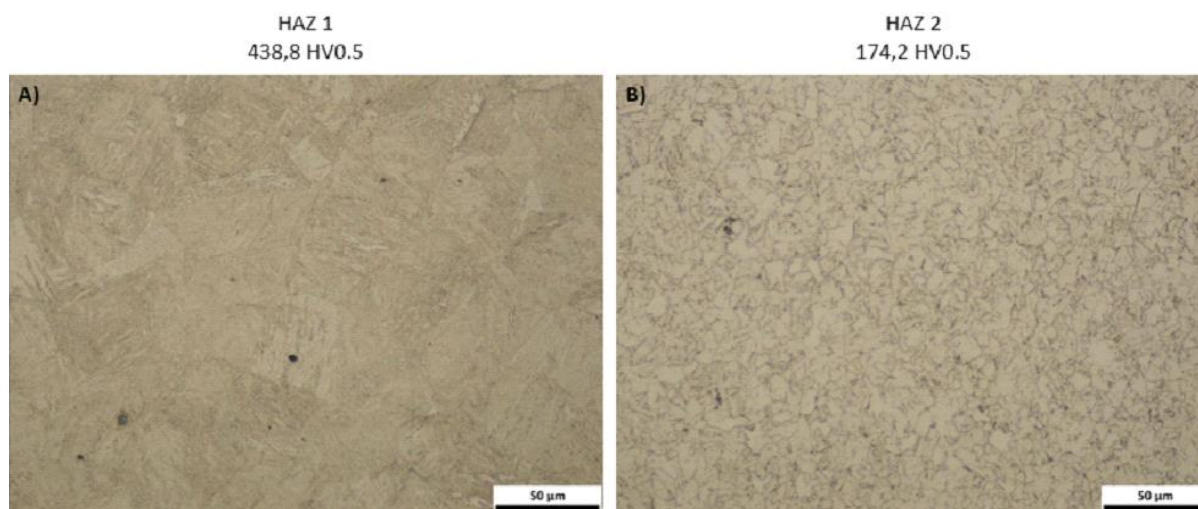


Εικόνα 29. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος C στο A σασί. Παρατηρούνται κόκκοι αλλοτριόμορφου φερρίτη στη ζώνη τήξης. Φανερή HAZ και πόροι στην ατελή συγκόλληση. Στη συγκόλληση με το BS1 παρατηρείται κιονοειδής δομή εν αντιθέσει της ισοαξονικής στην συγκόλληση με το BS2.

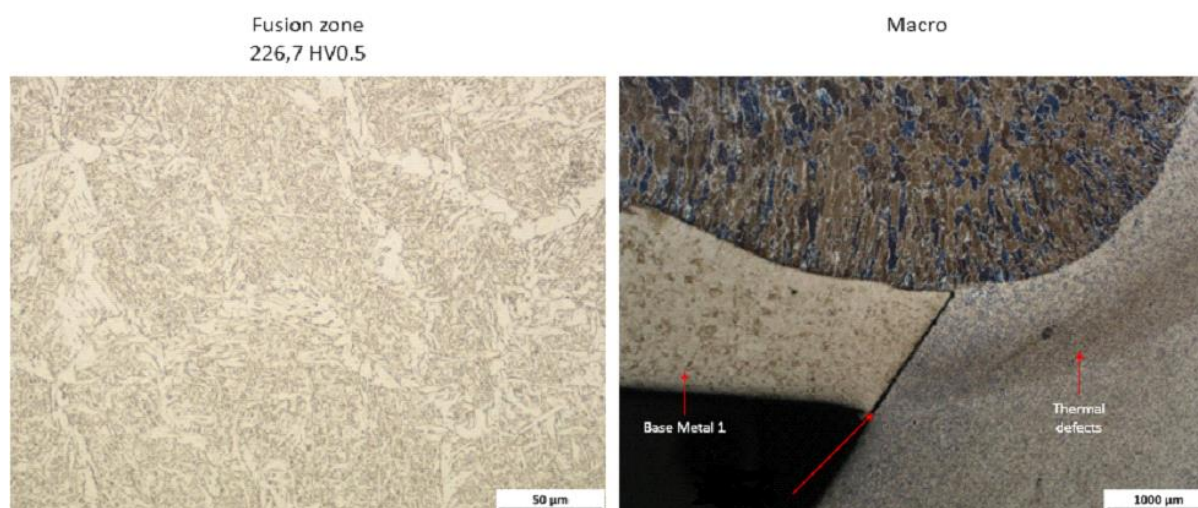
Στις μακροφωτογραφίες που λήφθηκαν για την συγκόλληση του τμήματος C της A, παρατηρήθηκαν αρχικά τα μέταλλα βάσης όπου είχαν αισθητά διαφορετική μικροδομή. Το BS2(270HV) αποτελείται από φερρίτη με ύπαρξη διασκορπισμένων καρβιδίων Fe_3C και φαίνεται να έχει χαμηλότερο ποσοστό σεμεντίτη, που υποδηλώνει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, οι σκληρομετρήσεις όμως έδειξαν πως είναι κατά 54HV σκληρότερο από το BS1(216HV) στο οποίο παρατηρήθηκε φερριτοπερλιτική μικροδομή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη διαφορά στο μέγεθος κόκκου(BS1~12.5μm,BS2~6.5μm) καθώς φυσικά και από τις τοπικές διακυμάνσεις σκληρότητας στην έκταση του μετάλλου. Στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες η διαφορά ήταν επίσης έντονη με την HAZ1 να παρουσιάζει μαρτενσιτική μορφολογία που εξηγεί και την υψηλή σκληρότητα (>500HV), ενώ στην HAZ2 υπάρχει μπαινίτης με διασκορπισμένους κόκκους αλλοτριόμορφου φερρίτη που υποδγκνύονται στην Εικόνα 29. Στη ζώνη συγκόλλησης παρατηρείται αλλοτριόμορφος φερρίτης που φαίνεται να είναι ανεπτυγμένος στα όρια πρότερου ωστενίτη και μπαινίτης. Στη μακροφωτογραφία της συγκόλλησης φαίνεται η διείσδυση, η οποία δεν είναι έντονη, και η ύπαρξη πόρων όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 30 μαζί με την φανερή ΘΕΖ2.



Εικόνα 30. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος C στο B σασί. Έντονη φερριτοπερλιτική μικροδομή στο BS1 συγκριτικά με το BS2. Οι διαφορές μεταξύ BS1 κ BS2 στα μεγέθη κόκκων, πιθανότατα στη χημική τους σύσταση και στη σκληρότητα. Έχουμε ανισορροπία γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης



Εικόνα 31. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος C στο B σασί. Όπως και στην περίπτωση της A, έχουμε πολύ μεγάλη αύξηση της σκληρότητας στο BS1, ενώ στο BS2 υπάρχει πτώση αυτής(σε αντίθεση με της A). Μαρτενσιτική μικροδομή μόνο στο BS1 με ελαφρά διασπορά καρβιδίων Fe_3C και στις 2 περιπτώσεις. Ξεκάθαρη διαφορά των 2 υλικών γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης.

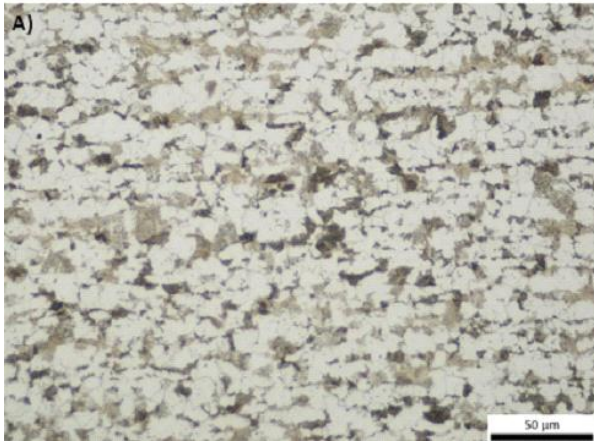


Εικόνα 32. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος C στο B σασί. Φανερή ΘΕΖ στο BS2. Η συγκόλληση επίσης δεν είναι πλήρης όμως έχει διεισδύσει πιο πολύ στο BS2. Δεν παρατηρούνται άλλες αστοχίες στη συγκόλλησης.

