



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Μελέτη της Ετερογενούς Συγκόλλησης ΑΗ 40 FCA – ΑΗ 36  
με Μέθοδο Ρομποτικής Συγκόλλησης MCAW »

---

Γεράσιμος Ι. Ποταμιάνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Ι. Παντελής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Δημήτριο Ι. Παντελή, Καθηγητή του Τομέα Θαλασσιών Κατασκευών, της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, την υποστήριξη του και την καθολική του επίβλεψη και καθοδήγηση επί της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Χ. Ξάνθη και Α. Μαρκουλή, μέλη του τεχνικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν σε κομμάτια της πειραματικής διαδικασίας της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα ακόμα, να ευχαριστήσω το προσωπικό της εταιρίας VETA S.A. για την παραχώρηση της μηχανής συγκόλλησης και του ρομποτικού βραχίονα, και ιδιαίτερα τον κ. Γ. Πουλάκη για τη συνεργασία μας στο πειραματικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω τα Ναυπηγεία Ελευσίνας και το προσωπικό τους και ιδιαίτερω τον κ. Σταύρο Χιονόπουλο, τόσο για την παροχή μέρους του υλικού της συγκόλλησης, καθώς και για τις συμβουλές του σε ζητήματα της διπλωματικής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, θα ήθελα να προσδώσω στον συνάδελφο Μάριο Καζασίδη, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. και διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για την αμέριστη βοήθεια και τη διαρκή συζήτηση που είχαμε γύρω από το θέμα της διπλωματικής εργασίας, την αρωγή που μου παρείχε σε καθημερινά διαδικαστικά προβλήματα που ανέκυπταν, την μετάδοση γνώσης πάνω σε πολλά προβλήματα της διπλωματικής αλλά και στις συμβουλές που μου έδωσε για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματεύεται την μελέτη της ετερογενούς συγκόλλησης χαλύβων AH40 FCA – AH36. Η συγκόλληση διεξήχθη με τη μέθοδο σωληνοειδούς ηλεκτροδίου με μεταλλική σκόνη πυρήνα, MCAW και με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα. Η μελέτη της εν λόγω συγκόλλησης είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς τόσο η μέθοδος, όσο και τα εν λόγω υλικά βρίσκουν εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία, όπου μπορεί να απαντηθεί η συγκόλληση.

Η εργασία περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια. Τα δυο πρώτα αποτελούν τη θεωρητική προσέγγιση της διπλωματικής εργασίας, το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διεξοδική παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε, το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην ανάλυση των αποτελεσμάτων και την παράθεση των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτά και το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα τα οποία αντλήθηκαν από την πειραματική διαδικασία.

Αναλυτικότερα:

Το πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, περιλαμβάνει τη περιγραφή των συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου παρουσία προστατευτικού αερίου (MIG, MAG, FCAW, MCAW). Η μέθοδος MCAW, με την οποία εκτελέστηκαν οι συγκολλήσεις της πειραματικής διαδικασίας, ανήκει στην οικογένεια αυτή.

Το δεύτερο κεφάλαιο, περιλαμβάνει μια γενική περιγραφή των ιδιοτήτων, των μικρογραφικών χαρακτηριστικών και της χημικής σύστασης των χαλύβων. Ακόμα παρουσιάζονται οι ναυπηγικοί χάλυβες με έμφαση στους AH36 και AH40 FCA. Γίνεται ενδελεχής αναφορά σε μελέτες που καταδεικνύουν τις μηχανικές τους ιδιότητες, καθώς και στη χρήση τους στη Ναυπηγική Βιομηχανία, καταλήγοντας σε περιπτώσεις όπου μπορεί να συναντηθεί η υπό μελέτη συγκόλληση.

Η πειραματική διαδικασία της διπλωματικής εργασίας, παρατίθεται στο τρίτο κεφάλαιο. Ειδικότερα καταγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προς μελέτη χάλυβα, των αναλωσίμων των συγκολλήσεων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή τους. Αναλύονται οι συνθήκες συγκόλλησης και περιγράφονται οι εργαστηριακές διαδικασίες μετρήσεων μικροσκληρότητας, οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας και διεξαγωγής πειραμάτων εφελκυσμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της προαναφερθείσας διαδικασίας, καθώς και εξαγωγή συμπερασμάτων, τα οποία εν τέλει συνοψίζονται στο πέμπτο κεφάλαιο, συνοδευόμενα από προτάσεις για μελλοντικές μελέτες.

## Περιεχόμενα

	Σελ.
Ευχαριστίες	i
Εισαγωγή	ii
Περιεχόμενα	iii
<b>A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	<b>1</b>
<b>1 Συγκολλήσεις</b>	<b>2</b>
1.1 Εισαγωγή	2
1.2 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding – GMAW)	4
1.2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου GMAW	4
1.2.2 Εξοπλισμός – Διάταξη Συγκόλλησης	6
1.2.3 Μεταφορά του τηγμένου μετάλλου προσθήκης (Transfer Mode)	6
1.2.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου	11
1.3 Συγκόλληση Τόξου με χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding – FCAW)	13
1.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου FCAW	13
1.3.2 Ηλεκτρόδια	14
1.3.3 Αέρια Προστασίας	16
1.3.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου	18
1.3.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW	19
1.4 Μέθοδος συγκόλλησης με σωληνοειδή ηλεκτρόδια με μεταλλική σκόνη πυρήνα (Metal Core Arc Welding – MCAW)	20
<b>2 Χάλυβες</b>	<b>24</b>
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Φάσεις – Μικροδομικά Συστατικά Χαλύβων	25
2.3 Συγκολλησιμότητα Χαλύβων	30
2.4 Κραματωμένοι Χάλυβες	31



2.4.1	Γενικά	31
2.4.2	Επίδραση Κραματικών Στοιχείων	32
2.4.2.1	Κύρια Κραματικά Στοιχεία Χαλύβων	32
2.4.2.2	Ακαθαρσίες	35
2.4.3	Μικροκραματομένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (HSLA)	36
2.5	Ναυπηγικοί Χάλυβες	36
2.5.1	Χημική Σύσταση Ναυπηγικών Χαλύβων	36
2.5.2	Μηχανικές Ιδιότητες Ναυπηγικών Χαλύβων	39
2.6	Ο Χάλυβας AH36	40
2.6.1	Γενικά	40
2.6.2	Εφαρμογές Χάλυβα AH36 στη Ναυπηγική	40
2.7	Ο Χάλυβας AH40 FCA	41
2.7.1	Γενικά στοιχεία των χαλύβων FCA	41
2.7.2	Θερμομηχανικές Διαδικασίες Ελέγχου (TMCP)	43
2.7.3	Τυποποίηση Χαλύβων	45
2.7.4	Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβων FCA	45
2.7.5	Συμπεριφορά Χαλύβων FCA σε Κόπωση	46
2.7.6	Βελτιωτικές Τεχνικές Κατεργασίας Συγκολλήσεων Χάλυβα FCA	49
2.7.7	Εφαρμογές Χαλύβων FCA στη Ναυπηγική	50
<b>B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>		<b>55</b>
<b>3</b>	<b>Πειραματική Διαδικασία</b>	<b>56</b>
3.1	Εισαγωγή	56
3.2	Υλικά	56
3.2.1	Χάλυβας AH36	56
3.2.2	Χάλυβας AH40 FCA	60
3.2.3	Μέταλλο Προσθήκης	63
3.3	Προετοιμασία Χαλύβδινων Ελασμάτων	64
3.4	Συγκόλληση	68
3.4.1	Εξοπλισμός Συγκόλλησης	68
3.4.2	Διεξαγωγή Συγκόλλησης - Συνθήκες	73

3.4.3	Θερμικός Κύκλος Συγκόλλησης – Ρυθμός Απόψυξης	80
3.5	Προετοιμασία Βέλτιστων Δοκιμίων	82
3.5.1	Λείανση	82
3.5.2	Στίλβωση	83
3.5.3	Χημική Προσβολή	84
3.6	Παρατήρηση στο Μικροσκόπιο	87
3.6.1	Οπτική Μικροσκοπία	87
3.6.2	Ηλεκτρονική Μικροσκοπία	88
3.7	Μετρήσεις Μικροσκληροτήτων	89
3.8	Μελέτη Μηχανικών Ιδιοτήτων – Δοκιμή Εφελκυσμού	92
3.8.1	Προετοιμασία Δοκιμίων Εφελκυσμού	93
3.8.2	Διεξαγωγή Πειράματος Εφελκυσμού	95
<b>4</b>	<b>Αποτελέσματα και Συζήτηση</b>	<b>98</b>
4.1	Εισαγωγή	98
4.2	Μακροσκοπική Παρατήρηση	98
4.3	Μελέτη Μικροσκληροτήτων	101
4.4	Μεταλλογραφική μελέτη δοκιμίων	109
4.4.1	Μέταλλα Βάσης	110
4.4.1.1	Χάλυβας AH36	110
4.4.1.2	Χάλυβας AH40 FCA	112
4.4.2	Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες	115
4.4.2.1	Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AH36	116
4.4.2.2	Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη AH40 FCA	119
4.4.3	Ζώνη Τήξης	122
4.4.3.1	Πρωτογενής Μικροδομή	123
4.4.3.2	Δευτερογενής Μικροδομή	125
4.4.4	Κατανομή Μεγέθους Κόκκων	127

4.5	Μελέτη Μηχανικών Ιδιοτήτων – Πειράματα Εφελκυσμού	128
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>134</b>
5.1	Συμπεράσματα	134
5.2	Προτάσεις για Μελέτη	136
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>137</b>

## **Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

# Κεφάλαιο 1

## Συγκολλήσεις

### 1.1 Εισαγωγή [2, 3, 57, 58]

Οι συγκολλήσεις αποτελούν τον πιο συνηθισμένο και συνάμα τον πιο αποτελεσματικό τρόπο σύνδεσης μετάλλων. Η εμφάνιση της τεχνικής της συγκόλλησης έλυσε πολλά προβλήματα που αφορούσαν στη σύνδεση των μελών μιας κατασκευής. Με τη χρήση συγκόλλησης μπορούμε να φτάσουμε στο 100% της αντοχής του βασικού μετάλλου, να εξασφαλίσουμε πλήρη στεγανότητα της σύνδεσης, ενώ δεν υπάρχει κανένας περιορισμός πάχους στα υπό σύνδεση ελάσματα. Μέσω της συγκόλλησης μεταφέρονται τα φορτία από το ένα μέλος της κατασκευής στο άλλο. Επομένως καθίσταται σαφές ότι η συγκόλληση πρέπει να διασφαλίζει την ακεραιότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής στην οποία εφαρμόζεται για όλο τον κύκλο ζωής της. Για το λόγο αυτό η έρευνα για βέλτιστες μεθόδους και συνθήκες συγκόλλησης αποτελεί μείζον θέμα για την επιστήμη των συγκολλήσεων. Η εύρεση μεθόδων και συνθηκών οφείλει να γίνεται συζευγμένα με μελέτες μικροδομής και μηχανικών ιδιοτήτων, ώστε να μπορούν να αξιολογηθούν οι υπό μελέτη παράμετροι.

Η πιο σημαντική συνθήκη για την επιτυχημένη επίτευξη μιας διαδικασίας συγκόλλησης είναι η πρόσδοση της απαιτούμενης θερμότητας προκειμένου να γίνει η ένωση των μεταλλικών τεμαχίων μέσω σύντηξης. Οι μέθοδοι συγκόλλησης που εκτελούνται όταν γίνεται εκμετάλλευση της παραπάνω συνθήκης, ονομάζονται *συγκολλήσεις τήξης*. Η παραγωγή της θερμότητας μπορεί να γίνει είτε με χημικό τρόπο, δηλαδή μέσω φλόγας και εξώθερμων αντιδράσεων, είτε μέσω δεσμών υψηλής ενέργειας (δέσμη ηλεκτρονίων, δέσμη laser), είτε με την παρουσία ηλεκτρικού τόξου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που αξιοποιούν την θερμότητα που μπορεί να παραχθεί από την ύπαρξη ηλεκτρικού τόξου και όλες μπορούν να βρουν εφαρμογή στο επίπεδο της ναυπηγικής τεχνολογίας, σε μεγάλη ή σε μικρή κλίμακα. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποιες διαδεδομένες συγκολλήσεις τόξου, δίνοντας βάρος στις συγγενείς μεταξύ τους μεθόδους GMAW/FCAW/MCAW, η τελευταία από τις οποίες είναι η μέθοδος με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις των τεμαχίων που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η σύγχρονη βιομηχανία εξαρτάται όλο και περισσότερο από τη χρήση αυτοματοποιημένων διατάξεων που ονομάζονται ρομποτικές μηχανές. Η χρήση ρομποτικών διατάξεων (ρομπότ) γίνεται όλο και περισσότερο οικονομικά συμφέρουσα διότι:

- Οι ρομποτικές διατάξεις μπορούν να φέρουν σε πέρας το βιομηχανικό έργο με εξίσου ποιοτικό αποτέλεσμα με τον ανθρώπινο τρόπο, συχνά και πολύ καλύτερο, και για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- Οι ρομποτικές διατάξεις παρουσιάζουν τον καλύτερο λόγο «κόστους παραγωγής» προς «όγκο παραγωγής» για μικρούς και μέσους όγκους παραγωγής.

- Οι ρομποτικές διατάξεις είναι ευέλικτες μηχανές που μπορούν να προσαρμοστούν σε πολύ διαφορετικές μεταξύ τους εργασίες, κυρίως λόγω της δυνατότητας επαναπρογραμματισμού τους. Αυτό τις καθιστά πλέον κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν συχνή αλλαγή εργασίας που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εισαγωγή νέων προϊόντων ή την διεξαγωγή έργου με πολυσύνθετες εργασίες.

Χαρακτηριστικό της ιδιότητας αυτής είναι το παράδειγμα στις εφαρμογές των συγκολλήσεων, που ασχολείται η παρούσα: Η προσήκουσα διεκπεραίωση μιας συγκόλλησης με τη μέθοδο GMAW εξαρτάται από το σωστό καθορισμό των παραμέτρων της συγκόλλησης, ήτοι την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, την τάση του, την ταχύτητα συγκόλλησης, την έκταση του ηλεκτροδίου, το χρησιμοποιούμενο αέριο προστασίας και το μήκος του ηλεκτρικού τόξου. Μια μικρή αλλαγή στην απόσταση του πιστολιού της συγκόλλησης (πυρσός συγκόλλησης) και του προς συγκόλληση τεμαχίου, μπορεί να επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην ένταση και την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος που τίθεται προς εφαρμογή. Η ένταση και η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και το αέριο προστασίας επηρεάζουν τον τρόπο μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου που τελικά καθορίζει τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης. Επομένως μια ρομποτική διάταξη, οποία μπορεί να διατηρεί σταθερές τις παραμέτρους κίνησης του πυρσού της συγκόλλησης και την παροχή του ηλεκτροδίου, μπορεί να εξασφαλίσει σταθερές συνθήκες συγκόλλησης, γεγονός που οδηγεί σε σωστά διεκπεραιωμένες συγκολλήσεις.

Η έρευνα στο πεδίο των ρομποτικών συγκολλήσεων ασχολείται με τις τεχνικές και επιστημονικές παραμέτρους που απαιτούνται για την προσομοίωση των ικανοτήτων ενός έμπειρου και τεχνικά καταρτισμένου συγκολλητή με το ρομπότ. Οι συγκολλήσεις ήταν για πολλά χρόνια ένα έργο που εκτελείτο αποκλειστικά από ανθρώπους και όχι από αυτοματοποιημένες διατάξεις, γιατί η σωστή διεκπεραίωσή τους περιλαμβάνει, την κατάλληλη τεχνική, την εμπειρία και την επιστημονική κατάρτιση. Το στοίχημα της επιτυχούς προσαρμογής τους είναι να προγραμματιστούν οι αυτοματοποιημένες ρομποτικές συγκολλήσεις με την αναγκαία διαρκώς προσαρμοζόμενη συμπεριφορά που θα πρέπει να έχει το (ρομπότ) σα να ήταν εξειδικευμένος τεχνίτης.

Όλες οι διαδικασίες συγκόλλησης αποτελούνται από τρεις διαφορετικές μεταξύ τους φάσεις. Η αρχική φάση της προετοιμασίας, όπου ο χειριστής της συγκόλλησης ετοιμάζει τα προς συγκόλληση δοκίμια, εισάγει και επιλέγει τις παραμέτρους της συγκόλλησης και προετοιμάζει τη διάταξη. Στη συνέχεια είναι φάση της συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της οποίας θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος της διαδικασίας μέσω της εποπτείας των παραμέτρων της. Και τέλος, η φάση της ανάλυσης που λαμβάνει χώρα μετά το πέρας της διαδικασίας της συγκόλλησης και στο στάδιο αυτό θα πρέπει να εξεταστεί αν η συγκόλληση που έγινε ικανοποιεί τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί πριν την έναρξη της διαδικασίας ή διαφορετικά θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στις προηγούμενες δύο φάσεις.

Στο πεδίο της έρευνας, αλλά και στο πεδίο της παραγωγής, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, γίνεται μεγάλη προσπάθεια να εφαρμοστεί τεχνολογία οπτικής παρατήρησης των παραμέτρων της συγκόλλησης, μέσω αισθητήρων, ήτοι καμερών υψηλής ταχύτητας και υπέρυθρης ακτινοβολίας, με τις οποίες μπορεί να γίνει ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς τόσο της λίμνης της συγκόλλησης όσο και του τρόπου μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης από σύνθετα νευρωνικά δίκτυα και να γίνει πρόβλεψη για τα χαρακτηριστικά που έχει η λίμνη της συγκόλλησης.

Η ανάλυση αυτή σε πραγματικό χρόνο μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή των ρυθμίσεων του ρομπότ συγκόλλησης έτσι ώστε να υπάρχει απόλυτος έλεγχος του βάθους διείσδυσης της συγκόλλησης, του πλάτους του κορδονιού επικάλυψης και της ρίζας. Προφανώς η τεχνολογία αυτή δεν απαιτεί πλέον καμία επέμβαση του χειριστή κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκόλλησης.

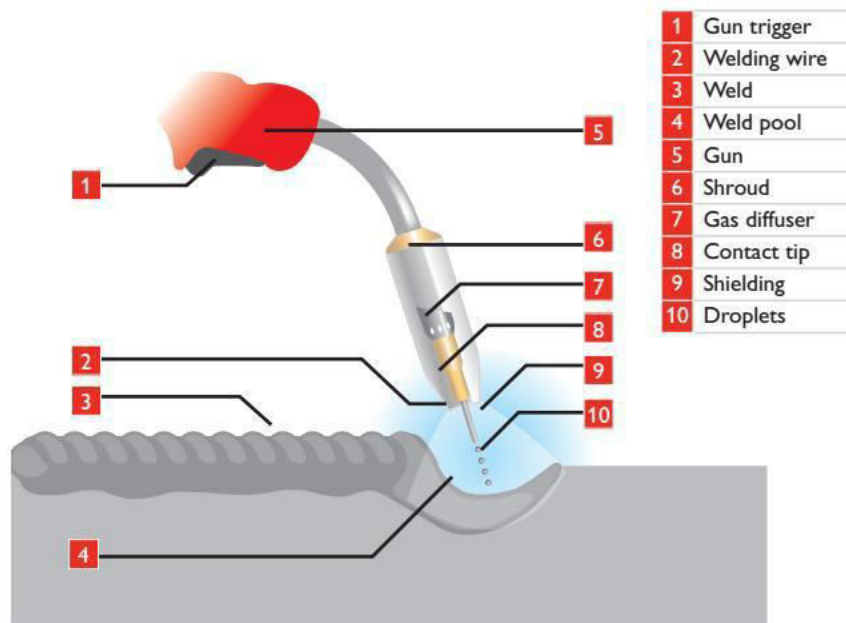
## **1.2 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding – GMAW)**

### **1.2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου GMAW [2, 3, 59, 60]**

Η μέθοδος GMAW, γνωστή και ως MIG, είναι μία μέθοδος συγκόλλησης που αξιοποιεί την θερμότητα που εκλύεται από ένα ηλεκτρικό τόξο προκειμένου να τήξει το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και το μέταλλο βάσης και να επιτευχθεί μόνιμη συγκόλληση των τεμαχίων. Η τήξη πραγματοποιείται υπό την παρουσία αερίου προστασίας όπως Αργό (Ar) ή Ήλιο (He) ή μειγμάτων αυτών με φθηνότερα αέρια όπως οξυγόνο ή διοξείδιο του άνθρακα, προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή του τηγμένου μετάλλου με την ατμόσφαιρα. Εφαρμόζοντας υψηλή ένταση ρεύματος, η άκρη του ηλεκτροδίου τήκεται και το τηγμένο μέταλλο (μέταλλο προσθήκης) μεταφέρεται στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Η παροχή του ηλεκτροδίου γίνεται αυτόματα προς τη λίμνη συγκόλλησης. Για να γίνει αυτό απαιτείται η χρήση καρουλιού που ξετυλίγεται μέσω μιας μηχανής τροφοδοσίας με σταθερή ταχύτητα. Ο ρυθμός παροχής του ηλεκτροδίου είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που καθορίζει το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου.

Η μέθοδος αυτή αρχικά χρησιμοποιείτο για τη συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου αλλά μεταγενέστερες εξελίξεις κατάφεραν τη λειτουργία της μεθόδου με χαμηλή πυκνότητα ρεύματος και παλλόμενο ρεύμα πράγμα που την κατέστησε κατάλληλη και για συγκόλληση άλλων υλικών με τη χρήση ενεργών αερίων (κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, CO<sub>2</sub>) και μειγμάτων αερίων. Η μέθοδος GMAW χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς βιομηχανικής κατασκευής, όπως σε βιομηχανικά εργοστάσια, στη ναυπηγική και την εξορυκτική βιομηχανία, για συγκόλληση σωληνώσεων, δοχείων πίεσης, χαλύβδινων δομικών στοιχείων και πληθώρα άλλων προϊόντων.

Η μέθοδος GMAW μπορεί να εφαρμοστεί σε ημιαυτόματες ή πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες συγκόλλησης. Όλα τα εμπορικά σημαντικά μέταλλα, μπορούν να συγκολληθούν με τη μέθοδο GMAW (απλοί ανθρακούχοι χάλυβες, χάλυβες HSLA, αλουμίνιο, τιτάνιο, κράματα νικελίου), επιλέγοντας το κατάλληλο αέριο προστασίας, ηλεκτρόδιο, και τις παραμέτρους της συγκόλλησης. Με την επιλογή των παραπάνω παραμέτρων γίνεται δυνατή η συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο πυρσός της συγκόλλησης GMAW.



**Εικ. 1.1** Αναπαράσταση της διαδικασίας συγκόλλησης με τη μέθοδο GMAW.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αυτόματη, συνεχή, τροφοδοσία του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου, το οποίο περικλείεται από το αέριο προστασίας. Αφού ο χρήστης έχει καθορίσει τις αρχικές συνθήκες της συγκόλλησης, η κατάλληλη παραμετροποίηση της διάταξης, διατηρεί σταθερές τις ιδιότητες του ηλεκτρικού τόξου. Στη χειροκίνητη συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW, ο συγκολλητής περιορίζεται απλώς στο να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα συγκόλλησης, τη διεύθυνσή της και τη θέση του πιστολιού συγκόλλησης. Παρέχοντας τις κατάλληλες παραμέτρους και εξοπλισμό συγκόλλησης, η τροφοδοσία του ηλεκτροδίου και η διατήρηση του ηλεκτρικού τόξου γίνονται αυτόματα.

Στη μέθοδο GMAW, συνηθίζεται η χρήση πηγής σταθερής τάσης, σε συνδυασμό με μηχανή σταθερής παροχής του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου. Με αυτόν το συνδυασμό, οι αλλαγές που μπορεί να συμβούν στην αλλαγή της θέσης του πιστολιού συγκόλλησης, έχουν αντίκτυπο στην αυξομείωση του ρεύματος της συγκόλλησης λόγω της αλλαγής της έκτασης του ηλεκτροδίου. Επί παραδείγματι, όταν αυξάνεται απότομα η απόσταση πιστολιού - τεμαχίου, το μήκος του ηλεκτρικού τόξου γίνεται στιγμιαία μεγαλύτερο. Το μεγάλο μήκος του ηλεκτρικού τόξου, προκαλεί μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος μειώνοντας τελικά το ρυθμό τήξης του ηλεκτροδίου. Από τη στιγμή που ο ρυθμός παροχής ηλεκτροδίου παραμένει σταθερός, αποκαθίσταται η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, υπάρχει μείωση του μήκους του ηλεκτρικού τόξου, εμφανίζεται αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος και τελικά έχουμε εξίσωση του ρυθμού τήξης του ηλεκτροδίου με το ρυθμό παροχής του.

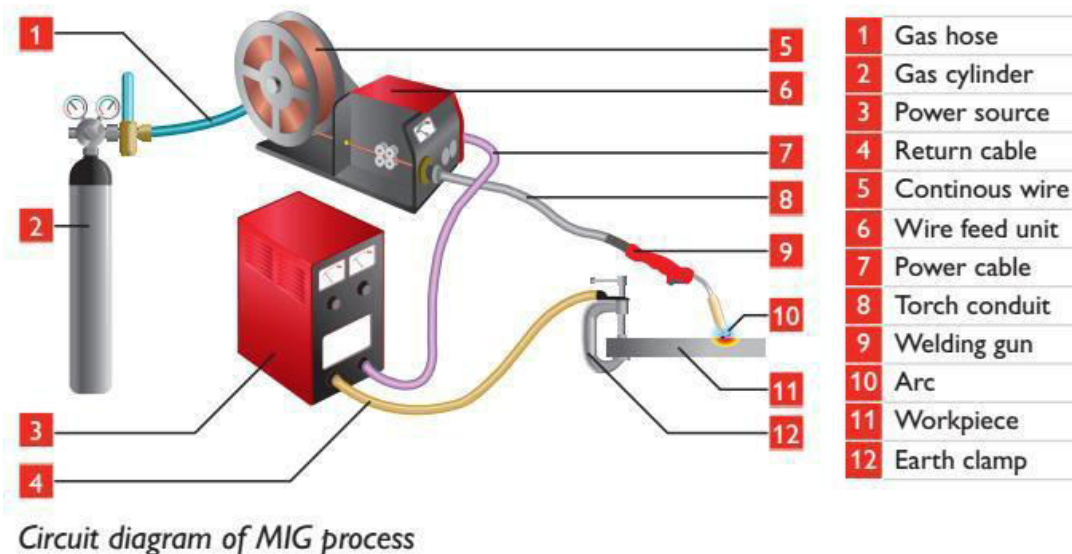
Η τελική ένταση ρεύματος που αποκαθίσταται σε μεγάλη έκταση ηλεκτροδίου (μικρό μήκος ηλεκτρικού τόξου) είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει όταν υπάρχει μικρή έκταση ηλεκτροδίου. Ως συνέπεια αυτού μειώνονται τόσο η θέρμανση του τεμαχίου όσο και η διεύθυνση της συγκόλλησης.



### 1.2.2 Εξοπλισμός – Διάταξη Συγκόλλησης [2, 3, 61-63]

Η τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο GMAW αποτελείται από διάφορα επιμέρους εξαρτήματα. Τα πιο βασικά από αυτά είναι:

- Η μηχανή της συγκόλλησης
- Το χειριστήριο
- Η τροφοδοσία του ηλεκτροδίου
- Το πιστόλι συγκόλλησης (ή πυρσός συγκόλλησης)
- Η παροχή του αερίου προστασίας
- Το ηλεκτρόδιο
- Το σύστημα ψύξης του πυρσού της συγκόλλησης

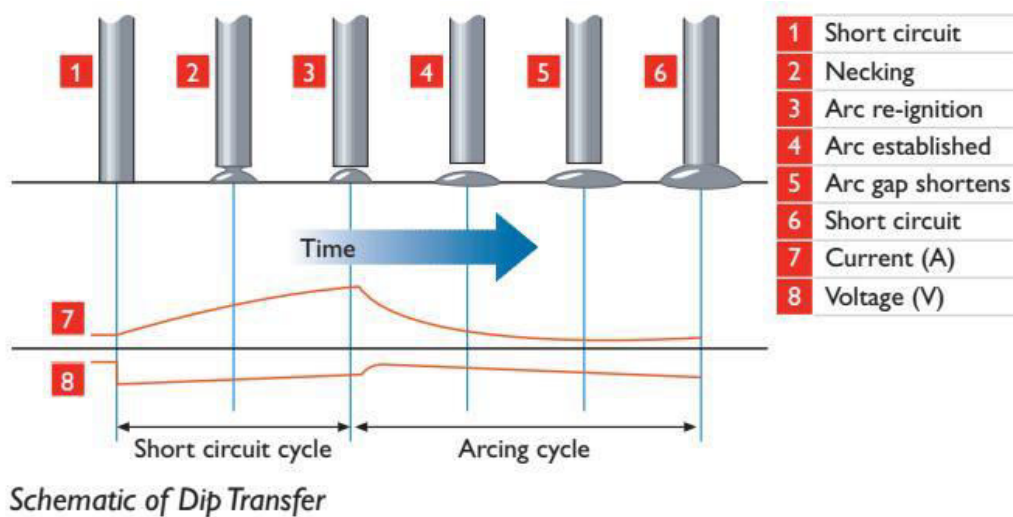


Εικ. 1.2 Διάταξη συγκόλλησης MIG.

### 1.2.3 Μεταφορά του τηγμένου μετάλλου προσθήκης (Transfer Mode) [2, 3, 59, 64-66]

- Μεταφορά με βύθιση ή βραχυκύκλωση (Short-Circuiting Transfer)

Κατά τη μέθοδο αυτή, η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης γίνεται με μικρά, επαναλαμβανόμενα βραχυκυκλώματα, που συμβαίνουν όταν το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο έρχεται σε άμεση επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης, που εν προκειμένω καταλήγει σχετικά μικρή λίμνη και γρήγορα στερεοποιούμενη γρήγορα. Συνεπώς η μεταφορά με βραχυκύκλωση καθίσταται ιδανική για συγκόλληση τεμαχίων με μικρό πάχος, σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης, καθώς και για συγκόλληση τεμαχίων με μεγάλο διάκενο. Η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης γίνεται μόνον όταν το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης 20 έως 200 φορές ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 1.3 Μεταφορά με βύθιση.

Όταν το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη της συγκόλλησης, κλείνει το κύκλωμα και έχουμε αύξηση της έντασης του ρεύματος. Η αύξηση αυτή οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας- λόγω της αντίστασης του ηλεκτροδίου- που οδηγεί στην τήξη της άκρης του. Όταν το τηγμένο μέταλλο αποκολλάται από την άκρη του ηλεκτροδίου, έχουμε εκκίνηση του ηλεκτρικού τόξου. Ο ρυθμός αύξησης της έντασης του ρεύματος πρέπει να είναι αρκετά υψηλός, έτσι ώστε να έχουμε επαρκή θέρμανση του ηλεκτροδίου για να επιτευχθεί η τήξη του, αλλά και αρκετά χαμηλός έτσι ώστε να αποφύγουμε εκτεταμένες ανεπιθύμητες εκτοξεύσεις τηγμένου μετάλλου που προκύπτουν από την ταχεία αποκόλληση του τηγμένου μετάλλου από την άκρη του ηλεκτροδίου. Η ρυθμός αύξησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος ελέγχεται από την προσαρμογή της επαγωγής της μηχανής της συγκόλλησης.

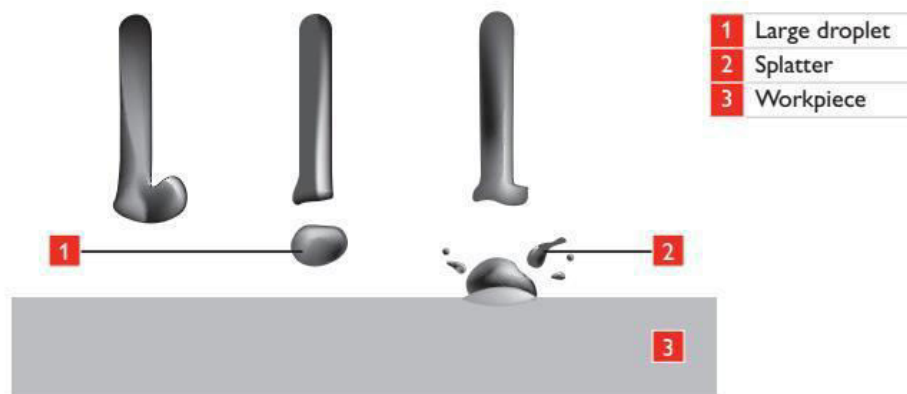
Η ιδανική ρύθμιση της επαγωγής εξαρτάται τόσο από τη συνολική αντίσταση του κυκλώματος της συγκόλλησης, όσο και από τη θερμοκρασία τήξης του ηλεκτροδίου. Όταν αποκαθίσταται το ηλεκτρικό τόξο, δημιουργείται βραχυκύκλωμα, η άκρη του ηλεκτροδίου τήκεται, και το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται για τη δημιουργία του επόμενου βραχυκυκλώματος. Η τάση του κυκλώματος πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή έτσι ώστε να μην έχουμε αποκόλληση της τηγμένης άκρης αν αυτή δεν έρθει σε επαφή με τη λίμνη της συγκόλλησης.

Παρόλο που η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, η σύσταση του αερίου προστασίας που χρησιμοποιείται έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επιφανειακή τάση του τηγμένου μετάλλου. Το μέγεθος της σταγόνας αλλά και η διάρκεια του βραχυκυκλώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση του αερίου προστασίας. Επίσης το είδος του αερίου προστασίας που χρησιμοποιείται, επηρεάζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού τόξου, καθώς και τη μέγιστη διείσδυση του τηγμένου μετάλλου που επιτυγχάνεται. Η χρήση 100% διοξειδίου του άνθρακα ως αερίου προστασίας οδηγεί σε εκτεταμένη παρουσία εκτοξεύσεων αλλά σε πολύ καλή διείσδυση, ενώ η χρήση μίγματος αργού – διοξειδίου του άνθρακα ως αέριο προστασίας μπορεί να συμβιβάσει την έκταση των εκτοξεύσεων με την επίτευξη ικανοποιητικής διείσδυσης συγκόλλησης. Η προσθήκη ηλίου (He) στο μίγμα αυτό μπορεί να αυξήσει τη διείσδυση της συγκόλλησης σε μη σιδηρούχα μέταλλα και να αυξήσει το ποσοστό της αραίωσης του μετάλλου βάσης στο μέταλλο της συγκόλλησης.

- Μεταφορά με σταγόνες (Globular Transfer)

Στην περίπτωση αυτή η μεταφορά του μετάλλου του ηλεκτροδίου γίνεται με τη μορφή μεγάλων σταγόνων που ακολουθούν τη «διεύθυνση» του ηλεκτρικού τόξου. Οι σταγόνες αυτές έχουν μεγαλύτερο διάμετρο από το ηλεκτρόδιο, και το γεγονός ότι επηρεάζονται έντονα από την βαρύτητα, καθιστά αυτή τη μέθοδο μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης, επιτυχημένη μόνο στην οριζόντια θέση. Στα μεσαία εύρη ρεύματος, τα οποία είναι ελαφρώς υψηλότερα από το ρεύμα που δημιουργεί μεταφορά με βραχυκύκλωση, είναι δυνατόν να επιτευχθεί η μεταφορά με τη μορφή σταγόνων όταν υπάρχει προστασία από ενδεικνυόμενο αέριο προστασίας. Στην περίπτωση που το μήκος του ηλεκτρικού τόξου είναι μικρό (χαμηλή τάση), η σταγόνα μπορεί να έρθει σε επαφή με το δοκίμιο πριν την απομάκρυνσή της από το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα να υπάρξει βραχυκύκλωμα και η άμεση αποσύνθεσή της να προκαλέσει εκτοξεύσεις τηγμένου μετάλλου προσθήκης.

Επομένως πρέπει το μήκος του ηλεκτρικού τόξου να είναι επαρκές προκειμένου να εξασφαλίζεται η πλήρης αποκόλληση της σταγόνας από το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο προτού έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της λίμνης της συγκόλλησης. Παρόλα αυτά, οι πολύ υψηλές τάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ατελή τήξη, σε μικρό βάθος διείσδυσης και επιφανειακή εναπόθεση (επιφανειακή ενίσχυση) άρα τελικά σε μη αποδεκτές συγκολλήσεις.



*Schematic of Globular Transfer*

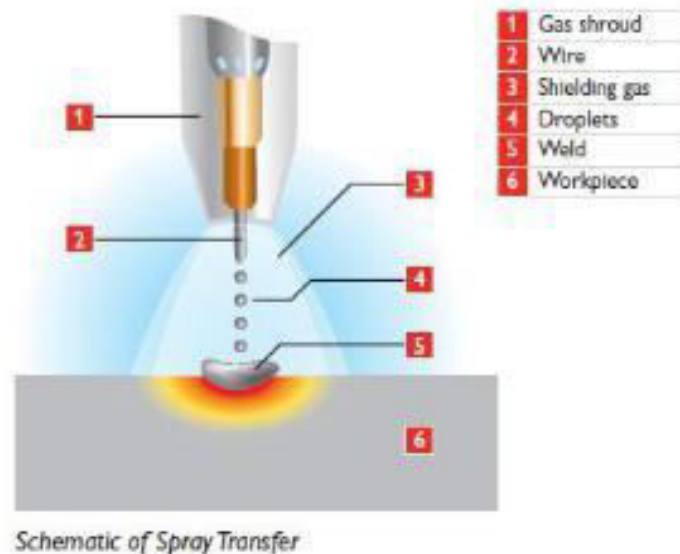
**Εικόνα 1.4** Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς με τη μορφή σταγόνων.

Όταν χρησιμοποιείται διοξείδιο του άνθρακα για αέριο προστασίας και οι συνθήκες έντασης και τάση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που απαιτούνται για μεταφορά με βραχυκύκλωση, παρουσιάζεται μεταφορά με σταγόνες η τροχιά των οποίων δεν είναι παράλληλη στο ηλεκτρικό τόξο. Η μη παράλληλη μεταφορά επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή της λίμνης της συγκόλλησης λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος. Με τη χρήση του διοξειδίου του άνθρακα το ρεύμα της συγκόλλησης επάγεται μέσω της τηγμένης σταγόνας και το ιονισμένο αέριο που περικλείει τη συγκόλληση δεν επηρεάζει την άκρη του ηλεκτροδίου. Η παρουσία εκτεταμένων εκτοξεύσεων οδηγεί στον αποκλεισμό του διοξειδίου του άνθρακα για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές

- Μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων (Spray Transfer)

Στην περίπτωση μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης με τη μορφή σταγονιδίων, υπάρχει επί της ουσίας μεταφορά του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή μικρών σταγονιδίων τα οποία έχουν τροχιά παράλληλη στη διεύθυνση του ηλεκτρικού τόξου, ενώ η διάμετρος των σταγονιδίων είναι αρκετά μικρότερη από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Στη συγκεκριμένη μορφή μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, αποφεύγεται πλήρως η πιθανότητα βραχυκύκλωσης, επομένως το ηλεκτρικό τόξο είναι πολύ σταθερό και έχουμε πλήρη αποφυγή εκτοξεύσεων.

Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη της μεταφοράς με τη μορφή σταγονιδίων, είναι η χρήση πηγής συνεχούς ρεύματος (DC) με θετικό πόλο το ηλεκτρόδιο καθώς και το ότι η τιμή του ρεύματος και της τάσης θα πρέπει να βρίσκονται πάνω από κάποια όρια, υψηλότερα από αυτά που απαιτούνται για τη μεταφορά με τη μορφή σταγόνων. Αυτό συνεπάγεται ότι η ενέργεια που μεταφέρεται στη συγκόλληση είναι αρκετά υψηλή, οπότε αυτός ο τρόπος μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης ενδείκνυται για ελάσματα πάχους τουλάχιστον 5 mm. Επίσης η υψηλή ενέργεια συγκόλλησης οδηγεί σε μεγάλη λίμνη συγκόλλησης, άρα αυτός ο τρόπος μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, είναι αποτελεσματικός κυρίως στην οριζόντια θέση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σταθερότητα του ηλεκτρικού τόξου δεν μπορεί να επιτευχθεί με αέριο προστασίας καθαρό διοξείδιο του άνθρακα (100% CO<sub>2</sub>). Το καταλληλότερο αέριο προστασίας είναι καθαρό αργό (100% Ar), και προτιμότερο είναι μείγμα αργού – διοξειδίου του άνθρακα (όχι περισσότερο από 25% CO<sub>2</sub>).



**Εικόνα 1.12** Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς με τη μορφή σταγονιδίων.

Αυτή η μέθοδος μεταφοράς μετάλλου προσθήκης χρησιμοποιείται για συγκολλήσεις αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα όπου το σύνηθες αέριο προστασίας είναι το μίγμα αργού–διοξειδίου του άνθρακα.

Η επίτευξη της μεταφοράς μετάλλου προσθήκης με τη μορφή σταγονιδίων είναι δυνατή και σε χαμηλότερες τιμές έντασης και τάσης του ρεύματος, αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο με μικρότερη διάμετρο. Κατ' αυτόν τον τρόπο μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, επιτυγχάνεται συνήθως η μεγαλύτερη παραγωγικότητα της μεθόδου GMAW. Μεγάλο ρόλο στη μεταφορά με σταγονίδια παίζει η πολικότητα της συγκόλλησης. Η μεγάλη πλειοψηφία των συγκολλήσεων GMAW γίνεται με Συνεχές Ρεύμα και Θετικό Ηλεκτρόδιο (DCEP).

Σε αυτήν την περίπτωση τα ηλεκτρόνια οδεύουν προς το ηλεκτρόδιο προκαλώντας τη θέρμανση και την τήξη του. Παράλληλα μέσα στο τόξο, τα θετικά ιόντα οδεύουν προς το τεμάχιο συγκόλλησης. Κατά την κίνησή τους αυτή, τα ιόντα αερίου προκαλούν την επιτάχυνση των σταγόνων μετάλλου που οδεύουν προς τη συγκόλληση, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται συγκόλληση με μεγάλη διείσδυση.

Οι περιορισμοί αυτής της μεθόδου που αφορούν το ελάχιστο πάχος ελάσματος και τη θέση της συγκόλλησης μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένων πηγών ρεύματος. Αυτές οι μηχανές συγκόλλησης μπορούν και δημιουργούν ελεγχόμενες κυματομορφές και συχνότητες ρεύματος που δημιουργούν παλμούς μεταφοράς των σταγονιδίων στη λίμνη της συγκόλλησης.