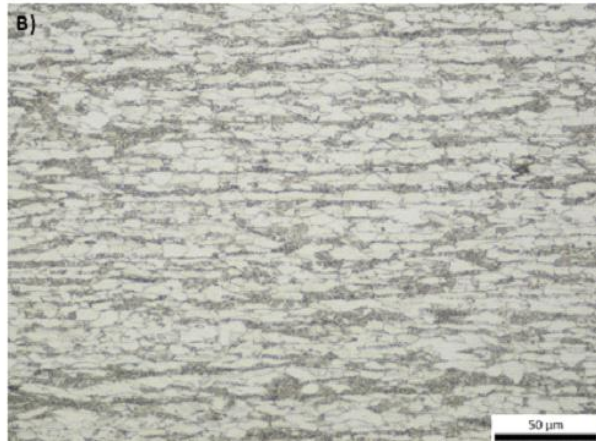
Στην περίπτωση της B υπάρχει επίσης φερριτοπερλιτική δομή στο BS1, χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα στο BS2 και οι σκληρότητες διαφέρουν κατά ~20HV. Το BS2 είναι κατά 80HV σκληρότερο σε σχέση με της A ενώ τα BS1 μόνο κατά 8HV. Έντονη διαφορά και στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες με μαρτενσιτική μικροδομή στην HAZ1 και φερρίτη με μικρή ποσότητα δυσδιάκριτου λόγω μεγέθυνσης περλίτη στην HAZ2, όπως και στην περίπτωση της A. Οι σκληρότητες είναι χαμηλότερες κατά ~70HV και ~100HV αντίστοιχα. Το μέγεθος κόκκου στη ζώνη συγκόλλησης είναι παρόμοιο με της A(A~5μm,B~5.5μm) ο αλλοτριόμορφος φερρίτης όμως είναι πιο ανεπτυγμένος, ενώ ο μπαινίτης δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Στην μακροφωτογραφία φαίνεται ξεκάθαρα η εντονότερη διείσδυση στο BS2 όμως, στο BS1 είναι ημιτελής και με κατάλληλη

προετοιμασία των επιφανειών(υποκοπή) και πλήρωση από την άλλη μεριά, θα είχαμε μία πιο ολοκληρωμένη συγκόλληση.

Θεωρητικά είναι ο Mid blue chassis (287 HV0.5)
Όμως εδώ έχουμε Base metal 1 → 214,8 HV0.5

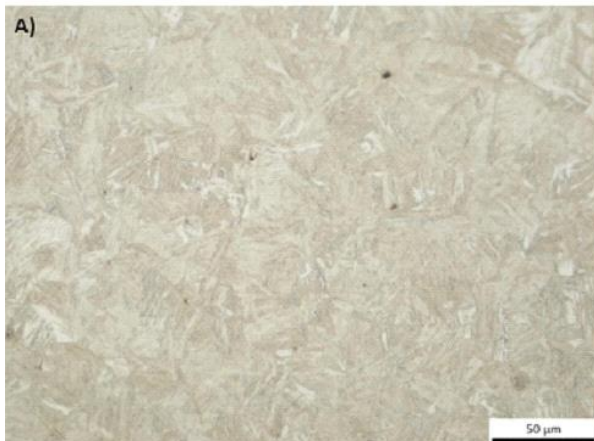


Θεωρητικά είναι ο Right blue chassis (265 HV0.5)
Όμως εδώ έχουμε Base metal 2 → 251,1 HV0.5



Εικόνα 33. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο A σασί. Υπάρχουν διαφορές στην αναμενόμενη σκληρότητα βάση προηγούμενων μετρήσεων ειδικά στο BS1. Φαίνονται οι γραμμές διέλασης στο BS2 κ παρόμοια φερριτοπερλιτική δομή μεταξύ των 2 με τη κύρια διαφορά στην παραμόρφωση της μικροδομής του BS2. Γενικά δεν υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης των συγκολληθέντων τεμαχίων.

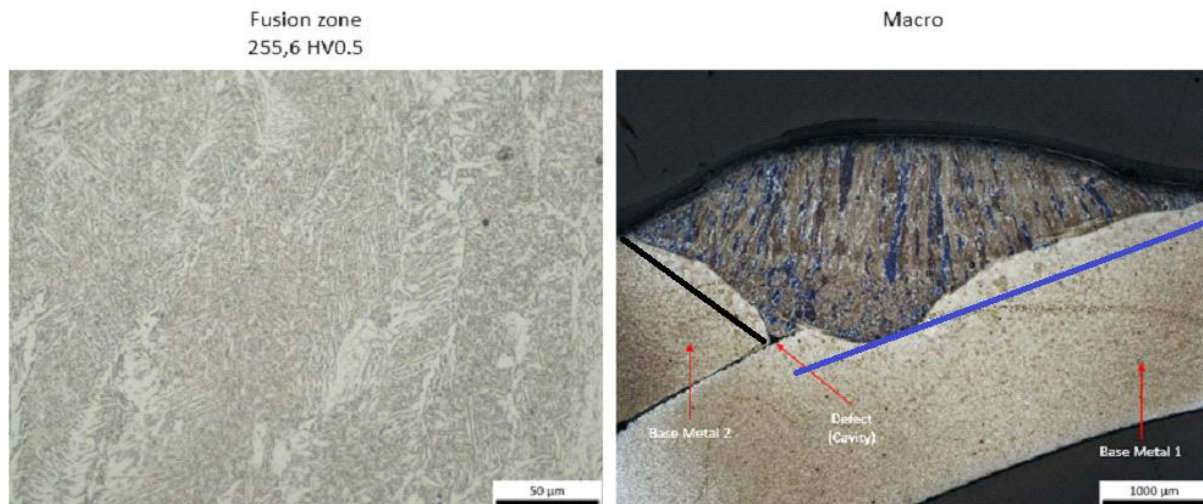
HAZ 1
475,7 HV0.5



HAZ 2
456,3 HV0.5

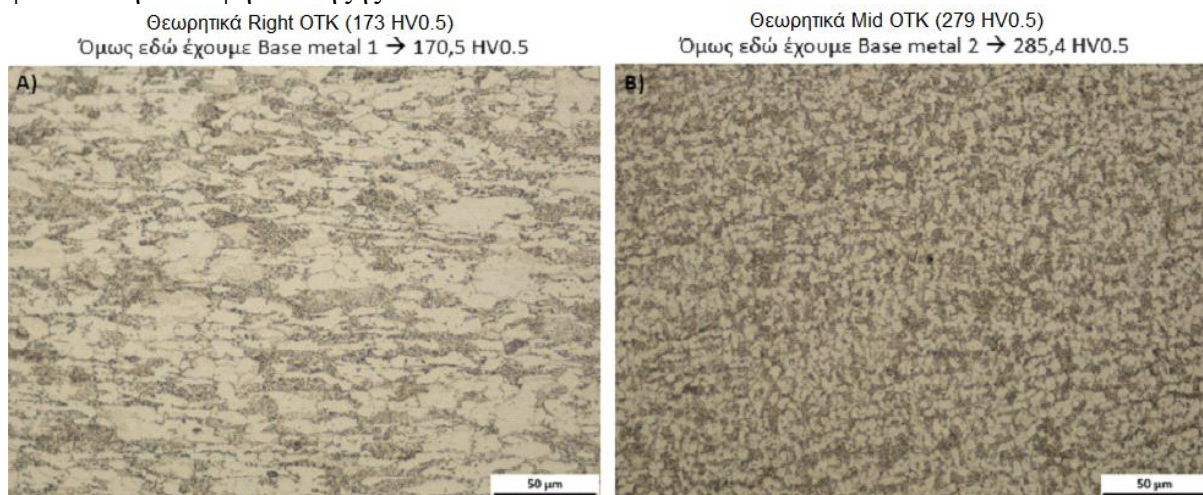


Εικόνα 34. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο A σασί. Βλέπουμε 2 παρόμοιες βελονοειδείς δομές με σχετικά κοντινές σκληρότητες. Μικροδομή μπεινιτικού φερρίτη που συναντήθηκε και σε προηγούμενες μικροφωτογραφίες.

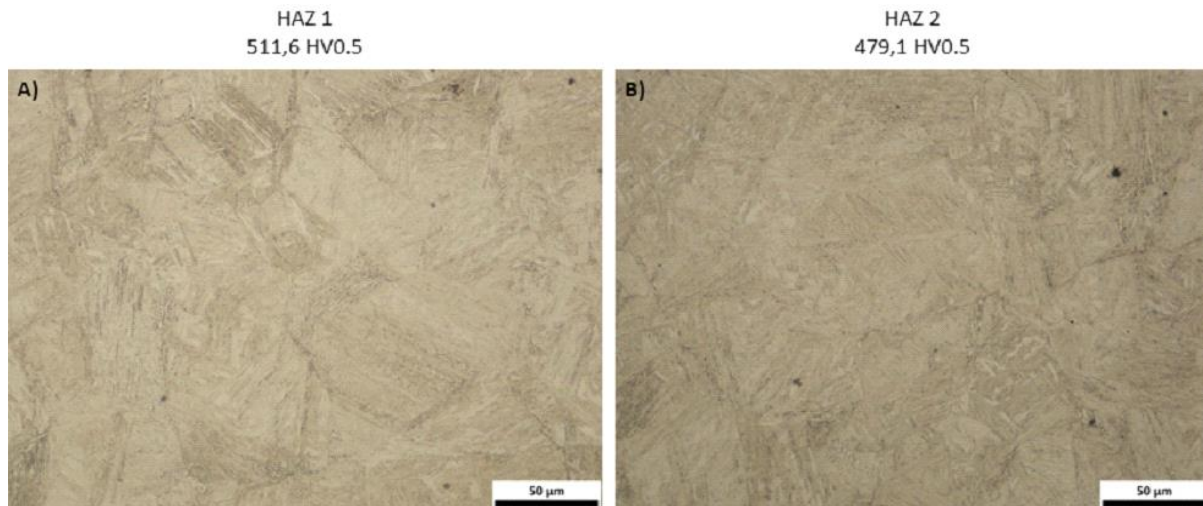


Εικόνα 35. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο A σασί. Αστοχία συγκόλλησης λόγω ατελούς τήξης/μη επαρκούς διείσδυσης. Η επιφάνεια του συγκολλημένου τμήματος BS2 (μαύρη γραμμή) είναι αναλογικά πολύ μικρότερη σε σχέση με του BS1 (μπλε γραμμή). Μικρή διείδυση και στα 2 μέταλλα βάσης.

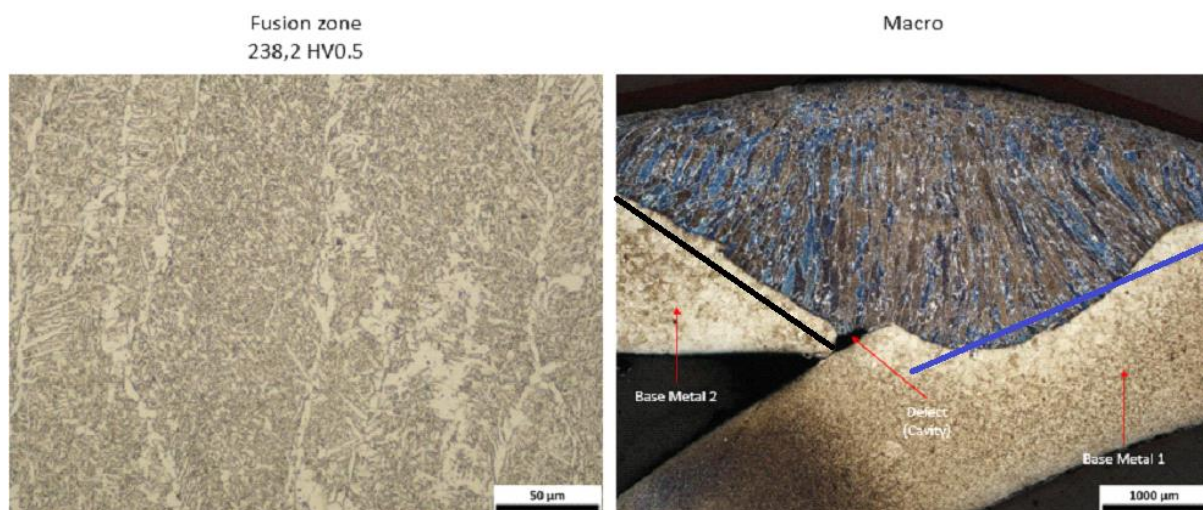
Στην συγκόλληση σωλήνα-σωλήνα(Tube-Tube) της A οι διαφορές των μετάλλων βάσης είναι η παραμόρφωση του BS2, το οποίο είναι κατά ~25HV πιο σκληρό και έχει μικρότερο μέγεθος κόκκου(BS1~14μm,BS2~11μm). Σύμφωνα με τις σκληρομετρήσεις των κεντρικών τμημάτων των δομικών σωλήνων, οι αναμενόμενες σκληρότητες για τα BS1 και BS2 ήταν 287HV και 265HV αντίστοιχα όμως, 215HV και 251HV ήταν οι μετρήσεις που λήφθηκαν από τα μέταλλα βάσης των συγκολληθέντων σωλήνων. Οι HAZ1 και HAZ2 μοιάζουν πολύ μεταξύ τους, είναι και οι δύο μαρτενσιτικές και έχουν παρόμοιο μέγεθος κόκκου. Δεν διακρίνονται ουσιαστικές διαφορές. Στην ζώνη συγκόλλησης υπάρχει μπαινίτης και αλλοτριόμορφος φερρίτης, ενώ στη μακροφωτογραφία φαίνεται πως η επιφάνεια συγκόλλησης με το BS1 είναι υπερδιπλάσια σε σχέση με του BS2. Η διείσδυση είναι φανερά ασθενής, όπως και η αστοχία στη συμβολή των ορίων BS1,BS2 και συγκόλλησης, όπου φαίνεται η έλλειψη σύντηξης.



Εικόνα 36. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο B σασί. Έντονη διαφορά γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης. Αρκετά πιο λεπτομερής η δομή κόκκων στο BS2 με μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ τους. Οι αναμενόμενες σκληρότητες βάση μετρήσεων στους δομικούς σωλήνες είναι πολύ παραπλήσιες με των μετρήσεων στα συγκεκριμένα μέταλλα βάσης.