- Παλμική μεταφορά με σταγονίδια (Pulsed Spray Transfer)

Η παλμική μεταφορά με σταγονίδια χρησιμοποιείται συνήθως για συγκολλήσεις αλουμινίου και ανοξείδωτων χαλύβων, αλλά και για απλούς ανθρακούχους χάλυβες. Η μέθοδος ελέγχου της μεταφοράς των σταγονιδίων μέσω παλμών ρεύματος (30 – 300 Hz) καθιστά δυνατή τη μεταφορά με σταγονίδια ακόμα και με πολύ ήπιες συνθήκες συγκόλλησης (ένταση ρεύματος, τάση ρεύματος). Ο τρόπος αυτός παρέχει σταθερό ηλεκτρικό τόξο με απουσία εκτοξεύσεων, σε αντίθεση με τη μέθοδο μεταφοράς με βραχυκύκλωση που γίνεται σε αντίστοιχες συνθήκες. Οι παλμοί οδηγούν στην αποκόλληση των σταγονιδίων από το ηλεκτρόδιο με την ταχύτητα κατανάλωσης του ίδιου του ηλεκτροδίου. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι βραχυκυκλώσεις και η δημιουργία εκτοξεύσεων. Συνεπώς τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Πλήρως ελεγχόμενη και χωρίς εκτοξεύσεις διαδικασία της συγκόλλησης.
- Δυνατότητα σε πολύ ήπιες συνθήκες συγκόλλησης που είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη για τη συγκόλληση υλικών όπως ανοξείδωτος χάλυβας ή αλουμίνιο. Γίνεται δυνατή η συγκόλληση λεπτών δοκιμίων ή συγκόλληση σε θέσεις εκτός της οριζόντιας, που θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο με τη μέθοδο της βραχυκύκλωσης.
- Σε σύγκριση με τη απλή μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων, η παλμική μεταφορά επιτυγχάνει καλύτερη διείσδυση.
- Ευκολότερη παροχή με χαμηλότερο κόστος καθώς παρέχεται η δυνατότητα χρήσης ηλεκτροδίου μεγαλύτερης διαμέτρου. Αυτό είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο στην περίπτωση συγκόλλησης αλουμινίου, αφού τα ηλεκτρόδια αλουμινίου είναι δυσκολότερο να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές MIG σε χαμηλότερες διαμέτρους.

### 1.2.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου [2, 3, 59]

Τα πιο συνηθισμένα σφάλματα που παρουσιάζονται στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο GMAW, είναι η αστάθεια του ηλεκτρικού τόξου, οι πόροι, η ατελής τήξη, η ατελής διείσδυση, η υπερβολική διείσδυση και οι εκτοξεύσεις. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται παρακάτω.

Αστάθεια έναυσης του ηλεκτρικού τόξου (arc start instability): Το σφάλμα αυτού του είδους οδηγεί σε εκτεταμένη παρουσία τμημάτων του ηλεκτροδίου με τη μορφή εκτοξεύσεων στη ραφή της συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει διότι παρόλο που το ηλεκτρικό τόξο δεν έχει ξεκινήσει, το ηλεκτρόδιο που διαρρέεται από ρεύμα έρχεται σε επαφή με το προς συγκόλληση τεμάχιο και θερμαίνεται ακαριαία λόγω βραχυκυκλώματος

Πόροι (porosity): Συχνό σφάλμα της μεθόδου GMAW είναι η ύπαρξη πόρων στο εσωτερικό, κυρίως των τελικών ραφών. Η δημιουργία του πορώδους οφείλεται στον εγκλεισμό αερίων που παράγονται από την τήξη των μετάλλων (κυρίως αέρια H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>). Η κύρια αιτία δημιουργίας πόρων στο εσωτερικό των ραφών είναι η ανεπαρκής κάλυψη της λίμνης συγκόλλησης από το αέριο προστασίας. Η αποφυγή της ύπαρξης πόρων στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης γίνεται με τη σωστή επιλογή του αερίου προστασίας και ταυτοχρόνως με τον επιμελή έλεγχο και τη σωστή συντήρηση του συστήματος παροχής του αερίου προστασίας.

Ατελής Τήξη (incomplete fusion): Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δεν έχει γίνει πλήρης σύντηξη του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης και οφείλεται κυρίως σε ακαθαρσίες της επιφάνειας και σε ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας στην περιοχή. Ο σωστός καθαρισμός της προς συγκόλληση επιφάνειας καθώς και η σωστή ρύθμιση της έντασης του ρεύματος της συγκόλλησης και η ρύθμιση της ταχύτητας του πυρσού, μπορούν να συντελέσουν στην εξάλειψη αυτού του είδους της ατέλειας.

Ατελής Διείσδυση (lack of penetration): Είναι ο ανεπαρκής βαθμός τήξης και σύνδεσης του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης. Η κύρια αιτία εμφάνισης αυτού του είδους της ατέλειας είναι η ακατάλληλη προετοιμασία της συμβολής της συγκόλλησης, δηλαδή η ελλιπής προετοιμασία των τεμαχίων, η λανθασμένη ρύθμιση του διάκενου μεταξύ των ελασμάτων, ή η ασυμβατότητα μεταξύ του πάχους των ελασμάτων προς συγκόλληση και της εφαρμοζόμενης μεθόδου. Η διατήρηση της σωστής γωνίας του πυρσού και της κατάλληλης έκτασης του ηλεκτροδίου (Electrode Extension) είναι μέτρα αποφυγής της ατελούς διείσδυσης. Η πρόσδοση περισσότερης θερμότητας συγκόλλησης, μέσω της αύξησης των παραμέτρων του ρεύματος και μείωσης της ταχύτητας μπορεί να αποτελέσει μια ακόμα λύση στο φαινόμενο της ατελούς τήξης.

Υπερβολική Διείσδυση (excessive penetration): Εμφανίζεται σε περιπτώσεις υπερβολικής πρόσδοσης θερμότητας στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Αντιμετωπίζεται με χαμηλότερες τιμές των παραμέτρων του ρεύματος και αύξηση της ταχύτητας της συγκόλλησης.

Εκτοξεύσεις (spatter): Η υψηλή ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου καθώς και η υψηλή τάση του τόξου είναι βασικές αιτίες δημιουργίας των εκτοξεύσεων. Η έκταση του ηλεκτροδίου συμβάλλει στη δημιουργία ή όχι των εκτοξεύσεων, ανάλογα με τις συνθήκες της συγκόλλησης. Τέλος η ανεπαρκής παροχή αερίου προστασίας καθώς και ο ελλιπής καθαρισμός της επιφάνειας της συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσουν σε εκτοξεύσεις.

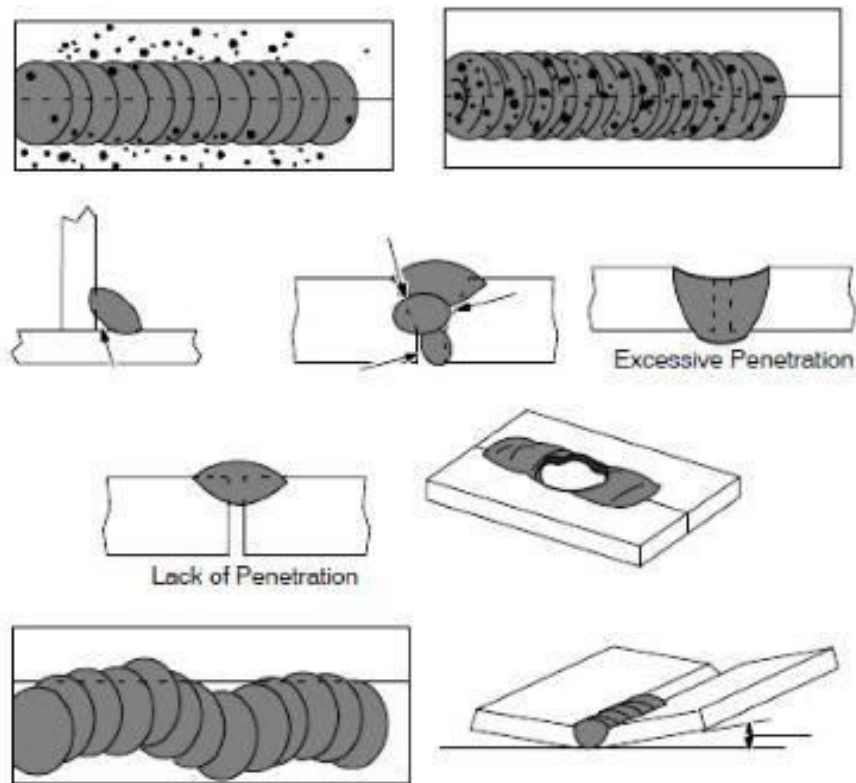


Κάποια επιπλέον σφάλματα που συναντώνται στις συγκολλήσεις GMAW είναι η ανώμαλη επιφάνεια της όψης της ραφής, οι παραμορφώσεις και το «τρέξιμο» του μετάλλου.

Η ανώμαλη επιφάνεια της όψης της ραφής οφείλεται στο ότι το τηγμένο μέταλλο δεν εναποτίθεται παράλληλα με τη διεύθυνση της συγκόλλησης με αποτέλεσμα να μην καλύπτει όλη τη ραφή, κυρίως εξαιτίας ασταθούς κίνησης του πυρσού συγκόλλησης σε περιπτώσεις χειροκίνητων εφαρμογών και μεγάλης έκτασης του ηλεκτροδίου.

Οι παραμορφώσεις προκαλούνται από τη συστολή του μετάλλου συγκόλλησης η οποία μετακινεί το τεμάχιο από την αρχική του θέση. Οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι η κύρια αιτία τέτοιου είδους σφαλμάτων και για την αποφυγή τους απαιτείται η πάκτωση των προς συγκόλληση ελασμάτων και η ένωση των τεμαχίων με πόντες μετά το πέρασμα της ρίζας.

Το «τρέξιμο» του μετάλλου είναι οι ασυνέχειες υλικού πάνω στη ραφή και έχει συνήθως τη μορφή οπής. Η ατέλεια αυτή οφείλεται σε υπερβολική τήξη του μετάλλου συγκόλλησης.



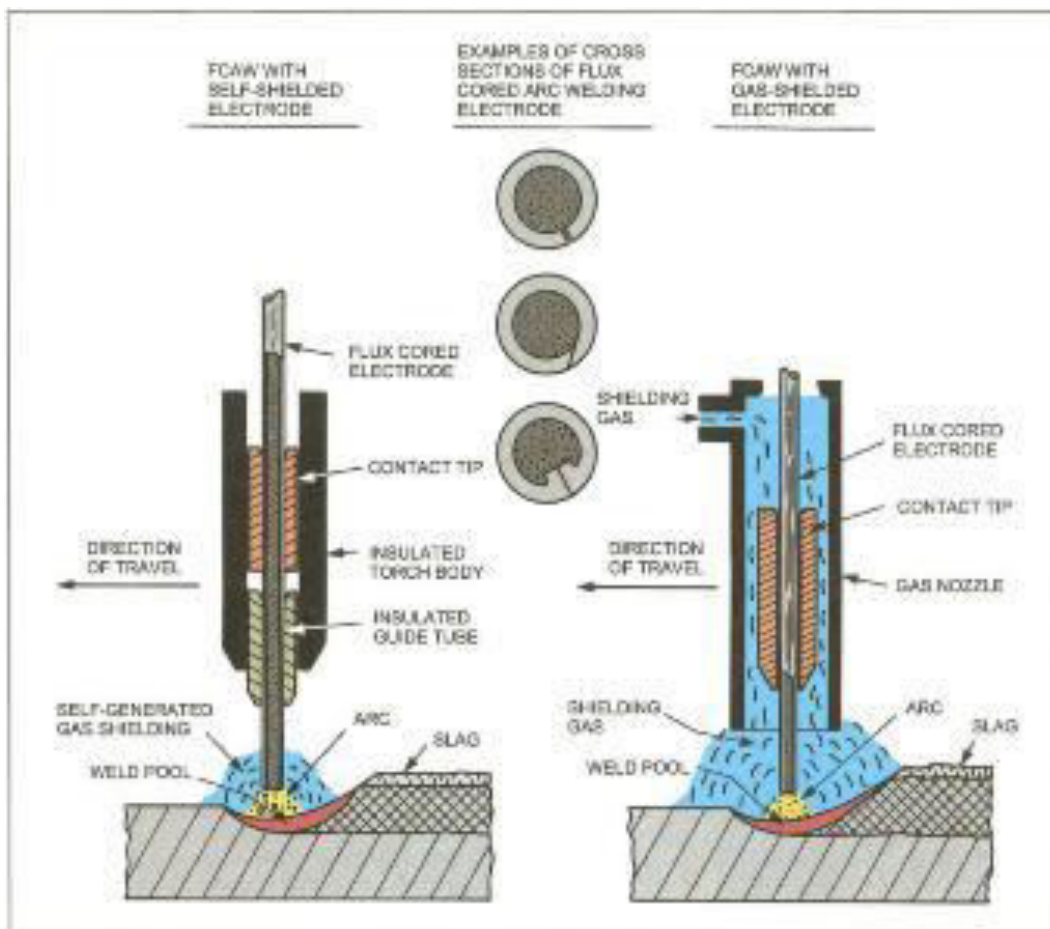
**Εικόνα 1.5** Σχηματική παρουσίαση των σφαλμάτων εκτοξεύσεων, πόρων, ατελούς τήξης, ατελούς ή υπερβολικής διείσδυσης, «τρέξιματος» του μετάλλου, ανώμαλης επιφάνειας όψης ραφής και παραμορφώσεων.

### 1.3 Συγκόλληση Τόξου με χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding – FCAW)

#### 1.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου FCAW [2, 3, 59, 67]

Η μέθοδος FCAW εκμεταλλεύεται τη θερμότητα ενός ηλεκτρικού τόξου έτσι ώστε να επιτευχθεί η συνένωση της συμβολής του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης. Είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος που μπορεί να προσαρμοστεί σε ημι-αυτοματοποιημένες ή πλήρως αυτοματοποιημένες διατάξεις συγκόλλησης και έχει ως αποτέλεσμα πολύ καλής ποιότητας συγκολλήσεις και ταυτόχρονα πολύ υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού. Το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός συνεχώς τροφοδοτούμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση ελάσματος. Η μέθοδος FCAW είναι επί της ουσίας μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW όπου το τηκόμενο ηλεκτρόδιο έχει τη μορφή ενός μεταλλικού σωλήνα που περιέχει στο εσωτερικό του σκόνη συλλιπάσματος.

Η χρήση του συλλιπάσματος είναι παρόμοια με εκείνη της μεθόδου SMAW (συγκόλληση βυθισμένου τόξου), δηλαδή η προστασία της λίκνης της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η διαφορά των μεθόδων συνίσταται στο ότι στη μέθοδο FCAW η σκόνη περιέχεται στο ηλεκτρόδιο, ενώ στη μέθοδο SMAW η σκόνη συλλιπάσματος περικλείει το τηκόμενο ηλεκτρόδιο. Στην περιοχή του τόξου υπάρχει δυνατότητα να παρέχεται αέριο μείγμα προστασίας για την προστασία του λουτρού της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η χρήση αερίου προστασίας στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι προαιρετική και το αν χρησιμοποιείται αέριο ή όχι δημιουργεί δύο παραλλαγές συγκολλήσεων FCAW.



Εικόνα 1.6 Απεικόνιση αριστερά: S-FCAW. Απεικόνιση Δεξιά: G-FCAW.



### 1. Αυτοπροστατευόμενη συγκόλληση με σωληνοειδή ηλεκτρόδια, S-FCAW (self-shielded FCAW)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για κατασκευές εξωτερικού χώρου, όπου η παρουσία ανέμων και εξωγενών παραγόντων θα μπορούσε να επηρεάσει ή ακόμα και να διακόψει την παροχή αερίου προστασίας. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με τη μέθοδο S-FCAW παρέχεται πρόσθετη προστασία λόγω της αποσύνθεσης κάποιων στοιχείων του πυρήνα του ηλεκτροδίου που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται από το τόξο της συγκόλλησης. Οι ατμοί που δημιουργούνται από την εξάτμιση αυτών των στοιχείων μετατοπίζουν ακαριαία τον ατμοσφαιρικό αέρα από την περιοχή γύρω από το ηλεκτρικό τόξο. Επιπλέον το ηλεκτρόδιο περιλαμβάνει μεγάλες ποσότητες αποξειδωτικών και απονιτρίτικών μέσων (deoxidizers, denitrifiers), το οποία αντιδρούν με τα ανεπιθύμητα στοιχεία που εν δυνάμει μπορούν να επηρεάσουν τη λίμνη της συγκόλλησης. Τέλος, ένα στρώμα σκουριάς που δημιουργείται από τα στοιχεία που περιέχονται στο ηλεκτρόδιο προστατεύουν το προς στερεοποίηση μίγμα από τον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα της συγκόλλησης.

### 2. Συγκόλληση με σωληνοειδή ηλεκτρόδια και χρήση αερίου προστασίας, G-FCAW (gas-shielded FCAW)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί σωληνοειδή ηλεκτρόδια που περιέχουν σκόνη συλλιπάσματος, καθώς και αέριο προστασίας, έχει δηλαδή διπλή προστασία (dual shield). Στη μέθοδο G-FCAW, το αέριο προστασίας (CO<sub>2</sub> ή μίγμα Ar – CO<sub>2</sub>) προστατεύει τη λίμνη της συγκόλλησης από το οξυγόνο και το άζωτο που περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, σχηματίζοντας ένα «νέφος» αερίου γύρω από το ηλεκτρικό τόξο και πάνω από τη λίμνη συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δεν υπάρχει ανάγκη απαζώτωσης (απομάκρυνσης του αζώτου) του μετάλλου συγκόλλησης επειδή ο ατμοσφαιρικός αέρας που είναι πλούσιος σε άζωτο έχει αποκλειστεί από το αέριο προστασίας. Παρόλα αυτά υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού οξυγόνου από τη διάσπαση του CO<sub>2</sub> σε οξυγόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η χρήση ηλεκτροδίων που η σύστασή τους περιέχει αποξειδωτικά μέσα τα οποία αντιδρούν με τις μικρές ποσότητες οξυγόνου που έχουν προκύψει στο αέριο προστασίας.

#### 1.3.2 Ηλεκτρόδια [2, 3, 67]

Όπως έχει αναφερθεί, το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιείται στη μέθοδο FCAW, είναι σωληνοειδές και έχει περίβλημα που αποτελείται από μέταλλο προσθήκης και πυρήνα που περιέχει διάφορα συστατικά σε μορφή σκόνης. Τόσο το υλικό του περιβλήματος όσο και η σκόνη του πυρήνα συμβάλλουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή στα επιθυμητά χαρακτηριστικά χρήσης της συγκόλλησης.

Οι κύριες λειτουργίες των συστατικών της σκόνης του πυρήνα του ηλεκτροδίου είναι οι ακόλουθες:

1. Προσδίδουν τα μηχανικά, μεταλλουργικά, και αντισκωριακά χαρακτηριστικά του μετάλλου συγκόλλησης, επηρεάζοντας την τελική χημική του σύσταση.
2. Επηρεάζουν και «ρυθμίζουν» την ορθότητα του μετάλλου συγκόλλησης, προστατεύοντας τη λίμνη της συγκόλλησης (στην περίπτωση της S-FCAW) από το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας.
3. Συμβάλλουν στον καθαρισμό της λίμνης της συγκόλλησης από ακαθαρσίες και ανεπιθύμητες προσμίξεις, αντιδρώντας χημικά με αυτές.
4. Δημιουργούν ένα στρώμα επιφανειακής σκουριάς που προστατεύει το προς στερεοποίηση μέταλλο συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα.
5. Σταθεροποιούν το τόξο της συγκόλλησης δημιουργώντας ένα αγωγίμο πεδίο που συμβάλλει στην ορθή γεωμετρία της συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.

Κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία που μπορούν να περιλαμβάνονται στη σκόνη του πυρήνα ενός ηλεκτροδίου της μεθόδου FCAW είναι τα παρακάτω:

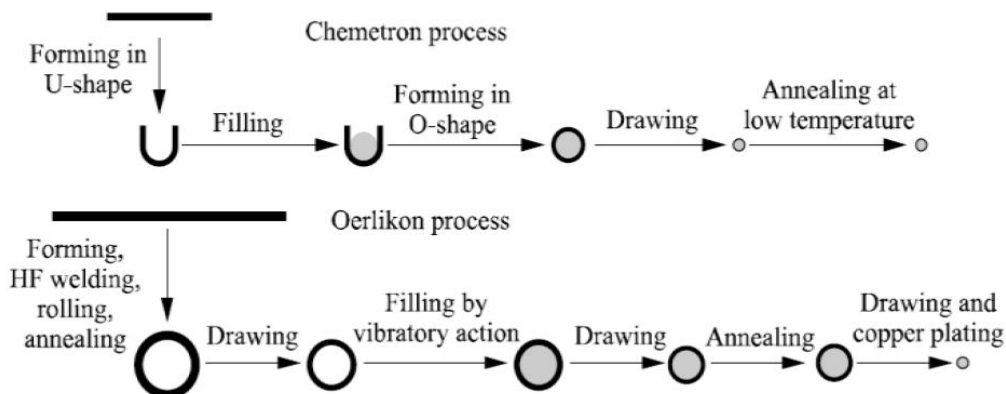
*Τιτάνιο, Αλουμίνιο, Ζιρκόνιο, Πυρίτιο, Μαγγάνιο:* είναι στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη σκόνη του πυρήνα των σωληνοειδών ηλεκτροδίων προκειμένου να απομακρυνθεί το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας.

*Νικέλιο, Μολυβδαίνιο, Χρώμιο, Βανάδιο:* τα στοιχεία αυτά εισέρχονται σαν στοιχεία κραμάτωσης στη λίμνη της συγκόλλησης και συνεισφέρουν στη μηχανική αντοχή, στην αντοχή στη διάβρωση και στην αύξηση της σκληρότητας του μετάλλου συγκόλλησης.

*Κάλιο, Νάτριο:* η εισαγωγή αυτών των στοιχείων στη σκόνη του πυρήνα του ηλεκτροδίου σταθεροποιεί το ηλεκτρικό τόξο και σχηματίζει προστατευτική σκουριά στη ραφή της συγκόλλησης.

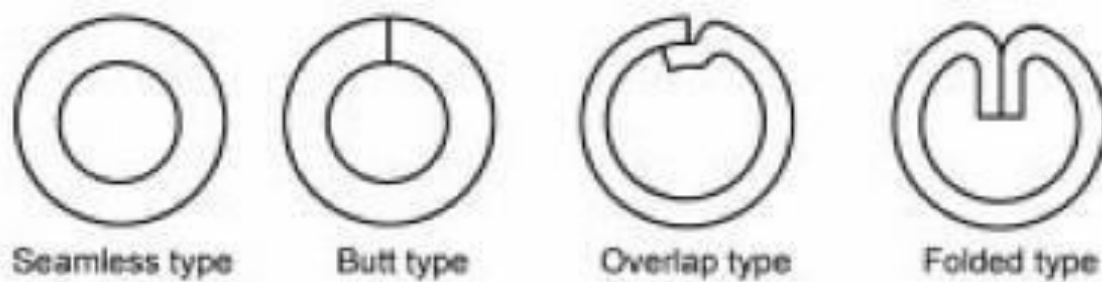
*Βόριο:* η χρήση αυτού του στοιχείου είναι απαραίτητη αν απαιτείται λεπτόκοκκη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης.

Η αρχική μέθοδος παρασκευής των ηλεκτροδίων ήταν η πλήρωση ενός μεταλλικού σωλήνα μεγαλύτερης διαμέτρου από την επιθυμητή με τη σκόνη του πυρήνα, και έπειτα μέσω της μεθόδου της ογκής επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάμετρος. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος σήμερα είναι η μέθοδος διαμόρφωσης επίπεδης λωρίδας. Η μεταλλική λωρίδα εισέρχεται σε μια διάταξη με ράουλα και διαμορφώνεται αρχικά σε μορφή U. Η σκόνη του πυρήνα απλώνεται στο εσωτερικό της ήδη διαμορφωμένης λωρίδας και έπειτα κλείνεται σε μορφή σωλήνα.



**Εικόνα 1.7** Μέθοδοι κατασκευής σωληνοειδών ηλεκτροδίων.

Ο τρόπος που εφαρμόζεται για να διαμορφωθεί ο τελικός σωλήνας διαφέρει αναλόγως με τον εξοπλισμό του κατασκευαστή αλλά και το είδος του ηλεκτροδίου που κατασκευάζεται. Μετά το κλείσιμο του σωλήνα μέσω διέλασης επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάμετρος του ηλεκτροδίου. Παρακάτω φαίνονται διάφορες διατομές ηλεκτροδίων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής



**Εικόνα 1.8** Διαφοροποίηση διατομών σωληνοειδών ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια της μεθόδου FCAW κατά AWS, για συγκολλήσεις ανθρακο-μαγνησιούχων χαλύβων, τυποποιούνται σύμφωνα με το παρακάτω πρότυπο:

E x x T x - x

- Το γράμμα E στην αρχή του τύπου υποδηλώνει την ύπαρξη ηλεκτροδίου
- Στη δεύτερη θέση εισάγεται ένας αριθμός που αντιστοιχεί στην αντοχή του ηλεκτροδίου σε εφελκυσμό, πολλαπλασιαζόμενος με έναν παράγοντα 10x που υποδεικνύει την αντοχή σε ksi.
- Στην τρίτη θέση εισάγεται ο αριθμός 0 ή 1 ανάλογα την θέση συγκόλλησης για την οποία ενδείκνυται το ηλεκτρόδιο. Ο αριθμός 0 αντιστοιχεί σε επίπεδες και οριζόντιες συγκολλήσεις ενώ η ο αριθμός 1 υποδηλώνει ότι το ηλεκτρόδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις.
- Ο χαρακτήρας T δείχνει ότι πρόκειται για σωληνοειδές ηλεκτρόδιο.
- Στην πέμπτη θέση εισάγεται ένας αριθμός μεταξύ 1, 4, 5, 6, 7, 8, 11, ή ο χαρακτήρας G, που υποδηλώνουν τις δυνατότητες χρήσης του ηλεκτροδίου δηλαδή το αέριο προστασίας και τη μορφή της σκουριάς που σχηματίζεται.
- Το τελευταίο ψηφίο καθορίζει τη χημική σύσταση του μετάλλου προσθήκης

### 1.3.3 Αέρια Προστασίας [3, 59, 66]

Τα πιο συνηθισμένα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο FCAW είναι το CO<sub>2</sub> (διοξείδιο του άνθρακα) καθώς και μίγμα CO<sub>2</sub> – Ar (διοξείδιο του άνθρακα – αργό).

- Διοξείδιο του άνθρακα

Το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται ευρέως σαν αέριο προστασίας στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο FCAW. Η χρήση του έχει σαν αποτέλεσμα συγκολλήσεις μεγάλης διεύθυνσης και το κόστος του είναι πολύ χαμηλότερο από τα διάφορα αέρια μίγματα.

Το CO<sub>2</sub> είναι σχετικά αδρανές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ όταν θερμαίνεται κατά τη συγκόλληση διασπάται σε CO (μονοξείδιο του άνθρακα) και O<sub>2</sub> (οξυγόνο). Μετά τη διάσπασή του, η περιβάλλουσα του τόξου ατμόσφαιρα περιέχει μια μετρήσιμη ποσότητα O<sub>2</sub> η οποία αντιδρά με τα μεταλλικά στοιχεία που περιέχονται στη λίμνη της συγκόλλησης. Η οξειδωτική τάση που παρουσιάζει η χρήση του CO<sub>2</sub> οδηγεί αναγκαστικά στη χρήση ηλεκτροδίων στον πυρήνα των οποίων περιέχονται αποξειδωτικά στοιχεία τα οποία εξουδετερώνουν την τάση αυτή. Επιπλέον, ο σίδηρος που περιέχεται στη λίμνη της συγκόλλησης αντιδρά με το CO<sub>2</sub>, και δημιουργούνται οξείδια του σιδήρου και CO.

Τα αποτελέσματα που έχει η χρήση του CO<sub>2</sub> σαν αέριο προστασίας σε χάλυβες μέσης ή χαμηλής κραμάτωσης, είναι μοναδικά. Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα του μετάλλου βάσης αλλά και του ηλεκτροδίου, η παρουσία του CO<sub>2</sub> μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν ενανθρακωτικό μέσο είτε σαν μέτριας δράσης μέσο απομάκρυνσης του άνθρακα. Η αύξηση ή η μείωση του άνθρακα στο μέταλλο συγκόλλησης εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται στο μέταλλο βάσης και στο ηλεκτρόδιο. Έχει παρατηρηθεί ότι αν το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται στο μέταλλο συγκόλλησης είναι μικρότερο του 0.05%, τότε η λίμνη της συγκόλλησης θα τείνει να απορροφήσει άνθρακα από την προστατευτική ατμόσφαιρα του CO<sub>2</sub>. Αντίθετα, εάν το ποσοστό του άνθρακα είναι μεγαλύτερο από 0.10% τότε η λίμνη της συγκόλλησης θα αποβάλλει μια ποσότητα του περιεχόμενου άνθρακα. Η αποβολή αυτή οφείλεται στο σχηματισμό του CO που λαμβάνει χώρα λόγω των οξειδωτικών χαρακτηριστικών που έχει το CO<sub>2</sub> σε υψηλές θερμοκρασίες. Όταν συμβαίνει αυτή η αντίδραση το CO παγιδεύεται στη λίμνη της συγκόλλησης και μπορεί να δημιουργήσει ατέλειες με τη μορφή πόρων στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυτό μπορεί να μειωθεί αισθητά αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο που περιέχει μεγάλες ποσότητες αποξειδωτικών μέσων στον πυρήνα του. Το οξυγόνο αντιδρά με τα στοιχεία αυτά και όχι με τον άνθρακα που περιέχεται στον προς συγκόλληση χάλυβα. Αυτή η αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οξειδίων τα οποία επιπλέον στην επιφάνεια της λίμνης της συγκόλλησης και δημιουργούν ένα στρώμα επιφανειακής σκουριάς που μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί.

- Μείγμα διοξειδίου του άνθρακα – αργού

Η χρήση μείγματος αερίου διοξειδίου του άνθρακα – αργού, εκμεταλλεύεται τα επιμέρους πλεονεκτήματα που μπορούν να προσφέρουν τα δύο αυτά αέρια. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό του CO<sub>2</sub> στο αέριο προστασίας τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η μεταφορά αποξειδωτικών μέσων που περιέχονται στον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Το αργό παρέχει προστασία και «κάλυψη» της λίμνης της συγκόλλησης σε όλες τις θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα, αφού η επαρκής παροχή του στο αέριο μίγμα προστασίας εμποδίζει την οξείδωση του μετάλλου της συγκόλλησης.

Το πιο σύνηθες μείγμα που χρησιμοποιείται στην G-FCAW είναι 75% αργό και 25% CO<sub>2</sub> (75/25). Αυτό το μείγμα οδηγεί στη δημιουργία τόξου μεταφοράς μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων (spray transfer arc). Το μέταλλο συγκόλλησης που εναποτίθεται μέσω προστασίας αυτού του μείγματος, έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και μεγαλύτερο όριο διαρροής από το μέταλλο συγκόλλησης που εναποτίθεται με αέριο προστασίας 100% CO<sub>2</sub>.

Αυτό συμβαίνει γιατί με τη χρήση του μείγματος (75/25) έχουμε μεταφορά μαγγανίου (Mn) και πυριτίου (Si) που παραμένουν ως κραματικά στοιχεία στο μέταλλο συγκόλλησης, ενώ σε περίπτωση που θα χρησιμοποιείτο 100% CO<sub>2</sub> ως αέριο προστασίας, τα στοιχεία αυτά θα αντιδρούσαν με το οξυγόνο και θα απομακρύνονταν με τη μορφή οξειδίων από τη λίμνη της συγκόλλησης. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός μείγματος (75/25) με ηλεκτρόδια που έχουν σχεδιαστεί για αέριο προστασίας 100% CO<sub>2</sub> μπορεί να οδηγήσει στην ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων Mn και Si στο μέταλλο συγκόλλησης, έτσι ώστε να αλλάξουν κατά πολύ οι αναμενόμενες μηχανικές του ιδιότητες. Επομένως, οι κατασκευαστές ηλεκτροδίων θα πρέπει να επισημαίνουν τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων που θα προκύψουν αναλόγως το είδος του προς συγκόλληση χάλυβα και του αερίου προστασίας που θα χρησιμοποιηθεί.

### 1.3.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου FCAW [59, 66, 68]

Η μέθοδος FCAW, ως παραλλαγή της μεθόδου GMAW/MIG, εμφανίζει σφάλματα παρεμφερή με αυτά της δεύτερης μεθόδου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι πόροι, η ατελής τήξη, η ατελής ή η υπερβολική διείδυση.

Δύο σφάλματα που εμφανίζονται στη μέθοδο αυτή και οφείλονται στα αποκλειστικά χαρακτηριστικά της, είναι οι ρωγματώσεις λόγω αυξημένης παρουσίας υδρογόνου, και οι ατέλειες τύπου «worm tracks».

Η ύπαρξη υδρογόνου στο μέταλλο συγκόλλησης μπορεί πολλές φορές να οδηγήσει σε ρωγμάτωση της ραφής είτε αμέσως μετά τη συγκόλληση, είτε σε διάρκεια μερικών ωρών. Η ύπαρξη υδρογόνου σε συνδυασμό με λανθασμένη εκτίμηση για τη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει, για την περίπτωση ιδιαίτερα σκληρών φάσεων, σε ρωγματώσεις του μετάλλου συγκόλλησης (hydrogen assisted cold cracking). Η ελεγχόμενη απόψυξη της συγκόλλησης μπορεί να ωφελήσει στη δημιουργία φάσεων μικρότερης σκληρότητας έτσι ώστε να αποφευχθούν οι ρωγματώσεις, όχι όμως αρκετά μικρές ώστε να τίθεται ζήτημα αντοχής.

Μια πιθανή αιτία αύξησης των επιπέδων του υδρογόνου στο περιβάλλον της συγκόλλησης είναι ατέλειες ή σφάλματα στο σύστημα παροχής προστατευτικού αερίου. Μια αύξηση του ποσοστού υδρογόνου στην περιοχή της συγκόλλησης μπορεί να αυξήσει τα ποσοστά του απορροφούμενου υδρογόνου στη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης, που μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ρωγμών εν ψυχρώ.

Οι διακυμάνσεις των παραμέτρων της συγκόλλησης είναι οι κύριες αιτίες προσρόφησης υδρογόνου από τη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης. Η αυξομείωση του ποσοστού υδρογόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εναλλαγές στην ένταση του ρεύματος. Επίσης η αύξηση της τάσης του τόξου μπορεί να οδηγήσει σε προσρόφηση αυξημένων ποσοστών υδρογόνου από τη συγκόλληση. Χαρακτηριστική μείωση στα ποσοστά υδρογόνου μπορεί να επιφέρει η αύξηση του μήκους του τόξου. Πέρα όμως από τις συνθήκες συγκόλλησης, η προσρόφηση του υδρογόνου μπορεί να περιέλθει από τους παρακάτω παράγοντες:

- Αυξημένη υγρασία στην ατμόσφαιρα γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης και στο αέριο προστασίας.
- Αυξημένη υγρασία στη σκόνη του πυρήνα των ηλεκτροδίων.
- Οργανικές ουσίες στη σκόνη του πυρήνα.
- Υδρογονούχες ουσίες σε εξωτερικά υλικά όπως βαφές και έλαια.

Επιπροσθέτως, σφάλματα της μορφής «worm tracks» αποτελούν επί της ουσίας επιφανειακά σημάδια στη ραφή της συγκόλλησης. Η αιτία δημιουργίας τους είναι τα διασπώμενα αέρια της συγκόλλησης τα οποία εκλύονται κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου συγκόλλησης και παγιδεύονται ανάμεσα στο μέταλλο συγκόλλησης και την επιφανειακή σκουριά, που εναποτίθεται στη μέθοδο FCAW. Τα σφάλματα αυτά παρουσιάζονται με τη μορφή γραμμικών ατελειών, πολλές φορές συνενωμένων, παράλληλα στην επιφάνεια συγκόλλησης.



**Εικόνα 1.9** Χαρακτηριστική μορφή των ατελειών τύπου worm tracks.

### 1.3.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW [59, 60, 61, 66]

Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου FCAW είναι η αυξημένη παραγωγικότητα που εμφανίζει σε πληθώρα εφαρμογών. Αυτό σημαίνει πως έχει μικρότερο συνολικό κόστος από άλλες μεθόδους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αντιστοίχως όπως η χειροκίνητη SMAW, η SAW, και η GMAW. Επίσης σε σχέση με τις αναφερθείσες μεθόδους, η FCAW, παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα. Χαρακτηριστικά αναφέρονται ως πλεονεκτήματα της μεθόδου FCAW, τα παρακάτω:

- Υψηλή ποιότητα εναποτιθέμενου μετάλλου.
- Πολύ καλής ποιότητας όψη της συγκόλλησης
- Μεγάλη ποικιλία ως προς τους προς συγκόλληση χάλυβες καθώς και μεγάλο εύρος συγκολλησίμου πάχους (συγκόλλησης πολύ λεπτών ελασμάτων).
- Μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης υλικού και υψηλή πυκνότητα ρεύματος.
- Εύκολη αυτοματοποίηση της μεθόδου
- Μεγάλος βαθμός αξιοποίησης του μετάλλου του ηλεκτροδίου
- Χαμηλές απαιτήσεις καθαρισμού των τεμαχίων σε σχέση με την GMAW

- Καλές ανοχές σε προσμίξεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε θραύση της συγκόλλησης
- Μικρή πιθανότητα ψυχρής ρωγμάτωση (underbead cracking)
- Στην περίπτωση της S-FCAW, η μέθοδος μπορεί και ανταπεξέρχεται στην ύπαρξη σχετικά ισχυρών ρευμάτων αέρα.

Παρόλο που η μέθοδος παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης, έχει κάποιους περιορισμούς όσον αφορά στο κόστος του εξοπλισμού, την εκπομπή καυσαερίων, την ανάγκη αφαίρεσης της σκουριάς ανά πάσο ή στο τέλος της συγκόλλησης ενός πάσου. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Η μέθοδος περιορίζεται στη συγκόλληση σιδηρούχων κραμάτων και κραμάτων νικελίου
- Παράγει σκουριά που πρέπει να αφαιρείται ανά πάσο συγκόλλησης
- Έχει μεγάλο κόστος ηλεκτροδίου ανά μονάδα βάρους σε σχέση με τα συμπαγή ηλεκτρόδια
- Μεγάλη παραγωγή καυσαερίων σε σχέση με την μέθοδο GMAW.

Επίσης, κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FCAW, λόγω της αυξημένης πυκνότητας ρεύματος, η θερμοκρασία που αναπτύσσει το τόξο είναι πολύ αυξημένη και η ακτινοβολία που εκπέμπει είναι πολύ ισχυρή, με αποτέλεσμα να αναγκάζεται ο συγκολλητής να κάνει περισσότερα διαλείμματα κατά την εκτέλεση του έργου. Τέλος οι συγκολλήσεις FCAW, παρουσιάζουν συχνά την ανάγκη χαλάρωσης των παραμενουσών τάσεων που έχουν συσσωρευτεί στη ζώνη που έχει επηρεάσει η συγκόλληση.

#### **1.4 Μέθοδος συγκόλλησης με σωληνοειδή ηλεκτρόδια με μεταλλική σκόνη πυρήνα (Metal Core Arc Welding – MCAW) [66, 67]**

Παρόλο που η μέθοδος FCAW, εξασφαλίζει πιο ευνοϊκές συνθήκες για το συγκολλητή, μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης μετάλλου προσθήκης σε διάφορες θέσεις συγκόλλησης (κάθετη και ουρανού) και παρέχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες στη ραφή της συγκόλλησης, υπάρχει η ανάγκη, να επιτευχθεί ο συνδυασμός υψηλού ρυθμού εναπόθεσης με την αποδοτικότητα της εναπόθεσης, δηλαδή το ποσοστό του βάρους του ηλεκτροδίου που τελικά παραμένει στο μέταλλο συγκόλλησης.

Η απάντηση σε αυτό ήρθε με τη δημιουργία σωληνοειδών ηλεκτροδίων που έχουν στο εσωτερικό τους αποκλειστικά μεταλλική σκόνη. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί τα εν λόγω ηλεκτρόδια ονομάζεται MCAW (Metal Core Arc Welding).

Η μέθοδος MCAW χρησιμοποιεί, όπως ακριβώς η GMAW, τη θερμότητα από ένα ηλεκτρικό τόξο συνεχούς ρεύματος προκειμένου να τήξει το μέταλλο βάσης και το μέταλλο προσθήκης έτσι ώστε να επιτευχθεί μόνιμη συγκόλληση. Η χρήση προστατευτικού αερίου είναι απαραίτητη.

Προφανώς από τη στιγμή που η μέθοδος MCAW είναι μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW, θα παρουσιάζει αρκετά κοινά στοιχεία με αυτήν αλλά και κάποιες διαφορές. Όπως στην GMAW έτσι και στην MCAW χρησιμοποιείται πηγή συνεχούς ρεύματος, όμως στην MCAW τα ηλεκτρόδια είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν τόσο σαν θετικοί όσα και σαν αρνητικοί πόλοι και κάποια από αυτά μπορούν να λειτουργήσουν και στις δύο συνθήκες.

Το συμπαγές μεταλλικό περίβλημα του ηλεκτροδίου, άγει το ηλεκτρικό ρεύμα που είναι απαραίτητο για τη δημιουργία του τόξου της συγκόλλησης. Τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια, λόγω της σύνθετης φύσης τους, μπορούν και μεταφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος στις ίδιες συνθήκες ρεύματος, σε σχέση με τα συμπαγή ηλεκτρόδια, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά το ρυθμό εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης.

Τα συστατικά που περιέχονται στον πυρήνα του σωληνοειδούς ηλεκτροδίου μεταλλικής σκόνης, είναι κυρίως το μαγνήσιο και το πυρίτιο και σε κάποιες περιπτώσεις το νικέλιο, το χρώμιο και το μολυβδαίνιο. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να περιέχονται μικρές ποσότητες στοιχείων που λειτουργούν σαν σταθεροποιητές του ηλεκτρικού τόξου, όπως είναι το νάτριο και το κάλιο. Τα ηλεκτρόδια με πυρήνα μεταλλικής σκόνης, παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας κραματωμένου μετάλλου συγκόλλησης και πλέον είναι δυνατή ακόμα και η δημιουργία ωστενιτικών και φερριτικών ανοξειδωτων χαλύβων, πέρα από τα συνηθισμένα κράματα νικελίου, χρωμίου και μολυβδαινίου. Τα ηλεκτρόδια αυτά περιέχουν ελάχιστα ή καθόλου συστατικά που δημιουργούν επιφανειακή σκουριά. Όπως και στην περίπτωση χρήσης των συμπαγών ηλεκτροδίων της GMAW, έτσι και με τη χρήση αυτών των ηλεκτροδίων μπορεί να λάβει χώρα ο σχηματισμός μικρών «νησίδων» πυριτίου στην επιφάνεια της συγκόλλησης, γεγονός που επιτρέπει τη διεξαγωγή πολλαπλών πάσων συγκόλλησης (multi-pass welding), χωρίς να είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της σκουριάς.