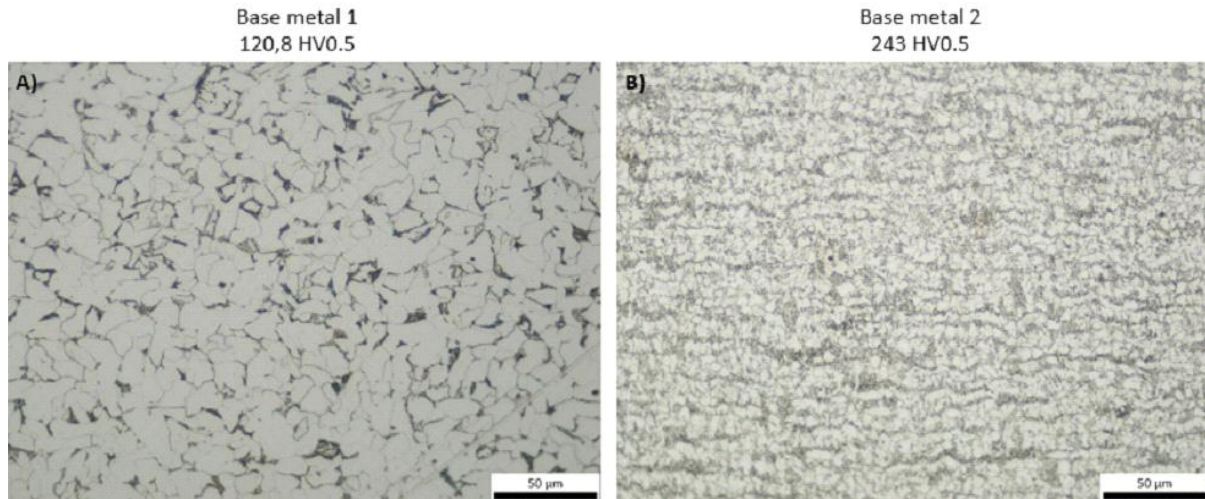


Εικόνα 37. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο B σασί. Παρόμοιες δομές με αυτή στην περίπτωση της A, καθώς παρατηρείται πάλι η δομή του μπαινιτικού φερριτή. Μικρή διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ των ΘΕΖ.

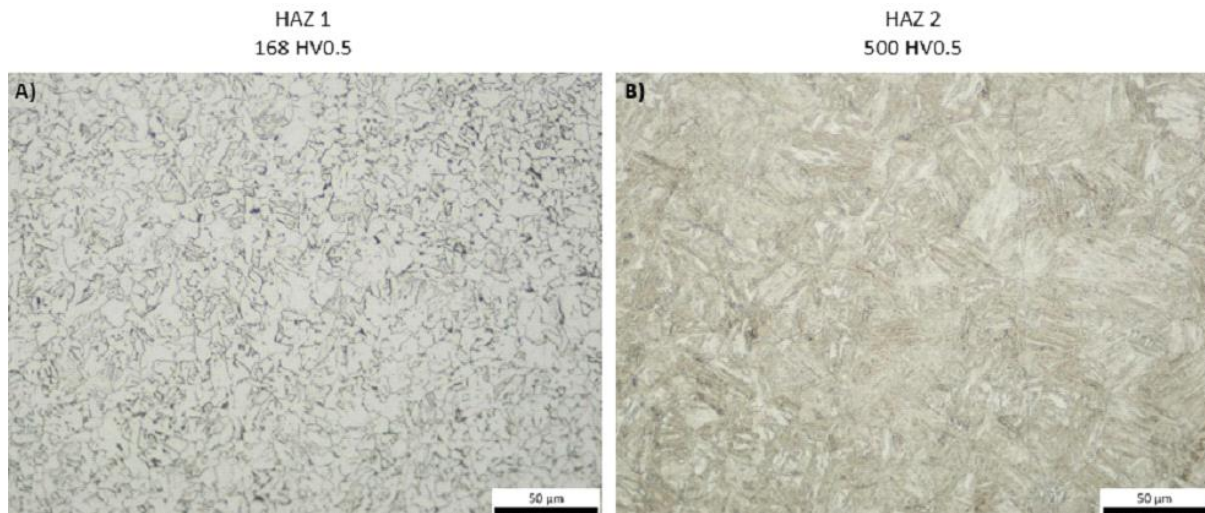


Εικόνα 38. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του τμήματος Tube-Tube στο B σασί. Ατέλεια συγκόλλησης λόγω ατελούς τήξης. Ωστόσο, συγκριτικά με το A μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας προς συγκόλληση του BS2 έχει ενσωματωθεί στη ζώνη τήξης, και φαίνεται πως έχει γίνει καλύτερη προετοιμασία πριν τη συγκόλληση στην συγκεκριμένη επιφάνεια. Τέλος, έχουμε καλύτερη αναλογία συγκολλημένων επιφανειών BS1/BS2. Η διείδυση ειδικότερα στο BS1 είναι αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με το A.

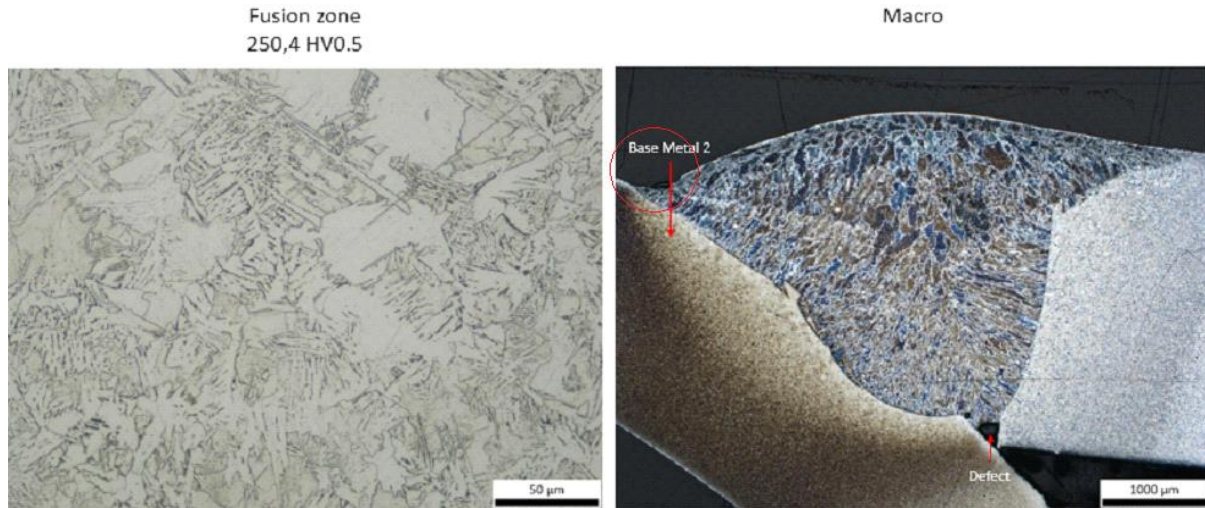
Εδώ υπάρχουν διαφορές μεταξύ των μετάλλων στο μέγεθος κόκκου (BS1~13µm, BS2~4.4µm), την παραμόρφωση και την σκληρότητα, όπως όμως αυτή αναμενόταν βάση των σκληρομετρήσεων. BS1 και BS2 διαφέρουν στη σκληρότητα κατά 110HV, στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη όμως είναι πολύ πιο κοντά στα 511HV και 479HV αντίστοιχα. Οι μικροδομές είναι μαρτενσιτικές και για τις 2 ΘΕΖ με την δεύτερη να φαίνεται ελαφρά πιο λεπτομερής. Στη ζώνη συγκόλλησης υπάρχει μπαινίτης και αλλοτριόμορφος φερριτής σαν αυτόν που εξετάστηκε στην Εικόνα 36 με τον τελευταίο πιο ανεπτυγμένο σε συγκεκριμένη διεύθυνση. Εξετάζοντας τη μακροφωτογραφία και συγκρίνοντάς την με του ανταγωνισμού, φαίνεται η διαφορά τόσο στη διείδυση, όσο και στις επιφάνειες των συγκολλήσεων με τα μέταλλα βάσης, οι οποίες έχουν πολύ κοντινή αναλογία. Παρατηρείται επίσης η ίδια αστοχία λόγω μη πλήρωσης και έλλειψης τήξης στη συμβολή των ορίων BS1, BS2 και συγκόλλησης. Η συγκόλληση είναι συνολικά ανώτερη από αυτή της A.