Γενικά η αποδοτικότητα της εναπόθεσης ορίζεται από το ποσό του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου που γίνεται πραγματικά μέταλλο προσθήκης και δεν χάνεται με τη μορφή σκουριάς, εκτοξεύσεων και καυσαερίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η αποδοτικότητα της εναπόθεσης του ηλεκτροδίου τόσο λιγότερο ηλεκτρόδιο «δαπανάται» τελικά για τη διεξαγωγή της συγκόλλησης. Τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια μεταλλικής σκόνης, παρουσιάζουν υπό συνθήκες μέχρι και 98% απόδοση εναπόθεσης μετάλλου. Συνθήκες που επιτυγχάνεται αυτό είναι η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων (spray transfer) και η ύπαρξη αερίου προστασίας με υψηλή περιεκτικότητα σε αργό. Το κατώτατο όριο που παρουσιάζει η αποδοτικότητα της εναπόθεσης σε αυτά τα ηλεκτρόδια είναι 92%, ενώ το ανώτατο όριο αποδοτικότητας ενός ηλεκτροδίου της μεθόδου FCAW είναι 89%. Αυτό δείχνει ότι τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια με πυρήνα μεταλλικής σκόνης είναι πολύ πιο αποδοτικά από αυτά της μεθόδου FCAW και προσομοιάζουν σε απόδοση τα συμπαγή ηλεκτρόδια της GMAW. Προφανώς οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξάγεται μια συγκόλληση, επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της εναπόθεσης και η επιλογή μεθόδου συγκόλλησης εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα τελικά χαρακτηριστικά συγκόλλησης που υπάρχει η ανάγκη να επιτευχθούν.

Ο ρυθμός εναπόθεσης ενός ηλεκτροδίου, αναφέρεται στο πόσο μέταλλο προσθήκης εναποτίθεται σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Το μέγεθος αυτό σε συνδυασμό με την αποδοτικότητα της εναπόθεσης, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση κόστους ενός ηλεκτροδίου.



Γενικά τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια, τόσο της FCAW όσο και της MCAW, έχουν το μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις τήξης. Έτσι ένα σωληνοειδές ηλεκτρόδιο για χρήση με τη μέθοδο MCAW που έχει παρόμοια αποδοτικότητα εναπόθεσης με ένα συμπαγές ηλεκτρόδιο, είναι πιο οικονομικό γιατί έχει μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης, επομένως με τη χρήση του υλοποιείται το ίδιο έργο σε λιγότερο χρόνο.

Εν γένει η μέθοδος MCAW συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της FCAW, προσθέτοντας μερικά επιπλέον. Η χρήση της μεθόδου MCAW, συνεπάγεται οριακά την ολοκληρωτική απουσία σκουριάς στην επιφάνεια της συγκόλλησης, γεγονός που ήταν μέχρι πολύ πρόσφατα αποκλειστικό πλεονέκτημα της GMAW σε σχέση με την FCAW, καθώς επίσης και σημαντική μείωση των εκτοξεύσεων σε σχέση με τη μέθοδο FCAW, αν χρησιμοποιείται μίγμα αερίου με υψηλή περιεκτικότητα σε αργό. Επίσης εκτελείται με χαμηλή πρόσδοση θερμότητας, γεγονός το οποίο έχει σημαντικά οφέλη που αναλύονται σε επόμενο Κεφάλαιο, ενώ ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι δίνει εξαιρετική ποιότητα ραφής συγκόλλησης, καλύτερη της FCAW.

Αυτό οφείλεται στο ότι σε συμπαγή ηλεκτρόδια το ρεύμα μεταφέρεται από όλη τη διατομή του ηλεκτροδίου, ενώ αντίθετα σε σωληνοειδή ηλεκτρόδια με μεταλλική σκόνη στον πυρήνα, το ρεύμα μέταγεται από τα τοιχώματα του ηλεκτροδίου, καθώς η σκόνη είναι λιγότερο αγωγίμη, λόγω του πορώδους της. Έτσι η μορφή του τόξου είναι πιο ευρεία (broad – bowl shaped arc cone) και η εναπόθεση επιτυγχάνεται καλύτερα. Τέλος, έχει το πλεονέκτημα ότι επιτυγχάνεται μεταφορά με σταγονίδια σε μικρότερης έντασης ρεύμα από ό,τι με συμπαγές ηλεκτρόδιο, κάτι που ενισχύει τη δυνατότητα συγκόλλησης ελασμάτων χαμηλού πάχους, αφού δεν παρουσιάζεται διαπέραση από το τόξο (burn-through).

Η απουσία σκουριάς και η απουσία εκτεταμένων εκτοξεύσεων δίνει μεγάλο πλεονέκτημα στην MCAW, όταν εφαρμόζεται σε συγκολλήσεις σε συνεχόμενες παραγωγικές διαδικασίες, όπου το τεμάχιο περνά από τη φάση της συγκόλλησης απευθείας στη φάση καθαρισμού και βαφής. Η ανάγκη καθαρισμού ενός συγκολλημένου τεμαχίου από τις εκτοξεύσεις μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος παραγωγής. Τα ηλεκτρόδια με πυρήνα μεταλλικής σκόνης περιέχουν συστατικά που σταθεροποιούν το τόξο και έτσι μειώνονται οι εκτοξεύσεις.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν τα πλεονεκτήματα της χρήσης των σωληνοειδών ηλεκτροδίων με μεταλλικής σκόνης πυρήνα και της μεθόδου MCAW. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου φαίνονται συνοπτικά παρακάτω:

- Η επίτευξη των κατάλληλων συνθηκών ταχύτητας και θέσης για τη σωστή εφαρμογή της μεθόδου και την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της, απαιτεί τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων με τη χρήση ρομποτικής διάταξης.

- Είναι απαραίτητη η μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων και άρα απαιτείται μεγάλο ποσοστό αργού στο αέριο μείγμα προστασίας. Το μεγάλο ποσοστό αργού, παρόλο που μειώνει δραστικά τα εκπεμπόμενα καυσαέρια, έχει πολύ μεγάλη εκπεμπόμενη θερμότητα με τη μορφή ακτινοβολίας. Επομένως καθίσταται αναγκαία η χρήση υδρόψυκτων πιστολιών συγκόλλησης προκειμένου να υπάρχει επαρκής προστασία από το τόξο και από το ακτινοβολούμενο φως.
- Για να επιτευχθεί η συγκόλληση σε όλες τις θέσεις θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή βραχυκύκλωσης. Οι δυσμενείς επιπτώσεις αυτού θα μπορούσαν να εξαλειφθούν από την αποδοτικότητα της εναπόθεσης του ηλεκτροδίου και από το μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης που έχουν αυτά τα ηλεκτρόδια. Έτσι, επειδή οι περισσότερες μηχανές συγκόλλησης δεν έχουν προγράμματα ειδικά προσαρμοσμένα στην MCAW, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στο πρόγραμμα της μηχανής προκειμένου να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης.

## Κεφάλαιο 2

### Χάλυβες

#### 2.1 Εισαγωγή [1]

Οι χάλυβες συνιστούν κράματα Fe-C με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1.5% κ.β. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται οι χάλυβες περιέχουν και ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, σε μικρές ή μεγαλύτερες ποσότητες, τα οποία τροποποιούν τις φυσικές, χημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ως προς τη χημική τους σύσταση οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες και
- Κραματομένους ή ειδικούς χάλυβες.

Ως προς τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε :

- χάλυβες διαμόρφωσης και
- χυτοχάλυβες

Ως προς τις χρήσεις τους οι χάλυβες διακρίνονται σε :

- χάλυβες κατασκευών
- εργαλειοχάλυβες
- ανοξείδωτους ή πυρίμαχους
- χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών
- κ.λ.π.

Ο χάλυβας είναι το σημαντικότερο και πιο διαδεδομένο υλικό των μηχανολογικών κατασκευών. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σ' ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων. Άλλοι πρόσθετοι λόγοι για την υπεροχή των χάλυβων είναι οι εξής:

- (α) Τα μεγάλα παγκόσμια αποθέματα μεταλλεύματος (ο φλοιός της γης περιέχει ~ 4% Fe), που ανάγονται εύκολα στη μεταλλική κατάσταση σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανακυκλώσεως (scrap recycling).
- Το σημείο τήξεως του σιδήρου (1539°C) επιτρέπει τη θερμική ενεργοποίηση διεργασιών σε θερμοκρασίες ( $T > 400^\circ\text{C}$ ) που επιτυγχάνονται σχετικά εύκολα και ελέγχονται βιομηχανικά.

- Η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες (π.χ. ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός) επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ναυπηγικοί χάλυβες AH36 και AH40 FCA, που είναι και οι δυο κραματωμένοι χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Ο AH36 κατηγοριοποιείται ως χάλυβας υψηλής αντοχής (High Strength Steel-HSS), ενώ ο AH40 FCA ως “μικροκραματωμένος χάλυβας υψηλής αντοχής” (High Strength Low Alloy-HSLA) από τους νηογνώμονες. Στο παρόν Κεφάλαιο παρατίθενται αρχικά κάποια γενικά στοιχεία για τους χάλυβες, καθώς και παρουσίαση μικροδομικών συστατικών και φάσεων τους, ώστε να υπάρχει το απαιτούμενο υπόβαθρο για τη μελέτη της μικροδομής της υπό μελέτη συγκόλλησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας που πραγματοποιείται σε επόμενο Κεφάλαιο.

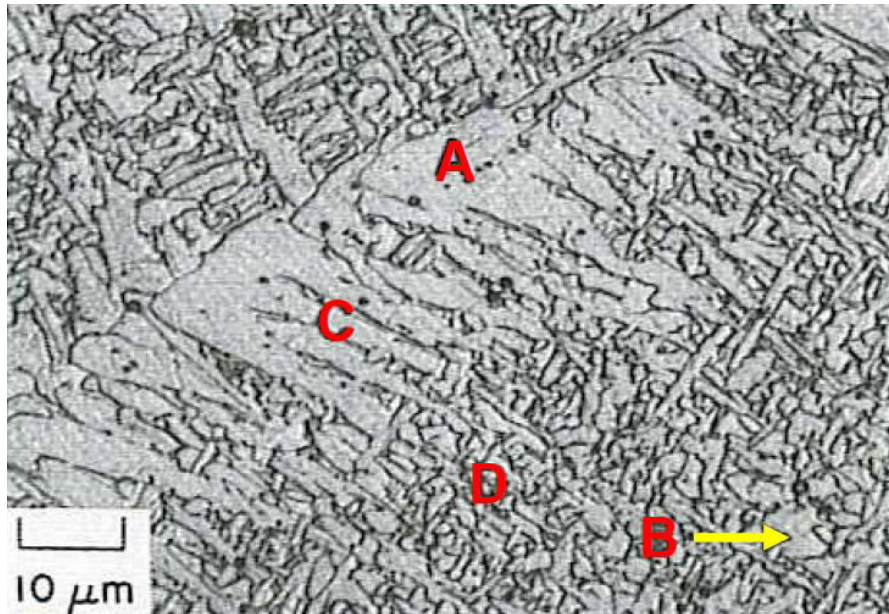
Στη συνέχεια παρουσιάζονται εκτενώς στοιχεία που αφορούν συγκεκριμένα τους δυο χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ ταυτόχρονα γίνονται αναφορές στη χρησιμότητα και τις εφαρμογές τους στη ναυπηγική, με σκοπό να διερευνηθεί η πιθανή συνάντηση της υπό μελέτη συγκόλλησης.

## 2.2 Φάσεις – Μικροδομικά Συστατικά Χαλύβων [1, 17, 70, 71]

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συντόμως οι κύριες φάσεις και τα κύρια μικροδομικά συστατικά που υπάρχουν στους χάλυβες χαμηλού άνθρακα, αυτούς δηλαδή που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζουν τη μικροδομή τους και κατ’ επέκταση τις ιδιότητές τους. Οι ιδιότητες που εξαρτώνται από τη μικροδομή, όπως το όριο διαρροής, η αντοχή και η σκληρότητα, χαρακτηρίζονται ως “structure sensitive properties”. Οι φάσεις και τα μικροδομικά συστατικά που μας απασχολούν στην παρούσα ενότητα είναι ο φερρίτης, ο περλίτης, ο μαρτενσίτης και ο μπαινίτης. Η ταυτοποίηση των συστατικών αυτών αποτέλεσε βασικό τμήμα της παρούσας εργασίας.

- Φερρίτης

Ο φερρίτης είναι στερεά φάση καθαρού σιδήρου ή στερεό διάλυμα με βασικό συστατικό τον σίδηρο που κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα και αποτελεί την κυριότερη φάση των χαλύβων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διάφορες φερριτικές δομές με τις οποίες συναντάται ο φερρίτης, οι οποίες παρουσιάζονται ενδεικτικά στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 2.1).

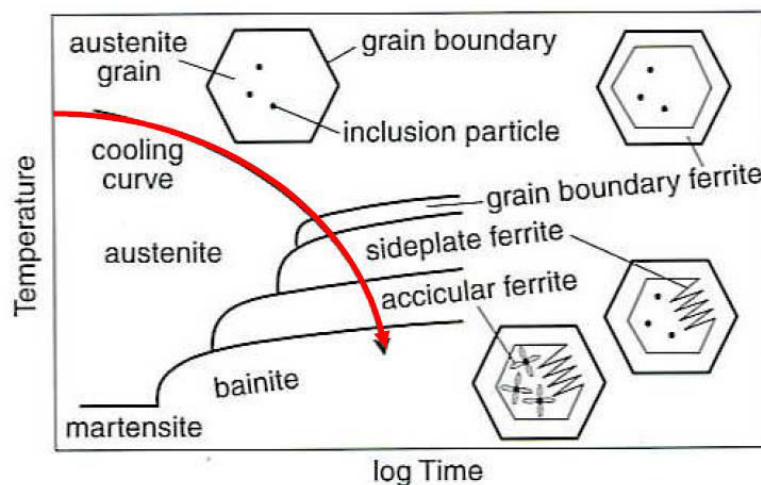


Εικ 2.1 Φερριτικές δομές [71].

Στην παραπάνω εικόνα είναι εμφανείς οι τέσσερις βασικές φερριτικές δομές, οι οποίες είναι (όπως φαίνονται παραπάνω):

- A: Αλλοτριόμορφος φερρίτης (Allotriomorphic – grain boundary ferrite)
- B: Πολυγωνικός (Ισοαξονικός)/Ημιπολυγωνικός φερρίτης (Polygonal/quasi-polygonal ferrite)
- C: Φερρίτης Widmanstätten (Widmanstätten ferrite)
- D: Βελονοειδής φερρίτης (Acicular ferrite)

Οι δομές αυτές κρυσταλλώνονται κατά το μετασχηματισμό ωστενίτη→φερρίτη σύμφωνα με τη σειρά που φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα CCT (Εικ.2.2). Όπως είναι φανερό αρχικά πυρηνοποιείται ο αλλοτριόμορφος φερρίτης στα όρια των κόκκων του ωστενίτη και κατόπιν από αυτόν πυρηνοποιείται προς το κέντρο του κόκκου φερρίτης Widmanstätten (side plate ferrite στο CCT).



Εικ 2.1 Τυπικό διάγραμμα CCT χάλυβων χαμηλού άνθρακα [71].

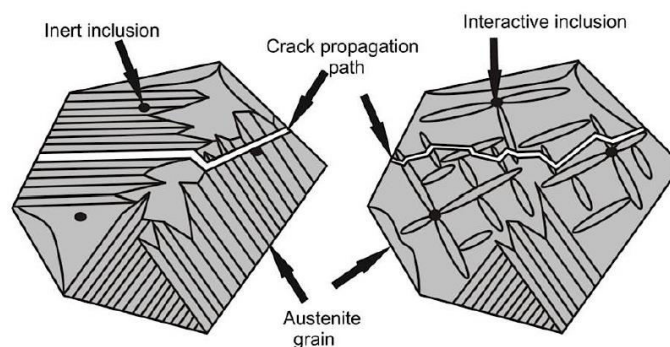
Έχει παρατηρηθεί ότι οι κραματικές προσθήκες και ο ρυθμός απόψυξης έχουν ανάλογη επίδραση στις προκύπτουσες φερριτικές δομές. Συγκεκριμένα όσο αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης και αντίστοιχα όσο αυξάνονται τα κραματικά στοιχεία, οι δομές του αλλοτριόμορφου φερρίτη και του φερρίτη Widmanstätten μειώνονται και αυξάνεται ο βελονοειδής φερρίτης (και ο μπαινίτης) [71].

Από τις δομές αυτές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite). Η δομή αυτή, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες, οι οποίες πυρηνοποιούνται περικρυσταλλικά από τα όρια των κόκκων του ωστενίτη (intergranular nucleation), πυρηνοποιείται ενδοκρυσταλλικά (intragranular nucleation). Συνήθως η κρυσταλλοποίηση αυτή ξεκινά ή υποβοηθάται από την ενδοκρυσταλλική παρουσία μη μεταλλικών εγκλεισμάτων σε μεγάλους κόκκους ωστενίτη και κρυσταλλοποιείται ετερογενώς προς πολλές, τυχαίες διευθύνσεις.

Τονίζεται ότι παρόλο που προκύπτει από μη μεταλλικά εγκλείσματα, κυριαρχεί η άποψη ότι τα εγκλείσματα αυτά καθ' αυτά μπορούν να παρατηρηθούν εξαιρετικά σπάνια, καθώς και ότι πιο αποτελεσματικά για τη δημιουργία βελονοειδούς φερρίτη είναι τα μη μεταλλικά εγκλείσματα που περιέχουν τιτάνιο (προσθήκη 0.005 wt% Ti προκαλεί σημαντική αύξηση) [17, 73]. Ακόμα έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη νιόβιου ευνοεί τον βελονοειδή φερρίτη εις βάρος του μπαινίτη [72].

Ο βελονοειδής φερρίτης έχει πολλές ομοιότητες με τον μπαινίτη (αναλύεται παρακάτω), καθώς και οι δυο δομές έχουν βελονοειδείς μακρόστενες μορφές, τους διαχωρίζει όμως μια βασική διαφορά. Ο μπαινίτης πυρηνοποιείται από επιφάνειες στα όρια των κόκκων και τελικά σχηματίζεται με μορφή παράλληλων βελόνων, η διεύθυνση των οποίων βρίσκεται σε γωνία με την επιφάνεια του κόκκου από όπου πυρηνοποιήθηκαν. Από την άλλη ο βελονοειδής φερρίτης, όπως αναφέρθηκε, πυρηνοποιείται ενδοκρυσταλλικά από σημεία (εγκλείσματα) και έχει το χαρακτηριστικό ότι κρυσταλλοποιείται προς πολλές διαφορετικές διευθύνσεις με άναρχο και μη σταθερό προσανατολισμό για το λόγο αυτό [17].

Το βασικό πλεονέκτημα του βελονοειδούς φερρίτη (το οποίο έχει και ο μπαινίτης) είναι ότι οι πολλές διαφορετικές διευθύνσεις των κόκκων του οδηγεί σε διαρκείς εκτροπές και λοξοδρομήσεις των ρωγμών που δημιουργούνται, καθυστερώντας έτσι σημαντικά την διάδοση της ρωγμής. Για αυτό και είναι η πιο επιθυμητή μορφή φερρίτη, αφού συνδέεται με μεγάλη δυσθραυστότητα στις κατασκευές που υπάρχει [17].



**Εικ 2.3** Αντίσταση βελονοειδούς φερρίτη στις ρωγμές [73].

Το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη είναι πολύ σημαντική παράμετρος της μικροδομής των χάλυβων, καθώς σχετίζεται με το όριο διαρροής του εκάστοτε υλικού μέσω της σχέσης Hall – Petch [17]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Όπου  $\sigma_0$  και  $k_y$  είναι σταθερές. Από τη σχέση αυτή αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι λεπτόκοκκες δομές παρουσιάζουν μεγαλύτερο όριο αντοχής. Για το λόγο αυτό η απόκτηση λεπτόκοκκων χάλυβων κατά την δημιουργία τους είναι από τους βασικότερους στόχους όλων των μεθόδων παραγωγής χάλυβων. Εν γένει η εκλέπτυνση της μικροδομής (grain refining) είναι εκ των συνηθέστερων τροπών ισχυροποίησης των χάλυβων μέσω θερμικών κατεργασιών [1, 17].

- Περλίτης

Ο περλίτης είναι μικρογραφική δομή του χάλυβα που αποτελείται από εναλλασσόμενα φύλλα («λαμέλες») φερρίτη ( $\alpha$ -Fe) και σεμεντίτη (Fe<sub>3</sub>C). Η σύστασή του είναι: 88,5% κ.β. φερρίτης και 11,5% κ.β. σεμεντίτης. Ο περλίτης σχηματίζεται κατά τον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό του ωστενίτη ( $\gamma$ -Fe), όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από 727°C. Επειδή περιέχει πολύ φερρίτη, ο περλίτης είναι και αυτός όλκιμος. Αποκτάται για σχετικά αργούς ρυθμούς απόψυξης

- Μαρτενσίτης

Ο μαρτενσίτης είναι το πιο σκληρό και εύθραυστο μικροδομικά συστατικό των χάλυβων, το οποίο αποκτάται για πολύ μεγάλους ρυθμούς απόψυξης (βαφή). Η δομή του μαρτενσίτη είναι βελονοειδής. Σε χάλυβες με λιγότερο από 0,4% κ.β. C, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή λωρίδων, ενώ σε χάλυβες με περισσότερο από 0,6% κ.β. C, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή πιο λεπτών πλακιδίων. Σε χάλυβες με περιεχόμενο άνθρακα μεταξύ 0,4 και 0,6% κ.β., παρατηρούνται φακοειδείς λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Ο μαρτενσίτης παρουσιάζει επίσης εσωτερική δομή που χαρακτηρίζεται από διδυμίες και έντονη παρουσία διαταραχών (κρυσταλλικών ατελειών). Η απότομη ψύξη του χάλυβα, που είναι γνωστή ως «βαφή», προκαλεί τον μαρτενσιτικό μετατοπιστικό μετασχηματισμό: τα άτομα του άνθρακα δεν προλαβαίνουν να μετακινηθούν από τις οκταεδρικές θέσεις του ωστενιτικού πλέγματος. Το πλέγμα μετασχηματίζεται από κυβικό εδροκεντρωμένο ( $\gamma$ -Fe) σε τετραγωνικό χωροκεντρωμένο, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ο άνθρακας. Η παρουσία του άνθρακα σε οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής προκαλεί ασύμμετρη παραμόρφωση στο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι λωρίδες και τα πλακίδια του μαρτενσίτη έχουν πολύ μικρό μέγεθος σε σύγκριση με τους μητρικούς κόκκους του ωστενίτη, με συνέπεια την σημαντική αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα. Επίσης, τα πολλά νέα όρια στην μικροδομή του μαρτενσίτη εμποδίζουν την μετακίνηση των διαταραχών και συμβάλλουν έτσι στην αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα.

Η βαφή του χάλυβα προκαλεί συχνά παραμορφώσεις και μικρορωγματώσεις λόγω συσσώρευσης τοπικών τάσεων. Ο βαμμένος χάλυβας γίνεται ψαθυρός από τον περιεχόμενο μαρτενσίτη, και αυτό μπορεί να κάνει το υλικό ακατάλληλο για πολλές εφαρμογές (επιθυμητός κυρίως σε κατασκευές σκληρών μαρτενσιτικών καρφιών. Γι' αυτό και η κατεργασία της βαφής συνήθως συνοδεύεται από επαναφορά σε θερμοκρασίες 150–650°C, ώστε να γίνει και πάλι ο χάλυβας όλκιμος με μικρή μείωση της σκληρότητάς του.

- Μπαινίτης

Ο μπαινίτης είναι μικρογραφική δομή του χάλυβα που προκύπτει 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 Ms (περίπου 250°C). Δηλαδή ο μπαινίτης αποκτάται για ενδιάμεσους ρυθμούς απόψυξης από αυτούς του περλίτη και του μαρτενσίτη.

Κατά την απότομη ψύξη του χάλυβα, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται μετατοπιστικά δίνοντας πλακίδια ή λωρίδες φερρίτη προσανατολισμένες προς μία κατεύθυνση, όπως συμβαίνει και κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Ωστόσο, εξαιτίας της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας του, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, ο άνθρακας προλαβαίνει να διαφύγει από το πλέγμα του ωστενίτη και σχηματίζει σεμεντίτη (Fe<sub>3</sub>C). Για τελικές θερμοκρασίες 400–550°C, ο σεμεντίτης σχηματίζεται ανάμεσα στις προσανατολισμένες λωρίδες του φερρίτη, οπότε γίνεται λόγος για ανώτερο μπαινίτη. Για τελικές θερμοκρασίες 250–400°C, ο άνθρακας σχηματίζει βελόνες σεμεντίτη μεγέθους της τάξης του 0,5 μm, μέσα στις προσανατολισμένες λωρίδες του φερρίτη, οπότε γίνεται λόγος για κατώτερο μπαινίτη. Βασική διαφορά του από τον περλίτη είναι ότι οι λωρίδες («λαμέλες») του μπαινίτη είναι πολύ πιο λεπτές από τα φύλλα του περλίτη. Γενικά ο μπαινίτης έχει εξαιρετικές ιδιότητες και αποτελεί έναν ιδανικό συνδυασμό σκληρότητας και δυσθραυστότητά (πιο σκληρός από τον περλίτη και λιγότερο εύθραυστος από τον μαρτενσίτη). Για το λόγο αυτό οι νέοι χάλυβες κατασκευάζονται όλο και πιο συχνά με τρόπο ώστε να αποκτούν φερριτομπαινιτικές δομές. Στα μεγάλα πλεονεκτήματα του μπαινίτη είναι ότι ο σχηματισμός των λωρίδων του σε συνδυασμό με τη σκληρότητά του παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά στην παρεμπόδιση της διάδοσης ρωγμών, αυξάνοντας πολλαπλώς τη δυσθραυστότητα των υλικών στα οποία περιέχεται.



### 2.3 Συγκολλησιμότητα Χαλύβων [2, 8, 9, 10, 13]

Οι χάλυβες συγκολλούνται πολύ συχνότερα από άλλα μέταλλα και κράματα αφού βρίσκουν μεγάλο πλήθος εφαρμογών και χαρακτηρίζονται από καλή συγκολλησιμότητα σε σχέση με αυτά. Καθώς οι συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται σε πολλών ειδών κατασκευές (πλοία, γέφυρες, δεξαμενές, δοχεία πίεσης, βιομηχανικός εξοπλισμός κ.τ.λ.), αντιλαμβάνεται κανείς ότι ένας χάλυβας που συγκολλάται εύκολα είναι πολύ πιο επιθυμητός από άλλους χάλυβες. Ο όρος συγκολλησιμότητα αναφέρεται στο πόσο “εύκολο” είναι να συγκολληθεί ένας χάλυβας. Η έννοια αυτή αφορά όλες τις ιδιότητες μιας συγκόλλησης. Σε πιο ευρύ πλαίσιο, δηλαδή, την αντοχή και τη δυσθραυστότητά της και σε ειδικότερο πλαίσιο τη σκληρότητα της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης και την ευαισθησία σε ψυχρή ρωγμάτωση [8]. Για το χαρακτηρισμό της συγκολλησιμότητας χρησιμοποιείται ο ισοδύναμος άνθρακας, μια νοητή περιεκτικότητα σε άνθρακα, η οποία προκύπτει εάν στην τρέχουσα περιεκτικότητα του κράματος προστεθεί και η ζυγισμένη επίδραση διαφόρων δραματικών στοιχείων (όλες οι προσμείξεις σε % κ.β.) [2]. Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου άνθρακα έχουν παραχθεί αρκετές σχέσεις. Οι δυο συχνότερα χρησιμοποιούμενες σχέσεις είναι αφενός ο ισοδύναμος άνθρακας  $CE_{IIW}$  των Dearden και O’Neill [9], ο οποίος μετρά από διορθώσεις υιοθετήθηκε από το International Institute of Welding (IIW), αλλά και από τον Lloyd’s Registry, και αφετέρου ο δείκτης  $P_{cm}$  [9][10], βασισμένος στη μελέτη των Itoh και Bessho, που υιοθετήθηκε από την Japan Welding Engineering Society (JWES). Οι προαναφερθέντες τύποι παρουσιάζονται παρακάτω.

$$CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cu+Ni)/15 + (Cr+Mo+V)/5$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Ο δείκτης  $P_{cm}$ , δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στην επίδραση του άνθρακα από ότι σε αυτή των άλλων κραματικών στοιχείων σε σχέση με τον δείκτη  $CE_{IIW}$ , και για το λόγο αυτό θεωρείται πιο κατάλληλος για το χαρακτηρισμό της συγκολλησιμότητας μοντέρνων χάλυβων με πολλά κραματικά στοιχεία και χαμηλότερο άνθρακα. Η American Welding Society (AWS) ορίζει να χρησιμοποιείται ο δείκτης  $CE_{IIW}$  για χάλυβες με  $C > 0.11\%$  και ο δείκτης  $P_{cm}$  για χάλυβες με  $C < 0.11\%$  [11]. Τα όρια της συγκολλησιμότητας παρουσιάζονται παρακάτω [12][13].

**Πίνακας 2.1: Όρια Συγκολλησιμότητας [9].**

Carbon equivalent (CE)	Weldability
Up to 0.35	Excellent
0.36–0.40	Very good
0.41–0.45	Good
0.46–0.50	Fair
Over 0.50	Poor

## 2.4 Κραματομένοι Χάλυβες

### 2.4.1 Γενικά [1, 17]

Αν και το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο των χαλύβων είναι ο άνθρακας, τις περισσότερες φορές προστίθενται και άλλα κραματικά στοιχεία για διάφορους λόγους. Το ποσοστό του άνθρακα στους κραματομένους χάλυβες δεν υπερβαίνει στην πράξη το 1% ενώ τα συνήθη στοιχεία προσθήκης είναι : Ni, Mn, Cr, Si και Mo (κύριες προσθήκες) και V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb (δευτερεύουσες προσθήκες). Οι κραματομένοι χάλυβες διακρίνονται σε :

- Ελαφρά κραματομένους ή μικροκραματομένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%.
- Μετρίως κραματομένους, με ποσοστό στοιχείων προσθήκης από 2% έως 10%.
- Ισχυρά κραματομένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10%.

Γενικά οι κοινοί χάλυβες παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε μηχανική φθορά, διάβρωση και ανεπαρκή δυσθραυστότητα, ιδιότητες που βελτιώνονται με προσθήκη κραματικών στοιχείων. Ανάλογα με την προσθήκη στοιχείων μπορούμε να πάρουμε χάλυβες διαφόρων μικροδομών, όπως μαρτενσιτικούς χάλυβες οι οποίοι έχουν δομή μαρτενσίτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος με κύρια χαρακτηριστικά την αυξημένη σκληρότητα και αντοχή και τη μειωμένη ολκιμότητα, ωστενιτικούς χάλυβες με μικροδομή ωστενίτη μετασταθούς κατάστασης, φερριτικούς χάλυβες, κ.λ.π.

**Πίνακας 2.2 Στοιχεία κραμάτωσης για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των χαλύβων**

<b>ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΚΟΙΝΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ</b>				
<b>Εμβαπτότητα</b>	<b>Αντοχή στην επαναφορά</b>	<b>Μηχανικές ιδιότητες</b>	<b>Αντοχή στη φθορά</b>	<b>Αντοχή στη διάβρωση</b>
<b>Ni</b>		<b>Ni</b>		<b>(Ni)</b>
<b>Mn</b>				
<b>(Cr)</b>	<b>Cr</b>		<b>Cr</b>	<b>Cr</b>
		<b>(Si)</b>		<b>(Si)</b>
	<b>Mo</b>	<b>Mo</b>	<b>Mo</b>	<b>(Mo)</b>
	<b>W</b>		<b>W</b>	
	<b>V</b>		<b>V</b>	

( ) = ελαφρά

## 2.4.2 Επίδραση Κραματικών Στοιχείων [1, 17]

### 2.4.2.1 Κύρια Κραματικά Στοιχεία Χαλύβων

Ο ρόλος ενός κραματικού στοιχείου είναι σύνθετος. Επηρεάζει την στερεά διαλυτότητα των άλλων κραματικών στοιχείων, την θερμοδυναμική σταθερότητα των φάσεων, την ταχύτητα των μετασχηματισμών και εν γένει την διαμόρφωση της μικροδομής στους χάλυβες. Όπως προαναφέρθηκε, τα κραματικά στοιχεία προστίθενται στους χάλυβες με σκοπό να ρυθμιστούν οι ιδιότητες του χάλυβα, αλλά επίσης πολλές φορές βρίσκονται μέσα στους χάλυβες ως ακαθαρσίες. Τα στοιχεία αυτά, ανάλογα με το αν επεκτείνουν και σταθεροποιούν τη φάση του ωστενίτη ( $\gamma$ ) ή του φερρίτη ( $\alpha$ ), χαρακτηρίζονται ως  $\gamma$ -φερρογόνα και  $\alpha$ -φερρογόνα. Και στις δύο περιπτώσεις η παρουσία αυτών των στοιχείων μεταθέτει τις θερμοκρασίες και τις περιεκτικότητες των μετασχηματισμών του διαγράμματος ισορροπίας σιδήρου-σεμεντίτη. Παρακάτω περιγράφεται η επίδραση που έχουν τα διάφορα κραματικά στοιχεία στις ιδιότητες των χάλυβων.

- Άνθρακας (C)

Αν και τυπικά δεν λογίζεται ως “στοιχείο κραμάτωσης” των χάλυβων, αφού οι χάλυβες ορίζονται ως κράματα σιδήρου και άνθρακα, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί σύντομα η επίδραση του ποσοστού άνθρακα σε ένα χάλυβα. Με αύξηση του ποσοστού άνθρακα στους χάλυβες αυξάνεται η αντοχή και το όριο διαρροής, καθώς και η σκληρότητα. Ωστόσο μειώνονται η ολκιμότητα, η συγκολλησιμότητα και αυξάνεται η εμβαιπτότητα, καθώς υπάρχει τάση σχηματισμού μαρτενσίτη (το υψηλό ποσοστό άνθρακα βοηθά στο σχηματισμό του).

#### Τα $\alpha$ -φερρογόνα στοιχεία

Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται σταθεροποιητές- $\alpha$ . Παρουσία τέτοιων στοιχείων το ωστενιτικό πεδίο “κλείνει” σχηματίζοντας τον ωστενιτικό βρόχο.

- Αργίλιο (Αλουμίνιο) (Al)

Το αργίλιο είναι το ισχυρότερο αποξειδωτικό και απαζωτικό στοιχείο και συντελεί σημαντικά στην αντίσταση του χάλυβα στη γήρανση. Σε μικρή αναλογία ευνοεί την εκλέπτυνση των κόκκων, μέσω της ετερογενούς φύτρωσης.

Επειδή σχηματίζει στην επιφάνεια του υλικού ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα οξειδίου του αργιλίου, χρησιμοποιείται στους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες για την αύξηση της αντοχής τους στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τον ίδιο λόγο, στους κοινούς ανθρακοχάλυβες η ενσωμάτωση αργιλίου στην επιφάνειά τους (επαργιλίωση) αυξάνει την αντοχή τους σε οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία

- Πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο είναι ήπιο αποξειδωτικό στοιχείο, αλλά χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην αποξείδωση επειδή είναι φτηνό και έχει καλή συμπεριφορά. Είναι επαμφοτερίζον στοιχείο (μεταλλοειδές), όπως για παράδειγμα το θείο και ο φωσφόρος, με τη διαφορά ότι είναι χρήσιμο και δεν αποτελεί ακαθαρσία. Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας και αύξηση της σκληρότητας. Δίνει φερριτικούς χάλυβες, με μεγάλους κόκκους (κατάλληλους για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές). Χρησιμοποιείται, επίσης, ως βελτιωτικό των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής στη διάβρωση. Μειονέκτημά του είναι ότι προκαλεί μειωμένη σφυρηλασιμότητα των χάλυβων (εν θερμώ) και διαμορφωσιμότητα (εν ψυχρώ). Χάλυβες με περιεκτικότητα σε Si 12% είναι σκληροί και εύθραυστοι, αλλά τελείως ανθεκτικοί στη διάβρωση σε οξέα και παράγονται μόνο σε χυτή κατάσταση, διότι η διαμόρφωσή τους εν ψυχρώ ή εν θερμώ δεν είναι δυνατή.

- Χρώμιο (Cr)

Το χρώμιο είναι παρόμοιο στοιχείο με τον σίδηρο. Έχουν παρόμοιο ατομικό βάρος, παρόμοια ατομική ακτίνα και είναι μεταβατικά στοιχεία. Γι' αυτό εμφανίζουν πλήρη διαλυτότητα στην υγρή και στερεά κατάσταση. Το χρώμιο αυξάνει την εμβαιπτότητα (μειώνει την κρίσιμη ταχύτητα βαφής), με συνέπεια ο χάλυβας να μπορεί να υποστεί βαφή στο λάδι και στον αέρα και σε μεγάλο βάθος. Έτσι, περιορίζονται οι εσωτερικές τάσεις και βελτιώνεται η συμπεριφορά κατά την επαναφορά. Η παρουσία του χρωμίου μειώνει σε μικρό βαθμό τη δυσθραυστότητα και την επιμήκυνση κατά τη θραύση, αλλά αυτή η επίδραση είναι δευτερεύουσα. Αυξάνει, επίσης, την αντοχή στην εκτριβή και αποτελεί βασικό στοιχείο των ταχυχάλυβων (χάλυβων που χρησιμοποιούνται για κοπτικά εργαλεία μεγάλης ταχύτητας, όπως τρυπάνια κ.λπ.). Λόγω σχηματισμού καρβιδίων, αυξάνει την αντοχή υπό πίεση υδρογόνου.

Στους χάλυβες η μοναδική προσθήκη χρωμίου μειώνει τη συγκολλησιμότητά τους, όταν συνδυάζεται με το νικέλιο, ενώ στους ανοξειδώτους ωστενιτικούς χάλυβες, η συγκολλησιμότητά τους βελτιώνεται. Το χρώμιο είναι το βασικό κραματικό στοιχείο των ανοξειδωτων και πυριμάχων χάλυβων. Για τη βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση χρειάζεται γενικά μία αναλογία άνω του 12-13%, ενώ η αντοχή στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες αρχίζει να βελτιώνεται από ακόμα χαμηλότερες περιεκτικότητες. Οι πυρίμαχοι χάλυβες μπορεί να περιέχουν και μέχρι 30% χρώμιο, όχι μόνο επειδή το στοιχείο αυτό σχηματίζει προστατευτικό στρώμα οξειδίου, αλλά και επειδή μέσω των σκληρών καρβιδίων αυξάνεται η αντοχή τους σε ερπυσμό. Το χρώμιο, επίσης, μειώνει τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του χάλυβα.

- Μολυβδαίνιο (Mo)

Το μολυβδαίνιο χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα σε συνδυασμό με άλλα κραματικά στοιχεία, συνήθως σε χαμηλές αναλογίες. Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, αύξηση της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας και παρεμποδίζει τη γήρανση. Προστίθεται για αύξηση της αντοχής σε επαναφορά, σε φθορά και διάβρωση και για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η προσθήκη Mo αυξάνει το όριο ελαστικότητας και την αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά μειώνει τη σφυρηλασιμότητα εν θερμώ όταν βρίσκεται σε σημαντική αναλογία.

- Βανάδιο (V)

Το βανάδιο είναι προσθήκη εκλέπτυνσης του κόκκου και χρησιμοποιείται κατά τη χύτευση. Βελτιώνει τη συγκολλησιμότητα, επειδή δυσχεραίνει τον σχηματισμό του μαρτενσίτη. Είναι ισχυρότατο καρβιδιογόνο, γι' αυτό βελτιώνει την αντοχή στην εκτριβή και την αντοχή στον ερπυσμό. Για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιείται στους ταχυχάλυβες. Προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας.

- Τα γ-φερρογόνα στοιχεία

Σε σημαντικές περιεκτικότητες στον χάλυβα τα στοιχεία αυτά επιτρέπουν τη διατήρηση της ωστενιτικής δομής ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου. Ειδικότερα ο άνθρακας θα μπορούσε να θεωρηθεί σταθεροποιητής-γ αφού σταθεροποιεί την ωστενιτική δομή. Έτσι το νικέλιο παίζει πρωτεύοντα ρόλο στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

- Μαγγάνιο (Mn)

Το μαγγάνιο είναι καρβιδιογόνο στοιχείο, λίγο ισχυρότερο από τον ίδιο το σίδηρο, γι' αυτό και συμμετέχει στη σύνθεση του σεμεντίτη, χωρίς να σχηματίζει δικά του καρβίδια μέσα στους χάλυβες. Είναι συνηθισμένο αποξειδωτικό, αλλά με μικρή αποξειδωτική δράση. Έχει, όμως, μεγάλη χημική συγγένεια με το θείο και γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως ως αποθειωτικό. Σχηματίζει το σουλφίδιο του μαγγανίου (MnS), το οποίο εμφανίζεται υπό μορφήν σφαιροειδών σουλφιδίων, αντί των λεπτών υμενίων FeS που θα περιέβαλαν τους κόκκους του φερρίτη, αν δεν είχε προστεθεί το μαγγάνιο. Το μαγγάνιο, επομένως, είναι αποτρεπτικό της θερμοψαθυρότητας και αποχτά ιδιαίτερη σημασία στους χάλυβες αποκοπής (free cutting steels), που περιέχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε θείο και προορίζονται για μηχανουργική κατεργασία της επιφάνειάς τους. Το μαγγάνιο αυξάνει πολύ αποτελεσματικά την εμβαπτότητα του χάλυβα, συντελώντας σε μεγαλύτερα βάθη βαφής. Αυξάνει, επίσης, σημαντικά το όριο ελαστικότητας και την αντοχή σε θραύση των χαλύβων. Έχει ευνοϊκή επίδραση στη σφυρηλασιμότητα (κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ) και τη συγκολλησιμότητα. Για περιεκτικότητα άνω του 4% σε μαγγάνιο οι χάλυβες αποκτούν υψηλή εμβαπτότητα και βάφονται ακόμα και με αργή απόψυξη, δίνοντας μεγάλη συγκέντρωση μαρτενσίτη, αυξάνοντας την ευθραυστότητά του. Όταν, όμως, η περιεκτικότητα ξεπεράσει το 12% μαγγάνιο και παράλληλα ο άνθρακας βρίσκεται σε υψηλή συγκέντρωση (π.χ. 1%), τότε σχηματίζεται ωστενίτης σε μετασταθή κατάσταση.