Εικόνα 39. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του Hub στο A σασί. Αρκετά πιο χονδρόκοκη δομή στο BS1, ενώ φαίνεται να είναι πολύ πιο φτωχό σε άνθρακα σε σχέση με το BS2. Έντονη διαφορά γύρω από τη ζώνη συγκόλλησης και διαφορές στη σκληρότητα.

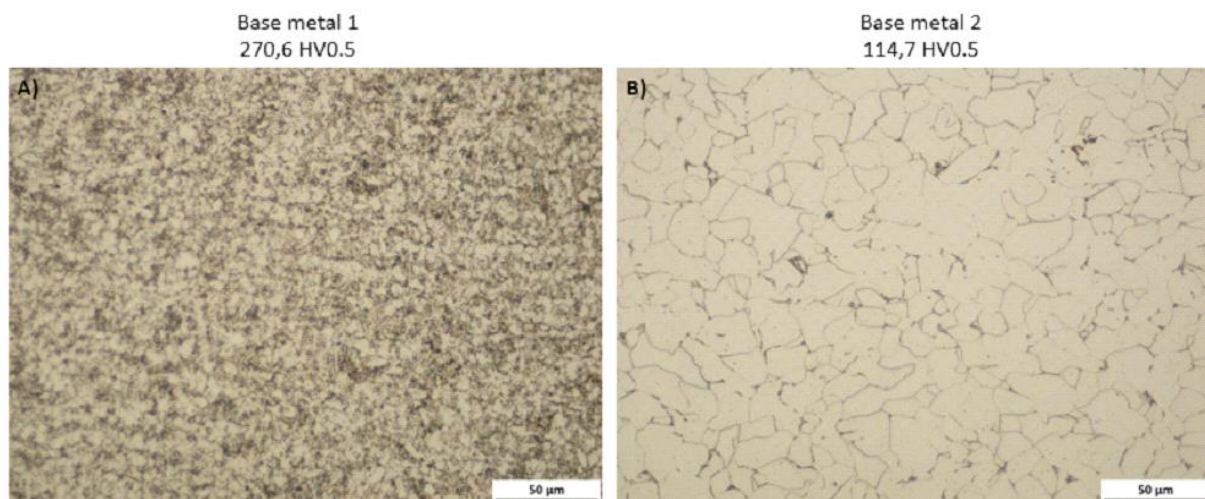


Εικόνα 40. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του Hub στο A σασί. Παρατηρούμε 2 τελείως διαφορετικές μικροδομές. Ελαφρά αύξηση της σκληρότητας στην HAZ1 λόγω εκλέπτυνσης της μικροδομής χωρίς αλλαγή στη μορφολογία. Στην HAZ2 τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά με πολύ μεγάλη αύξηση στη σκληρότητα και βελονοειδή πλέον μορφολογία.

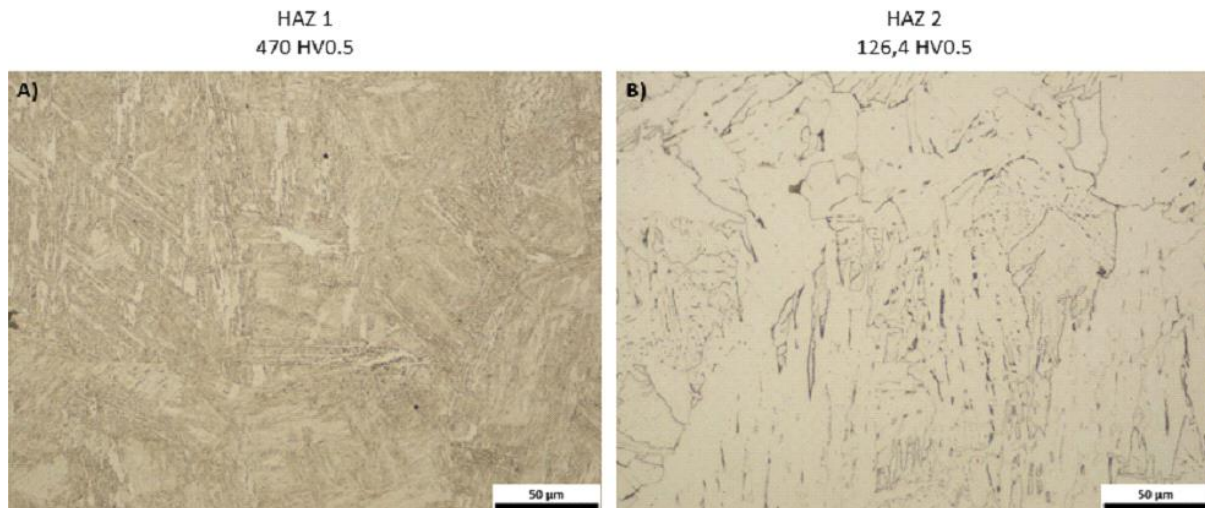


Εικόνα 41. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του Hub στο A σασί. Ατέλεια μη πλήρωσης στη ρίζα της μονοπλευρούς συγκόλλησης και ελαφρά ανεπαρκής πλήρωση στο κυκλωμένο τμήμα. Μικρή διείδυση και στα 2 μέταλλα βάσης.

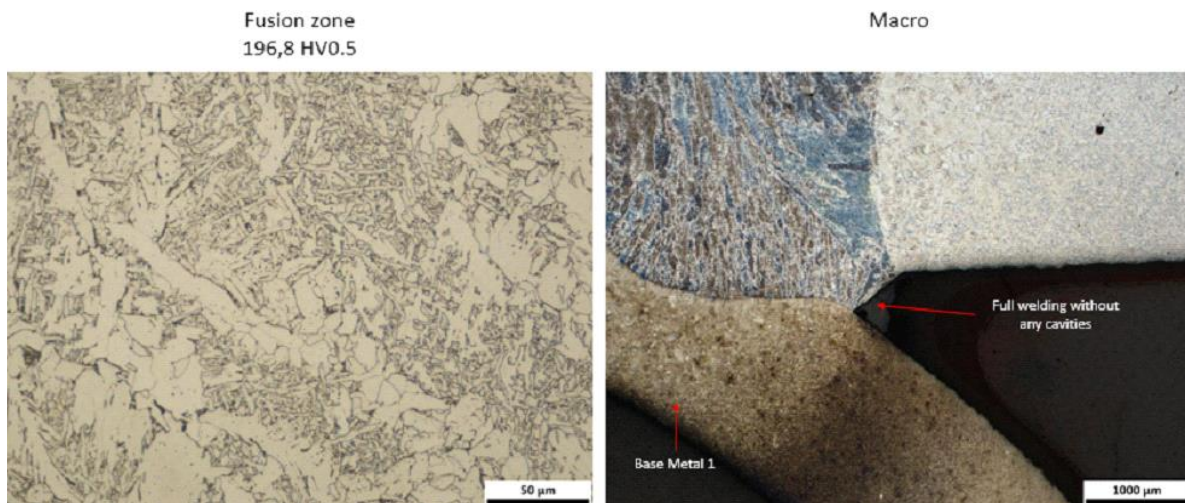
Στη συγκόλληση του Hub της A παρατηρούνται αρχικά διαφορές στα μέταλλα βάσης. Το BS1 είναι κατά 123HV και σχεδόν 50% πιο μαλακό από το BS2, του οποίου η μικροδομή είναι πιο λεπτομερής και η περιεκτικότητα σε άνθρακα επίσης αυξημένη. Διαφορές παρατηρήθηκαν και στη σκληρότητα των ΘΕΖ με 332HV διαφορά μεταξύ τους. Αυτό είναι λογικό καθώς στην HAZ1 υπάρχει εκλέπτυνση της αρχικής φερριτικής μικροδομής (BS1~16μm, BS2~6μm, ενώ στη HAZ1 υπολογίστηκε μέσος όρος κόκκου 10μm) και διάχυση του σεμεντίτη προερχόμενου από περλίτη στα όρια των εκλεπτυσμένων κόκκων φερρίτη με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας κατά 28HV. Στην HAZ2 υπάρχει βελονοειδής δομή μαρτενσίτη και η υψηλή σκληρότητα εξηγείται από την ύπαρξη του. Στη ζώνη συγκόλλησης έχουν αναπτυχθεί ευμεγέθεις κόκκοι φερρίτη οι οποίοι περιβάλλονται από μπαινίτη. Η διείδυση είναι ασθενής και στα δύο μέταλλα βάσης με ύπαρξη ατέλειας λόγω μη πλήρωσης στη ρίζα της συγκόλλησης και ανεπαρκή πλήρωση όπως υποδεικνύεται κυκλωμένη στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42. Μέταλλα βάσης για την συγκόλληση του Hub στο B σασί. Πολύ μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα των 2 υλικών, στο μέγεθος κόκκων τους και στην περιεκτικότητά τους σε άνθρακα με το BS2 να έχει τη χαμηλότερη. Προφανώς πρόκειται για 2 διαφορετικά υλικά.