- Νικέλιο (Ni)

Το νικέλιο είναι ισχυρό γ-φερρογόνο στοιχείο και δεν σχηματίζει δικά του καρβίδια, ούτε μετέχει στη σύνθεση άλλων καρβιδίων μέσα στον χάλυβα. Προκαλεί σημαντική αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει την ανακρυστάλλωση. Προστίθεται, επίσης, για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής στη διάβρωση. Η σπουδαιότερη ιδιότητά του είναι ότι αυξάνει τη δυσθραυστότητα, η οποία διατηρείται υψηλή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των χαλύβων μειώνονται παρουσία νικελίου.

- Χαλκός (Cu)

Ο χαλκός σε ελάχιστες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ως κραματική πρόσμιξη των χάλυβων. Μία περίπτωση είναι στους ωστενοφερριτικούς ανοξειδωτους χάλυβες (duplex). Μία δεύτερη περίπτωση είναι σε οικοδομικά διακοσμητικά πανό, δηλ. ελάσματα, που χρησιμοποιούνται στους εξωτερικούς τοίχους μοντέρνων οικοδομών. Τα ελάσματα αυτά, με την ατμοσφαιρική επίδραση, παθητικοποιούνται αποκτώντας μάλιστα με το χρόνο μία συμπαθητική ερυθρωπή χροιά με διακοσμητικό χαρακτήρα και αντιστέκονται στην περαιτέρω διάβρωση (weather resistance). Σε περιεκτικότητες άνω του 1% ο χαλκός αυξάνει την αντοχή στη διάβρωση σε υδροχλωρικό και θειικό οξύ. Ο χαλκός αυξάνει το όριο ελαστικότητας. Αυξάνει την εμβαπτότητα. Η επίδρασή του στη συγκολλησιμότητα είναι αμφιλεγόμενη. Περιεκτικότητες άνω του 0.3% μπορούν να δημιουργήσουν κατακρήμνιση και ευθραυστοποίηση.

#### 2.4.2.2 Ακαθαρσίες

- Φωσφόρος (P)

Ο φωσφόρος είναι από τις πιο ανεπιθύμητες ακαθαρσίες του χάλυβα. Κατ' αρχήν εισάγει έντονο χημικό μακροδιαφορισμό στη διάρκεια της στερεοποίησης, ο οποίος είναι πολύ δύσκολο να αναιρεθεί, λόγω της μικρής διαχυσιμότητας του στοιχείου. Για το λόγο αυτό ο φωσφόρος δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει το 0.03-0.05% κατά μέσον όρο. Ο φωσφόρος αυξάνει την ευθραυστότητα του χάλυβα κατά την επαναφορά. Το φαινόμενο είναι εντονότερο, όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα, όσο αυξάνει η θερμοκρασία βαφής και όσο αυξάνει το μέγεθος του κόκκου. Εκδηλώνεται ως ευθραυστότητα εν ψυχρώ και ευαισθησία στις κρούσεις.

- Θείο (S)

Το θείο δημιουργεί τον εντονότερο χημικό μακροδιαφορισμό από όλες τις άλλες ακαθαρσίες. Ο θειούχος σίδηρος (FeS), που καλύπτει τα όρια των κόκκων ως λεπτός υμένας, μαλακώνει σε θερμοκρασίες ακόμη και κάτω των 1000° C και δημιουργεί θερμοψαθυρότητα, με συνέπεια την ψαθυρή περικρυσταλλική θραύση σε σχετικώς υψηλές θερμοκρασίες. Το φαινόμενο εντείνεται από την παρουσία οξυγόνου. Για τον περιορισμό του φαινομένου χρησιμοποιείται προσθήκη μαγγανίου, που δεσμεύει εκλεκτικά το θείο σχηματίζοντας σφαιροειδή εγκλείσματα θειούχου μαγγανίου. Τα εγκλείσματα αυτά είναι τα λιγότερο επικίνδυνα από όλα τα άλλα συνήθη. Το θείο είναι επίσης αιτία θερμής ρωγμάτωσης στις συγκολλήσεις. Το θείο προστίθεται ως κραμάτωση στους χάλυβες ελεύθερης αποκοπής μέχρι ποσοστού 0.4%, σε συνδυασμό με το αντίστοιχο μαγγάνιο. Η λιπαντική του δράση στην κόψη του κοπτικού εργαλείου περιορίζει την τριβή και αυξάνει τη μακροζωία του εργαλείου, ενώ το απόκομμα (γρέζι) θρυμματίζεται και διευκολύνει την κατεργασία.

### 2.4.3 Μικροκραματομένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (HSLA) [1, 6]

Οι μικροκραματομένοι χάλυβες οφείλουν την αντοχή τους στην ύπαρξη πολλών στοιχείων κραμάτωσης σε μικρή ποσότητα και σε κατάλληλες θερμομηχανικές κατεργασίες που υφίστανται. Ανάμεσα στα στοιχεία προσθήκης είναι το μαγγάνιο Mn, σε ποσοστό έως 1.5%, το νιόβιο Nb, το βανάδιο V, το τιτάνιο Ti, σε συνολικό ποσοστό έως 0.1%, ο χαλκός Cu, ο φώσφορος P, κ.ά. Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται από 400-650 MPa, ενώ η επιμήκυνσή τους έως τη θραύση είναι σημαντική, από 14% έως 27%. Η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά είναι χαμηλή, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων και η ικανότητα μορφοποίησής τους εν ψυχρώ είναι μικρή.

Οι βελτιωμένες ιδιότητες των χαλύβων HSLA οδηγούν στη μείωση του κόστους συντήρησης και σε πολλές περιπτώσεις και κατασκευής-λόγω του μικρότερου απαιτούμενου πάχους-αν και είναι ακριβότεροι από τους κοινούς χάλυβες. Επίσης, αν και ανθεκτικότεροι και σκληρότεροι σε σχέση με τους απλούς χάλυβες, οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν ικανοποιητική ολκιμότητα και διαμορφώνονται και συγκολλούνται σχετικά εύκολα. Επιπλέον, επειδή πολλοί χάλυβες HSLA έχουν βελτιωμένη αντίσταση σε διάβρωση, επιτυγχάνεται ίδιος χρόνος ζωής για μικρότερο πάχος, ή μεγαλύτερος χρόνος ζωής για ίδιο πάχος σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες. Επίσης η αντοχή σε κόπωση και σε φθορά κατά τη διάρκεια ζωής είναι εξαιρετική.

## 2.5 Ναυπηγικοί Χάλυβες [6, 7]

### 2.5.1 Χημική Σύσταση Ναυπηγικών Χαλύβων

Οι χάλυβες για την κατασκευή πλοίων παράγονται κυρίως με μία από τις τρεις μεθόδους: ανοιχτής φλογοκαμίνου, ηλεκτρικής καμίνου, και βασικής οξυγόνου. Σύμφωνα με το πρότυπο A131M της ASTM και τον Lloyd's Register of Shipping οι χάλυβες για την κατασκευή πλοίων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Κοινούς χάλυβες – Με τις κωδικές ονομασίες A, B, D, DS, και E και ελάχιστο όριο διαρροής 235 MPa.
- Ενισχυμένους χάλυβες ή χάλυβες υψηλής αντοχής – Με τις κωδικές ονομασίες AH, DH, και EH και ελάχιστο όριο διαρροής 315 ή 350 MPa.

Τα όρια της χημικής σύστασης των ναυπηγικών χαλύβων παρουσιάζονται ακολούθως:

Πίνακας 2.3: Χημική Σύσταση Κοινών Ναυπηγικών Χαλύβων

ΚΟΙΝΟΙ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑ ASTM A131							
Χάλυβας	C <sub>max</sub>	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Si	Al <sup>1</sup>	Nb
A	0,21	<sup>2</sup>	0,035	0,035	0,50 max	-	-
B	0,21	0,80 min	0,035	0,035	0,35 max	-	-
D	0,21	0,60 min	0,035	0,035	0,10-0,35	0,020 min <sup>4</sup>	-
E	0,18	0,70 min	0,035	0,035	0,10-0,35	0,020 min	-

Υποσημειώσεις:

1. Συνολικό αλουμίνιο
2. Μαγγάνιο όχι λιγότερο από 2,5 φορές την % κ.β περιεκτικότητα σε C
3. Το άθροισμα των περιεκτικοτήτων C + 1/6 Mn δεν θα πρέπει να υπερβαίνει σε καμία περίπτωση την τιμή 0,40%.
4. Το Al είναι απαραίτητο σε περιπτώσεις που το πάχος των ελασμάτων θα είναι μεγαλύτερο των 25 mm.

Για μικρά πάχη έως 12 mm οι χάλυβες είναι συνήθως μερικώς αποξειδωμένοι (semi killed), ενώ για μεγαλύτερα πάχη είναι πλήρως αποξειδωμένοι (killed). Όλες οι κατηγορίες ναυπηγικών χαλύβων που αναφέρθησαν παραπάνω διατίθενται στο εμπόριο σε ελάσματα πάχους μέχρι και 30 mm, σε φύλλα, ή ρολά, αλλά και σε δοκούς μορφής Γ ή Η (διπλό Ταυ).

Η συγκολλησιμότητα των ναυπηγικών χαλύβων είναι πολύ καλή για όλες τις διαθέσιμες τεχνικές συγκόλλησης, πρέπει όμως σε κάθε περίπτωση το άθροισμα των % περιεκτικοτήτων κ.β. σε C και Mn διαιρεμένο με το 6 να μην υπερβαίνει την τιμή 0,40%:

$$\frac{\%C + \%Mn}{6} \leq 0,4$$



Πίνακας 2.4: Χημική Σύσταση Ναυπηγικών Χαλύβων Υψηλής Αντοχής [6]

ΧΑΛΥΒΑΣ	AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36 AH40, DH40, EH40
<b>Χημική Σύσταση % κ.β</b>	
$C_{\max}$	0,18
$Mn$	0,90 – 1,60 <sup>(1)</sup>
$Si_{\max}$	0,50
$P_{\max}$	0,035
$S_{\max}$	0,035
$Al_{(2)}$	0,015
$Nb_{(2)}$	0,02 – 0,05
$V_{(2)}$	0,05 – 0,10
$Ti_{\max}^{(2)}$	0,02
$Cu_{\max}$	0,35
$Cr_{\max}$	0,20
$Ni_{\max}$	0,40
$Mo_{\max}$	0,08
<p>(1) Για πάχη μέχρι 12,5 mm το min Mn μπορεί να φτάσει το 0,70.</p> <p>(2) Οι χάλυβες περιέχουν ως συστατικά που εκλεπτύνουν τον κόκκο Al, Nb, V, Ti είτε αυτόνομα, είτε σε συνδυασμό. Αν χρησιμοποιούνται αυτούσια, δεν θα πρέπει να υπερβαίνει η περιεκτικότητά τους την αναγραφόμενη χημική σύσταση, ενώ, αν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, το άθροισμα Nb+V+Ti δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 0,12%.</p>	

### 2.5.2 Μηχανικές Ιδιότητες Ναυπηγικών Χαλύβων

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία τάση προτίμησης των χαλύβων υψηλής αντοχής έναντι των κοινών, στη ναυπηγική, λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων που έχουν οι πρώτοι, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μικρότερες διατομές στα δομικά στοιχεία του πλοίου. Έτσι μειώνεται το βάρος της κατασκευής, οπότε μπορεί να είναι πιο γρήγορο και ευέλικτο ένα πλοίο. Ωστόσο χρειάζεται προσοχή στην επιλογή τους, καθώς υπέρμετρη μείωση του πάχους ενδεχομένως να εγκυμονεί κινδύνους λυγισμού. Οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων παρουσιάζονται ακολούθως:

**Πίνακας 2.5: Μηχανικές Ιδιότητες Ναυπηγικών Χαλύβων [6, 7]**

<b>ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ</b>						
Χάλυβας	Όριο διαρροής σε MPa	Όριο Θραύσης σε MPa	% Επιμήκυνση	Δυσθραυστότητα (J) για t ≤ 50 mm		
				θ °C	διαμήκης	εγκάρσια
<b>A- B- D- E</b>	>235	400-520	22%	+20		
				0	27	20
				-20	27	20
				-40	27	20
<b>AH32- DH32 EH32</b>	315-350	440-590	22%	0	31	22
				-20	31	22
				-40	31	22
<b>AH36 DH36 EH36</b>	>350	490-620	21%	0	34	24
				-20	34	24
				-40	34	24
<b>AH40 DH40 EH40</b>	>390	510-660	20%	0	41	27
				-20	41	27
				-40	41	27

## 2.6 Ο Χάλυβας AH36

### 2.6.1 Γενικά

Ένας εκ των δυο χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκόλληση που μελετάται στην παρούσα διπλωματική ήταν ο ναυπηγικός χάλυβας AH36, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία HTS (High Tensile Steel). Η ονομασία και κατάταξή του ως ναυπηγικού χάλυβα τύπου AH36, ακολουθεί το πρότυπο A131M της ASTM και προέρχεται από τον Lloyd's Register of Shipping.

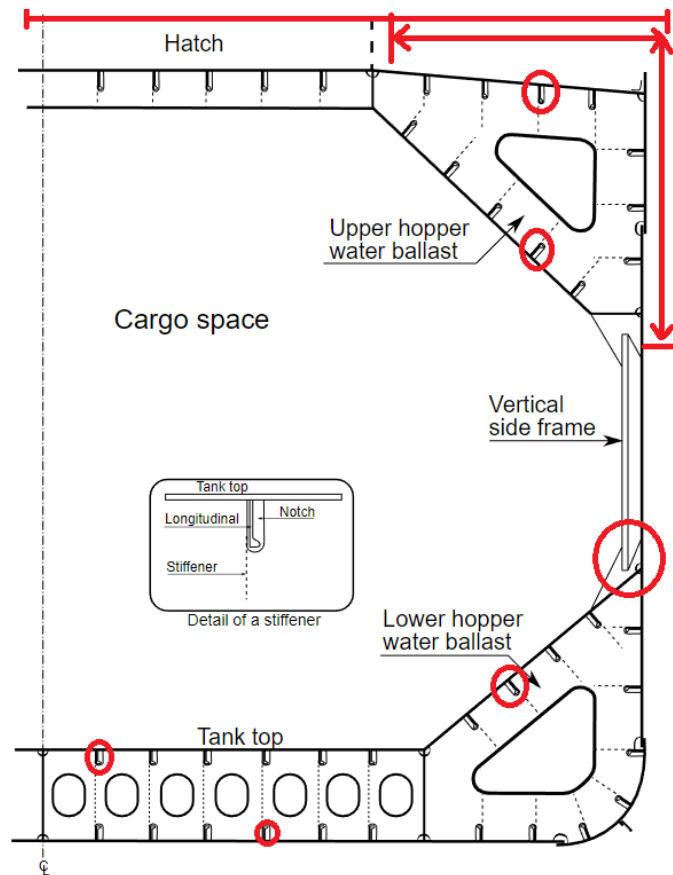
Ο χάλυβας AH36 παράγεται μέσω διαδικασίας θερμής έλασης και είναι από τους συχνότερα χρησιμοποιούμενους χάλυβες υψηλής αντοχής στα πλοία. Όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο ο χάλυβας έχει διφασική φερριτοπερλιτική προσανατολισμένη δομή (banded microstructure), στη διεύθυνση της έλασης.

### 2.6.2 Εφαρμογές Χάλυβα AH36 στη Ναυπηγική [6, 7]

Η γάστρα του πλοίου και οι δεξαμενές κατασκευάζονται συνήθως από κοινό ναυπηγικό χάλυβα. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα μικρότερου πάχους ελάσματα και χαμηλότερο βάρος, σε σχέση με τους ανθρακούχους χάλυβες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χάλυβας AH36, που ανήκει στους χάλυβες υψηλής αντοχής. Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36 :

- έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα
- έχει μεγαλύτερη σκληρότητα
- υψηλότερη αντοχή,
- εμφανίζει την ίδια αντοχή σε κόπωση,
- εξίσου καλή συγκολλησιμότητα
- η αντοχή του σε διάβρωση είναι παρόμοια

Εν γένει προτιμάται η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής για μείωση του πάχους σε ανωτέρα σημεία του πλοίου καθ' ύψος. Αυτό γιατί ο ουδέτερος άξονας της κάμψης της κυρίας φόρτισης του πλοίου (πρωτεύουσες τάσεις), βρίσκεται πάντα χαμηλότερα του μέσου του κοίλου. Έτσι οι ορθές τάσεις είναι αυξημένες σε ανωτέρα σημεία όπου οι αποστάσεις από τον ουδέτερο άξονα είναι μεγαλύτερες. Ωστόσο αν ληφθούν υπ' όψιν τα συστήματα δευτερευουσών και τριτερευουσών τάσεων στα ελάσματα από πιέσεις και τοπικές φορτίσεις, κρίνεται αναγκαία η χρησιμοποίηση χάλυβα υψηλής αντοχής και σε βοηθητικά ελάσματα (girders, floors) αλλά κυρίως σε ενισχυτικά (ακόμα και στον πυθμένα, όπου υπάρχει πίεση φορτίου). Ο χάλυβας AH36, που είναι από τους πιο κοινούς χάλυβες υψηλής αντοχής, χρησιμοποιείται σε πολλά από τα προαναφερθέντα σημεία, είτε ως κύριο έλασμα, είτε ως βοηθητικό έλασμα, είτε ως ενισχυτικό. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά μια μέση τομή πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (bulk carrier), που έχουν σημειωθεί σημεία που συναντάται συχνά ο AH36. Σε αντίστοιχες περιοχές συναντάται και σε άλλους τύπους πλοίων.



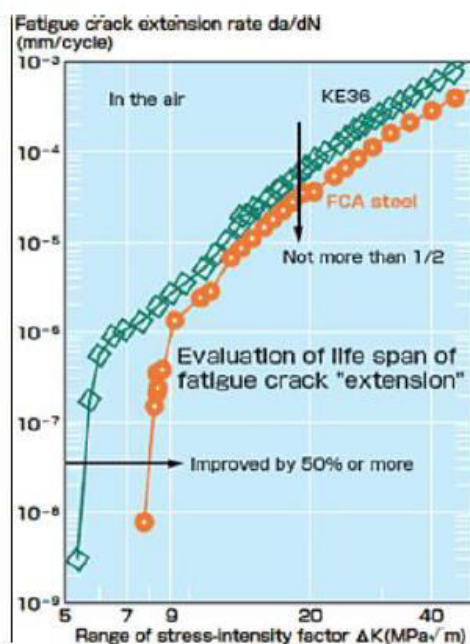
Εικ 2.4 Σημεία χρησιμοποίησης AH36 σε Μέση Τομή Bulk Carrier.

## 2.7 Ο Χάλυβας AH40 FCA

### 2.7.1 Γενικά στοιχεία των χαλύβων FCA [74, 75]

Η οικογένεια χαλύβων τύπου Fatigue Crack Arrester (FCA), είναι ένας νέος τύπος χάλυβα που αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία το 2001 και ανήκει στην κατηγορία χαλύβων HSLA. Οι χάλυβες αυτοί παρήχθησαν για πρώτη φορά από την εταιρία Sumitomo Industries Ltd. και παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε έναρξη ρωγμής λόγω κόπωσης και εξαιρετική αντίσταση στη διάδοση ρωγμής κόπωσης σε συγκολλητές κατασκευές. Η βελτιωμένη συμπεριφορά σε ότι αφορά στην καθυστέρηση έναρξης και διάδοσης της ρωγμής λόγω κόπωσης, καθιστά αυτού του είδους τους χάλυβες αποδεκτούς από τους μεγαλύτερους νηογνώμονες παγκοσμίως όπως ο ABS, ο NK, ο DNV και άλλοι. Μέσα από πειραματικές μελέτες έχει αποδειχτεί ότι η χρήση χαλύβων FCA σε κρίρια στοιχεία ενίσχυσης των πλοίων είναι πολύ αποτελεσματική, καθώς η δυνατότητά τους να δέχονται επαναλαμβανόμενα φορτία κόπωσης λόγω των κυματισμών, έχει συντελέσει στην αύξηση της διάρκειας ζωής των στοιχείων ενίσχυσης έως και 200%.

Οι χάλυβες FCA, κατασκευάζονται μέσω της ρύθμισης της χημικής τους σύστασης και εφαρμογής θερμο-μηχανικών διαδικασιών ελέγχου TMCP (Thermo-mechanical control processes), οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Η εφαρμογή μεθόδων TMCP συμβάλλει δραστικά στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χάλυβων FCA και ταυτόχρονα δεν υποβαθμίζει καθόλου τη συγκολλησιμότητά τους. Η χρήση χάλυβων που έχουν παραχθεί με μεθόδους TMCP συμβάλλει δραστικά στη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και από τη σκοπιά των συγκολλήσεων, η χρήση τέτοιων χάλυβων οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης, καθώς και στη δυνατότητα πρόσδοσης μεγαλύτερων ποσών θερμότητας για τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων.



**Εικ. 2.5** Διαφορά στη συμπεριφορά κόπωσης μεταξύ απλού χάλυβα (KE36, όμοιος με AH36) και χάλυβα FCA.

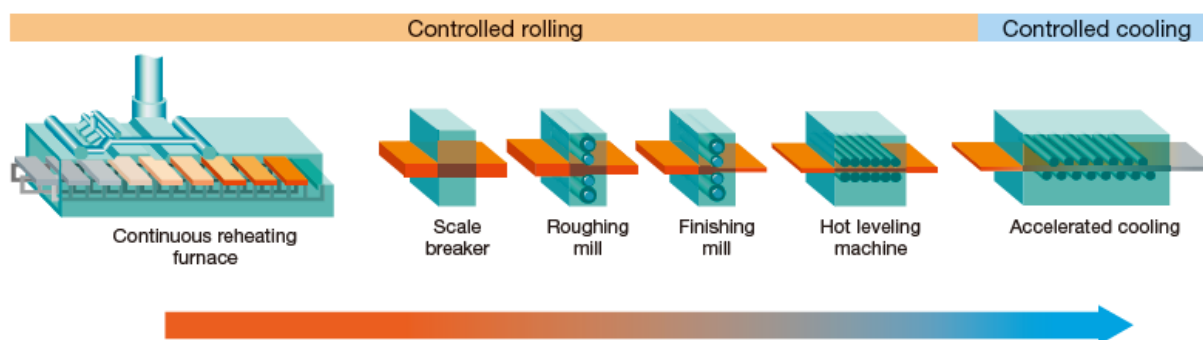
Οι χάλυβες FCA έχουν πολύ βελτιωμένη συμπεριφορά σε κόπωση από τους συνήθεις χάλυβες υψηλής αντοχής. Κάποια από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

- Καλύτερος έλεγχος έναρξης ρωγμής σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες.
- Η μικροδομή του υλικού εμποδίζει τη διάδοση της ρωγμής και περιορίζει το ρυθμό διάδοσης των ρωγμών σε πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Η χρήση TMCP μεθόδων στην παραγωγή των χάλυβων αυτών δεν υποβαθμίζει τις ιδιότητές τους (συγκολλησιμότητα, κατεργασιμότητα, αντίσταση σε διάβρωση) σε σχέση με συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής.
- Σαν συνέπεια των παραπάνω, η χρήση αυτών των χάλυβων αυξάνει δραστικά το όριο ζωής των κατασκευών.

Οι χάλυβες FCA έχουν μικροδομή που θα μπορούσε να θεωρηθεί λεπτόκοκκη διφασική φερριτομπαινιτική, αποτελούμενη δηλαδή από ομοιογενή εναλλαγή κόκκων φερρίτη και μπαινίτη. Ο μπαινίτης αποτελεί πιο σκληρή φάση σε σχέση με τον φερρίτη. Αυτού του είδους η μικροδομή αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα των χάλυβων FCA, αφού είναι ο κυρίαρχος παράγοντας που αυξάνει την πολύ μεγάλη αντοχή που εμφανίζουν αυτοί οι χάλυβες σε κόπωση. Η μικροδομή των χάλυβων FCA και η συμβολή της στην αντοχή σε κόπωση των χάλυβων αυτών παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα και αναλύεται εκτενώς σε επόμενο Κεφάλαιο.

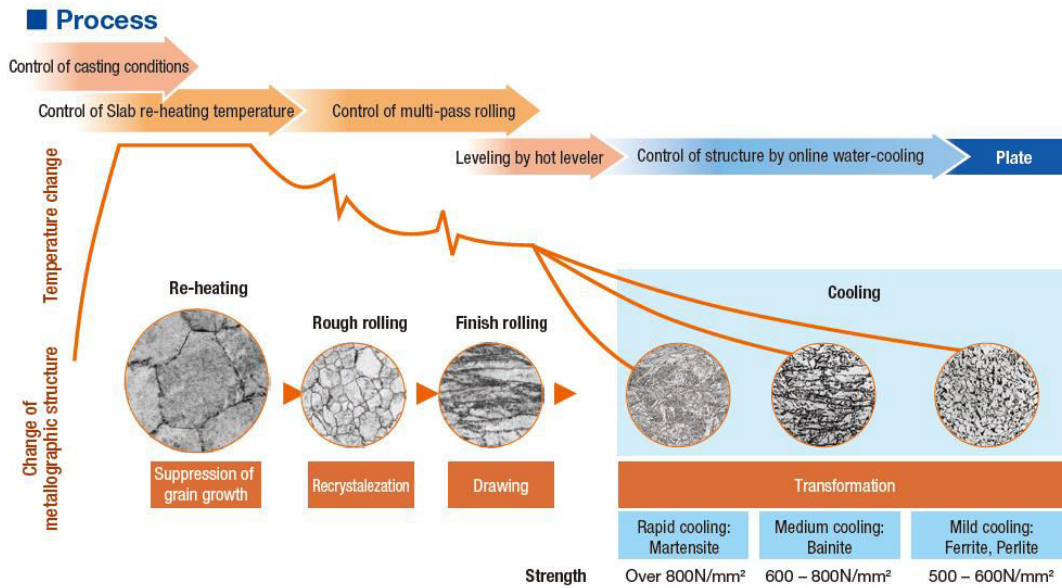
### 2.7.2 Θερμομηχανικές Διαδικασίες Ελέγχου (TMCP) [19, 82, 83]

Λόγω της διευρυμένης χρήσης χάλυβων υψηλής αντοχής στη ναυπηγική, η μέθοδος εξέλασης με θερμομηχανική διαδικασία, αποτελεί βοήθημα ώστε να προσπελούνται προβλήματα που αφορούν την δυσθραυστότητα του υλικού και τις ιδιότητες του συγκριτικά με το πάχος των ελασμάτων που κατασκευάζονται. Η βασική αρχή της μεθόδου συνίσταται στο γεγονός πως η εξέλαση δεν χρησιμοποιείται μόνο για την μόρφωση των ελασμάτων, αλλά και για τη μείωση του μεγέθους των κόκκων του χάλυβα, παράγοντας έτσι υλικό με ίδιες ή καλύτερες ιδιότητες από εκείνες του εξομαλυμένου χάλυβα χωρίς την εφαρμογή θερμικής κατεργασίας μετά την εξέλαση. Πρακτικά, λοιπόν, οι μέθοδοι TMCP αντικαθιστά την πολύ συνηθισμένη μέθοδο παραγωγής χάλυβων, η οποία ξεκινάει με θερμή έλαση ώστε να επιτευχθούν οι απαιτούμενες διαστάσεις (μήκος, πλάτος, πάχος) και ακολουθείται από θερμικές κατεργασίες, όπως π.χ. βαφή και επαναφορά, για να βελτιωθούν οι ιδιότητες του υλικού. Οι μέθοδοι εξέλασης TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) είναι το σύνολο των κατεργασιών που συνδυάζουν την επιταχυνόμενη απόψυξη (Accelerated Cooling, AcC) και τη μηχανική έλαση εν θερμώ (Thermo-mechanical Rolling, TMR). Η διαδικασία των TMCP μεθόδων φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



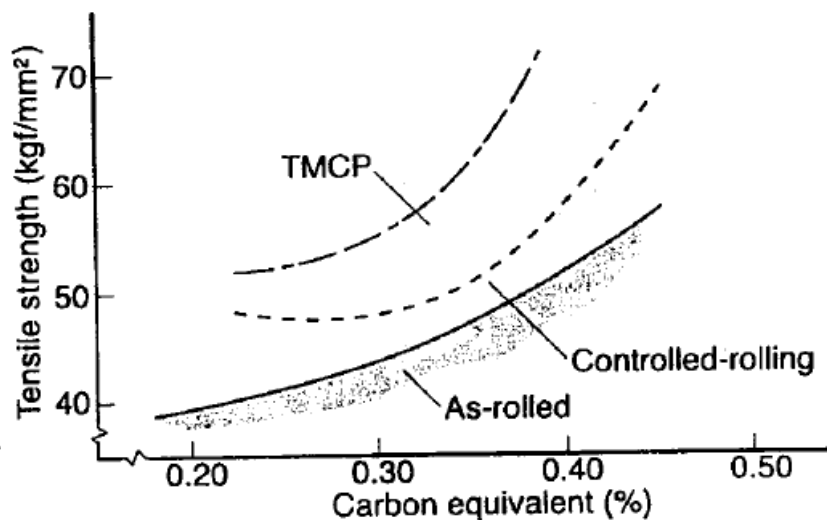
Εικ. 2.6 Διαδικασία TMCP μεθόδων.

Η λογική πίσω από το αποτέλεσμα της λεπτόκοκκης δομής των μεθόδων TMCP είναι η δημιουργία πολλών πυρήνων (nuclei generation) μέσω της πίεσης της έλασης σε θερμό μέταλλο και στη συνέχεια περιορισμό (nuclei expansion inhibition) της διόγκωσης των πυρήνων αυτών μέσω της ταχείας απόψυξης. Με προσεκτική επιλογή του ρυθμού απόψυξης επιλέγεται αν θα αποκτηθεί περλίτης, μπαινίτης ή μαρτενσίτης, με προφανή επιλογή τον μπαινίτη. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικ. 2.7 Μεταβολές μικροδομής κατά τη διάρκεια TMCP μεθόδων.

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική, όπως ο AH40 FCA, σε αντίθεση με τις άλλες κατηγορίες, απαιτείται να έχουν αντοχή σε δυσθραυστότητα και να έχουν αυστηρές προδιαγραφές για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης. Τελικά παράγονται χάλυβες με μειωμένο μέγεθος κόκκων, συνήθως αποτελούμενοι από βελονοειδή φερρίτη και μπαινίτη, αντί για τη συνηθισμένη φερριτοπερλιτική δομή. Έτσι αποκτάται εξαιρετική αντοχή σε συνδυασμό με εξαιρετική δυσθραυστότητα και χαμηλή εμβαπτότητα. Επίσης τα υλικά TMCP μεθόδων δεν είναι επιρρεπή σε ψυχρή ρωγμάτωση, ενώ ακόμα γίνεται να συγκολληθούν και με αρκετά μεγάλες τιμές προσδιδόμενης θερμότητας ανά μονάδα μήκους. Η συγκολλησιμότητά τους, μάλιστα, είναι τόσο καλή που συνήθως δεν απαιτείται προθέρμανσή τους για τις περισσότερες συνθήκες συγκόλλησης. Επομένως γίνεται σαφές ότι για παρόμοιες χημικές συστάσεις (ίδια επίπεδα ισοδύναμου άνθρακα) οι χάλυβες TMCP μεθόδων είναι ανώτεροι σε κάθε παράμετρο από τους κοινά παραχθέντες χάλυβες, ακόμα και στην κατεργασιμότητα. Η ανωτερότητα σε ζητήματα αντοχής φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικ. 2.8 Ανωτερότητα αντοχής χαλύβων TMCP.



### 2.7.3 Τυποποίηση Χαλύβων FCA [75, 76]

Οι χάλυβες FCA είναι μια αναπτυσσόμενη ομάδα χαλύβων βιομηχανικής χρήσης και δεν διατίθεται επαρκής βιβλιογραφία για τα χαρακτηριστικά τους, τις ιδιότητες τους κλπ. Παρόλα αυτά, μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων κυρίως των κατασκευαστών μπορούν εύκολα να καταταγούν στην κατηγορία των χαλύβων υψηλής αντοχής. Επίσης τα σεβαστά ποσοστά μαγγανίου που περιλαμβάνονται στην χημική του σύσταση μπορεί να τους εντάξουν στους ανθρακομαγγανιούχους χάλυβες. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, τέλος τους εντάσσουν στις οικογένειες 490N, 520N, 570N, και 590N. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μια σύντομη κατηγοριοποίηση των χαλύβων FCA σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

**Πίνακας 2.6: Προτυποποίηση Χαλύβων FCA**

ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ FCA			
	JIS	ASTM	Ship Classification Society
JIS G 3106	SM490	A572	A32, A36, A40
	SM490Y	A573	D32, D36, D40
	SM520	A572 Gr.60/65	A43/D43
	SM570	A678 Gr.C/D A841	A47/D47 E47
JIS G 3114	SMA490W	A242 Type2 A588	-
	SMA570W	-	-

### 2.7.4 Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβων FCA [19, 75]

Οι χάλυβες της οικογένειας FCA εμφανίζουν μηχανικές ιδιότητες αισθητά βελτιωμένες σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες. Έχουν βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό και η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητά τους είναι τουλάχιστον ισοδύναμη με αυτήν των συμβατικών χαλύβων. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων αυτών.

**Πίνακας 2.7: Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβων FCA [19].**

Μηχανικές Ιδιότητες χαλύβων FCA					
Κατηγορία	Πάχος [mm]	Όριο Διαρροής [N/mm <sup>2</sup> ]	Αντοχή σε Εφελκυσμό [N/mm <sup>2</sup> ]	Επιμήκυνση %	Δυσθραυστότητα στους -40°C [J]
490N	9	425	604	18	231
	25	486	599	23	348
	50	469	576	25	395
	80	433	571	27	331
570N	38	539	651	29	323 (-20°C)
	74	498	660	28	227 (-20°C)



### 2.7.5 Συμπεριφορά Χαλύβων FCA σε Κόπωση [1, 3, 19, 74, 75, 81]

Η εναλλασσόμενη, περιοδική και συνεχής καταπόνηση ενός υλικού μπορεί να οδηγήσει τελικά στην αστοχία και θραύση του. Το αποτέλεσμα αυτό ονομάζεται θραύση από κόπωση.

Η ναυπηγική βιομηχανία ασχολείται κυρίως με την κόπωση υψηλής συχνότητας που αφορά σε στοιχεία του σκάφους που δέχονται γρήγορα εναλλασσόμενα φορτία (έλικα, περιοχές κοντά στοροφαλοφόρο κλπ.) και με την κόπωση χαμηλής συχνότητας που χαρακτηρίζει περιοχές που εμφανίζει ασυνέχεια η γάστρα (ανοίγματα στομιών κυτών, ανοίγματα ράμπας φορτοεκφόρτωσης κλπ.).

Η θραύση λόγω κόπωσης χαρακτηρίζεται από τα εξής στάδια:

1) Έναρξη της ρωγμής – fatigue crack initiation.

Αναφέρεται στο στάδιο όπου λόγω κόπωσης εμφανίζεται ένα ελάττωμα σε μια επιφανειακή περιοχή της κατασκευής. Είναι στάδιο όπου το ελάττωμα ενδεχομένως αντιμετωπίζεται.

2) Διάδοση της ρωγμής μέσω ταινιών ολίσθησης – fatigue crack propagation.

Αναφέρεται στη διαδικασία όπου η μικρή επιφανειακή ρωγμή αρχίζει να αυξάνει το μέγεθός της μέσω των κρυσταλλογραφικών επιπέδων μέγιστης διάτμησης τάσης με κάθε εναλλαγή του φορτίου (κύκλος). Η φάση αυτή ονομάζεται Στάδιο I ανάπτυξης της ρωγμής.

3) Διάδοση ρωγμής μέσω των επιπέδων της μέγιστης εφελκυστικής τάσης.

Είναι το στάδιο επέκτασης της ρωγμής που αναφέρθηκε στο προηγούμενο στάδιο, πλέον κάθετα στον άξονα εφαρμογής της μέγιστης εφελκυστικής τάσης (Στάδιο II).

4) Τελικό στάδιο αστοχίας – fatigue fracture.

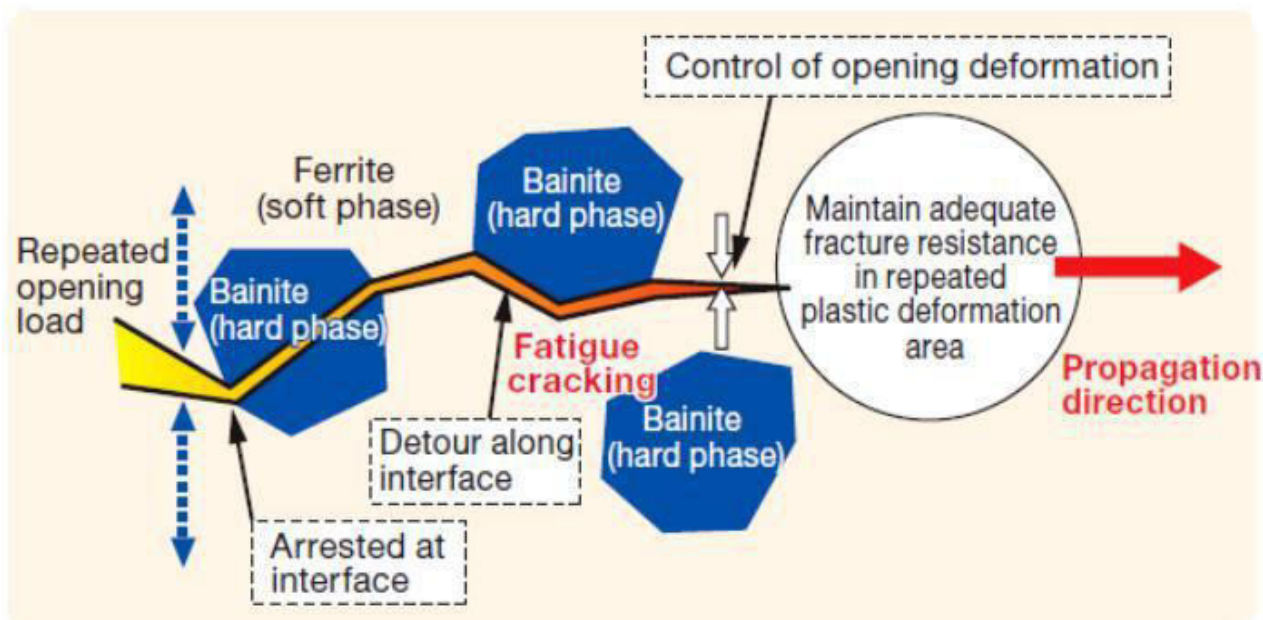
Είναι το στάδιο όπου λόγω της αυξανόμενης εναπομένουσας τάσης στην περιοχή της όλο και μεγαλύτερης ρωγμής, εμφανίζεται αύξηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής. Η τελική θραύση γίνεται είτε με ψαθυρό τρόπο, όπου το μέγεθος της ρωγμής φτάνει σε κρίσιμη τιμή για τις συνθήκες που βρίσκεται η κατασκευή και για τη γεωμετρία της, είτε με όλκιμο τρόπο όπου η τοπική τάση ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού.

Οι ρωγμές που οφείλονται σε φορτία κόπωσης αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα αστοχίας κατασκευαστικών στοιχείων γάστρας πλοίου. Το πιο ουσιώδες βήμα στην αντιμετώπιση της εμφάνισης αυτού του φαινομένου είναι η κατανόηση των ιδιοτήτων έναρξης ρωγμών. Αξίζει να αναφερθεί ότι στα πλοία και δη στη γάστρα οι ρωγμές είναι ήδη πολύ μεγάλου μήκους όταν είναι δυνατόν να ανιχνευθούν, κάτι που καθιστά δύσκολη την έγκαιρη αντικατάσταση ευάλωτων σημείων, κάτι που δεν ισχύει για μηχανολογικά εξαρτήματα (γρήγορη ανίχνευση ρωγμής).

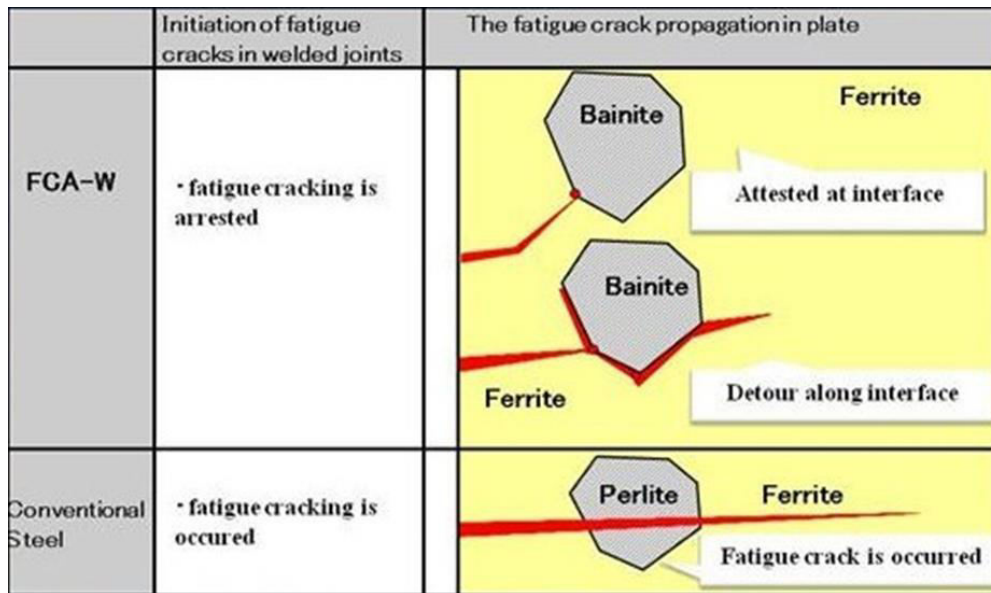
Επομένως η αποφυγή εμφάνισης ρωγμών έρχεται με δυο τρόπους. Αφενός μέσω του σχεδιασμού των κατασκευαστικών στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μειωμένη συγκέντρωση κρίσιμων τάσεων σε αυτά και αφετέρου μέσω της επιλογής νέων υλικών κατασκευής που θα παρουσίαζαν αντίσταση τόσο στην έναρξη (δημιουργία – crack initiation resistance), όσο και στη διάδοση των ρωγμών (crack propagation resistance). Τέτοιου είδους υλικά είναι και η οικογένεια χαλύβων FCA.

Οι χάλυβες FCA, όπως αναφέρθηκε, παράγονται με μεθόδους TMCP (thermo-mechanical control processes), γεγονός που τους προσδίδει βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση, σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες. Η ιδιότητα της εξαιρετικής αντοχής τους σε κόπωση οφείλεται στη μικροδομή που επιτυγχάνεται μέσω των TMCP μεθόδων παραγωγής τους, δηλαδή μέσω θερμής έλασης στη μη ανακρυσταλλοποιημένη θερμοκρασιακή περιοχή και επακόλουθης επιταχυνόμενης ψύξης.

Αυτή ακριβώς η μικροδομή καθορίζει τη συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση και σε ενδεχόμενη ανάπτυξη ρωγμής. Η ανάπτυξη της ρωγμής εμποδίζεται στο τελικό στάδιο της διαδικασίας διάδοσης από το μαλακό στρώμα του φερρίτη στο σκληρό στρώμα του μπαινίτη. Η βασική αρχή λειτουργίας του μηχανισμού παρεμπόδισης της ανάπτυξης της ρωγμής χαρακτηρίζεται από την ανακοπή της ρωγμής από τα στρώματα του μπαινίτη είτε από την αναγκαστική λοξοδρόμησή της από την αρχική της διεύθυνση γύρω από τη φάση του μπαινίτη. Κάτι τέτοιο δεν θα συνέβαινε αν υπήρχε περιλίτης όπως σε συμβατικούς χάλυβες. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το παραπάνω φαινόμενο.

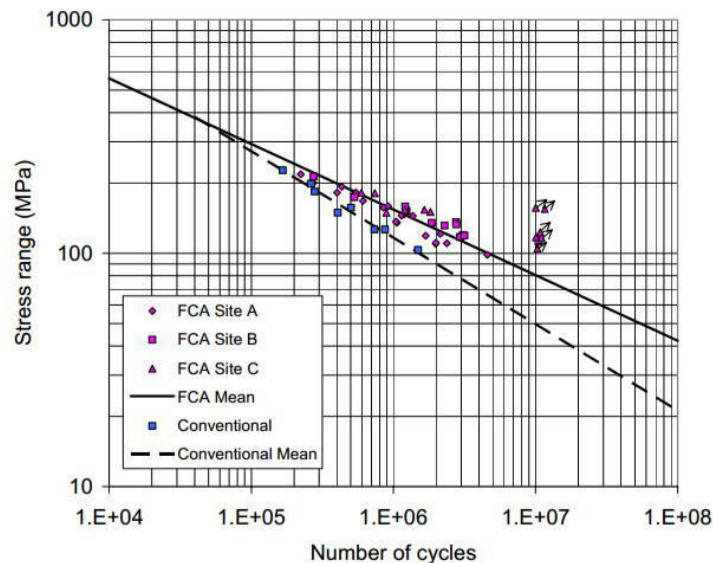


**Εικ. 2.9** Ο μηχανισμός συμπεριφοράς των χαλύβων FCA σε διάδοση ρωγμής από κόπωση.



**Εικ. 2.10** Σύγκριση συμπεριφορών χάλυβα FCA με συμβατικό χάλυβα σε κόπωση.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη συμπεριφορά των χάλυβων FCA σε κόπωση σε σχέση με συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής.



**Εικ. 2.7** Συγκριτική συμπεριφορά χάλυβων FCA σε κόπωση σε σχέση με συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής.

Έχει βρεθεί ότι οι χάλυβες FCA μπορούν να παρουσιάσουν μέχρι και τριπλάσια αντοχή σε κόπωση από ότι οι συμβατικοί χάλυβες για μεγάλους κύκλους φορτίσεων, δηλαδή  $10^6$ - $10^8$  κύκλους, ωστόσο οι διαφορές είναι μικρές για λίγους κύκλους φορτίσεων (Εικ. 2.7) [74]. Δηλαδή οι χάλυβες αυτοί είναι πιο κατάλληλοι για υψισυχνές φορτίσεις (διέγερση κυματισμών) και όχι τόσο αποτελεσματικοί έναντι σε λιγότερο επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, όπως φόρτωμα/ξεφόρτωμα βαρών σε βιομηχανικά μηχανήματα. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι ειδικά στη ναυπηγική η χρησιμοποίησή τους μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη, καθώς τα πλοία σχεδιάζονται για  $10^8$  κύκλους επαναλαμβανομένης φόρτισης από κυματισμούς.

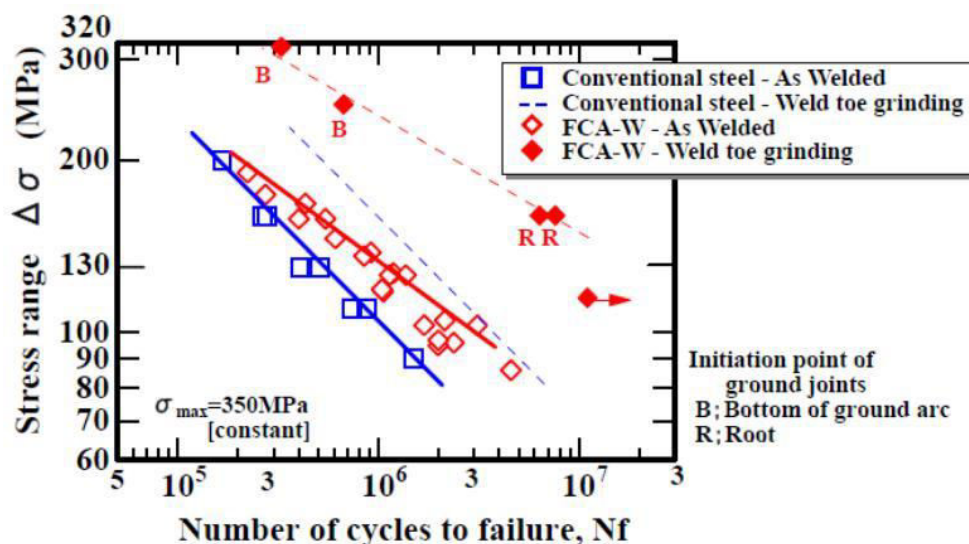
Ένας ακόμα λειτουργικός μηχανισμός των χαλύβων FCA, που συμβάλλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς τους σε κόπωση, είναι η αποφυγή της δημιουργίας εγκοπής στο υλικό (material notch effect). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν υπάρχει συσσώρευση τάσεων σε ένα σημείο της επιφάνειας του υλικού. Η ανισοκατανομή της σκληρότητας του υλικού, δηλαδή η ύπαρξη περιοχών με αισθητά μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας σε σχέση με άλλες γειτονικές περιοχές, μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση τάσεων. Οι χάλυβες FCA έχουν ομοιογενή κατανομή της σκληρότητας κατά τον όγκο τους. Η ομοιογενής κατανομή της σκληρότητας είναι μια ιδιότητα που επίσης προσδίδεται μέσω της διαδικασίας παραγωγής των χαλύβων FCA με μέθοδο TMCP. Πολύ σημαντικό είναι ότι η παρεμπόδιση έναρξης ρωγμής γίνεται και στην Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη των χαλύβων αυτών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς για αρκετά χρόνια μετά την πρώτη παραγωγή χαλύβων FCA, τα προβλήματα αντοχής σε κόπωση σε συγκολλημένα ελάσματα παρέμεναν χωρίς σημαντικές βελτιώσεις, οδηγώντας σε συνήθη μετρά, με προφανή μειονεκτήματα, όπως η αύξηση του πάχους των επιλεχθέντων ελασμάτων, η αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων με λείανση της βάσης της συγκόλλησης (toe grinding) και με συγκόλληση ενισχυτικών μελών (backing plates). Ωστόσο το 2008 οι χάλυβες FCA τροποποιήθηκαν καταλλήλως (χημική σύσταση/μικροδομή μέσω των μεθόδων TMCP) σε χάλυβες FCA-W, που προσέδιδαν την εξαιρετική τους συμπεριφορά σε κόπωση και μετά από συγκόλληση, χωρίς να χρειάζεται τελικά αύξηση πάχους ή προσκόλληση ενισχυτικών μελών.

#### **2.7.6. Βελτιωτικές Τεχνικές Κατεργασίας Συγκολλήσεων Χάλυβα FCA [77, 78]**

Όπως το σύνολο των χαλύβων έτσι και οι χάλυβες της οικογένειας FCA μπορούν να δεχτούν κατεργασίες που βελτιώνουν την αντοχή τους σε κόπωση μετά το πέρας συγκολλήσεων. Οι κατεργασίες αυτές είναι οι:

- Επένδυση με τη χρήση TIG (TIG dressing)
- Λείανση της βάσης της ραφής (Toe grinding)
- Υπερηχητική Κρούση (Ultrasonic Peening)

Οι μέθοδοι της υπερηχητικής κρούσης (UP ή Ultrasonic Peening) και της λείανσης της βάσης της ραφής (Toe Grinding) είναι οι δύο κύριες μέθοδοι που βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στους χάλυβες της οικογένειας FCA. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη συμπεριφορά σε κόπωση συγκολλήσεων συμβατικού χάλυβα και χάλυβα FCA πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου της λείανσης της βάσης τη ραφής. Είναι εμφανές ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο η διάρκειας ζωής των τεμαχίων σε κόπωση, αυξάνεται πάνω από 200%.



**Εικ. 2.8** Συγκριτική συμπεριφορά συγκολλημένων τεμαχίων χάλυβα πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου λείανσης της βάσης της ραφής.

Η μέθοδος της υπερηχητικής κρούσης επιδρά αυξητικά στη διάρκεια ζωής συγκολλημένων τεμαχίων που δέχονται καταπονήσεις κόπωσης, εισάγοντας θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στα επιφανειακά στρώματα της ραφής της συγκόλλησης. Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης τάσεων και την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος του υλικού. Με τη μέθοδο αυτή εμφανίζεται επίσης, εκλέπτυνση των κόκκων της κατεργασμένης επιφάνειας.

### 2.7.7 Εφαρμογές Χαλύβων FCA στη Ναυπηγική [6, 7, 19, 74, 79, 80]

Η οικογένεια FCA των κατηγοριοποιείται ως οικογένεια χαλύβων υψηλής αντοχής σε κόπωση (fatigue resistant). Εκτός από τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία (σασί αυτοκινήτων) και σε μηχανολογικά εξαρτήματα, χρησιμοποιείται και στη ναυπηγική. Αποτιμάται για τη συνεισφορά της, στην υψηλότερη λειτουργική ζώνη των ναυπηγικών κατασκευών και στο χαμηλότερο βάρος που εκτιμάται ότι προσφέρει, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, το οποίο είναι μείζον θέμα για κάθε πλοιοκτήτη. Τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, καθιστούν τους χάλυβες FCA άμεσα προτιμητέους στην ανέγερση νέων κατασκευών. Τονίζεται ότι τα πλοία είναι κατασκευές που καταπονούνται ιδιαίτερα από φαινόμενα κόπωσης, καθώς η κύρια φόρτιση της κάμψης σε ήρεμο νερό μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη λόγω της κίνησης του πλοίου σε κυματισμούς. Η χρησιμοποίησή των χαλύβων FCA σε πλοία εκτιμάται να αυξήσει την αντοχή των σημείων που χρησιμοποιείται σε κόπωση έως και με τριπλασιασμό, βάσει των καμπυλών S-N των χαλύβων FCA για πολλούς κύκλους φορτίσεων, δηλαδή  $10^6$ - $10^8$  (Εικ. 2.7) [74].

Η πρώτη εταιρία που χρησιμοποίησε χάλυβες FCA στις κατασκευές της ήταν η Mitsubishi Heavy Industries όπου το 2003 χρησιμοποίησε κατασκευαστικά στοιχεία διπύθμενου ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου αερίου LPG που ήταν κατασκευασμένα από χάλυβα FCA. Η εταιρία Mitsui Engineering & Shipbuilding εφάρμοσε σε διάφορες κρίσιμες περιοχές της γάστρας ενός cape size πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier), ελάσματα από χάλυβα FCA. Οι χάλυβες της οικογένειας FCA έχουν βρει μεγάλη εφαρμογή σε καλύμματα δεξαμενών πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG.

Σύμφωνα με το πρότυπο A131 της ASTM, το συγκεκριμένο υλικό αποτελεί χάλυβα υψηλής αντοχής, ο οποίος χρησιμοποιείται στον τομέα της ναυπηγικής τόσο για την κατασκευή πλοίων όσο και πλωτών πλατφορμών άντλησης πετρελαίου.

Οι μεγαλύτερες κατασκευάστριες εταιρίες όπως η Kawasaki Heavy Industries, η Mitsui που αναφέρθηκε και πριν και η Sumitomo Metal, έχουν κάνει μελέτες για την κατασκευή ενισχυτικών και κατασκευαστικών στοιχείων πλοίων από χάλυβα FCA. Οι μελέτες αυτές καταδεικνύουν αποτελεσματική επίδραση της εφαρμογής FCA από άποψη σχεδιασμού κόπωσης. Πιο συγκεκριμένα έχουν προταθεί:

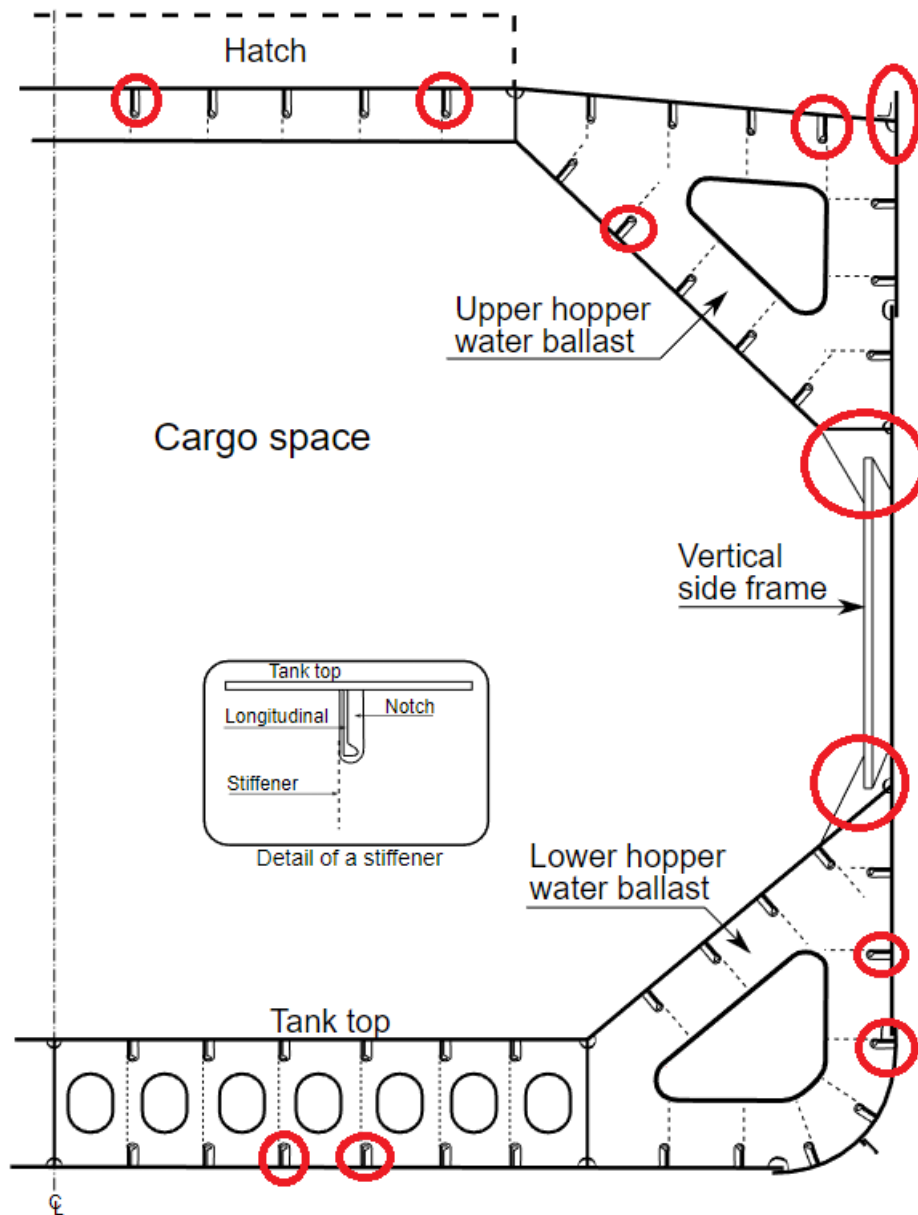
- Ενισχυτικά πυθμένα και πλευρικού τοιχώματος για πλοίο τύπου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier), μεγέθους cape size.
- Ενισχυτικά πυθμένα και πλευρικού τοιχώματος για δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC.
- Γωνίες υδατοστεγών καλυμμάτων κυτών φορτίου (hatch corners) για πλοίο τύπου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containership).

Όλα τα παραπάνω ξεπέρασαν κατά πολύ τα όρια ζωής που ορίζουν οι κανονισμοί του CSR και μεγάλων νηογνομών όπως ο ABS.

Άλλες πιθανές εφαρμογές των χάλυβων FCA σε πλοία και πλωτές κατασκευές είναι επί παραδείγματι οι εξής περιπτώσεις:

- Γενικώς για ενισχυτικά σε ανωτέρα σημεία του πλοίου και σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπως ο ζωστήρας, ο πυθμένας και το κατάστρωμα.
- Στα σημεία που το έλασμα του πυθμένα συναντά το έλασμα hopper σε πλοία τύπου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier).

- Στα καλύμματα στομίων κυτών σε πλοία τύπου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier).

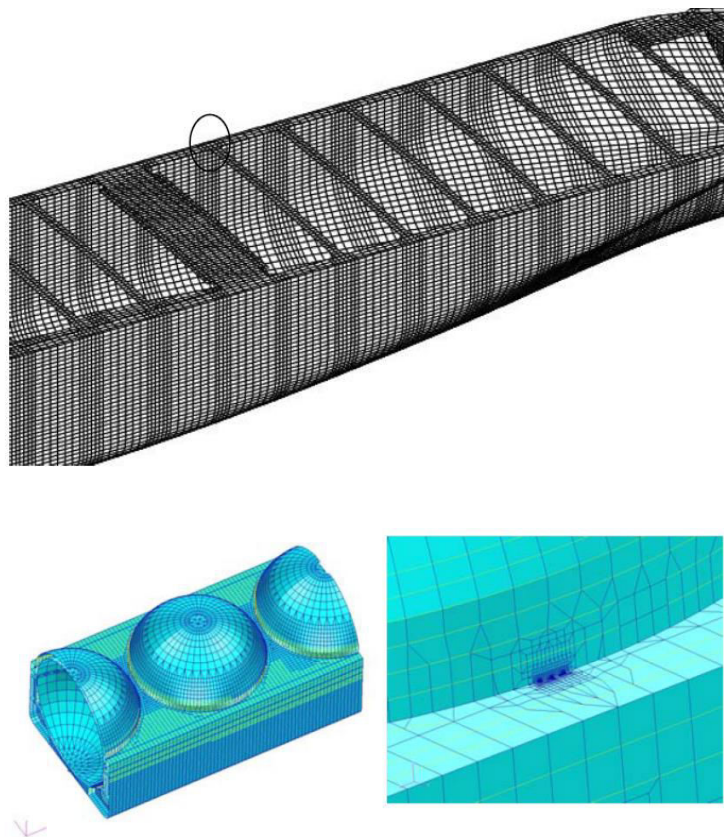


**Εικ 2.9** Σημεία χρησιμοποίησης AH40 FCA σε Μέση Τομή Bulk Carrier.

- Σε εγκάρσιες πτυχωτές φρακτές σε πλοία οχηματαγωγά πλοία τύπου Ro/Ro.
- Λόγω του ότι ο AH40 παρουσιάζει υψηλή αντοχή (ελάχιστη 390 MPa) , ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες, δύναται να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή πλοίων που πλέουν σε βαθιές και κρύες θάλασσες (π.χ. arctic vessels) καθώς και σε θαλάσσιες πλατφόρμες που βρίσκονται σε παγωμένα νερά.
- Σε ό,τι αφορά τις πλωτές πλατφόρμες εξορύξεων , χρησιμοποιείται κυρίως στις ενώσεις των σωλήνων μεταφοράς του πετρελαίου καθώς και στην κατασκευή της βάσης της πλατφόρμας



- Στα σημεία που συναντά το έλασμα του κυρίου καταστρώματος τα ελάσματα των καλυμμάτων των δεξαμενών σε πλοία μεταφοράς LNG.

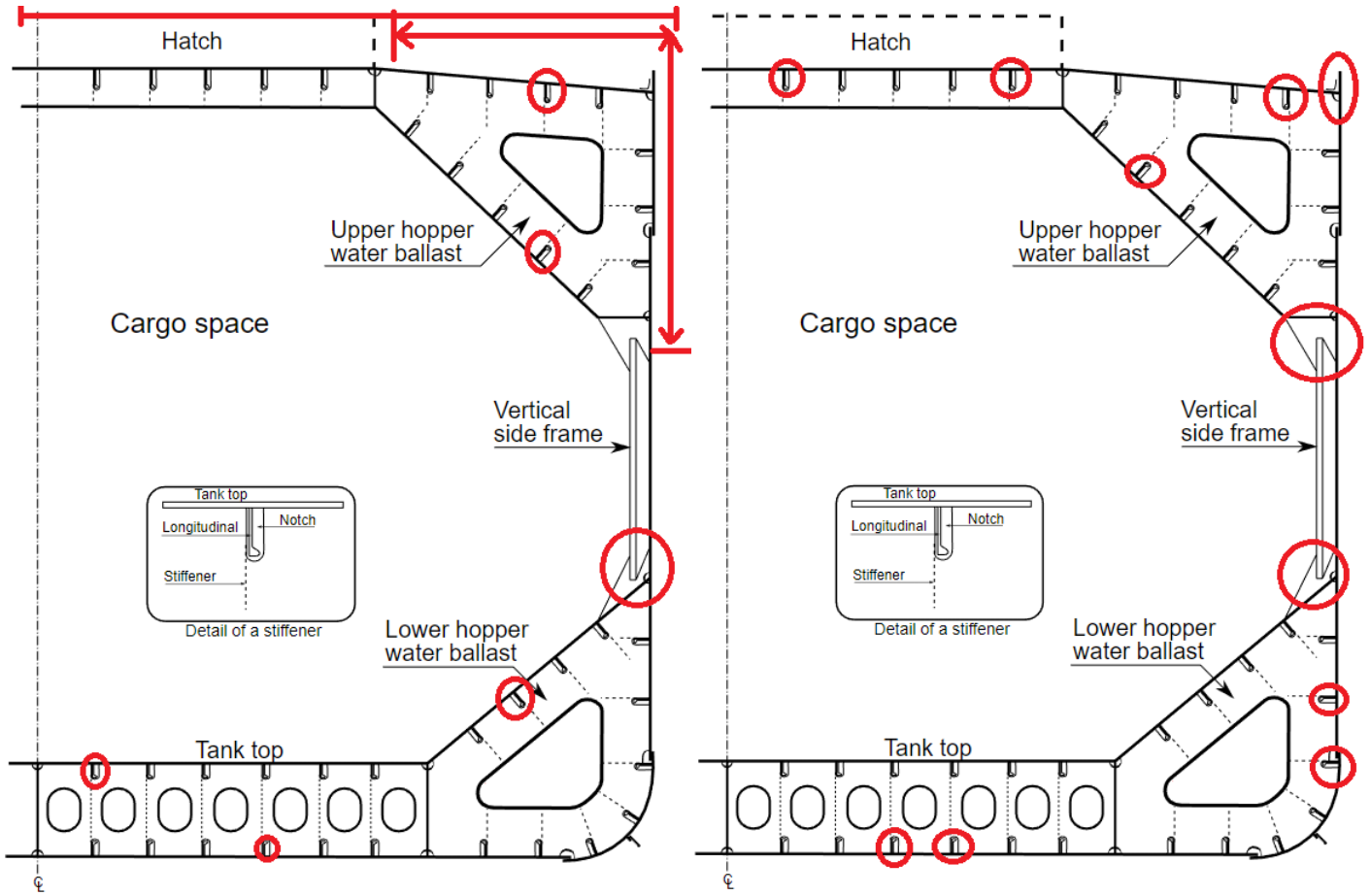


**Εικ 2.10** Σημεία χρησιμοποίησης AH40 FCA σε LNG Carrier.

Είναι προφανές ότι, εκτός των παραπάνω, ελάσματα και ενισχυτικά χάλυβα AH40 FCA προτείνεται να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια επισκευών ρωγματωμένων ελασμάτων ή ενισχυτικών, κατόπιν επιθεωρήσεων από τους νηγνώμονες, καθώς οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής έχει εμφανίσει ρωγή είναι επιρρεπές σε κόπωση και λογίζεται ως σημείο αδυναμίας της κατασκευής, τόσο λόγω συγκέντρωσης τάσεων όσο και φαινομένων κόπωσης.

Συνδυάζοντας τις προαναφερθείσες εφαρμογές για τους δυο χρησιμοποιούμενους χάλυβες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, AH36 και AH40 FCA, με δεδομένο ότι οι συγκολλήσεις της μεθόδου GMAW είναι πολύ διαδεδομένες στη ναυπηγική βιομηχανία λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων τους (και άρα και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος MCAW), αντιλαμβάνεται κανείς ότι η μελέτη και η κατανόηση της ετερογενούς συγκόλλησης που πραγματοποιείται είναι πολύ σημαντική, αφού είναι πολύ πιθανό να συναντηθεί εκτενώς, καθώς και οι δυο χάλυβες χρησιμοποιούνται σε ανώτερα σημεία της γάστρας και αφού ο χάλυβας AH40 FCA χρησιμοποιείται εκτενώς για επισκευές, αυξάνοντας τα πιθανά σημεία συγκόλλησης των δυο χαλύβων (παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο ακόλουθο σχήμα, συνοψίζοντας τα παραπάνω).





Εικ 2.11 Σημεία που απαντάται η υπό μελέτη συγκόλληση.

## **Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

**Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>****Πειραματική Διαδικασία****3.1 Εισαγωγή**

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορά την προετοιμασία, τη διεξαγωγή και τη μελέτη συγκόλλησης των ναυπηγικών χαλύβων AH36 και AH40 FCA με τη μέθοδο MCaw. Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με την προετοιμασία των ελασμάτων που θα συγκολληθούν, την επιλογή των υλικών και των αναλωσίμων της συγκόλλησης. Έπειτα καθορίστηκαν οι παράμετροι με τις οποίες διεξήχθησαν οι συγκολλήσεις, λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τις χημικές συστάσεις των προς συγκόλληση μετάλλων, όσο και μελέτες που έχουν προηγηθεί σχετικά με την βέλτιστη επιλογή συνθηκών συγκόλλησης. Μετά τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων, με τη βοήθεια υδροκοπής, αφαιρέθηκαν τμήματα στην περιοχή της συγκόλλησης για τη μελέτη της μικροδομής και των μικροσκληροτήτων, στις περιοχές των μετάλλων βάσης, της ζώνης τήξης, αλλά και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Για τη μελέτη της δομής του χάλυβα στις τρεις διαφορετικές περιοχές χρησιμοποιήθηκε Οπτική Μικροσκοπία, καθώς και Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM). Τέλος, αφότου έγιναν κατεργασίες εξάλειψης της γωνιακής παραμόρφωσης της πλάκας μετά από τη συγκόλληση, κόπηκαν τρία τεμάχια μέσω υδροκοπής για τη διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού.

**3.2 Υλικά****3.2.1 Χάλυβας AH36**

Ένα εκ των δυο χρησιμοποιούμενων υλικών, όπως έχει προαναφερθεί, ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία HSS (High Strength Steel). Η ονομασία και κατάταξή του ως ναυπηγικού χάλυβα τύπου AH36, ακολουθεί το πρότυπο A131M της ASTM και προέρχεται από τον Lloyd's Register of Shipping. Η χημική σύσταση του AH36, όπως εμφανίζεται στο πιστοποιητικό παραγωγής παρουσιάζεται παρακάτω στον Πίνακα 3.1:

**Πίνακας 3.1: Χημική Σύσταση Χάλυβα AH36**

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Al
wt(%)	0.12	0.22	1.23	0.018	0.012	0.23	0.11	0.10	0.02	0.009	0.003	0.04

Όπως είναι φανερό, όλα τα στοιχεία κραμάτωσης βρίσκονται εντός των ορίων που τίθενται από τους νηογνώμονες [6], τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 3.2 και καλύπτουν όλες τις κατηγορίες ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής. Ωστόσο παρατηρείται υψηλό ποσοστό άνθρακα (0.12%), το οποίο, όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2, συνεπάγεται μεταξύ άλλων αύξηση του ορίου διαρροής, συνοδευόμενο με σχετική μείωση της ολκιμότητας.

**Πίνακας 3.2: Χημική Σύσταση Ναυπηγικών Χαλύβων Υψηλής Αντοχής [6]**

<b>ΧΑΛΥΒΑΣ</b>	<b>AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36 AH40, DH40, EH40</b>
<b>Χημική Σύσταση % κ.β</b>	
$C_{\max}$	0,18
Mn	0,90 – 1,60 <sup>(1)</sup>
$Si_{\max}$	0,50
$P_{\max}$	0,035
$S_{\max}$	0,035
Al <sub>(2)</sub>	0,015
Nb <sub>(2)</sub>	0,02 – 0,05
V <sub>(2)</sub>	0,05 – 0,10
$Ti_{\max}$ <sup>(2)</sup>	0,02
$Cu_{\max}$	0,35
$Cr_{\max}$	0,20
$Ni_{\max}$	0,40
$Mo_{\max}$	0,08
<p>(1) Για πάχη μέχρι 12,5 mm το min Mn μπορεί να φτάσει το 0,70.</p> <p>(2) Οι χάλυβες περιέχουν ως συστατικά που εκλεπτύνουν τον κόκκο Al, Nb, V, Ti είτε αυτόνομα, είτε σε συνδυασμό. Αν χρησιμοποιούνται αυτούσια, δεν θα πρέπει να υπερβαίνει η περιεκτικότητά τους την αναγραφόμενη χημική σύσταση, ενώ, αν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, το άθροισμα Nb+V+Ti δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 0,12%.</p>	

Για πάχη έως 12.5 mm (0.50 in) ο χάλυβας είναι συνήθως ημι-καθησυχασμένος, δηλαδή μερικώς αποξειδωμένος, ενώ για μεγαλύτερα πάχη ο χάλυβας είναι καθησυχασμένος, δηλαδή πλήρως αποξειδωμένος. Όλες οι κατηγορίες ναυπηγικών χαλύβων που αναφέρθηκαν παραπάνω διατίθενται στο εμπόριο σε ελάσματα πάχους μέχρι και 30 mm, σε φύλλα, ή ρολά. Η σκληρότητα του χάλυβα AH36 είναι της τάξης των 180 HV<sub>0.3</sub> (επιβεβαιώνεται από μετρήσεις που έγιναν, στο επόμενο κεφάλαιο) [6].

Στο σημείο αυτό πρέπει να χαρακτηριστεί ο χάλυβας AH36 ως προς τη συγκολλησιμότητα του. Ο όρος συγκολλησιμότητα, όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρεται στο πόσο “εύκολο” είναι να συγκολληθεί ένας χάλυβας. Για τον σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθούν οι δείκτες  $CE_{IIW}$  και  $P_{cm}$ , των οποίων η προέλευση, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες, παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 και των οποίων οι σχέσεις φαίνονται παρακάτω:

$$CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cu+Ni)/15 + (Cr+Mo+V)/5$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Έτσι για τον χάλυβα AH36 έχουμε:

$$CE_{IIW} = 0.37$$

$$P_{cm} = 0.23$$

Η συγκολλησιμότητα του AH36 επομένως χαρακτηρίζεται ως “πολύ καλή”, σύμφωνα με τον  $CE_{IIW}$ , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 3.3: Όρια Συγκολλησιμότητας [9]**

Carbon equivalent (CE)	Weldability
Up to 0.35	Excellent
0.36–0.40	Very good
0.41–0.45	Good
0.46–0.50	Fair
Over 0.50	Poor

Στο σημείο αυτό δίνονται στον Πίνακα 3.4 οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα AH36 για πάχος 12mm. Όπως είναι φανερό και στην περίπτωση αυτή, όλες οι τιμές βρίσκονται εντός των απαιτούμενων ορίων των νηογνώνων, που φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

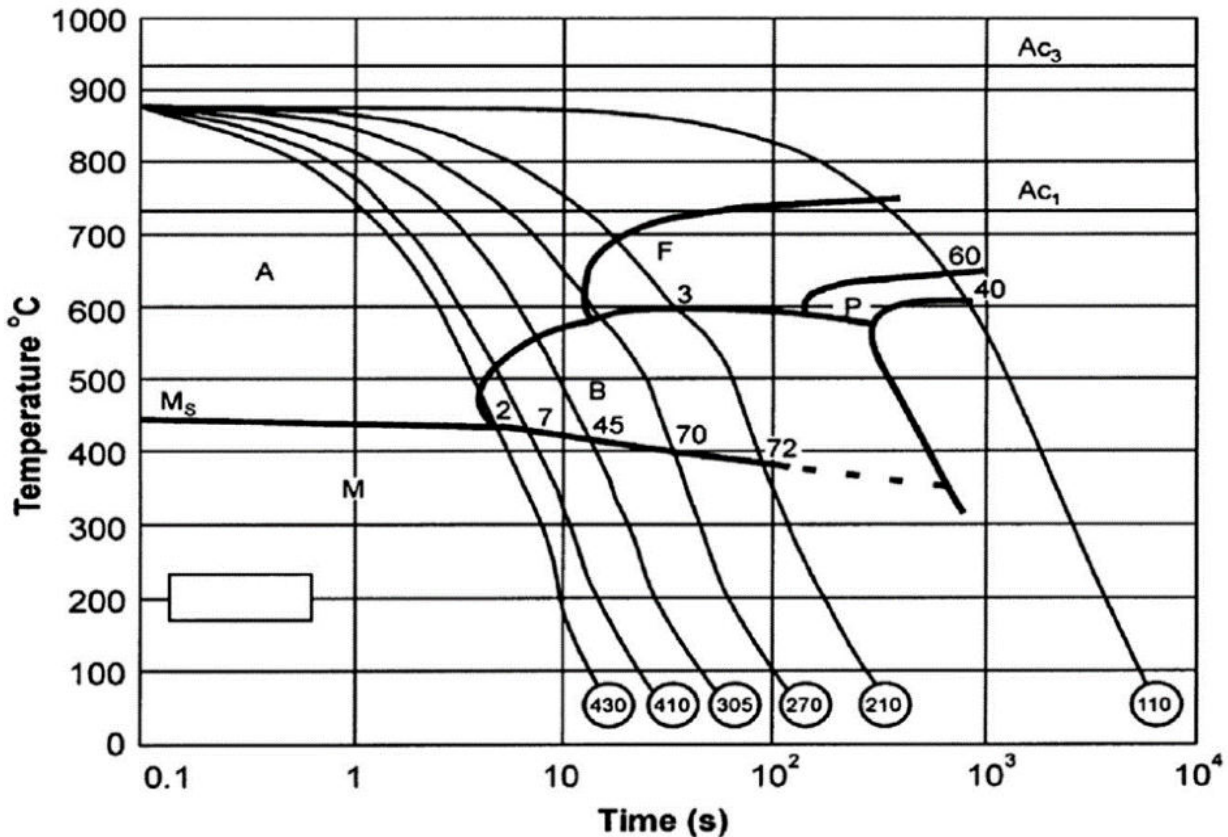
**Πίνακας 3.4: Μηχανικές Ιδιότητες AH36**

Όριο Διαρροής Re (MPa)	Αντοχή σε Εφελκυσμό Rm (MPa)	Επιμήκυνση %	Λόγος Re/Rm
415	535	24	0.798

Πίνακας 3.5: Μηχανικές Ιδιότητες Νναυπηγικών Χαλύβων [6, 7]

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ						
Χάλυβας	Όριο διαρροής σε MPa	Όριο Θραύσης σε MPa	% Επιμήκυνση	Δυσθραυστότητα (J) για t ≤ 50 mm		
				θ °C	διαμήκης	εγκάρσια
A- B- D- E	>235	400-520	22%	+20		
				0	27	20
				-20	27	20
				-40	27	20
AH32- DH32 EH32	315-350	440-590	22%	0	31	22
				-20	31	22
				-40	31	22
AH36 DH36 EH36	>350	490-620	21%	0	34	24
				-20	34	24
				-40	34	24
AH40 DH40 EH40	>390	510-660	20%	0	41	27
				-20	41	27
				-40	41	27

Τέλος, παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα το διάγραμμα CCT για τον χάλυβα AH36 [16]. Πάνω στο συγκεκριμένο διάγραμμα CCT αναγράφονται και τιμές μικροσκληροτήτων, επομένως, συνδυάζοντας μικροσκληρομετρήσεις και ρυθμούς απόψυξης, είναι δυνατή η ταυτοποίηση των φάσεων και των μικρογραφικών συστατικών.



Εικ. 3.1 Διάγραμμα CCT Χάλυβα AH36 [16]

### 3.2.2 Χάλυβας AH40 FCA

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι κατασκευασμένος με μεθόδους TMCP και κωδικοποιείται ως AH40 FCA (Fatigue Crack Arrester). Κατηγοριοποιείται ως χάλυβας HSLA. Η χημική σύσταση του χάλυβα σύμφωνα με τον κατασκευαστή Nippon Steel & Sumitomo Metals δίνεται στον Πίνακα 3.6. Όπως φαίνεται και σε αυτή την περίπτωση όλα τα κραματικά στοιχεία βρίσκονται εντός των απαιτούμενων ορίων. Παρατηρείται πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε Άνθρακα και αυξημένη περιεκτικότητα σε Μαγγάνιο, τόσο απόλυτα, όσο και συγκριτικά με τον AH36. Αυτό επιβεβαιώνει και τον άτυπο γενικό κανόνα αύξησης της περιεκτικότητας σε Μαγγάνιο καθώς ανεβαίνουν τα grades των χαλύβων.[17].

Πίνακας 3.6: Χημική Σύσταση Χάλυβα AH40 FCA

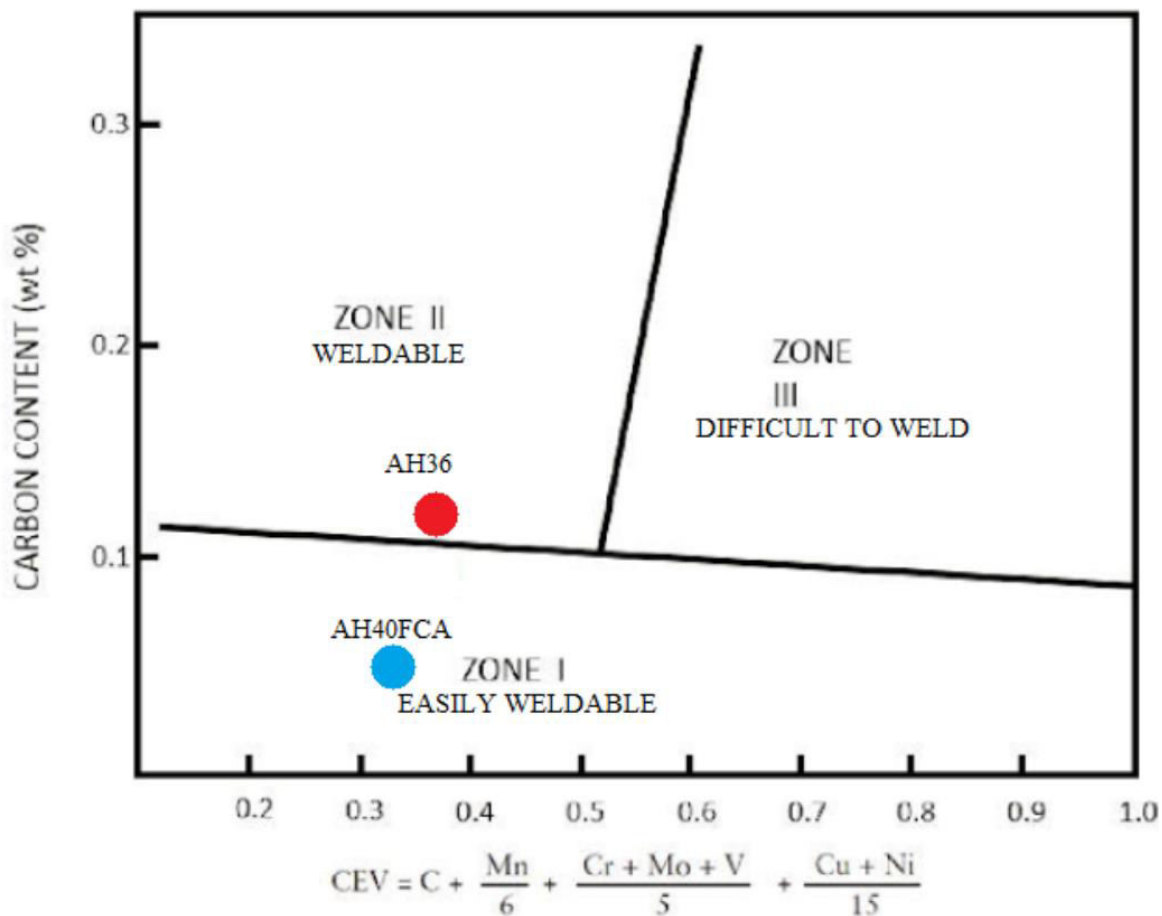
Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Al
wt(%)	0.0425	0.41	1.45	0.013	0.002	0.02	0.02	0.16	0.01	0.008	0.017	0.027

Στη συνέχεια ακολουθεί χαρακτηρισμός της συγκολλησιμότητας του χάλυβα AH40 FCA, μέσω των δεικτών ισοδύναμου άνθρακα.

$$CE_{ΠW} = 0.32$$

$$P_{cm} = 0.19$$

Η συγκολλησιμότητα του AH40 FCA επομένως χαρακτηρίζεται ως “εξαιρετική”, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3. Αναφορικά με την συγκολλησιμότητα, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν συνοψίζονται για τους δυο χάλυβες και στο παρακάτω διάγραμμα Graville [18].



Εικ. 3.2 Διάγραμμα Συγκολλησιμότητας Graville [18]

Οι χάλυβες της οικογένειας FCA, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αυξημένη αντοχή σε κόπωση. Η σκληρότητα του χάλυβα AH40 FCA είναι της τάξης των 190 - 195 HV<sub>0.3</sub> (επιβεβαιώνεται από μετρήσεις που έγιναν, στο επόμενο κεφάλαιο) [6, 19]. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, πάχους 13mm, που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, παρατίθενται στον Πίνακα 3.7, όπως παρέχονται από τον κατασκευαστή [19].