Εικόνα 43. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες για την συγκόλληση του hub στο B σασί. Βελονοειδής μικροδομή στην HAZ1 με πολύ αυξημένη σκληρότητα εν αντιθέσει με την HAZ2 στην οποία έχουμε μικρή αύξηση στη σκληρότητα χωρίς την εμφάνιση ισοαξονικών κόκκων όπως στο BS2 από το οποίο προέρχεται.



Εικόνα 44. Ζώνη τήξης και μακροφωτογραφία για την συγκόλληση του Hub στο B σασί. Εδώ έχουμε μία επιτυχημένη πλήρη συγκόλληση, χωρίς δομικές ατέλειες και πολύ καλή διείδυση και στα 2 μέταλλα βάσης.

Παρόμοιες διαφορές μεταξύ των BS1 και BS2 με αυτές που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση της A για τα μέταλλα βάσης. Αρκετά χονδρόκοκη φερριτική μικροδομή στο BS2 με πολύ χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και πολύ πιο λεπτομερές φερριτοπερλιτική δομή στο BS1 (BS1~5µm,BS2~20µm). Η HAZ1 είναι μαρτενσιτική ενώ η HAZ2 είναι φερριτική με πιο ανεπτυγμένους κόκκους από του BS2. Η ζώνη συγκόλλησης είναι επίσης φερριτομπαϊνιτική και μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλήρης συγκόλληση, καθώς δεν παρουσιάζει καμία αστοχία και η διείδυση στα μέταλλα βάσης είναι πλήρης και ομοιογενής δίνοντας μία γερή συνένωση.

4. Συζήτηση των αποτελεσμάτων

4.1. Δομικοί Σωλήνες

Τα περισσότερα τμήματα της Β που σκληρομετρήθηκαν έδωσαν χαμηλότερες μετρήσεις σε σχέση με της Α. Μοναδική εξαίρεση το εμπρόσθιο τμήμα στους δομικούς σωλήνες, το μέταλλο βάσης του Hub και του κεντρικού τμήματος των οποίων οι συγκολλήσεις εξετάστηκαν. Στην περίπτωση του κεντρικού τμήματος το αποτέλεσμα σκληρομέτρησης ήταν διαφορετικό από το αναμενόμενο αλλά τέτοιες διαφορές δύναται να προκύψουν, καθώς τα μέταλλα παρουσιάζουν διαφορά στη σκληρότητα σε όλη τους την έκταση. Για το λόγο αυτό πρέπει να δίνεται προσοχή στη δημιουργία συμπερασμάτων από άντληση τέτοιων πληροφοριών. Η έλλειψη σκληρότητας και άρα η χαμηλή αντοχή σε διαρροή του σασί μπορεί να αποκλειστεί και να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην επίδραση των συγκολλήσεων και των μικροδομών στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες. Αυτή ήταν μία αρχική υπόθεση καθώς αν ήταν αυτό το πρόβλημα τότε θα παρουσιαζόντουσαν προβλήματα λόγω στρεβλώσεων πιο συχνά στο σασί της Β.

4.2. Θερμικά επηρεασμένες ζώνες

Οι θερμικά επηρεασμένες ζώνες στο τμήμα C είναι μαρτενσιτικές και μπαινιτικές για τις HAZ1 και HAZ2 αντίστοιχα και για τις 2 εταιρείες. Στη συγκόλληση σωλήνα-σωλήνα(Tube-Tube) έχουμε μαρτενσίτη και στις 2 ΘΕΖ, ενώ σε αυτή της Α υπάρχει μπαινίτης. Ο μαρτενσίτης έχει υψηλότερη αντοχή και σκληρότητα από τον μπαινίτη και αυτό δίνει μία πρώτη ένδειξη αδυναμίας σε σχέση με την Β. Στο Hub από την άλλη υπάρχει μπαινίτης και μαρτενσίτης στις ΘΕΖ της Α ενώ στη θέση του μπαινίτη, ο προηγουμένως ισοαξονικός φερρίτης έχει μετασχηματιστεί σε μια μορφή βελονοειδούς φερρίτη με φανερή ανάπτυξη κόκκων. Η σκληρότητα δεν δίνει βοήθεια ιδιαίτερα στην άντληση συμπερασμάτων καθώς σε κάποιες ζώνες μετρήθηκε πιο σκληρό το Α ενώ σε άλλες το αντίθετο.

4.3. Μελέτη συγκολλήσεων

Εξετάζοντας τις μακροφωτογραφίες και μικροφωτογραφίες των συγκολλήσεων μπορούν να βγουν πιο ξεκάθαρα συμπεράσματα. Φυσικά οι συγκολλήσεις που εξετάστηκαν είναι τοπικές και μελετημένες στο επίπεδο και η μελέτη μίας και μόνο περίπτωσης δεν επαρκεί για αξιόπιστη συμπερασματολογία. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν 3 διαφορετικές, ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί μια γενικότερη εντύπωση της ποιότητας και αποτελεσματικότητας των συγκολλήσεων εξετάζοντας την διείσδυση, την πλήρωση, την αναλογία των συγκολλημένων επιφανειών μετα μέταλλα βάσης τους καθώς και την εύρεση αστοχιών. Η διαφορά στην ποιότητα των συγκολλήσεων είναι ξεκάθαρη ειδικά στα τμήματα Tube-Tube και Hub. Η διείσδυση των συγκολλήσεων στα μέταλλα βάσης της Α είναι ασθενής, ειδικά όταν συγκριθεί με του ανταγωνισμού της και στα 2 σημεία, ενώ η αναλογία των επιφανειών συγκόλλησης με τα μέταλλα βάσης είναι επίσης σημαντική. Ειδικότερα στο Hub, η συγκόλληση που εξετάστηκε έχει καλή πλήρωση, είναι συνεκτική, με πολύ καλή διείσδυση και αναλογία επιφανειών συγκόλλησης μεταξύ των μετάλλων βάσης. Ακόμα και στην συγκόλληση του C όπου η Α έχει διευσδύσει πλήρως στο BS1, στο BS2 δεν υπάρχει το ίδιο αποτέλεσμα. Η Β από την άλλη έχει πετύχει μια συνολικά πιο ομοιόμορφη συγκόλληση.