Πίνακας 3.7: Μηχανικές Ιδιότητες AH40 FCA [19]

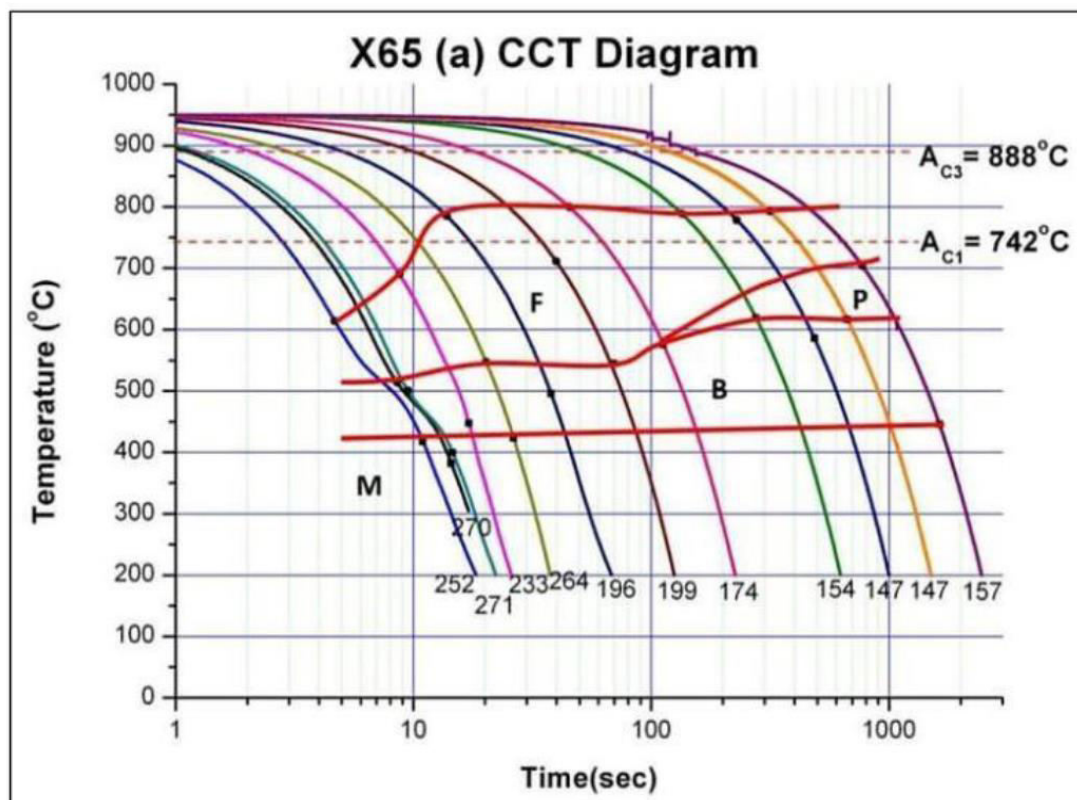
Όριο Διαρροής Re (MPa)	Αντοχή σε Εφελκυσμό Rm (MPa)	Επιμήκυνση %	Λόγος Re/Rm
421	575	27	0.737

Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, οφείλονται στη μικροδομή του, που έχει επιτευχθεί μέσα από τις μεθόδους παραγωγής TMCP. Αν και οι μικροδομές αναλύονται σε επόμενο στάδιο, αναφέρεται απλώς ότι η μικροδομή του χάλυβα αποτελείται από φερρίτη και μαινίτη και αποκτάται μέσω θερμής έλασης στην περιοχή της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης και ταχείας αποψύξεως.

Μετά από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση του διαγράμματος CCT του χάλυβα AH40 FCA. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα CCT του χάλυβα X65, ο οποίος έχει παραπλήσια χημική σύσταση με τον χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η χημική σύσταση του χάλυβα X65 φαίνεται στον Πίνακα 3.8 που ακολουθεί. Και στο εν λόγω διάγραμμα CCT αναγράφονται και τιμές μικροσκληροτήτων, επομένως συνδυάζοντας μικροσκληρομετρήσεις και ρυθμούς απόψυξης, είναι δυνατή η ταυτοποίηση των φάσεων και των μικρογραφικών συστατικών.

Πίνακας 3.8: Χημική Σύσταση Χάλυβα X65

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Al
wt(%)	0.06	0.45	1.65	0.02	0.01	-	-	-	-	0.06	0.05	-



Εικ. 3.3 Διάγραμμα CCT Χάλυβα X65 [21]

### 3.2.3 Μέταλλο Προσθήκης

Το μέταλλο προσθήκης στις μεθόδους ηλεκτρικού τόξου, τροφοδοτείται, όπως έχει αναφερθεί, στη συγκόλληση, με τη μορφή ηλεκτροδίου. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε ηλεκτρόδιο από τον κατάλογο της εταιρίας Bohler, και είναι το HL 51-FD. Η κωδικοποίηση του ηλεκτροδίου κατά το πρότυπο EN ISO 17632-A είναι T 46 4 M 1 H 5. Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου, αποτελείται από μεταλλική σκόνη και η συνολική χημική του σύσταση φαίνεται στον Πίνακα 3.9. Η επιλογή του προαναφερθέντος ηλεκτροδίου έγινε με κριτήριο τη χημική σύσταση των μετάλλων βάσης, εν προκειμένω του χάλυβα AH40 FCA. Πράγματι, παρατηρείται ότι το μέταλλο προσθήκης με τον χάλυβα AH40 FCA έχουν σχεδόν πανομοιότυπα επίπεδα άνθρακα και μαγγανίου, ενώ υπάρχει σχετική απόκλιση στο πυρίτιο. Ωστόσο, με βάση τα διαθέσιμα ηλεκτρόδια, το συγκεκριμένο ήταν η εγγύτερη, από άποψη συμβατότητας, επιλογή για την παρούσα συγκόλληση.

**Πίνακας 3.9: Χημική Σύσταση Μετάλλου Προσθήκης**

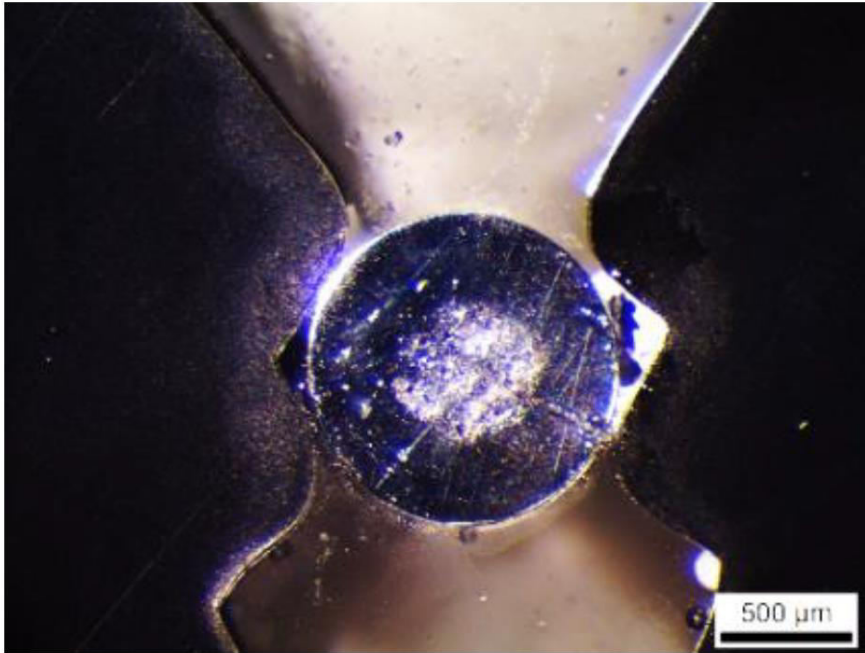
Element	C	Si	Mn
wt (%)	0.07	0.7	1.5

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το ηλεκτρόδιο παρουσιάζει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, χαμηλά επίπεδα εκτοξεύσεων με ικανοποιητική όψη ραφής. Οι μηχανικές ιδιότητες του ηλεκτροδίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10. Το ηλεκτρόδιο αυτό, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ενδείκνυται για χάλυβες κατηγορίας AH όταν αυτοί έχουν όριο διαρροής  $Re \leq 460 \text{ N/mm}^2$ .

**Πίνακας 3.10: Μηχανικές Ιδιότητες Μετάλλου Προσθήκης**

Όριο Διαρροής Re (MPa)	Αντοχή σε Εφελκυσμό Rm (MPa)	Επιμήκυνση %	Λόγος Re/Rm
490	610	27	0.803

Η ονομαστική διάμετρος του ηλεκτροδίου είναι 1.2mm. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ηλεκτροδίου, το καταλληλότερο αέριο προστασίας για τη χρήση του ηλεκτροδίου που επιλέχθηκε είναι μείγμα αργού – διοξειδίου του άνθρακα Ar – CO<sub>2</sub> με περιεκτικότητα 15 – 25% CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, η αναφορά του εξοπλισμού και των συνθηκών συγκόλλησης θα γίνουν εκτενώς σε επόμενο στάδιο. Στην εικόνα που ακολουθεί [21] φαίνονται τόσο το μεταλλικό περίβλημα, όσο και η σκόνη του πυρήνα.



Εικ. 3.4 Φωτογραφική απεικόνιση του ηλεκτροδίου HL 51-FD [21]

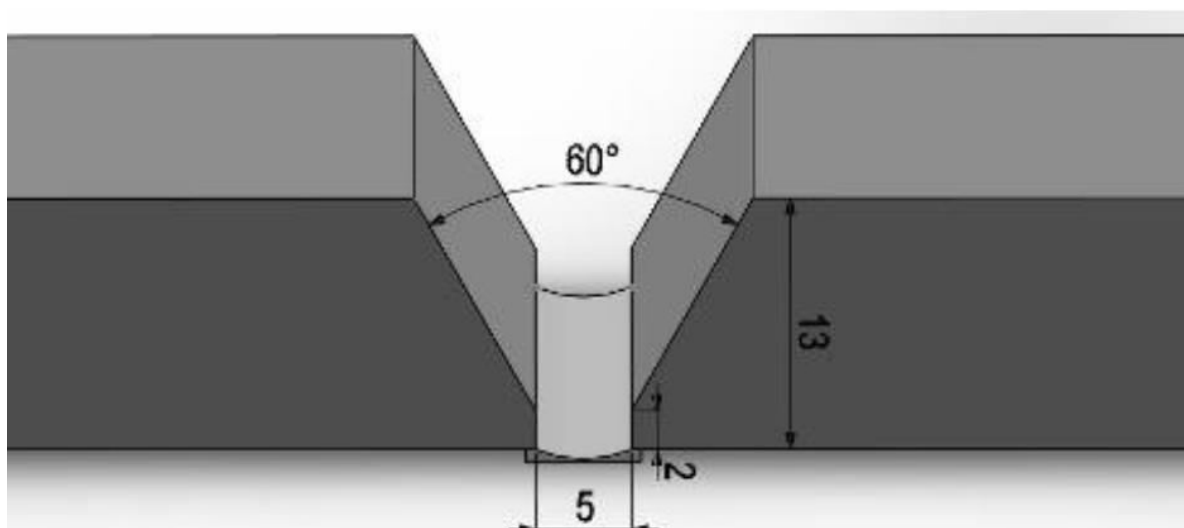
### 3.3 Προετοιμασία Χαλύβδινων Ελασμάτων

Τα ελάσματα που ετοιμάστηκαν προς συγκόλληση είχαν διαστάσεις 350 x 150 mm και πάχος 13 mm. Τα ελάσματα θα συγκολληθούν μετωπικά (butt joint) και απεικονίζονται παρακάτω. Επιλέχθηκε η διεύθυνση της συγκόλλησης να συμπίπτει με τη διεύθυνση έλασης, οι οποίες είναι στη μεγάλη διάσταση, των 350 mm.



Εικ. 3.5 Τα προς συγκόλληση ελάσματα

Προτού συγκολληθούν τα ελάσματα υπέστησαν διαδικασίες κοπής στις κατάλληλες διαστάσεις, λοξοτομής για να επιτευχθεί η απαιτούμενη γωνία διαμόρφωσης και αμμοβολής, ώστε να είναι καθαρή η προς συγκόλληση επιφάνεια. Για την επιτυχή συγκόλληση των δοκιμών σύμφωνα με το πρότυπο AWS D1.1: Structural Welding Code – Steel (2000), για συγκολλήσεις της οικογένειας MIG, και πάχος ελάσματος 13mm, θα πρέπει τα ελάσματα να έχουν στις προς συγκόλληση ακμές διαμόρφωση V, δηλαδή λοξοτομή συμμετρικής γωνίας διαμόρφωσης (groove angle) 60 μοιρών (δηλαδή bevel angle 30 μοιρών), ύψος ποδός 2 mm για την αποφυγή λεπτών ακμών, και άνοιγμα ρίζας 5 mm. Αυτό συμβαίνει καθώς το σχετικά υψηλό πάχος των ελασμάτων δεν ευνοεί τη συγκόλληση κλειστής (closed butt or squared groove) ή ανοιχτής (open square butt or open square groove weld) συμβολής. Οι τιμές της γωνίας, του ύψους ποδός και της απόστασης των τεμαχίων εξαρτώνται από το πάχος των ελασμάτων, τη θέση της συγκόλλησης και από το αν η συγκόλληση γίνεται από τη μια ή και από τις δυο πλευρές. Όλες οι κοπές για να επιτευχθεί η προαναφερθείσα διαμόρφωση έγιναν με φρέζα. Η σχηματική αναπαράσταση της διαμόρφωσης των ακμών των προς συγκόλληση ελασμάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και τα χαρακτηριστικά της στον παρακάτω πίνακα.



**Εικ. 3.6** Σχηματική αναπαράσταση διαμόρφωσης ακμής προς συγκόλληση ελασμάτων, κατά το πρότυπο AWS D1.1 (2000) [5]

**Πίνακας 3.11: Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά Διαμόρφωσης Ελασμάτων**

Διαστάσεις Δοκιμίου	Μήκος Δοκιμίου (mm)	Πλάτος Δοκιμίου (mm)	Πάχος Δοκιμίου (mm)
		350	150
Διαμόρφωση Ακμών	Γωνία Διαμόρφωσης $\varphi$ (°)	Ύψος Ποδός (mm)	Άνοιγμα Ρίζας (mm)
	60	2	5

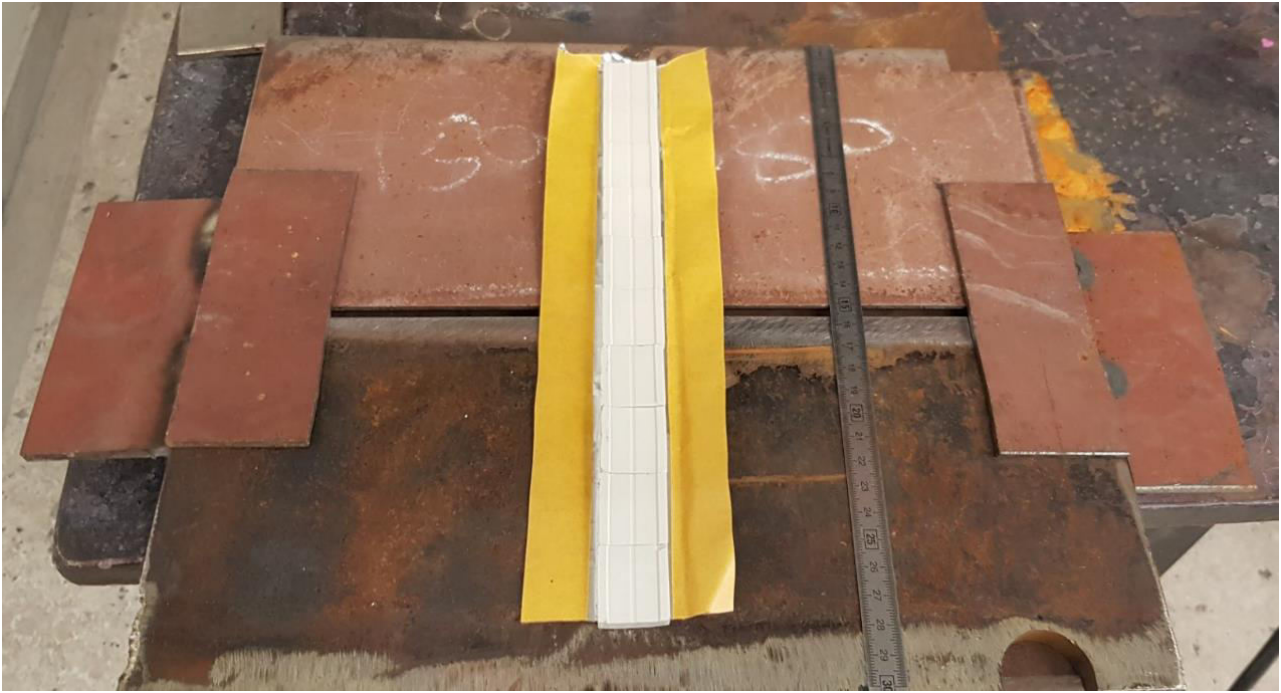
Για την απόλυτη συγκράτηση των ελασμάτων στο διάκενο των 5mm, όπως ορίζεται από το πρότυπο που επιλέχτηκε, στα άκρα των ελασμάτων συγκολλήθηκαν ελάσματα μικρών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν σαν αποστάτες. Πέρα από τη μόνιμη συγκράτηση των ελασμάτων για τη διαδικασία της συγκόλλησης, οι αποστάτες αυτοί αξιοποιήθηκαν για τη σωστή έναρξη του ηλεκτρικού τόξου της συγκόλλησης, προκειμένου να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες τόξου σε όλο το ενεργό μήκος των ελασμάτων. Όλα τα δοκίμια που προκύπτουν από τα συγκολλημένα ελάσματα, κόβονται από κατάλληλες περιοχές της συγκόλλησης, σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 15614-1:2004. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, για ελάσματα που έχουν συγκολληθεί με μετωπική συγκόλληση, μονής λοξοτομής, τα πρώτα 25mm από την κάθε μεριά της ραφής θεωρούνται περιοχή από την οποία δεν μπορούν να αντληθούν δοκίμια μεταλλογραφίας ή μηχανικών δοκιμών και έτσι απορρίπτονται. Παρόλα αυτά θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση των μεταλλικών αποστατών ως την περιοχή που θα εκκινήσει το ηλεκτρικό τόξο, προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη συγκόλληση, αλλά και να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η γωνιακή παραμόρφωση, ακόμα και στα άκρα των ελασμάτων

Οι μεταλλικοί αποστάτες συγκολλήθηκαν με πόντες, χρησιμοποιώντας τη χειροκίνητη μέθοδο συγκόλλησης SMAW. Τονίζεται ότι πριν την τοποθέτηση των αποστατών με ποντάρισμα, τα τεμάχια ήταν πακτωμένα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επίσης, πριν τη διαδικασία της συγκόλλησης, σε όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκε κεραμική επικάλυπτρα, στην περιοχή της ρίζας, προκειμένου να συγκρατήσει τη λίμνη συγκόλλησης κατά το πρώτο κορδόνι (Root Pass) και να εξασφαλιστεί σωστή γεωμετρία στην περιοχή της ρίζας. Ακολουθούν εικόνες της προαναφερθείσας διαδικασίας.



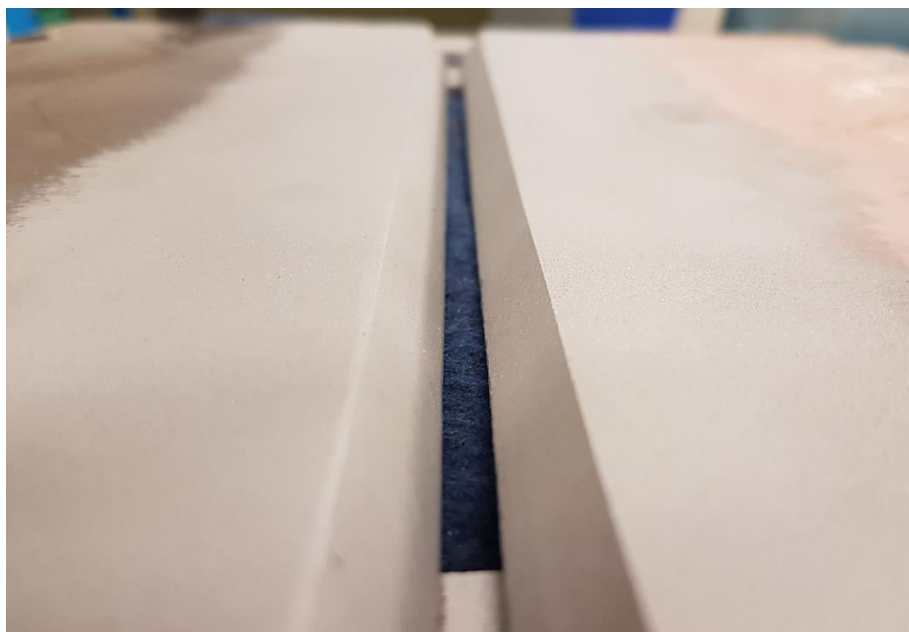
**Εικ. 3.7** Διάταξη τοποθέτησης αποστατών



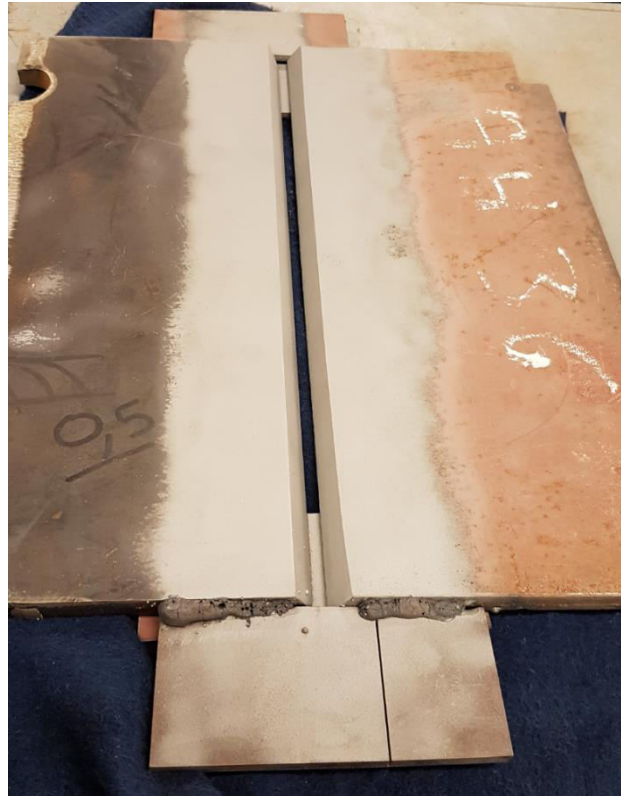


**Εικ. 3.8** Τελική διάταξη ελασμάτων. Φαίνονται οι τοποθετημένοι αποστάτες αλλά και η επικάλυπτρα.

Τέλος, οι προς συγκόλληση ακμές των ελασμάτων του χάλυβα καθαρίστηκαν με τη διαδικασία της αμμοβολής προκειμένου να απομακρυνθεί το επιφανειακό στρώμα σκουριάς και τυχόν έλαια, βερνίκια και άλλες ακαθαρσίες που ήταν πιθανό να υπάρχουν. Η διαδικασία αυτή αποτελεί σημαντικό κομμάτι της προετοιμασίας διότι όσο πιο καθαρή είναι η προς συγκόλληση επιφάνεια, τόσο περισσότερο μειώνεται η πιθανότητα να εμφανιστούν ατέλειες στη συγκόλληση. Η αμμοβολή πραγματοποιήθηκε σε διάταξη κλειστού τύπου, στο E.N.T.



**Εικ. 3.9** Καθαρισμένη επιφάνεια συγκόλλησης μετά από αμμοβολή



Εικ. 3.10 Τελική κατάσταση ελασμάτων προ συγκόλλησης

### 3.4 Συγκόλληση

#### 3.4.1 Εξοπλισμός Συγκόλλησης

Η μηχανή της συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων, με μέθοδο MCAW, είναι το μοντέλο TransPuls Synergic 4000 του οίκου Fronius®. Η χρήση του παραχωρήθηκε από την εταιρία VETA S.A. Οι τεχνικές προδιαγραφές της μηχανής, που δίνονται από τον κατασκευαστή, φαίνονται στον Πίνακα 3.12, ενώ η ίδια η μηχανή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικ. 3.11 Η μηχανή συγκόλλησης TransPuls Synergic 4000

**Πίνακας 3.12: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μηχανής TransPuls Synergic 4000**

<b>TS 4000</b>	
Line Voltage	3 x 400 V
Line Voltage Tolerance	15% +/-
Line Fusion protection	35 A
Primary continuous Power (100% d.c.)	12.4 kVA
Cos phi	0.99
<b>Welding Current Range</b>	
MIG/MAG	3 - 400 A
TIG	3 - 400 A
Electrode (MMA)	10 - 400 A
<b>Duty Cycle at 10 min 40°C</b>	
	50 % d.c. 400 A
	100% d.c 320 A
Open-Circuit voltage	70 V
Operating voltage	14.2 - 34.0 V
Degree of protection	IP 23
Dimensions L/W/H	625 / 290 / 475 mm
Weight	35.2 kg

Η μηχανή συγκόλλησης που επιλέχθηκε έχει πλήρεις δυνατότητες συνεργειακής μηχανής. Οι συνεργειακές Μηχανές Συγκόλλησης, έχουν τη δυνατότητα παροχής παλμών ρεύματος τέτοιους ώστε, τα σταγονίδια του τηγμένου μετάλλου που αποκολλώνται από το τηκόμενο ηλεκτρόδιο, να έχουν πανομοιότυπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ελέγχοντας ταυτόχρονα τη σταθερότητα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του τόξου και της ομαλής τήξης του ηλεκτροδίου.

Η δυνατότητα αυτή παρέχεται μέσω προκαθορισμένων ρυθμίσεων σχετικά με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο και την προσφερόμενη στη συγκόλληση ενέργεια και δημιουργούν τις ιδανικές συνθήκες συγκόλλησης για κάθε περίπτωση. Οι σύγχρονες συνεργειακές μηχανές, μπορούν να προσαρμοστούν σε μεγάλη ποικιλία αναλωσίμων, συμπεριλαμβανομένων σωληνοειδών ηλεκτροδίων με προστατευτική ή μεταλλική σκόνη πυρήνα.

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά των μηχανών συνεργειακής λειτουργίας είναι

1. Οι συνθήκες του παλμού επιλέγονται αυτόματα.
2. Η διάρκεια ή η συχνότητα του παλμού σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου.
3. Η ηλεκτρονική διαχείριση των παραμέτρων εξασφαλίζει ομοιόμορφη διεύθυνση συγκόλλησης και μορφή ραφής.



Στην πράξη, η συνεργειακή λειτουργία επιτρέπει στο χειριστή να προεπιλέξει το υλικό του ηλεκτροδίου και τη διάμετρό του και έπειτα να ρυθμίσει το ρυθμό παροχή ηλεκτροδίου. Η λειτουργία «ενός κομβίου» είναι το κυρίαρχο πλεονέκτημα τέτοιων συστημάτων σε σχέση με τις μη συνεργειακές – συμβατικές μηχανές συγκόλλησης.

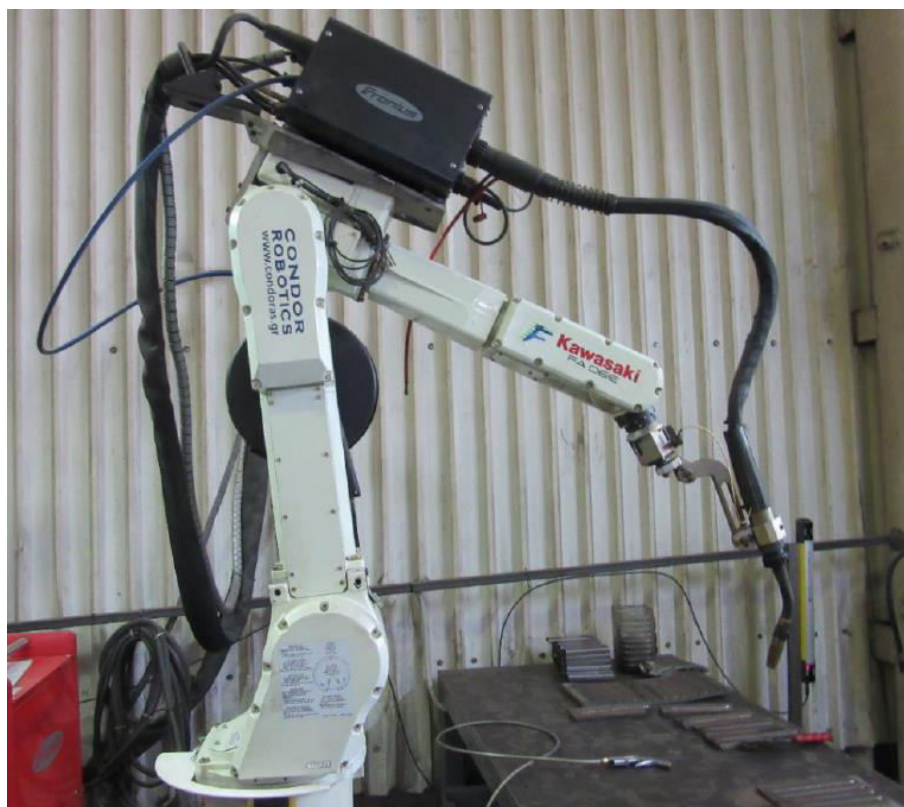
Οι συγκολλήσεις των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν με τη βοήθεια ρομποτικού βραχίονα (Εικ. 3.11). Ο ρομποτικός βραχίονας που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας Kawasaki, έχει κωδικό μοντέλου FA 06E, είναι έξι βαθμών ελευθέριας και παραχωρήθηκε επίσης για τη διεξαγωγή των πειραμάτων από την εταιρία VETA S.A. Η σταθερή ταχύτητα πυρσού συγκόλλησης εξασφαλίζεται από την ελεγχόμενη κίνηση του ρομποτικού βραχίονα.

Η διατήρηση σταθερής ταχύτητας πυρσού συγκόλλησης, παρέχει τη δυνατότητα να «κατανεμηθεί» με ισόποσο τρόπο η ενέργεια που προσδίδεται στη συγκόλληση, σε όλο το μήκος αυτής. Η διατήρηση σταθερής ενέργειας συγκόλλησης, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, κρίθηκε απαραίτητη, προκειμένου να εξαχθούν συνολικά συμπεράσματα για την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων, ωστόσο η σημασία της ενέργειας συγκόλλησης θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω.

Δεδομένου ότι η μεταλλογραφική παρατήρηση καθώς και η μέτρηση μικροσκληροτήτων καθ' όλο το μήκος των συγκολλήσεων δεν είναι δυνατές, με τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας επιτυγχάνονται συγκολλήσεις με ομοιογενή χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 3.13 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα FA 06E, όπως αυτά λαμβάνονται από τον κατασκευαστή.

**Πίνακας 3.13: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ρομποτικού Βραχίονα FA 06E**

		<b>FA 06E</b>
Degrees of Freedom		6 Axis
Maximum Reach		1500 mm
Maximum Payload		6 kg
Maximum Speed	JT1	200 °/s
	JT2	140 °/s
	JT3	200 °/s
	JT4	360 °/s
	JT5	360 °/s
	JT6	600 °/s
Repeatability		0.1 mm +/-
Mass		170 kg
Max. Linear Speed		9200 mm/s
Installation		Floor / Ceiling
Ambient Conditions	Temp.	0 - 45 °C
	Humid.	35 - 85%
	Vibr.	<0.5G



Εικ. 3.12 Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki FA 06E

Η διεξαγωγή των συγκολλήσεων με τη μέθοδο MCAW, απαιτεί την ύπαρξη προστατευτικού αερίου, προκειμένου να προστατεύεται η λίκνη της συγκόλλησης από τα στοιχεία του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η προστασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα κρίνεται απαραίτητη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη ανεπιθύμητων στοιχείων στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης που προκύπτουν από την αντίδραση διαφόρων κραματικών στοιχείων της λίκνης συγκόλλησης με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Στη διεξαγωγή των συγκολλήσεων της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε αέριο μείγμα προστασίας αργού και διοξειδίου του άνθρακα και πιο συγκεκριμένα  $Ar + 18\% CO_2$ . Η επιλογή αυτή έγινε λόγω του χρησιμοποιούμενου ηλεκτροδίου, καθώς όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ηλεκτροδίου το καταλληλότερο αέριο προστασίας για τη χρήση του ηλεκτροδίου που επιλέχτηκε είναι μείγμα  $Ar - CO_2$  με περιεκτικότητα 15 – 25%  $CO_2$ .



**Εικ. 3.13** Φιάλη μείγματος αερίου προστασίας της συγκολλητικής διάταξης. Διακρίνεται ο ρυθμιστής πίεσης που ελέγχει την παροχή του αερίου

### 3.4.2 Διεξαγωγή Συγκόλλησης – Συνθήκες

Προτού γίνει η παρουσίαση της διαδικασίας της συγκόλλησης είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν οι συνθήκες που επιλέχθηκαν, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν. Βασικός γνώμονας για την επιλογή των περισσότερων παραμέτρων των συνθήκων ήταν η προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, Heat Input (H.I.), ενώ για κάποιες άλλες τα ίδια τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Το σχετικά μεγάλο πάχος των ελασμάτων απαιτεί πολλαπλά κορδόνια για να συγκολληθούν σωστά τα ελάσματα (multipass welding). Από προηγούμενη μελέτη σε ίδια ελάσματα χάλυβα AH40 FCA που έχουν γίνει [4, 5, 21], αλλά και την γενικότερη βιβλιογραφία [27] επιλέχθηκε να γίνουν επτά (7) κορδόνια για το πάχος των ελασμάτων, ώστε να έχουμε σωστή κάλυψη της περιοχής συγκόλλησης και μείωση πιθανότητας σφαλμάτων.

Τα 7 κορδόνια ήταν το πέρασμα της ρίζας (root pass) και έξι διαδοχικά περάσματα επικάλυψης (cover passes). Η εναπόθεση του μετάλλου συγκόλλησης έγινε με γραμμική κίνηση του πυρσού συγκόλλησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρώτο και το τελευταίο πέρασμα μιας συμβολής συγκόλλησης χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι επιθυμούμε ικανοποιητική ενίσχυση της ρίζας, όχι ελλιπή αλλά ούτε και υπερβολική, με άμεσο στόχο την απόκτηση ραφής υψηλής αντοχής και καλών μηχανικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, επιθυμούμε ομαλή και ικανοποιητική όψη ραφής για το τελικό πέρασμα επικάλυψης, με απουσία τυπικών σφαλμάτων υποκοπής (undercut) και υπερκάλυψης (overlap).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή διεξαγωγή των περασμάτων, κυρίως της ρίζας και του τελικού περάσματος επικάλυψης (ήταν δυο στην περίπτωση μας, το έκτο και το έβδομο), αποτελεί η απόλυτη ευθυγράμμιση της πορείας του πυρσού συγκόλλησης με τη διεύθυνση της συμβολής. Ιδιαίτερα για το πέρασμα της ρίζας θα πρέπει, επίσης, τα δοκίμια να ισαπέχουν καθ' όλο το μήκος της συμβολής, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει μια επιτυχημένη συγκόλληση πόντας, όπως αυτή που προηγήθηκε. Οι ενδεχόμενες αποκλίσεις της πορείας συγκόλλησης έχουν ως άμεσο αντίκτυπο τις διαφοροποιήσεις της κατανομής τηγμένου υλικού κατά μήκος της ραφής, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες για τη παρούσα διαδικασία.

Ακολούθως, τα ενδιάμεσα περάσματα επικάλυψης εκτελούνται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε η επιφάνεια, που προσδίδουν στο τέλος του 5<sup>ου</sup> κορδονιού να είναι όσο το δυνατόν πιο ισοεπίπεδη γίνεται. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι επιθυμητή, επειδή καθιστά ευχερέστερη και αποδοτικότερη την εναπόθεση μετάλλου συγκόλλησης στα τελικά περάσματα επικάλυψης. Αξίζει να αναλογιστεί κανείς ότι ανισοεπίπεδη επιφάνεια στο τέλος του 5<sup>ου</sup> κορδονιού δύναται να οδηγήσει σε ικανοποιητική ενίσχυση της μιας άκρης (toe) και στην εμφάνιση υποκοπής στην έτερη. Γενικότερα υποβόσκουν διάφορες εκδοχές εμφάνισης σφαλμάτων, υπό τη συνθήκη ύπαρξης της ανωτέρω καταστάσεως.

Αρχικά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ορθής πολικότητας (DCEP), καθώς αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθεί για το ηλεκτρόδιο που επιλέχθηκε. Επιλέχθηκε όλες οι εναποθέσεις να γίνουν με την *forehand* τεχνική, δηλαδή ο βραχίονας, και πιο συγκεκριμένα το ακροφύσιο παροχής του ηλεκτροδίου, να κινείται προς την ίδια φορά με τη φορά εναπόθεσης του ηλεκτροδίου στη λίμνη της συγκόλλησης. Αυτό λόγω καλύτερης όψης ραφής και ομαλότερης εναπόθεσης υλικού σε σχέση με τη *backhand* τεχνική [54]. Το ακροφύσιο παροχής του ηλεκτροδίου είχε γωνιά με τον κατακόρυφο άξονα, περίπου ίση με 15 μοίρες, η οποία θεωρείται βέλτιστη [54].

Εν συνεχεία, επιλέχθηκε να μην γίνει προθέρμανση στα προς συγκόλληση ελάσματα. Αυτό γιατί σύμφωνα με τους δείκτες συγκολλησιμότητάς τους, CE<sub>ΠW</sub> και Pcm, αλλά και τα πάχη τους, δεν ήταν αναγκαία η προθέρμανσή τους [15]. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από το πρόγραμμα υπολογισμού που παρέχει η Japan Welding Engineering Society για τον υπολογισμό της απαιτούμενης προθέρμανσης στην ιστοσελίδα της [23].

Όπως αναφέρθηκε, ο κυριότερος γνώμονας για τον καθορισμό των παραμέτρων της συγκόλλησης ήταν η προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, Heat Input (H.I.), δηλαδή επιλέχθηκαν παράμετροι ώστε να επιτευχθεί συγκεκριμένη τιμή για την προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, η οποία είναι από τα σημαντικότερα μεγέθη της συγκόλλησης, αφού συνδέει πολύ σημαντικές παραμέτρους, όπως την ένταση του ρεύματος *I*, την τάση *V* και την ταχύτητα κίνησης του πυρσού συγκόλλησης. Η προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Heat Input} = Q = k \cdot V \cdot I/s$$

Όπου:

- Heat Input (H.I.), *Q* το ποσό της προσδιδόμενης ενέργειας ανά μονάδα μήκους
- *V* η τάση της μηχανής συγκόλλησης
- *I* η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος
- *s* η ταχύτητα κίνησης του πυρσού συγκόλλησης
- *k* συντελεστής που εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης. Για τη μέθοδο MCAW, *k*=0.8 [15, 25].

Συγκεκριμένα, για την εκτέλεση των συγκολλήσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε η προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους να ισούται περίπου με 1 kJ/mm, καθώς έχει βρεθεί ότι οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν καλύτερη δυσθραυστότητα όταν χρησιμοποιείται χαμηλή *Q* [50].

Η επιλογή αυτή έγινε βάσει προηγούμενων μελετών σε ίδια ελάσματα χάλυβα AH40 FCA που έχουν γίνει [4, 5, 21], σχετικά με την επίδραση της προσδιδόμενης ενέργειας ανά μονάδα μήκους, στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα βρέθηκαν τα παρακάτω για την προαναφερθείσα τιμή, σε σύγκριση τις με άλλες τιμές για την *Q*:

- Παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές μικροσκληροτήτων τόσο στην περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης, όσο και στην περιοχή της Ζώνης Τήξης. Δηλαδή η χαμηλή ενέργεια συγκόλλησης φαίνεται να οδηγεί σε τιμές μικροσκληρότητας που κυμαίνονται γύρω από τη μικροσκληρότητα του μετάλλου βάσης (ίσες ή μεγαλύτερες τιμές), ενώ η αύξηση της προσδιδόμενης ενέργειας οδηγεί σε πτώση των τιμών των μικροσκληροτήτων σε σχέση με τη μικροσκληρότητα του μετάλλου βάσης [21].
- Στην περιοχή συγκόλλησης είχε παρατηρηθεί πλήρης ανακρυστάλλωση για αυξημένες τιμές  $Q$ , ενώ για  $Q=1$  kJ/mm, μερική ανακρυστάλλωση με καλύτερες δομές (φερριτομπαινιτικές έναντι φερριτοπερλιτικών), καθώς και υψηλότερες τιμές σκληροτήτων, κοντινές με του μετάλλου βάσης, με λογική αντίστοιχη όσων παραιτήθηκαν και στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη [21].
- Η αύξηση της ενέργειας συγκόλλησης, επιδρά στην αύξηση του εύρους της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης στην περιοχή του μέσου πάχους των Δοκιμίων, όπως είναι προφανές. Το φαινόμενο αυτό είναι ανεπιθύμητο, καθώς η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη είναι ευαίσθητη περιοχή σε συγκολλήσεις [7, 10, 11, 26], στην οποία συχνά παρουσιάζεται είτε μείωση είτε αύξηση σκληρότητας [49], ψυχρή ρωγμάτωση και μειωμένη αντοχή σε κόπωση, και είναι επιθυμητό να έχει κατά το δυνατόν μικρό εύρος [21].
- Για  $Q=1$  kJ/mm, το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη ήταν πολύ κοντά (ίσο ή και μικρότερο) σε αυτό του μετάλλου βάσης, και γενικά πολύ μικρό, ενώ για αύξησή της  $Q$ , το μέγεθος των κόκκων παρουσίαζε αύξησή [4].
- Για  $Q \leq 1.5$  kJ/mm, παρατηρήθηκαν οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες στον εφελκυσμό. Συγκεκριμένα με αύξηση της προσδιδόμενης ενέργειας ανά μονάδα μήκους παρατηρήθηκε μείωση των ορίων διαρροής και θραύσης, ενώ μετρά το  $Q=1.5$  kJ/mm, υπήρξε σταθεροποίηση, ωστόσο για αυξημένες τιμές  $Q$ , η επιμήκυνση αυξανόταν. Εντούτοις δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερος χαμηλές τιμές επιμήκυνσης για χαμηλή  $Q$  και επομένως ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικών ιδιοτήτων, δηλαδή αυξημένα όρια διαρροής και θραύσης με επαρκή επιμήκυνση, παρουσιάστηκε για  $Q \leq 1.5$  kJ/mm [4].
- Η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη μπορούσε να δεχτεί μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας, κάτι που προέκυψε από δοκιμές Charpy, για χαμηλές τιμές  $Q$ , ενώ με αύξησή τους είχαμε μείωση της δυσθραυστότητας [5].



Εν τέλει, βάσει της πειραματικής διαδικασίας που είχε γίνει [4, 5, 21], βρέθηκε ότι η χαμηλή ενέργεια συγκόλλησης, φαίνεται να αποδίδει δοκίμια με τη βέλτιστη μικροδομή καθώς και με βέλτιστη κατανομή των μικροσκληροτήτων, τόσο στην περιοχή της ΘΕΖ όσο και στην περιοχή της Ζώνης Τήξης, ενώ έδωσε και επιθυμητά μεγέθη κόκκων, καθώς στόχος είναι το μέγεθος των κόκκων να είναι παραπλήσιο με αυτό του μετάλλου βάσης [28]. Τέλος, με  $Q \leq 1.5$  kJ/mm επιτεύχθηκαν και οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες στον εφελκυσμό και η βέλτιστη δυσθραυστότητα.

Με στόχο λοιπόν να επιτευχθεί  $Q=1$  kJ/mm, έπρεπε να καθοριστούν οι παράμετροι τάσης, ρεύματος και ταχύτητας πυρσού συγκόλλησης, ώστε να δώσουν την επιθυμητή τιμή. Αυτό συνέβη ως εξής:

- Για το ρεύμα χρησιμοποιήθηκε τιμή μεγαλύτερη των 220-230 A, που είναι το όριο μετάβασης από μεταφορές υλικού με σταγόνες (globular transfer) σε μεταφορά υλικού με σταγονίδια spray transfer, ώστε να εκμεταλλευθούν τα πλεονεκτήματα της δεύτερης [29, 30]. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ρεύμα περί τα 270 A για περισσότερη μεταφορά υλικού.
- Η τάση καθορίστηκε αυτομάτως από τη χρησιμοποιούμενη μηχανή TransPuls Synergic 4000, στα 28,9V.

Η ταχύτητα του πυρσού συγκόλλησης δεν ήταν σταθερή σε κάθε κορδόνι της συγκόλλησης. Αρχικά για τη ρίζα της συγκόλλησης, ήταν απαραίτητη μικρότερη ταχύτητα, συνοδευόμενη από ελαφρώς αυξημένη  $Q$ . Κατά τη διεξαγωγή συγκολλήσεων, δεδομένης της κατάλληλης επιλογής παραμέτρων και της σωστής ευθυγράμμισης της πορείας του πυρσού συγκόλλησης με τη διεύθυνση της συμβολής, συχνά παρουσιάζεται ελλιπής διείσδυση του μετάλλου εναπόθεσης στη ρίζα της συγκόλλησης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με μείωση της ταχύτητας, στα 25 cm/min. Επιλέχθηκε η τιμή  $Q = 1.5$  kJ/mm έτσι ώστε να παρέχεται επαρκής ενέργεια προκειμένου το κορδόνι της ρίζας να διεξαχθεί σωστά και χωρίς σφάλματα όπως ατελής τήξη ή εκτοξεύσεις. Επίσης η αυξημένη ενέργεια εξασφάλισε την πλήρη επικάλυψη του διάκενου των 5 mm. Στα επόμενα τρία κορδόνια η ταχύτητα ανέβηκε στα 37 cm/min, ενώ στα τρία τελευταία ανέβηκε στα 40 cm/min. Σε όλη τη διάρκεια, εξαιρουμένου του πρώτου κορδονιού, είχαμε προσδιορισμένη ενέργεια ανά μονάδα μήκους ίση με 1 kJ/mm. Ο λόγος που επιλέχθηκε να γίνει αύξηση ρεύματος και ταχύτητας στα τελευταία κορδόνια, όπου είναι εφικτό γιατί είναι ευκολότερη η εναπόθεση του προστιθέμενου μετάλλου [28], διότι αυξήσεις των παραμέτρων αυτών έχει βρεθεί να ισχυροποιεί τις μηχανικές ιδιότητες (όριο διαρροής, αντοχή) του μετάλλου συγκόλλησης [31].

Τέλος, αναφέρεται ότι επιλέχθηκε ρυθμός παροχής ηλεκτροδίου ίσος με 8.8 m/min και ρυθμός παροχής προστατευτικού αερίου ίσος με 17 lt/min. Αμφότερες οι παράμετροι καθορίστηκαν από τη χρησιμοποιούμενη μηχανή TransPuls Synergic 4000. Στον παρακάτω Πίνακα 3.14 συνοψίζονται οι παραπάνω επιλογές σχετικά με τις παραμέτρους της συγκόλλησης

Πίνακας 3.14: Συνθήκες Συγκόλλησης

Συνθήκες Συγκόλλησης				
Κορδόνι	Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ταχύτητα (cm/min)	Πρόσδοση Θερμότητας (kJ/mm)
1	270-290	28.9	25	1.5
2	270-290	28.9	37	1.0
3	270-290	28.9	37	1.0
4	270-290	28.9	37	1.0
5	270-290	28.9	37	1.0
6	270-290	28.9	37	1.0
7	270-290	28.9	37	1.0
<b>Ρυθμός παροχής ηλεκτροδίου (m/min)</b>				8.8
<b>Ρυθμός παροχής προστατευτικού αερίου (lt/min)</b>				17.0

Μετά τον καθορισμό των παραμέτρων που φαίνονται στους πίνακες παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις των δοκιμίων.

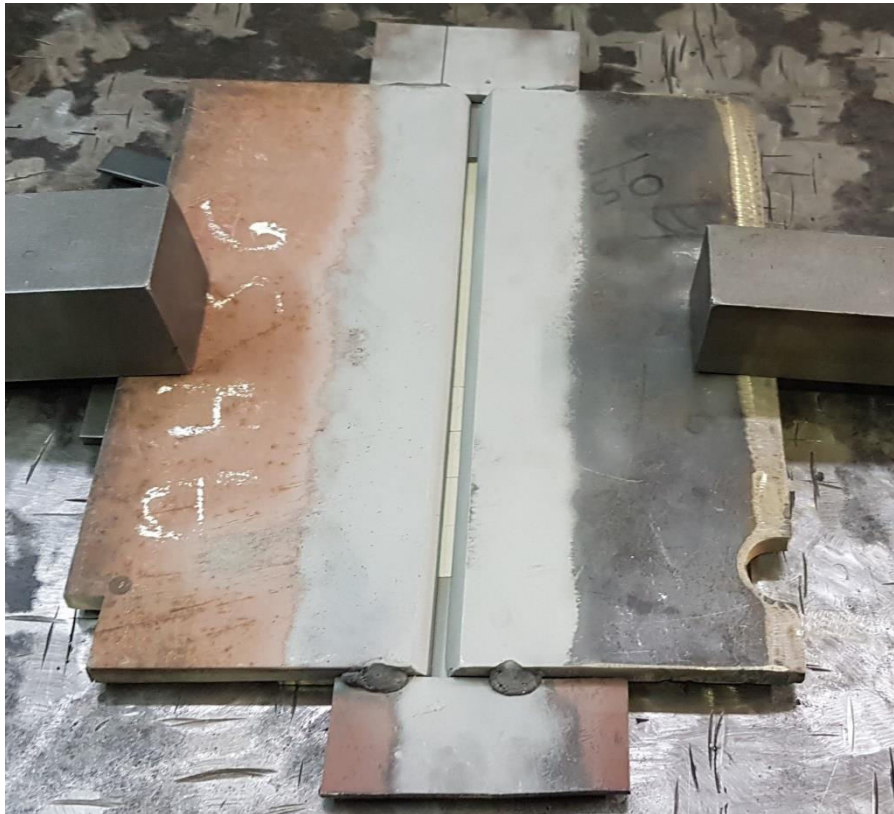
Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο μεταλλικό πάγκο που βρίσκεται δίπλα στο ρομποτικό βραχίονα και στερεώθηκαν έτσι ώστε να διασφαλίζεται αγωγή επαφή (με μεταλλικούς τάκους) με αυτόν. Σημειώνεται ότι ο ακροδέκτης που κλείνει το κύκλωμα είναι συνδεδεμένος στον μεταλλικό πάγκο έτσι ώστε το ηλεκτρικό κύκλωμα που απαιτείται για την έναρξη της συγκόλλησης να είναι μόνιμα κλειστό.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του εδαφίου, οι συγκολλήσεις που διεξάγονται στα πλαίσια της διπλωματικής, είναι συγκολλήσεις πολλαπλών κορδονιών (multipass welding). Αυτό σημαίνει ότι τα ελάσματα του χάλυβα δέχονται μεγάλα, επαναλαμβανόμενα θερμικά φορτία. Τα δοκίμια του χάλυβα δεχόμενα αυτά τα φορτία, διαστέλλονταν και συστέλλονταν μετά από κάθε κορδόνι με αποτέλεσμα να αποκτήσουν μόνιμη γωνιακή παραμόρφωση. Η πιθανή πάκτωση των δοκιμίων θα μπορούσε να αποτρέψει τη δημιουργία σχετικής γωνίας στα ελάσματα, αλλά μια τέτοια διαδικασία θα οδηγούσε στην υπέρθεση των παραμενουσών τάσεων στα δοκίμια [2, 28]. Ωστόσο τοποθετήθηκαν βάρη πάνω στα προς συγκόλληση ελάσματα, μετρό που είχε μικρή ή και αμελητέα επίδραση στη μείωση της γωνιακής παραμόρφωσης, δεν προκαλούσε όμως γωνιακές παραμορφώσεις στα ελάσματα.

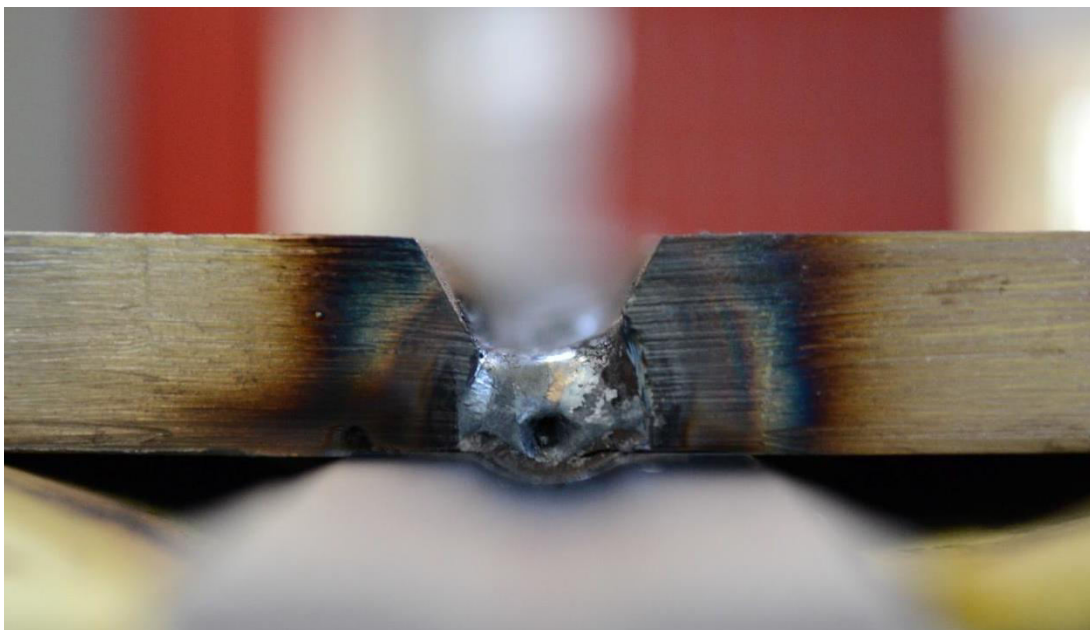
Η εναπόθεση κάθε κορδονιού γινόταν 5-8 λεπτά, έπειτα από την εναπόθεση του προηγούμενου. Η διαδικασία αυτή γίνεται για να υπάρχει αρκετός χρόνος απόψυξης του εναποτιθέμενου κορδονιού κάτω από τους 250°C. Η μέτρηση των θερμοκρασιών γινόταν με τη χρήση θερμομέτρου laser. Στο χρονικό διάστημα, που μεσολαβούσε μεταξύ των δύο περασμάτων, λάμβανε χώρα ο καθαρισμός της ραφής με πεπιεσμένο αέρα, η μακροσκοπική παρατήρηση της και ο προγραμματισμός του ακόλουθου περάσματος. Εδάφιο, προς περαιτέρω ανάλυση, αποτελεί το χρονικό διάστημα ψύξης,



το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών περασμάτων και η επίδρασή του στη σκληρότητα με μηχανικές ιδιότητες και τις αποκτηθείσες παραμορφώσεις της συγκόλλησης. Ακολουθούν εικόνες από τη διαδικασία της συγκόλλησης.



**Εικ. 3.14** Η διάταξη των ελασμάτων πριν την συγκόλληση. Διακρίνεται η επικαλύπτρα και τα βάρη που τοποθετήθηκαν για μείωση της παραμόρφωσης.



**Εικ. 3.15** Η ρίζα της συγκόλλησης. Παρατηρήθηκε πλήρες γέμισμα του διάκενου και έλλειψη σφαλμάτων με τις επιλεγθείσες συνθήκες.



**Εικ. 3.16α, 3.16β** Η επιφάνεια της συγκόλλησης μετά το 5<sup>ο</sup> κορδόνι (α) και μετά τα δυο τελευταία κορδόνια (β). Στο 5<sup>ο</sup> κορδόνι παρατηρείται η απαιτούμενη ομαλή επιφάνεια για την εναπόθεση των δυο τελευταίων κορδονιών, τα οποία με τη σειρά τους είναι ομαλά, ελλείπει σφαλμάτων.



**Εικ. 3.17** Η ρίζα της συγκόλλησης από την κάτω μεριά, μετρά την αφαίρεση της επικάλυπτρα. Και εδώ παρατηρείται ομαλή επιφάνεια, ελλείπει σφαλμάτων.

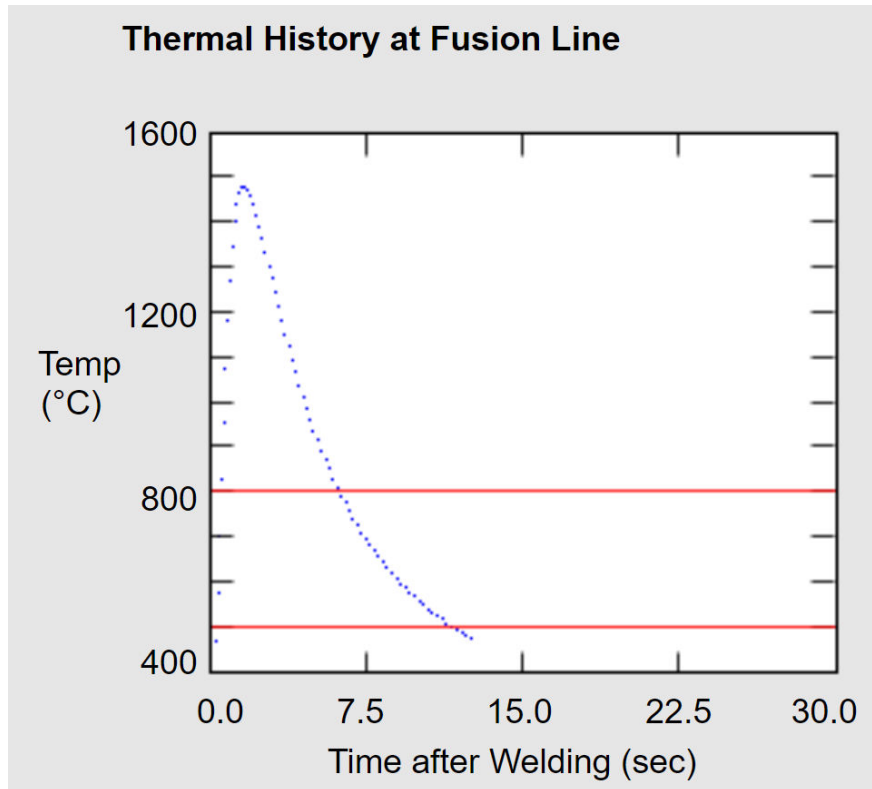
Τα τελικά κορδόνια επικάλυψης έχουν καλύψει πλήρως την επιφάνεια ραφής, χωρίς υπερβολική ή ελλιπή εναπόθεση υλικού ή άλλα σφάλματα όπως επιφανειακοί πόροι. Όπως ήταν αναμενόμενο μετρά την συγκόλληση τα ελάσματα είχαν πάρει γωνιακή παραμόρφωση. Η γωνιακή παραμόρφωση μετρήθηκε περίπου ίση με 7 μοίρες.

### 3.4.3 Θερμικός Κύκλος Συγκόλλησης – Ρυθμός Απόψυξης

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούμε στον θερμικό κύκλο της συγκόλλησης. Ένας τυπικός θερμικός κύκλος συγκόλλησης τόξου αποτελείται από απότομη θέρμανση (πολλές εκατοντάδες βαθμοί ανά δευτερόλεπτο) έως μια θερμοκρασία κορυφής, ακολουθούμενος από σχετικά ταχεία απόψυξη έως θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι αλλαγές της μικροδομής τόσο στο μέταλλο συγκόλλησης όσο και στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη, εξαρτώνται σημαντικά από τους προαναφερθέντες ρυθμούς θέρμανσης και απόψυξης (κυρίως), οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται από την προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους (Heat Input), από το πάχος των συγκολλημένων ελασμάτων και τις θερμοκρασίες των ενδιάμεσων κορδονιών, αφού μέσω αυτών γίνεται αναθέρμανση του στερεοποιημένου μετάλλου και της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης, που αλλάζει τη μικροδομή τους. Οι αλλαγές στη μικροδομή με τη σειρά τους, επηρεάζουν τη σκληρότητα και φυσικά τις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου μετάλλου [2, 3, 32].

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι ο καθορισμός της ανώτατης θερμοκρασίας της συγκόλλησης (peak temperature), καθώς και του ρυθμού απόψυξης (cooling rate) είναι υψίστης σημασίας. Η ανώτατη θερμοκρασία συγκόλλησης είναι σαφές μέγεθος, αφού αποτελείται από μια τιμή, ωστόσο ο ρυθμός απόψυξης είναι πιο ασαφής. Για το λόγο αυτό είθισται να εκφράζεται για μαγγανιούχους και μικροκραματωμένους χάλυβες χαμηλού άνθρακα με τον ορό  $t_{8/5}(s)$ , που είναι ο χρόνος απόψυξης αναμεσα στους  $800^{\circ}\text{C}$  και τους  $500^{\circ}\text{C}$ . Αυτό γιατί οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες αυτούς ξεκινούν περίπου στους  $800^{\circ}\text{C}$  και τελειώνουν στους  $500^{\circ}\text{C}$  [15]. Ωστόσο ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών κάθε άλλο παρά εύκολος είναι, καθώς δεν γίνεται να μετρηθούν με κάποιο τρόπο, επομένως είναι αναγκαία η μοντελοποίηση του φαινομένου και η προσέγγισή τους μέσω του μοντέλου. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες σχετικά με τα παραπάνω [32, 33, 34, 35] και οι περισσότερες εξ αυτών στηρίζονται στην αξιοποίηση και των εξισώσεων Rosenthal [33, 34] και την ανάπτυξη διορθωτικών παραγόντων πάνω σε αυτές, ώστε να προσομοιάζεται καλύτερα το φαινόμενο της συγκόλλησης [32, 35].

Με αυτή τη λογική λειτουργεί και το εργαλείο υπολογισμού της θερμικής ιστορίας της συγκόλλησης και του ρυθμού απόψυξης, της Japan Welding Engineering Society [23], το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν αποτελέσματα για την παρούσα διπλωματική, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Τονίζεται ότι ο χρόνος  $t_{8/5}(s)$ , από το εν λόγω εργαλείο υπολογίζεται για bead on plate συγκολλήσεις.



Welding Condition Input	
Current(A) 50<Amp<5000	270
Voltage(V) 5<Volt<100	28.9
Velocity(cm/min) 1<Velocity<1000	37
Arc Efficiency 0.3<Eata<1.0	0.8
Thickness(mm) 5<Thick<200	13
Ambient Temp(°C) -50<Temp<50	20
Preheat&Interpass(°C) -50<Temp<400	0
Welding Condition Output	
Arc Energy,AE(kJ/mm)	1.265
Heat Input,HI(kJ/mm)	1.012
Weld Cooling Time,t8/5(s)	<b>5.536</b>

**Εικ. 3.18** Θερμική ιστορία και ρυθμός απόψυξης συγκόλλησης.



### 3.5 Προετοιμασία Βέλτιστων Δοκιμίων

Μετά τη διεξαγωγή της συγκόλλησης, κόπηκε υδροκοπή ένα τμήμα εγκάρσιο στη διεύθυνση της συγκόλλησης, αρκετά πλατύ, ώστε να περιλαμβάνει όλες τις δημιουργούμενες ζώνες, δηλαδή τα Μέταλλα Βάσης, τις Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες και φυσικά τη Ζώνη Τήξης. Κατόπιν κοπήκαν δοκίμια από το κομμάτι αυτό, συγκεκριμένα τρία, με τη δίστομο Discotom 50, της εταιρίας Struers, του Ε.Ν.Τ. η οποία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικ. 3.19** Δισκοτόμος Struers Discotom 50, του Ε.Ν.Τ.

Ο λόγος που κόπηκαν αρκετά κομμάτια ήταν για να μπορούν να γίνουν ξεχωριστά στο καθένα μακροσκοπικές, μικροσκοπικές παρατηρήσεις και μετρήσεις σκληρότητας, ζητήματα τα οποία αναλύονται παρακάτω. Ωστόσο για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειάς τους. Τα βήματα της διαδικασίας της προετοιμασίας περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

#### 3.5.1 Λείανση

Σκοπός της λείανσης είναι η εξάλειψη ενδεχομένων επιφανειακών ανωμαλιών που φέρει η επιφάνεια του δοκιμίου μετά από την κοπή στη δισκοτόμο, προκειμένου αυτή να καταστεί λεία και καθαρή. Η λείανση των δοκιμίων έγινε με τη χρήση της λειαντικής μηχανής Struers LaboPol – 5, περιστρεφόμενου πλατό, που διαθέτει το Ε.Ν.Τ., η οποία παρουσιάζεται ακολούθως. Για τη σωστή λείανση των δοκιμίων, απαιτείται η χρήση λειαντικών χαρτιών καρβιδίου του Πυριτίου (SiC) αυξανόμενης κοκκομετρίας, που τοποθετούνται στο περιστρεφόμενο πλατό της μηχανής λείανσης.

Η επιφάνεια των δοκιμίων μετά την κοπή τους στο δισκοτόμο απαιτεί την έναρξη της λείανσης με χαρτί τραχύτητας P# 80. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εξής ακολουθία λειαντικών χαρτιών: P# 120, P# 180, P# 220, P# 320, P# 500, P# 800, P# 1000, P# 1200, P# 2000, P# 4000. Ο κατασκευαστής των χαρτιών προτείνει ενδεικτικά τη λείανση της επιφάνειας για 3 – 5 λεπτά με κάθε λειαντικό χαρτί, ωστόσο λειάνθηκαν για περισσότερη ώρα με τα δυο τελευταία χαρτιά για επίτευξη πιο λείας επιφάνειας. Η μηχανή ρυθμίστηκε να περιστρέφεται στις 250 rpm για τα πρώτα λειαντικά χαρτιά, ενώ οι στροφές ελαττώθηκαν στα τελευταία λειαντικά χαρτιά κάτω από τα 200 rpm. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της λείανσης παρέχεται τροφοδοσία νερού στον περιστρεφόμενο δίσκο, με μεγαλύτερη παροχή για τα πρώτα λειαντικά χαρτιά και μικρότερη για τα τελευταία, η οποία βοηθά στην απομάκρυνση των υπολειμμάτων μετάλλου και λειαντικού χαρτιού από την διεπιφάνεια λείανσης. Τονίζεται ότι για καλύτερη λείανση προτείνεται τα δοκίμια να εγκιβωτιστούν και κατόπιν να στερεωθούν στη μηχανή συγκόλλησης. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό, δεδομένου του μεγάλου μεγέθους των δοκιμίων που κοπήκαν (από μέταλλο βάσης σε μέταλλο βάσης), επομένως τόσο η λείανση, όσο και οι επόμενες επιφανειακές κατεργασίες (στίλβωση) έγιναν χειρωνακτικά, με επιβολή δηλαδή σταθερής - κατά το δυνατόν - πίεσης στο δοκίμιο, πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο. Είναι προφανές ότι εφόσον ο στόχος είναι μια καθαρή και λεία επιφάνεια, που να θυμίζει καθρέπτη, σε κάθε λείανση με άλλο χαρτί, έπρεπε να εξαλειφθούν οι γραμμές λείανσης του προηγούμενου χαρτιού, έτσι ώστε μετρά το πέρας όλης της διαδικασίας να αποκτηθεί επιφάνεια που να παρουσιάζει στοιχειώσε καθρεπτίσσιμη, χωρίς χαράξεις. Για το λόγο αυτό πολλές φορές προέκυψε η ανάγκη για επαναληπτικούς κύκλους λείανσης, έως ωού να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, δεδομένου ότι και με χειρωνακτική λείανση, καθίσταται δυσκολότερο να γίνει σωστά κάθε πέραςμα, αφού η επιβολή πίεσης και η επιπεδότητα του δοκιμίου είναι προφανώς λιγότερο σταθερές από ότι αυτές που θα επέβαλε η πάκτωση εγκιβωτισμένου δοκιμίου. Εφόσον οι διαδικασίες λείανσης ολοκληρωθούν, ακολουθεί η στίλβωση της επιφάνειας του δοκιμίου.

### 3.5.2 Στίλβωση

Μετά το πέρας της λείανσης των δοκιμίων, απαιτείται η στίλβωσή του προκειμένου να εξαλειφθούν οι λειαντικές γραμμές που προκύπτουν από τη διαδικασία της λείανσης (όσες έχουν μείνει) και το δοκίμιο να αποκτήσει όψη καθρέπτη. Για τη στίλβωση των δοκιμίων, τοποθετείται στο περιστρεφόμενο πλατό της λειαντικής μηχανής, δίσκος με επιφάνεια βελούδου και πάνω σε αυτόν πάστα αλούμινας (οξείδιο του αλουμινίου – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) με κοκκομετρία 1μm, αρχικά, και 0.1μm έπειτα. Η διαδικασία της στίλβωσης απαιτεί σχετικά χαμηλές στροφές μηχανής (περίπου 150-200 rpm) και ο χρόνος που εκτίθεται κάθε δοκίμιο σε κάθε μία κοκκομετρία είναι και σε αυτήν την περίπτωση 3-5 λεπτά.



Εικ. 3.20 Λειαντική μηχανής Struers LaboPol – 5του Ε.Ν.Τ.

### 3.5.3 Χημική Προσβολή

Μετά τη λείανση και τη στίλβωση των δοκιμίων, οπότε έχουν πλέον αποκτήσει λεία και επίπεδη επιφάνεια, απαιτείται η χημική προσβολή τους προκειμένου να αναδειχθεί η μικροδομή του μετάλλου και του προφίλ της συγκόλλησης και έπειτα να μελετηθούν στο μικροσκόπιο. Επισημαίνεται ότι η χημική προσβολή πρέπει να γίνει σε μικρό χρόνο μετρά από τις διαδικασίες λείανσης και στίλβωσης, καθώς αν περάσει ώρα από το πέρας των διαδικασιών αυτών το δοκίμιο θα έχει την τάση στρώματος παθητικοποίησης, το οποίο πρέπει να μην υπάρχει κατά τη διάρκεια της χημικής προσβολής, αφού το αντιδραστήριο δεν θα δράσει ομοιόμορφα σε κάθε περιοχή του δοκιμίου [42].

Η χημική προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας γίνεται με σκοπό να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες της μικροδομής του υλικού, κυρίως με τη μέθοδο της οπτικής μικροσκοπίας. Η χημική προσβολή στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε μικροδομικά συστατικό έχει διαφορετική συμπεριφορά σε διάβρωση. Τα πιο ηλεκτροθετικά διαβρώνονται ευκολότερα και τα πιο ηλεκτραρνητικά διαβρώνονται δυσκολότερα. Με τη χημική προσβολή μιας επιφάνειας, που αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο, τα διαφορετικά συστατικά της επιφάνειας διαβρώνονται εκλεκτικά, με αποτέλεσμα να αντανακλούν διαφορετικά το φως και συνεπώς να εμφανίζονται διαφορετικά στο οπτικό μικροσκόπιο. Έτσι για παράδειγμα όταν ένα συστατικό αντανακλά πλήρως το φως εμφανίζεται να έχει ανοιχτό χρώμα. Η προσβολή γίνεται με εμβάπτιση του υλικού σε κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως με βάση την εμπειρία [42].

Υπάρχουν πολλά χημικά αντιδραστήρια για μικροκραματωμένους χάλυβες χαμηλού άνθρακα [36, 39, 42]. Υπάρχουν διάφορες ομαδοποιήσεις, ωστόσο μια βασική λογική διαχωρισμού είναι ανάλογα με την αρχή προσβολής, δηλαδή με το τι στοχεύει κάθε αντιδραστήριο. Επί παραδείγματι, να εμφανίσει καρβίδια ή όρια κόκκων ή και τα δυο ή να στοχεύει σε συγκεκριμένο “χρωματισμό” συγκεκριμένων φάσεων και μικρογραφικών συστατικών. Επομένως, ανάλογα με το ποιες φάσεις προσβάλλει, αλλά και με ποιο τρόπο τις αναδεικνύει κάθε αντιδραστήριο, καθίσταται δυνατό να παρατηρηθούν κάθε φορά διαφορετικά στοιχεία στην υπό μελέτη μικροδομή. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω του ενός αντιδραστήρια, στην προσπάθεια να υπάρξει μια πιο σφαιρική και πλήρης εικόνα της υπό μελέτη μικροδομής. Αν και όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, στο τμήμα των αποτελεσμάτων, δεν εξήχθησαν περαιτέρω συμπεράσματα από τα παραπάνω αντιδραστήρια, πέραν του βασικότερου (Nital 2%), κρίνεται σημαντικό για λόγους πληρότητας, αλλά και για μελλοντικές μελέτες, να παρατεθούν όλα όσα χρησιμοποιήθηκαν, τα χαρακτηριστικά τους, η σύστασή τους και ο τρόπος παρασκευής τους, στοιχεία αναγκαία για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και την κατάλληλη χρήση κάθε αντιδραστήριου. Σημαντικό είναι επίσης να είναι γνωστό ποιες φάσεις προσβάλλει το καθένα και πώς τις εμφανίζει [36, 39, 42].

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν. Στο σημείο αυτό γίνονται αναφορές σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την παρασκευή του κάθε αντιδραστήριου, όπως αυτά μελετήθηκαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, αλλά και για τους χρόνους προσβολής στους οποίους υποβλήθηκαν τα δοκίμια. Επισημαίνεται ότι, καθώς η συγκόλληση είναι ετερογενής και τα Μέταλλα Βάσης έχουν ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους για κατάλληλη χημική προσβολή, η διαδικασία εφαρμόστηκε όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία [42] για περιπτώσεις όπου ο χρόνος διάβρωσης δεν είναι γνωστός ή πλήρως καθορισμένος, δηλαδή με διαδοχικά μικρά διαστήματα έκθεσης στο αντιδραστήριο 20-25 δευτερολέπτων, έως ότου να κριθεί μέσω παρατήρησης ότι έχει γίνει επαρκής χημική προσβολή.

- Nital 2%

Το χημικό αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε κατά βάση για τη χημική προσβολή των δοκιμίων είναι το διάλυμα Nital 2% το οποίο αποτελείται από 2 ml Νιτρικό Οξύ ( $\text{HNO}_3$ ) και 98 ml καθαρή Αιθανόλη ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). Το Nital αποτελεί το πλέον σύνηθες αντιδραστήριο χημικής προσβολής για χάλυβες και κατατάσσεται στα αντιδραστήρια εμφάνισης των ορίων των κόκκων του φερρίτη και κατά περιπτώσεις του μαρτενσίτη. Κατά τη διάρκεια της χημικής προσβολής υπάρχει κίνδυνος να προσβληθεί περισσότερο από ότι πρέπει η προετοιμασμένη επιφάνεια με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η στερεοσκοπική ή μικροσκοπική της παρατήρηση.



Η περίπτωση να συμβεί αυτό είναι συνάρτηση της δραστηριότητας του διαλύματος και του χρόνου που εκτίθεται η επιφάνεια του δοκιμίου σε αυτό. Τα δοκίμια στη συγκεκριμένη διαδικασία εκτέθηκαν στο διάλυμα του Nital 2% για περίπου 65 δευτερόλεπτα συνολικά και έπειτα η επιφάνεια ξεπλύθηκε με καθαρή Αιθανόλη και στεγνώθηκε με τη βοήθεια πιστολιού θερμού αέρα [39, 40, 42].

- LePera's Reagent

Το συγκεκριμένο χημικό αντιδραστήριο αναπτύχθηκε για τον καθορισμό μαρτενσιτικών και μπαινιτικών δομών σε διφασικούς χάλυβες και εν γενεί σε μικροκρατωμένους χάλυβες χαμηλού άνθρακα. Αποτελείται από μεταδιθειώδες Νάτριο ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) περιεκτικότητας 1% σε υδατικό διάλυμα μαζί με 4% Πικρικό Οξύ ( $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$ ) σε καθαρή Αιθανόλη ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). Με το συγκεκριμένο αντιδραστήριο ο μαρτενσίτης εμφανίζεται λευκός, ο μπαινίτης μαύρος και ο φερρίτης σε αποχρώσεις του γκρι, χωρίς να εμφανίζει τα όρια των κόκκων του φερρίτη. Κύρια χρησιμότητα του παρόντος αντιδραστήριου είναι να μπορεί ο μελετητής να καθορίσει την ύπαρξη και τα ποσοστά φάσεων μαρτενσίτη και μπαινίτη σε συνδυασμό με τη βοήθεια προγράμματος φωτογραφικής ανάλυσης. Τα δοκίμια στη συγκεκριμένη διαδικασία εκτέθηκαν στο διάλυμα για περίπου 50 δευτερόλεπτα συνολικά και έπειτα η επιφάνεια ξεπλύθηκε με καθαρή Αιθανόλη και στεγνώθηκε με τη βοήθεια πιστολιού θερμού αέρα [41].

- Marshall's Reagent

Το εν λόγω χημικό αντιδραστήριο, έχει παρόμοιο τρόπο δράσης με το Nital, δηλαδή αποσκοπεί στην εμφάνιση των ορίων των κόκκων του φερρίτη, τους οποίους σύμφωνα με τη βιβλιογραφία εμφανίζει καλύτερα και με μεγαλύτερη συνέπεια από το Nital [42], ενώ ακόμα εξυπηρετεί σε καλύτερη εμφάνιση ανακρυσταλλωμένων κόκκων σε άλλες θερμοκρασίες. Είναι διμερές χημικό αντιδραστήριο, δηλαδή φτιάχνεται αναμιγνύοντας δυο ξεχωριστά διαλύματα Α και Β, τα οποία φυλάσσονται ξεχωριστά και αναμιγνύονται μόνο κατά τη στιγμή της προσβολής. Το μίγμα Α αποτελείται από 5 ml Θεϊκό Οξύ, 8 γραμμάρια Οξαλικό Οξύ σε μορφή λευκών κρυστάλλων διαλυμένα σε 100 ml νερού. Το Θεϊκό Οξύ διαλύεται στο νερό και αφού προηγηθεί καλή ανάδευση προστίθεται το Οξαλικό Οξύ. Το μίγμα Β αποτελείται από διάλυμα Υπεροξειδίου του Υδρογόνου 30%. Αφού τα δυο διαλύματα αναμιχθούν το αντιδραστήριο είναι έτοιμο για χρήση. Η διαδικασία που προτείνεται είναι εμβάπτιση 2 δευτερολέπτων σε Nital 1%, καθάρισμα με Αιθανόλη και στέγνωμα με τη βοήθεια πιστολιού θερμού αέρα, κατόπιν εμβάπτιση 2 δευτερολέπτων στο Marshall's, ξανά καθάρισμα με Αιθανόλη και τέλος ξανά εμβάπτιση 2 δευτερολέπτων στο Nital 1%, ακολουθούμενο από ένα τελευταίο καθάρισμα με Αιθανόλη και στέγνωμα με πιστόλι θερμού αέρα [37, 38, 42].

## 3.6 Παρατήρηση στο Μικροσκόπιο

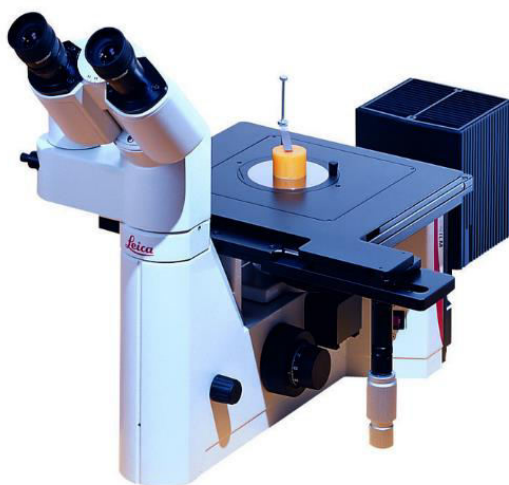
### 3.6.1 Οπτική Μικροσκοπία[46]

Η Οπτική Μικροσκοπία είναι μία πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της μεταλλογραφίας. Το Οπτικό Μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπήγησης Τεχνολογίας είναι Leica DMILM.

Τα κύρια μέρη του μικροσκοπίου είναι (Σχ. 5.6):

- Η πηγή φωτός
- Οι φακοί που κατευθύνουν τη φωτεινή δέσμη
- Το διάφραγμα
- Οι μεγεθυντικοί φακοί
- Το ημιανακλαστικό κάτοπτρο
- Ο αντικειμενικός φακός
- Η τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς παρατήρηση δοκίμιο και επιτρέπει τη μετακίνησή του μέσω κατάλληλης διάταξης
- Ο προσοφθάλμιος φακός

Εκτός από τα παραπάνω, το οπτικό μικροσκόπιο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλη διάταξη που να επιτρέπει τη στερέωση κάμερας. Το μικροσκόπιο διαθέτει δύο τύπους μεγεθυντικών φακών: τους αντικειμενικούς και τους προσοφθάλμιους. Οι πρώτοι είναι οι πιο σημαντικοί, γιατί συγκεντρώνουν το ανακλώμενο από το μεταλλικό δοκίμιο φως και συνθέτουν την εικόνα. Είναι συνήθως βιδωτοί και τοποθετούνται σε μία περιστρεφόμενη βάση, η οποία δέχεται τέσσερις φακούς με διαφορετική μεγέθυνση ο καθένας. Οι προσοφθάλμιοι φακοί έχουν σταθερή μεγέθυνση. Βρίσκονται στο σημείο από το οποίο παρατηρεί ο χρήστης του μικροσκοπίου και μεγεθύνουν την παραγόμενη από τον αντικειμενικό φακό εικόνα, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα. Η συνολική μεγέθυνση της παρατηρούμενης εικόνας είναι το γινόμενο της μεγέθυνσης των δύο αυτών φακών και το οπτικό μικροσκόπιο διαθέτει φακούς μεγέθυνσης x100, x200, x500 και x1000.



Εικ. 3.21 Οπτικό Μικροσκόπιο Leica DMILM, του Ε.Ν.Τ.

### 3.6.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία[44, 45]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε και Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope). Το Μικροσκόπιο είναι της εταιρείας Jeol 6390. Το Μικροσκόπιο συνοδεύεται από σύστημα μικροανάλυσης ακτίνων X (x-rays Energy Dispersive Spectroscopy EDS) με υπέρλεπτο παράθυρο (super ultrathin window – SUTW) της εταιρείας IDAX.

Το SEM χρησιμοποιεί μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για την παραγωγή διαφόρων σημάτων από την επιφάνεια ενός στερεού δοκιμίου. Τα σήματα αυτά που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων – επιφάνειας δοκιμίου αποκαλύπτουν πληροφορίες για ένα δοκίμιο όπως η μορφολογία του, η χημική του σύσταση, η κρυσταλλική δομή και ο προσανατολισμός των συστατικών του δοκιμίου. Τα δεδομένα συλλέγονται από μια συγκεκριμένη επιφάνεια του δοκιμίου και προκύπτει μια δισδιάστατη εικόνα η οποία περιέχει τις παραπάνω πληροφορίες. Το SEM παρέχει επίσης τη δυνατότητα ποιοτικής και ημιποσοτικής ανάλυσης συγκεκριμένων σημείων και περιορισμένων επιφανειών της επιφάνειας του δοκιμίου με τη χρήση συστήματος EDS (Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy). Στα βασικά μέρη ενός συμβατικού SEM περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Πηγή ηλεκτρονίων (Οπλο – Electron Gun)
- Φακοί ηλεκτρονίων
- Τράπεζα δοκιμίου
- Ανιχνευτές
- Διατάξεις οθόνης / επεξεργασίας δεδομένων
- Απαιτήσεις υποδομής:
  - Παροχή ρεύματος (σταθερή)
  - Σύστημα κενού
  - Σύστημα ψύξης
  - Αντικραδασμική επιφάνεια
  - Χώρος ελεύθερος από μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία

Τα SEM έχουν πάντα τουλάχιστον έναν ανιχνευτή, συνήθως αυτόν των δευτερογενών ηλεκτρονίων, και τα περισσότερα έχουν και άλλους. Οι δυνατότητες ενός SEM καθορίζονται από τους ανιχνευτές που διαθέτει.

### 3.7 Μετρήσεις Μικροσκληροτήτων

Μετά τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων, διεξήχθησαν μετρήσεις μικροσκληρότητας σε δοκίμια τα οποία κόπηκαν εγκάρσια στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας των δοκιμίων έγιναν με τη βοήθεια της διάταξης μέτρησης μικροσκληρότητας Wolpert-Wilson 402 MVD, που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Η μέθοδος με την οποία μετρήθηκαν οι μικροσκληρότητες των δοκιμίων, είναι η μέθοδος Vickers HV<sub>0,3</sub>, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E384-17.

Ως σκληρότητα ορίζεται η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε μόνιμη παραμόρφωση ή αλλοίωση, όταν έρθει σε επαφή με ένα διεισδυτή υπό κάποιο φορτίο. Στη φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού[1]. Η σκληρότητα σχετίζεται τόσο με την αντοχή όσο και με τη μικροδομή ενός υλικού [52].