5. Συμπεράσματα

Αρχικά εντύπωση δημιούργησαν οι σκληρομετρήσεις, όπου σε όλα τα δομικά τμήματα πλην του εμπρόσθιου (front), τα δοκίμια της A παρουσίασαν υψηλότερες σκληρότητες σε σχέση με της B. Τόσο η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη στα σημεία που μελετήθηκαν όσο και το μέταλλο βάσης παρουσίασαν διαφορές στη μικροδομή, το μέγεθος των κόκκων τους και τη σκληρότητα. Συγκεκριμένα στους δομικούς σωλήνες, παρατηρήθηκαν σε όλα τα δοκίμια γραμμές διέλασης εκτός του κεντρικού(Mid) και εμπρόσθιου τμήματος της A. Η μεγαλύτερη διαφορά στο μέγεθος κόκκου φάνηκε στο κεντρικό τμήμα, όπου ενώ η A φαίνεται να έχει πιο λεπτομερή μικροδομή, η σκληρότητα μεταξύ τους είχε μικρότερη διαφορά από την αναμενόμενη. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πλαστικά παραμορφωμένη δομή που περιορίζει τη μετακίνηση διαταραχών και εν γένει αυξάνει τη σκληρότητα συγκριτικά με ένα μη παραμορφωμένο υλικό. Προχωρώντας στα συγκολλημένα τμήματα, παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο τόσο στα μέταλλα βάσης, όσο και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη σε όλα τα δοκίμια με μοναδικές εξαιρέσεις τις ΘΕΖ στις συγκολλήσεις μεταξύ των σωλήνων (Tube-Tube). Συγκεκριμένα η σκληρότητα στις ΘΕΖ της A ήταν 475.7HV και 456.3HV, ενώ στις B 511.6HV και 479.1 αντίστοιχα. Ωστόσο πρωταγωνιστικό ρόλο στο πρόβλημα που μελετάμε έχουν οι συγκολλήσεις και κυρίως η διείσδυση αυτών στο μέταλλο βάσης, ενώ αξία αναφοράς είναι και η υποβάθμιση της δυσθραυστότητας που επέρχεται με την αύξηση της σκληρότητας ευνοώντας την ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών στις συγκολλήσεις ή όπου αλλού προκύψουν. Μελετώντας τις μακροφωτογραφίες, όπου είναι φανερή όλη η συγκόλληση και η διείσδυση αυτής στο μέταλλο βάσης διαπιστώθηκαν τα εξής. Και στις 3 συγκολλήσεις που μελετήθηκαν αυτές της B ήταν πιο συνεκτικές ως προς την σύνδεση τους με τα μέταλλα βάσης και την διείσδυση της συγκόλλησης σε αυτά. Στη συγκόλληση μεταξύ των 2 σωλήνων παρατηρείται η ίδια αστοχία ανεπαρκούς τήξης στη βάση της συγκόλλησης. Παρόλα αυτά στην περίπτωση της A η διείσδυση ήταν αρκετά μικρότερη συγκριτικά με της B. Καλύτερη προετοιμασία των μεταλλικών τμημάτων προς συγκόλληση, αύξηση της έντασης του ρεύματος καθώς και χρήση διαφορετικής προστατευτικής ατμόσφαιρας μπορούν να βοηθήσουν ως προς την διείσδυση όμως περαιτέρω δοκιμές θα πρέπει να πραγματοποιηθούν για να μπορέσουμε να δώσουμε εγγυημένη κατεύθυνση στην A για να βελτιώσει το προϊόν της, ενώ περιθώρια βελτίωσης υπάρχουν και για την B με σκοπό να έχουμε συγκολλήσεις όπως αυτή που μελετήθηκε στο Hub της ίδιας εταιρείας. Ο σκελετός της A μπορεί να αποτελείται από σκληρότερα τμήματα, τα οποία συνήθως είναι και πιο ανθεκτικά στις καταπονήσεις, όμως παράγοντες όπως η δυσθραυστότητα σε ένα περιβάλλον μόνιμων κραδασμών και κόπωσης απαιτούν την εύρεση της χρυσής τομής μεταξύ των ιδανικών ιδιοτήτων και χωρίς περαιτέρω δοκιμές δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι ποια εταιρεία βρίσκεται πιο κοντά σε αυτή. Αυτό που μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά είναι πως τα ισχυρότερα δομικά μέρη σε ένα σασί δεν μπορούν να αξιοποιηθούν χωρίς την σωστή και ολοκληρωμένη συγκόλληση μεταξύ τους.

6. Βιβλιογραφία

1. <https://www.tennant-metall.de/en/grades/25crmo4-4130> (5 Ιουλίου 2024)
2. Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “Γενική Μεταλλογνωσία 1”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π
3. “Βιομηχανικά Κράματα” s.l. : Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
4. Χάλυβας. Βικιπαίδεια. [Ηλεκτρονικό] 4 Οκτώβριος 2015. [Παραπομπή: 7 Ιούλιος 2016.] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82>.
5. Total Materia. Classification of carbon and low-alloy steels. [Ηλεκτρονικό] Νοέμβριος 2001. [Παραπομπή: 3 Ιούνιος 2016.] "<http://www.totalmateria.com/articles/Art62.html>"
6. Αντωνιάδης, Αριστομένης. Σιδηρούχα Κράματα. Micromachining & manufacturing modeling lab. [Ηλεκτρονικό] Technical University of Crete, 5 Ιούνιος 2016. [Παραπομπή: 15 Ιούνιος 2016.] ["http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROUXA%20KRAMATAw.pdf"](http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROUXA%20KRAMATAw.pdf) (5 Ιουλίου 2024)
7. Βιομηχανικά Κράματα. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. [Ηλεκτρονικό] Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., 3 Ιούνιος 2016. [Παραπομπή: 15 Ιούνιος 2016.]
8. Modelling of Kinetics of Austenite Formation in Steels with Different Initial Microstructures
F. G. CABALLERO, C. CAPDEVILA and C. GARCÍA DE ANDRÉS June 6, 2001
9. Παπαδημητρίου, Γ. Δ. Γενική Μεταλλογνωσία II Τα Κράματα. Αθήνα : s.n., 1993.
10. Χαϊδεμενόπουλος, Γρηγόρης Ν. Φυσική Μεταλλουργία. s.l. : Τζιόλα, 2001.
11. Ε. Μαραβελάκης, Β. Δημητρίου. Κατεργασίες με παραμόρφωση. [Ηλεκτρονικό] 2008. [Παραπομπή: 20 May 2016.] ["http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/420](http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/420)
12. Παύλου, Π. Τεχνικά Υλικά Διαγράμματα Fe-C. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. [Ηλεκτρονικό] Μάρτιος 2006. [Παραπομπή: 21 Μάιος 2016.] ["http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/FeC.pdf"](http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/FeC.pdf).
13. Μπούριθης Λ., Γ.Δ. Παπαδημητρίου. Εργαστηριακές Ασκήσεις Γενικής Μεταλλογνωσίας II Θερμικές Κατεργασίες Χαλύβων (ΑΝόπτηση-Βαφή).
14. Τσούτσιας, Αγγελος Β. Μελέτη ανοπτημένου άξονα πλοίου με μαγνητικές καταστροφικές τεχνικές. Αθήνα : s.n., 2014.
15. D. William, Jr. Callister. Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών. Αθήνα : Τζιόλα, 2008
16. Διάχυση-Μετασχηματισμοί δομής χαλύβων σε στερεά κατάσταση Διαγράμματα TTT και CCT. ["http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/2006Diaxisi.pdf"](http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/2006Diaxisi.pdf) Αθήνα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
17. https://d12oja0ew7x0i8.cloudfront.net/image-handler/ts/20220923014741/ri/556/src/images/Article_Images/ImageForArticle_13961_448270747772916668672.jpg
18. Overview of the current issues in austenite to ferrite transformation and the role of migrating interfaces therein for low alloyed steels. M. Goune, F. Danoix, J. Agren, Y. Brechet,

- C.R. Hutchinson, M. Militzer, G. Purdy, S. van der Zwaag, H. Zurob. 92, s.l. : Materials Science and Engineering R, 2015.
19. Phase Transformations in metals.
[<http://web.utk.edu/~prack/mse201/Chapter%2010%20Phase%20Transformations.pdf>] s.l. : University of Tennessee, 2010
20. W.D. Callister Εισαγωγή στην Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών Αθήνα : Τζιόλα, 2010.
21. Effect of Cooling Rate on Phase Transformation and Microstructure of NbTi Microalloyed Steel. Su Zhao, Donglai Wei, Rongbin Li, Li Zhang. China : Materials Transactions, 2014, Τόμ. 55.
22. Χαϊδεμενόπουλος, Γρηγόρης Ν. Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις. s.l. : Τζιόλα, 2010.
23. Effects of Tungsten Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed Forging Steels
JINGWEI ZHAO, TAEKYUNG LEE, JEONG HUN LEE, ZHENGYI JIANG,
and CHONG SOO LEE
24. Allotriomorphic Ferrite. Bhadeshia, H. K. D. H. s.l. : Materials Science & Metallurgy, Vol. 2.
25. [Ηλεκτρονικό] <http://www.hnssd.com/news.asp?type=1>
26. University of Glasgow . ISAAC : Imaging Spectroscopy and Analysis Centre - EBSD. Glasgow : s.n.
27. [Ηλεκτρονικό] <http://www.cata.in/images/img/120005242.pdf>
29. Φούρλαρης, Γ. Μετασχηματισμοί Φάσεων. Αθήνα : s.n., 2015.
30. Ρωξάνη, Σκαρτσιούνη. Μελέτη παραμέτρων θερμικών κατεργασιών στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης για αντιτριβικές εφαρμογές. Θεσσαλονίκη : Α.Π.Θ., 2012
31. Μικροσκοπία. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας. [Ηλεκτρονικό] 26 Φεβρουαρίου 2016. [Παραπομπή: 25 Ιούνιος 2016.
<http://users.uoi.gr/metallab/down/microscopy.pdf>
32. Μαρτενσίτης.
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Steel_035_water_quenched.png] s.l. : Βικιπαίδεια.
33. Eng. Rolando M. Núñez Monrroy of the Pontifical Catholic University of Peru
34. Hyo Kyung Sung, Sang Yong Shin, Wooyeol Cha, Kyungshik Oh, Sunghak Lee, Nack J. Kim. Effects of acicular ferrite on charpy impact properties in heat affected zones of oxide-containing API X80 linepipe steels. Material Science and Engineering A. Republic of Korea : s.n., 2010.
35. Παπαδημητρίου, Γ.Δ. Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ. Αθήνα : Ε.Μ.Π., 1993.
37. Ι. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα : Παπασωτηρίου, 2007.
38. Campbell, Flake C. Phase Diagrams: Understanding the Basics. Ohio : ASM International, 2012.
39. Widmanstätten Ferrite. Bhadeshia, K. H. D. H. s.l. : Materials Science & Metallurgy, Vol. 2.

40. Riemenschneider, Dr. Oliver. Bainite. KielMAT international. [Ηλεκτρονικό] Kiel University, 15 April 2016. [Παραπομπή: 18 May 2016.]
http://www.tf.unikiel.de/matwis/amat/iss/kap_8/illustr/s8_4_1.html#_dum_35.
41. Bhadeshia, H. K. D. H. Bainite in Steels. Korea : s.n.
42. An overview on bainite formation in steels. Zhi-Gang Yang, Hong-Sheng Fang. Beijing :Solid State & Materials Science, 2005, Vol. 9.
43. Elena Pereloma, David V. Edmonds. Phase transformations in steels: Fundamentals and diffusion-controlled transformations. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2012.
44. Shah, K. P. I-T Diagram and cooling curves. *Practical Maintenance*. [Ηλεκτρονικό]
45. Henderieckx, Gietech B.V. "Deoxidizing of Steel" (2020)
46. A.K. Sinha, "Physical Metallurgy Handbook", McGraw Hill, New York, (2003)
47. J. Platl, H. Leitner, C. Turk, R. Schnitzer, "Determination of Martensite Start Temperature of High Speed Steels on Thermodynamic Calculations", Steel Research, 91
48. Payson, Peter. The annealing of steel. Crucible steel company of America, 1943.
49. Ε. Μαραβελάκης, Β. Δημητρίου. Κατεργασίες με παραμόρφωση. [Ηλεκτρονικό] 2008. [Παραπομπή: 20 May 2016.]
["http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/420FASEIS%20Fe%20Cw.pdf"](http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/420FASEIS%20Fe%20Cw.pdf)
50. Ματζίνος, Παναγιώτης. Τεχνολογία Υλικών Οχημάτων (Τεύχος ΙΙ). Θεσσαλονίκη 2010.
51. Αντωνιάδης, Αριστομένης. Θερμικές Κατεργασίες Χαλύβων. Micromachining & Manufacturing Modeling Lab. [Ηλεκτρονικό] 5 Ιούνιος 2016. [Παραπομπή: 13 Ιούλιος 2016.]
["http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/520THERMIKES%20KATERGA"](http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/520THERMIKES%20KATERGA)
52. Quenching Review - Heat Treating.
[\[http://www.engineersedge.com/materials/quenching-review.htm\]](http://www.engineersedge.com/materials/quenching-review.htm) s.l. : Engineers EDGE,
53. Μαρίου, Μάριος. Διερεύνηση του μαινιτικού μετασχηματισμού σε. Αθήνα : ΕΜΠ, 2015.
54. Μπούριθης Λ., Γ.Δ. Παπαδημητρίου. Εργαστηριακές Ασκήσεις Γενικής Μεταλλογνωσίας ΙΙ Θερμικές Κατεργασίες Χαλύβων (ΑΝόπτηση-Βαφή). Αθήνα : s.n.
55. Παπαδημητρίου, Γ. Δ. Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ Τα Κράματα. Αθήνα : s.n., 1993.
56. "Effects of Chromium and Molybdenum on the Microstructure and Mechanical Properties of 4130 Steel"
Journal of Materials Engineering and Performance 45-57
57. "Weldability and Mechanical Properties of 4130 Steel: An Overview" Welding Journal 112-125
58. Stergiopoulos Demetrios, Welding Greek Institute, Welding Processes and Equipment, 2019
59. Diamantopoulos Konstantinos, Welding Greek Institute, Materials and their Behaviour During Welding ,2019
60. Mastrogiannis Vasilios / Diamantopoulos Konstantinos , Welding Greek Institute, Construction and Design ,2019
61. Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature

review. Hitesh Arora, Rupinder Singh and Gurinder Singh Brar

62.<https://www.gsi-elearning.de/service/screenshots/fernlehrgang-zum-schweisskonstrukteur-g1/> (30 Ιουνίου 2024)

63.https://icdn.tradew.com/file/201512/1568041/jpg/7071508.jpg?x-oss-process=image/quality,Q_90 (30 Ιουνίου 2024)

64.Riemenschneider, Dr. Oliver. Martensite. *KielMAL international*. [Ηλεκτρονικό] Kiel University, 15 April 2016. [Παραπομπή: 18 May 2016.]

http://www.tf.unikiel.de/matwis/amat/iss/kap_8/backbone/r8_4_1.html#_dum_28.