Στόχος των μετρήσεων μικροσκληρότητας είναι να διαπιστωθεί αν η μέθοδος, οι συνθήκες και τα χρησιμοποιούμενα υλικά για μια συγκόλληση είναι καλά, καθώς αφού συσχετίζεται με την αντοχή [52], ένα πιθανό προφίλ μικροσκληρομετρήσεων με μακρινές μέσες τιμές ανά περιοχή, μεγάλες διακυμάνσεις τιμών και πολύ ψηλές ή χαμηλές τιμές υποδηλώνει μια κακή κατασκευή. Το ζήτημα αυτό στις συγκολλήσεις εξετάζεται κυρίως στη Θ.Ε.Ζ. και στη Ζ.Τ, οι οποίες πρέπει αμφότερες να έχουν ίση η περισσότερη ακόμα αντοχή από τα Μ.Β., αλλιώς η συγκόλληση εξασθένησε την κατασκευή. Τέλος χρησιμεύουν στο να καθοδηγήσουν ενδεχομένους ελέγχους αντοχής σε θραύση, όπου αυτοί είναι αναγκαίοι. Γενικά, η δοκιμή σκληρότητας πραγματοποιείται με πίεση ενός διεισδυτή γνωστής γεωμετρίας και μηχανικών ιδιοτήτων στο υπό μελέτη δοκίμιο. Ο διεισδυτής μπορεί να είναι σφαιρικός (Brinell), κωνικός (Rockwell), ή να έχει μορφή πυραμίδας (Vickers και Knoop). Όταν οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται με εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων της τάξης των μερικών δεκάδων γραμμαρίων, τότε αυτές καλούνται μικροσκληρομετρήσεις. Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας με τη μέθοδο Vickers, η οποία είναι και η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη [52]. Κατά τη μικροσκληρομέτρηση Vickers χρησιμοποιείται ως διεισδυτής πυραμίδα διαμαντιού τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής  $\alpha=136^\circ$  (αυτό οδηγεί σε γωνία  $22^\circ$  με το οριζόντιο επίπεδο) και γνωστή δύναμη που κυμαίνεται από 5-1000gr [1, 47]. Η δύναμη εφαρμόζεται σταδιακά και η επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου διαρκεί 10-20 δευτερόλεπτα. Η δύναμη πρέπει να είναι γνωστή επακριβώς (αναφορά στο πρότυπο ASTM E 384 σε ότι αφορά τις ανοχές). Μετά την αφαίρεση της δύναμης μετρούνται οι δυο διαγώνιοι και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Vickers σύμφωνα με τη σχέση:

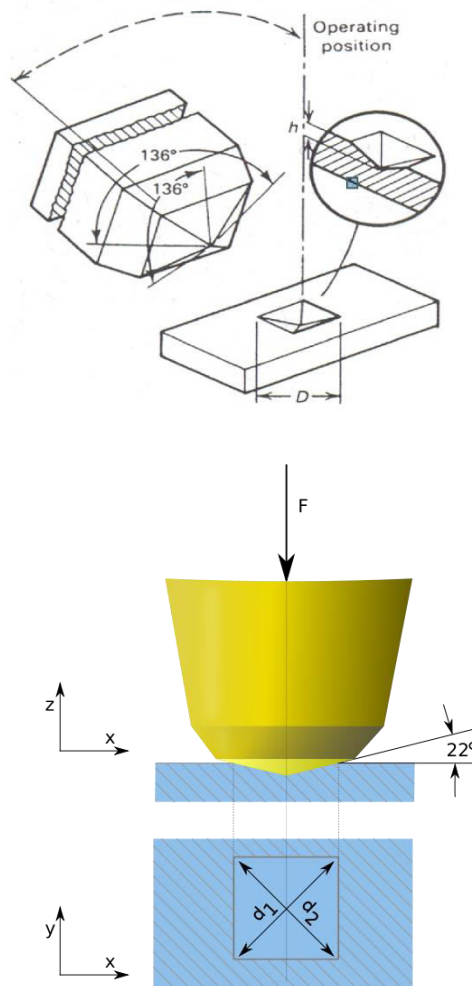
$$HV = \frac{2000 \cdot P \cdot \sin(a/2)}{d^2} = \frac{1854.4 \cdot P}{d^2}$$

Όπου:

d: μέσος όρος διαγωνίων σε μμ.

$\alpha$ : γωνία κορυφής =  $136^\circ$

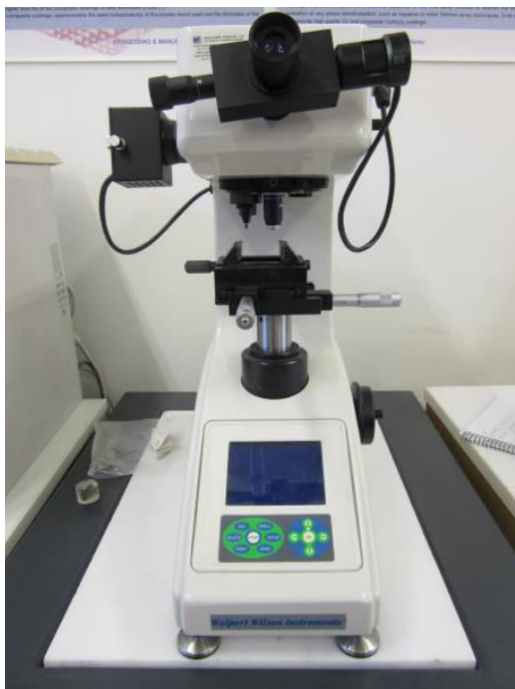
P: δύναμη σε gr.



**Εικ. 3.22** Σχηματική αναπαράσταση μικροσκληρομέτρησης Vickers.

Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής: τοποθετείται το δείγμα στην τράπεζα του οργάνου και μέσω του μικροσκοπίου που διαθέτει γίνεται εστίαση μέχρι να διακριθεί καθαρά η μικροδομή του δείγματος. Μετά προγραμματίζεται με όλες τις παραμέτρους που χρειάζεται και επιλέγεται ο χρόνος που θα διαρκέσει η διείσδυση, καθώς και το φορτίο που θα ασκήσει η πυραμίδα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Γίνεται εστίαση στην περιοχή που είναι επιθυμητή η μέτρηση της σκληρότητας και αντικαθίσταται ο φακός του μικροσκοπίου με τον διεισδυτή. Πατώντας το κουμπί start η πυραμίδα διεισδύει στην επιφάνεια του υλικού δημιουργώντας ένα αποτύπωμα (Εικ. 3.22).

Γυρίζοντας πάλι στο μικροσκόπιο υπολογίζονται (με τη βοήθεια γραμμών) οι διαγώνιοι της πυραμίδας που έχει σχηματιστεί ( $d_1, d_2$  - Εικ. 3.22).. Τέλος, το λογισμικό υπολογίζει από τις τιμές των διαγωνίων τις τιμές σκληρότητας σε HVN (Hardness Vickers Number). Το μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι Wolpert Wilson Instruments, τύπου 402MVD με φορτίο 300 gr στο διεισδυτικό μηχάνημα για 15 sec (Εικ. 3.23).



**Εικ. 3.23** Το μικροσκληρόμετρο Wolpert - Wilson 402 MVD του Ε.Ν.Τ.

Εξαιτίας της διαμόρφωσης του δοκιμίου και του μεγέθους του, για τη στερέωση του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε ειδική βάση του μικροσκληρομέτρου. Για τη λήψη των μικροσκληρομετρήσεων το δοκίμιο από την τομή της συγκόλλησης λειάνθηκε, στιλβώθηκε και προσεβλήθη χημικά, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι μετρήσεις των μικροσκληροτήτων θα μπορούσαν να γίνουν και χωρίς τη χημική προσβολή των δοκιμίων, αλλά επιλέχθηκαν να γίνουν κατόπιν αυτής, αφού η ανάδειξη της μικροδομής και της “γεωμετρίας” της συγκόλλησης καθιστά δυνατή την παρατήρηση της ακριβούς περιοχής της συγκόλλησης από την οποία λαμβάνεται η κάθε μέτρηση και συνεπώς η συσχέτιση των τιμών σκληρότητας με διάφορες περιοχές (Μέταλλο Βάσης, Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη, Ζώνη Τήξης, δένδριτικές, ανακρυσταλλωμένες ισοαξονικές κ.τ.λ) ή ακόμα και με μικροδομικά συστατικά (περλίτης, μπαινίτης κ.τ.λ.).

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων έγιναν τρεις κατηγορίες μετρήσεων στο δοκίμιο της εγκάρσιας τομής της συγκόλλησης, καθώς και συμπληρωματικές μετρήσεις σε δοκίμια των μετάλλων βάσης, ώστε να επιβεβαιωθούν οι βιβλιογραφικές τιμές για τις μικροσκληρότητες τους και να εξαχθεί μια αξιόπιστη μέση τιμή που θα χρησιμεύει σε συγκρίσεις με τιμές της συγκόλλησης.

Οι κατηγορίες μετρήσεων που διεξήχθησαν έγιναν ακολουθώντας τα υπάρχοντα πρότυπα για τον τομέα αυτό (ASTM E384-17). Η πρώτη κατηγορία μετρήσεων - Κατηγορία Μετρήσεων Α- έγινε κατά τη διεύθυνση του πάχους των ελασμάτων στον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης (Through – Thickness Measurements). Στην Κατηγορία Μετρήσεων Β, οι μετρήσεις ξεκίνησαν από τη ρίζα της συγκόλλησης (Root Pass) και κατέληξαν στο κορδόνι της ενίσχυσης (Cover Pass), κατά τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης. Η δεύτερη κατηγορία -Κατηγορία Μετρήσεων Β- αφορά στις μετρήσεις που οφείλουν να γίνουν στο μέσο του πάχους των ελασμάτων και παράλληλα στο επίπεδο της ρίζας της συγκόλλησης (Mid – Thickness Measurements). Ωστόσο για περιπτώσεις αυξημένου πάχους ή/και μεγάλης γωνίας λοξοτόμησης προτείνεται η κατηγορία αυτή να χωριστεί σε δυο υποκατηγορίες μετρήσεων, δηλαδή αντί να γίνει μια οριζόντια μέτρηση στο μέσον του πάχους, να γίνουν δυο οριζόντιες μετρήσεις, μια στο 1/3 του πάχους και μια στα 2/3 του πάχους. Οι δυο αυτές υποκατηγορίες, Κατηγορία Μετρήσεων Β1 και το 1/3 του πάχους και Κατηγορία Μετρήσεων Β2 για τα 2/3 του πάχους, θα δώσουν μεγαλύτερο τελικό αριθμό μετρήσεων και θα βοηθήσουν στην πιο σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων. Στις Κατηγορίες Μετρήσεων Β1 και Β2 οι μετρήσεις ξεκίνησαν από την περιοχή του ενός Μετάλλου Βάσης (έστω ΑΗ36), και περνώντας διαδοχικά από την Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (του ΑΗ36 και το Μέταλλο Συγκόλλησης κατέληξαν στην άλλη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (του ΑΗ40 FCA) και τελικά στην περιοχή του αλλού Μετάλλου Βάσης (ΑΗ40 FCA), με άξονα συμμετρίας τον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης. Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια, στο επόμενο Κεφάλαιο.

### 3.8 Μελέτη Μηχανικών Ιδιοτήτων – Δοκιμή Εφελκυσμού

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή, καθώς παρέχει πληθώρα δεδομένων που καθορίζουν τον χαρακτηρισμό ενός υλικού και την επιλογή του για συγκεκριμένες εφαρμογές [69]. Συνίσταται στην υποβολή σε εφελκυστική καταπόνηση δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού ή της μελετουμένης συγκόλλησης, κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση ΔΙ. Μέσω της δοκιμής εφελκυσμού λαμβάνονται παράμετροι που περιγράφουν την πλαστική παραμόρφωση (Όριο Διαρροής), μια προσέγγιση του μέγιστου δυνατού φορτίου που αντέχει το αντικείμενο προς μελέτη (Όριο Θραύσης), αλλά και ένα μέτρο της ολκιμότητας (Επιμήκυνση). Εν τελεί μέσω δοκιμών εφελκυσμού προσδιορίζεται η συμπεριφορά των υλικών σε εφελκυστικά φορτία μέσω διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η τάση διαρροής, η τάση θραύσης, το μέτρο ελαστικότητας του Young και η επιμήκυνση. Τα δοκίμια του εφελκυσμού είναι ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων[51]. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου ( $l_0$ ). Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία θα συγκρατηθεί από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, έχουν ισχυρότερη διατομή.

### 3.8.1 Προετοιμασία Δοκιμίων Εφελκυσμού

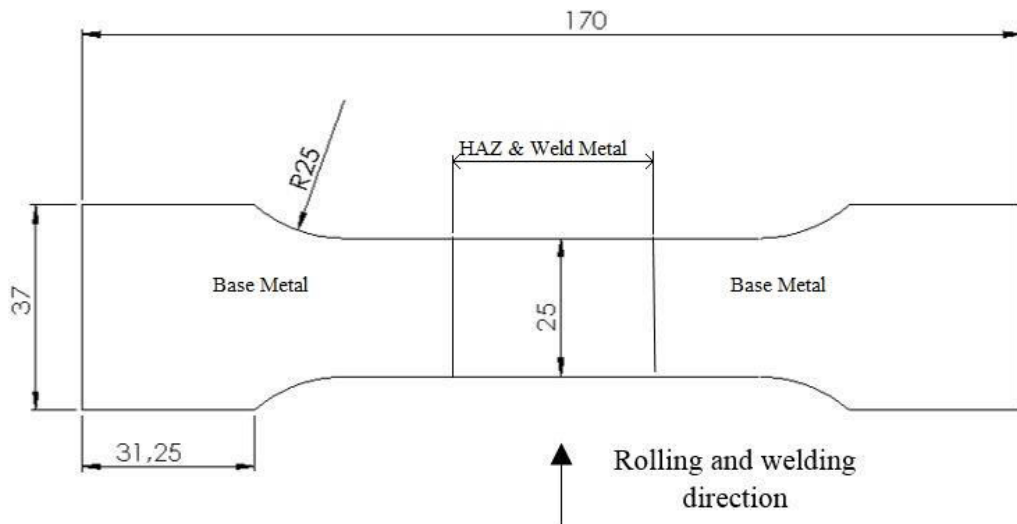
Προτού εκτελεστούν τα πειράματα του εφελκυσμού έπρεπε να εξαχθούν τα μελετούμενα δοκίμια από τα συγκολλημένα ελάσματα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μετρά τη διεξαγωγή της συγκόλλησης τα ελάσματα είχαν πάρει γωνιακή παραμόρφωση, η οποία μετρήθηκε περίπου ίση με 7 μοίρες. Προφανώς τα δοκίμια του εφελκυσμού πρέπει να είναι επίπεδα. Στόχος λοιπόν ήταν η εύρεση κατάλληλου μικρότερου πάχους και πλάτους ελάσματος από αυτά της συγκόλλησης, ώστε να μπορεί να ληφθεί επίπεδο έλασμα, από το οποίο στη συνέχεια θα εξαγόταν τα δοκίμια του εφελκυσμού. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις διαστάσεις των δοκιμίων [51], το πλάτος του επιπέδου ελάσματος έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από 170mm (ώστε να μην υπάρξει μεγάλη μείωση πάχους). Επομένως επεξεργαζόμενοι την γεωμετρία των συγκολλημένων πλακών και της απαιτήσεως βρέθηκε ότι οι πλάκες έπρεπε να φρεζαριστούν καταλλήλως και από τις δυο πλευρές, έως ότου το πλάτος γίνει ίσο με 8mm περίπου. Καθώς ο υπολογισμός αυτός ήταν προσεγγιστικός και έγινε με τη βοήθεια του Autodesk AutoCAD, προκειμένου να υπάρχει βεβαιότητα για την απολυτή επιπεδότητα της πλάκας από την οποία θα εξαγόταν τα δοκίμια, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει λίγο περισσότερο φρεζάρισμα, δίνοντας τελικό πάχος ίσο με 7.5mm. Ο γεωμετρικός προσδιορισμός του πάχους του φρεζαρισμένου ελάσματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 3.24), από το οποίο καθορίστηκαν και οι περιοχές των συγκολλημένων πλακών που έπρεπε να αφαιρεθούν (ο,τιδήποτε βρίσκεται “εκτός” του κόκκινου ελάσματος Εικ. 3.24).



Εικ. 3.24 Γεωμετρικός προσδιορισμός πάχους φρεζαρίσματος.

Αφού η συγκόλληση φρεζαρίστηκε καταλλήλως, έπρεπε να κοπούν, με υδροκοπή, τα δοκίμια του εφελκυσμού. Οι διαστάσεις των δοκιμίων λαμβάνονται από το κατάλληλο πρότυπο ISO [51] καθώς όπως αναφέρθηκε νωρίτερα είναι τυποποιημένες. Τα δοκίμια έχουν σχήμα “dog bone” και λαμβάνονται κάθετα στη διεύθυνση της συγκόλλησης, με το μήκος τους να ορίζεται συμμετρικά από τη ραφή της συγκόλλησης. Οι ακτίνες καμυλότητας (fillets) που υπάρχουν είναι αναγκαίες για μείωση της συγκέντρωσης τάσεων στις περιοχές αυτές. Από το διαθέσιμο έλασμα μπορούσαν να εξαχθούν μέχρι τρία δοκίμια εφελκυσμού, αριθμός ικανός πειραματικά για να παρατηρηθεί επαναληψιμότητα (εφόσον υπάρχει) και να εξαχθούν συμπεράσματα με ασφάλεια. Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο ακόλουθο σχήμα.

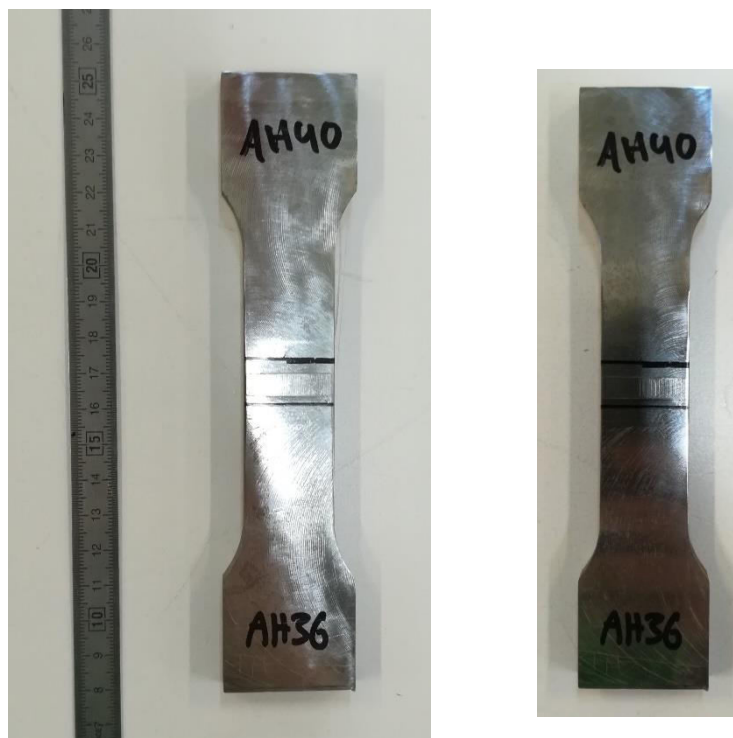




Εικ. 3.25 Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού “dog bones” [51].



Εικ. 3.26 Η φρεζαρισμένη, επίπεδη πλακά, ωφέλιμου πάχους 7.5mm.



Εικ. 3.27 Τα δοκίμια εφελκυσμού, μετά το φρεζάρισμα.

Όπως είναι φανερό στα δοκίμια σημειώθηκε με μαρκαδόρο η περιοχή της συγκόλλησης, η οποία έχει πλάτος περίπου ίσο με 15mm (μέση τιμή για τα τρία δοκίμια, καθώς η απόκλιση ήταν αμελητέα).

### 3.8.2 Διεξαγωγή Πειράματος Εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την πραγματοποίηση της μηχανικής δοκιμής του εφελκυσμού, το κάθε δοκίμιο τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση και οι αρπάγες της μηχανής συγκρατούν το δοκίμιο από τα άκρα, όπου είναι μεγαλύτερη η διατομή του. Η πίεση σύσφιξης των αρπαγών της μηχανής είναι 20 MPa. Η μηχανή εφελκυσμού “MTS 322 Test Frame” του Ε.Ν.Τ. φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Η καταγραφή των αποτελεσμάτων γίνεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω μιας κονσόλας με ένα ηλεκτροεπιμηκυνσιόμετρο (strain gauge) για τη μέτρηση παραμορφώσεων. Οι μετρήσεις του επιμηκυνσιόμετρου γίνονται σε μήκος 50mm, με το επιμηκυνσιόμετρο τοποθετημένο συμμετρικά στον άξονα της συγκόλλησης, δηλαδή 25mm μήκος μέτρησης εκατέρωθεν του άξονα. Έτσι το επιμηκυνσιόμετρο περιλαμβάνει όλες τις υπό μελέτη περιοχές (Μέταλλα Βάσης, Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες, Ζώνη Τήξης). Τονίζεται ότι έγινε τοπικός καθαρισμός με αιθανόλη στο κέντρο του κάθε δοκιμίου ώστε να γίνει δυνατή η προσκόλληση του strain gauge. Η διάταξη μέτρησης παρουσιάζεται ακολούθως.

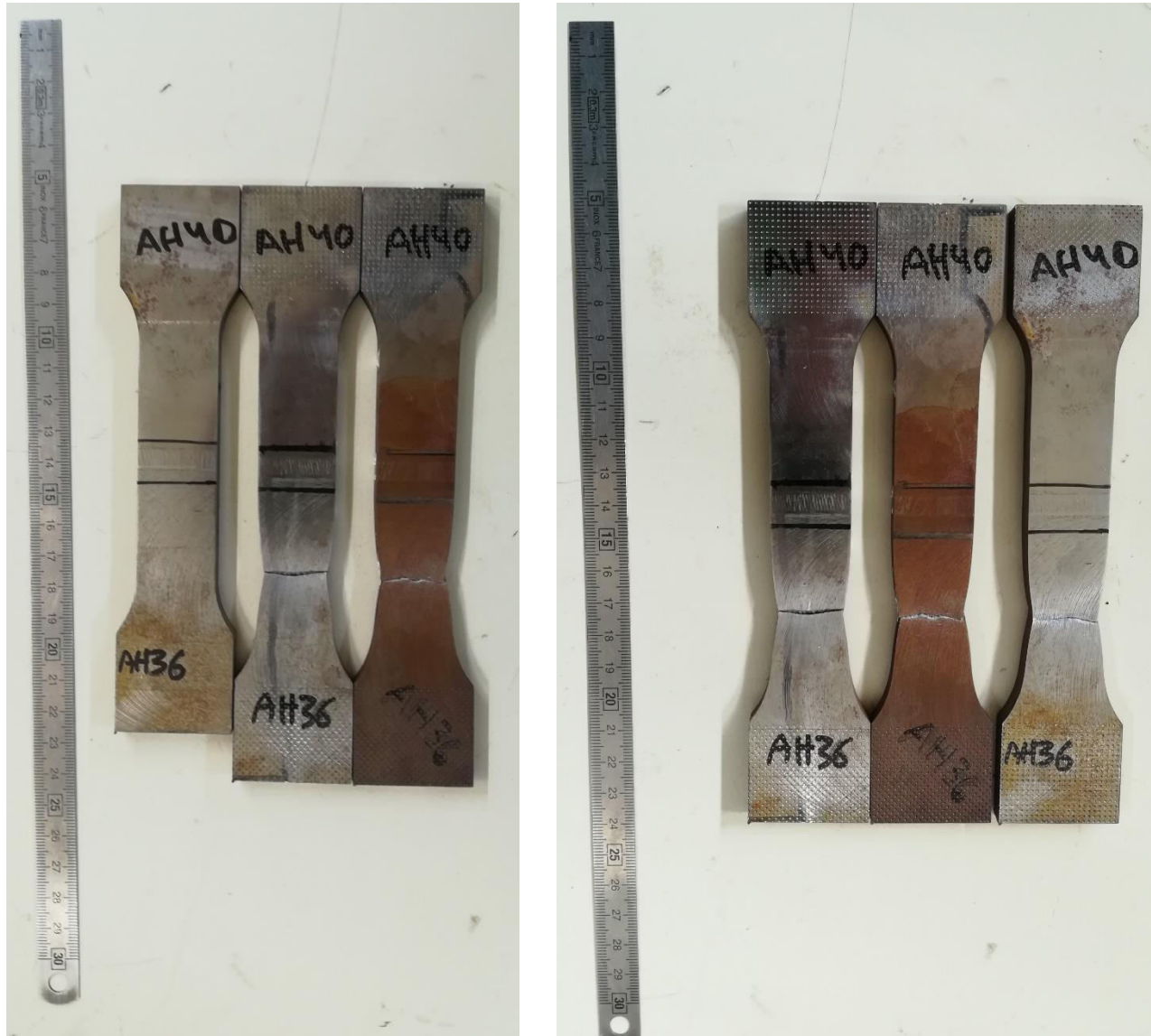


Εικ. 3.28 Η μηχανή εφελκυσμού “MTS 322 Test Frame” του Ε.Ν.Τ.



Εικ. 3.29 Διάταξη μέτρησης πειράματος εφελκυσμού.

Σε ό,τι αφορά τις παραμέτρους της δοκιμής, η μηχανή είναι Force Controlled με 25kN/min και τέθηκε Sampling Rate: 60 Hz. Όπως διαπιστώθηκε η θραύση είχε όλκιμα χαρακτηριστικά, ενώ και τα τρία δοκίμια αστόχησαν υπό γωνία στην περιοχή του ΑΗ36 μακριά από την Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη. Περαιτέρω ανάλυση του πειράματος ακολουθεί στο επόμενο Κεφάλαιο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την εκτέλεση του πειράματος.



**Εικ. 3.30** Τα δοκίμια του εφελκυσμού μετά την εκτέλεση του πειράματος.

Στην αριστερή εικόνα έχουν τοποθετηθεί δυο δοκίμια κατόπιν διεξαγωγής του πειράματος, δίπλα σε ένα πριν την διεξαγωγή του πειράματος. Είναι εμφανής η επιμήκυνση σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Στην δεξιά εικόνα φαίνονται και τα τρία μετά την εκτέλεση του πειράματος. Όπως είναι φανερό έσπασαν και τα τρία σχεδόν σε πανομοιότυπο σημείο, στη μεριά του ΑΗ36, μακριά από τη συγκόλληση, έχοντας μάλιστα σχεδόν πανομοιότυπη επιμήκυνση.



## Κεφάλαιο 4

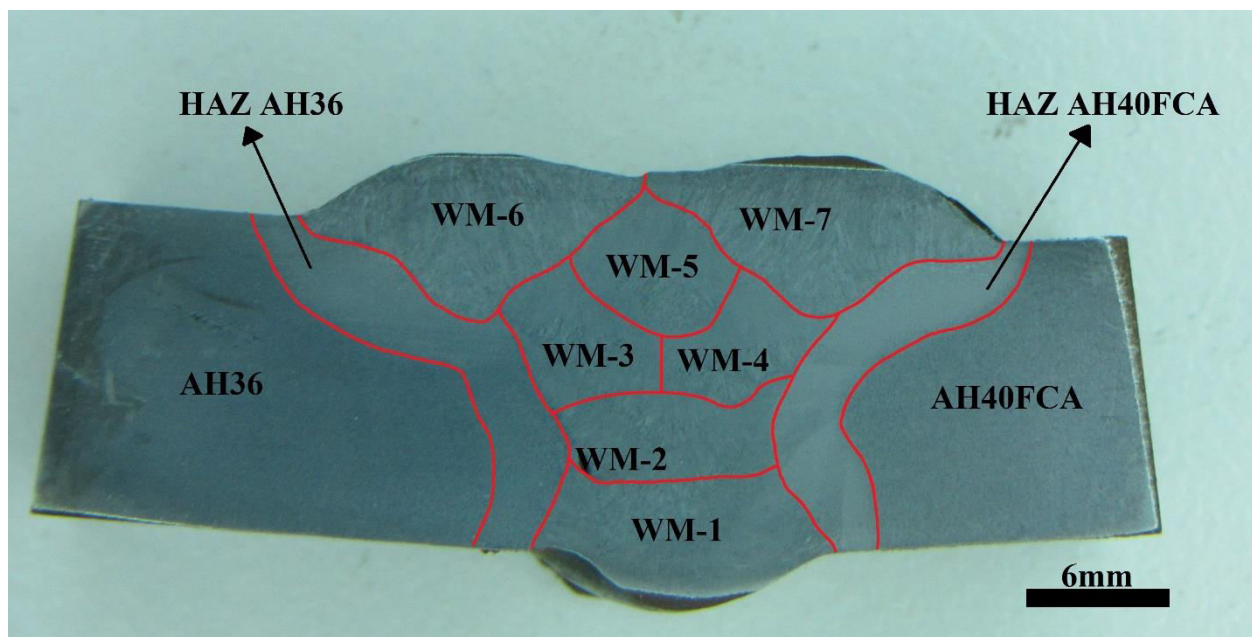
### Αποτελέσματα και Συζήτηση

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Αρχικά γίνεται μακροσκοπική παρατήρηση στο δοκίμιο που αφαιρέθηκε από τη συγκόλληση. Κατόπιν ακολουθεί ανάλυση της μελέτης της μικροσκληρότητας. Έπειτα, ερευνάται η μεταλλογραφική μελέτη των δοκιμίων της συγκόλλησης. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά αφορούν τις τρεις διαφορετικές περιοχές των συγκολλημένων δοκιμίων, δηλαδή των Μετάλλων Βάσης (MB), των Θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών (Heat Affected Zones) (ΘΕΖ/HAZ) και της Ζώνης Τήξης (ΖΤ). Τέλος, παρατίθεται τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού. Καθ' όλη τη διάρκεια του παρόντος εδαφίου γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων των διαφόρων υποενοτήτων μεταξύ τους.

#### 4.2 Μακροσκοπική Παρατήρηση

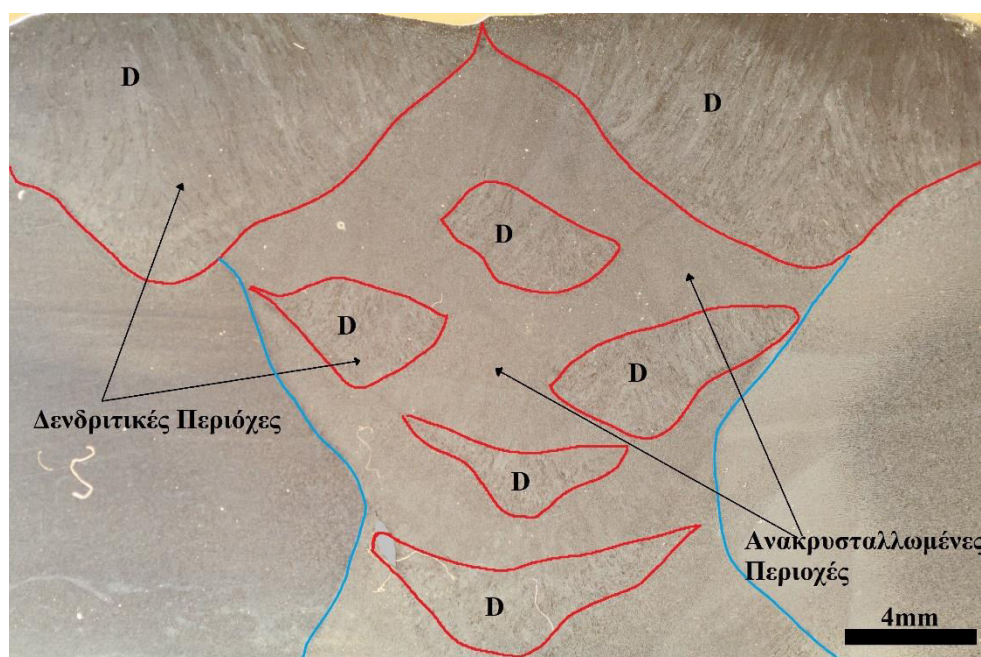
Η στερεοσκοπική ανάλυση των δοκιμίων έγινε με τη βοήθεια του στερεοσκοπίου Leica MZ6 της Μονάδας Μεταλλογραφίας του Ε.Ν.Τ. Το στερεοσκόπιο αυτό διαθέτει ικανότητα βηματικής μεγέθυνσης x0.63, x0.80, x1.0, x1.25, x1.6, x2.0, x2.5, x3.2, x4.0, και μπορεί να δεχτεί ψηφιακή κάμερα που συνδέεται σε Η/Υ. Μέσω της παραπάνω διάταξης και του λογισμικού Image Pro Plus Image Analysis της εταιρίας Leica ελήφθησαν μακροσκοπικές εικόνες του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό τα δοκίμια είχαν ήδη υποστεί επιφανειακές κατεργασίες και προσβλήθει χημικά με Nital 2%.



Εικ. 4.1 Η διατομή της συγκόλλησης.

Κατ' αρχάς δεν παρατηρούνται, τουλάχιστον σε μακροσκοπική κλίμακα, τυπικά σφάλματα των συγκολλήσεων, όπως ρωγμές, πόροι, στερεά εγκλείσματα, υποκοπή, υπερκάλυψη, ατελή τήξη και διείσδυση κ.τ.λ. Στην Εικ. 4.1 παρουσιάζονται με κόκκινες διαχωριστικές γραμμές τα επτά κορδόνια της συγκόλλησης, τα οποία είναι εμφανή (WM – Weld Metal). Οι αριθμοί δίπλα από το κάθε πάσο συμβολίζουν την ακολουθία με την οποία αυτά πραγματοποιήθηκαν. Ακόμα, έχουν οριοθετηθεί οι δυο Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες (Θ.Ε.Ζ.). Κατόπιν μετρήσεων με το λογισμικό της Leica, μετρήθηκε το πλάτος των δυο Θ.Ε.Ζ. ως η μέση τιμή των τιμών του πάχους κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης, στο μέσο της συγκόλλησης και στα ανωτέρα πάσα επικάλυψης. Για τη Θ.Ε.Ζ. του AH36 το πλάτος προκύπτει ίσο με 2.6 mm περίπου, ενώ για τη Θ.Ε.Ζ. του AH40 FCA το πλάτος προκύπτει ίσο με 2.7 mm. Οι τιμές αυτές ήταν αναμενόμενες για την πρόσδοση ενέργειας ανά μονάδα μήκους που χρησιμοποιήθηκε, δεδομένης της μεθόδου και των υλικών [4, 21]. Όπως, επίσης, ήταν αναμενόμενο να είναι περίπου ίσο το πλάτος καθώς η επίδραση της θερμότητας σε τόσο παρεμφερείς χάλυβες ήταν λογικό να είναι πανομοιότυπη.

Μέσα στη Ζώνη Τήξης (Z.T.) παρατηρούνται δύο είδη μικροδομών, οι οποίες σχετίζονται με τους ρυθμούς απόψυξης και στερεοποίησης του τηγμένου μετάλλου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κορδόνι που εισάγεται στη συγκόλληση στερεοποιείται ταχέως και η μικροδομή του αναπτύσσεται, όπως είναι γνωστό, για υψηλούς ρυθμούς απόψυξης [2] με τη μορφή δενδριτών, σχηματίζοντας την πρωτογενή μικροδομή. Παρόλα αυτά η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της προσδιδόμενης ενέργειας που εισάγεται στη συγκόλληση από το επόμενο πάσο, συμβάλλει στην “ανόπτηση” και στην ανακρυστάλλωση του μετάλλου συγκόλλησης που έχει ήδη εναποτεθεί και στερεοποιηθεί, τη δευτερογενή μικροδομή. Έτσι οι περιοχές που φαίνονται πιο “τραχείς” στην όψη ανήκουν στην πρώτη κατηγορία και οι πιο “λείες” στη δεύτερη, όπως επιβεβαιώθηκε και στη συνέχεια με οπτικό μικροσκόπιο. Οι προαναφερθείσες περιοχές παρουσιάζονται παρακάτω σε μεγαλύτερη μεγέθυνση.



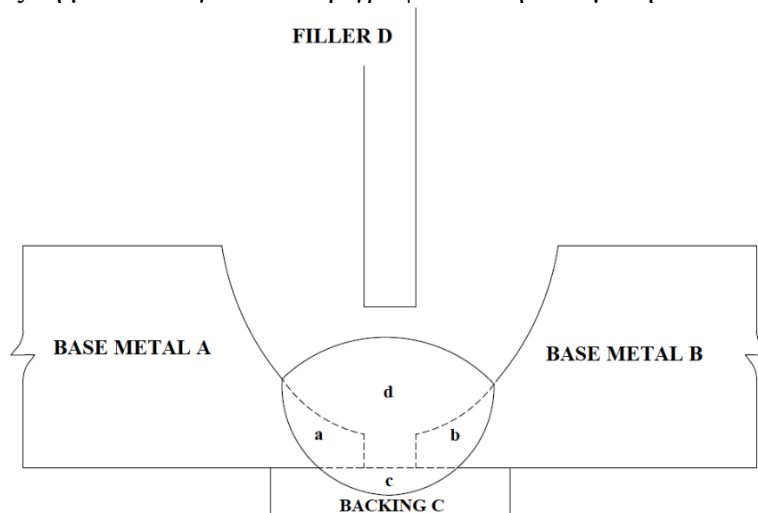
Εικ. 4.2 Πρωτογενής & Δευτερογενής Μικροδομή.

Με τη βοήθεια του εργαλείου εμβαδομέτρησης του προγράμματος ανάλυσης της Leica μετρήθηκαν προσεγγιστικά τα ποσοστά της πρωτογενούς και της δευτερογενούς μικροδομής. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, η πρωτογενής περιοχή καταλαμβάνει αρκετά μεγαλύτερο ποσοστό από τη δευτερογενή, κάτι που σχετίζεται άμεσα με τη χαμηλή πρόσδοση θερμότητας, αφού η θερμότητα δεν ήταν αρκετή για να “ανοποτίσει” μεγάλες περιοχές. Η πρωτογενής μικροδομή είναι αυξημένη ειδικά σε συγκολλήσεις με διαμόρφωση λοξοτομής V-groove, όπως η παρούσα, αφού τα δυο τελευταία πάσα επικάλυψης έχουν την ταχύτερη στερεοποίηση από όλα, δεν αναθερμαίνονται αφού είναι τα τελευταία και καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο, αφού η εναπόθεση υλικού γίνεται σε διπλάνες παράλληλες ευθείες, επομένως έρχονται ελάχιστα σε επαφή (πολύ μικρή περιοχή συμβολής πάσων WM-6 και WM-7).

**Πίνακας 4.1: Πρωτογενής & Δευτερογενής Μικροδομή**

Ζώνη Τήξης	
Περιοχές	Ποσοστο %
Πρωτογενής Μικροδομή	59
Δευτερογενής Μικροδομή	41

Εκτός των παραπάνω με τη βοήθεια της εμβαδομέτρησης του προγράμματος ανάλυσης της Leica μετρήθηκε το εμβαδόν της επιφάνειας της ζώνης τήξης, εγκάρσια στη διεύθυνσή της. Γνωρίζοντας το εμβαδόν της λοξοτομής μέσω του προτύπου, αλλά και συνυπολογίζοντας τη γωνιακή παραμόρφωση 7° που έχουν δεχτεί τα δοκίμια όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, υπολογίστηκε η τελική αραίωση (dilution) του μετάλλου βάσης στο μέταλλο συγκόλλησης, αξιοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην επόμενη εικόνα [28].



$$[1] \% \text{ DILUTION} = \frac{a+b+c}{a+b+c+d} \times 100$$

$$[2] \% \text{ ELEMENT E IN WELD BEAD} =$$

$$\frac{1}{a+b+c+d} [a(\% \text{ E in a}) + b(\% \text{ E in b}) + c(\% \text{ E in c}) + d(\% \text{ E in d})]$$

**Εικ. 4.3** Υπολογισμός αραίωσης (dilution) [28].



Ακολουθώντας τις παραπάνω σχέσεις υπολογίστηκαν τα ποσοστά του προστιθέμενου μετάλλου συγκόλλησης, του χάλυβα AH36 και του χάλυβα AH40 FCA στη Ζώνη Τήξης. Χρησιμοποιώντας τα ποσοστά αυτά σε συνδυασμό με τις χημικές συστάσεις των τριών χρησιμοποιούμενων υλικών (ηλεκτρόδιο, AH36, AH40 FCA) και εφαρμόζοντας κανόνα βαρών στις περιεκτικότητες του εκάστοτε χημικού στοιχείου, υπολογίστηκε η χημική σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης στη Ζώνη Τήξης. Παρατηρείται απεμπλουτισμός στα περισσότερα χημικά στοιχεία, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του μετάλλου της Ζ.Τ. αποτελείται από το μέταλλο προσθήκης, το οποίο δεν περιείχε τα περισσότερα κραματικά στοιχεία των δυο Μ.Β., όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα παραπάνω διατυπώνονται αναλυτικά στους Πίνακες 4.2 & 4.3 παρακάτω.

**Πίνακας 4.2: Ποσοστά Αραίωσης**

Μέταλλο	Ποσοστό %
AH36	10.5%
AH40FCA	13.1%
Μ.Π. %	76.4%

**Πίνακας 4.3: Χημική Σύσταση Μετάλλου Ζώνης Τήξης**

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Al
wt (%)	0.072	0.61	1.47	0.004	0.002	0.03	0.01	0.03	0.003	0.002	0.003	0.008

### 4.3 Μελέτη Μικροσκληροτήτων

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, αναφορικά με τη διαδικασία υπολογισμού των μικροσκληροτήτων με τη μέθοδο Vickers HV 0.3, πραγματοποιήθηκαν τρεις κατηγορίες μετρήσεων στο δοκίμιο της εγκάρσιας τομής της συγκόλλησης, καθώς και συμπληρωματικές μετρήσεις σε δοκίμια των μετάλλων βάσης, ώστε να επιβεβαιωθούν οι βιβλιογραφικές τιμές για τις μικροσκληρότητες τους και να εξαχθεί μια αξιόπιστη μέση τιμή που θα χρησιμεύει σε συγκρίσεις με τιμές της συγκόλλησης. Για τα δυο Μέταλλα Βάσης (AH36, AH40 FCA) ακολουθούν οι μέσες τιμές της σκληρότητας που υπολογίστηκαν.

- AH36: Μετά από αρκετές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε δυο επίπεδα, το επίπεδο έλασης XZ, το οποίο έχει banded μικροδομή και το επίπεδο XY, που είναι κάθετο στη διεύθυνση και δεν παρουσιάζει banding (βλ. επόμενη παράγραφο). Η μέση τιμή για τη μικροσκληρότητα Vickers HV<sub>0.3</sub> προέκυψε ίση με 175.6 HV<sub>0.3</sub>, σε συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία [6], ότι δηλαδή έχει σκληρότητα περί τα 180 HV<sub>0.3</sub>, ενώ δεν υπήρξε διαφορά στις μετρήσεις των δυο επίπεδων, με μικρή τυπική απόκλιση (3.6 HV<sub>0.3</sub>).

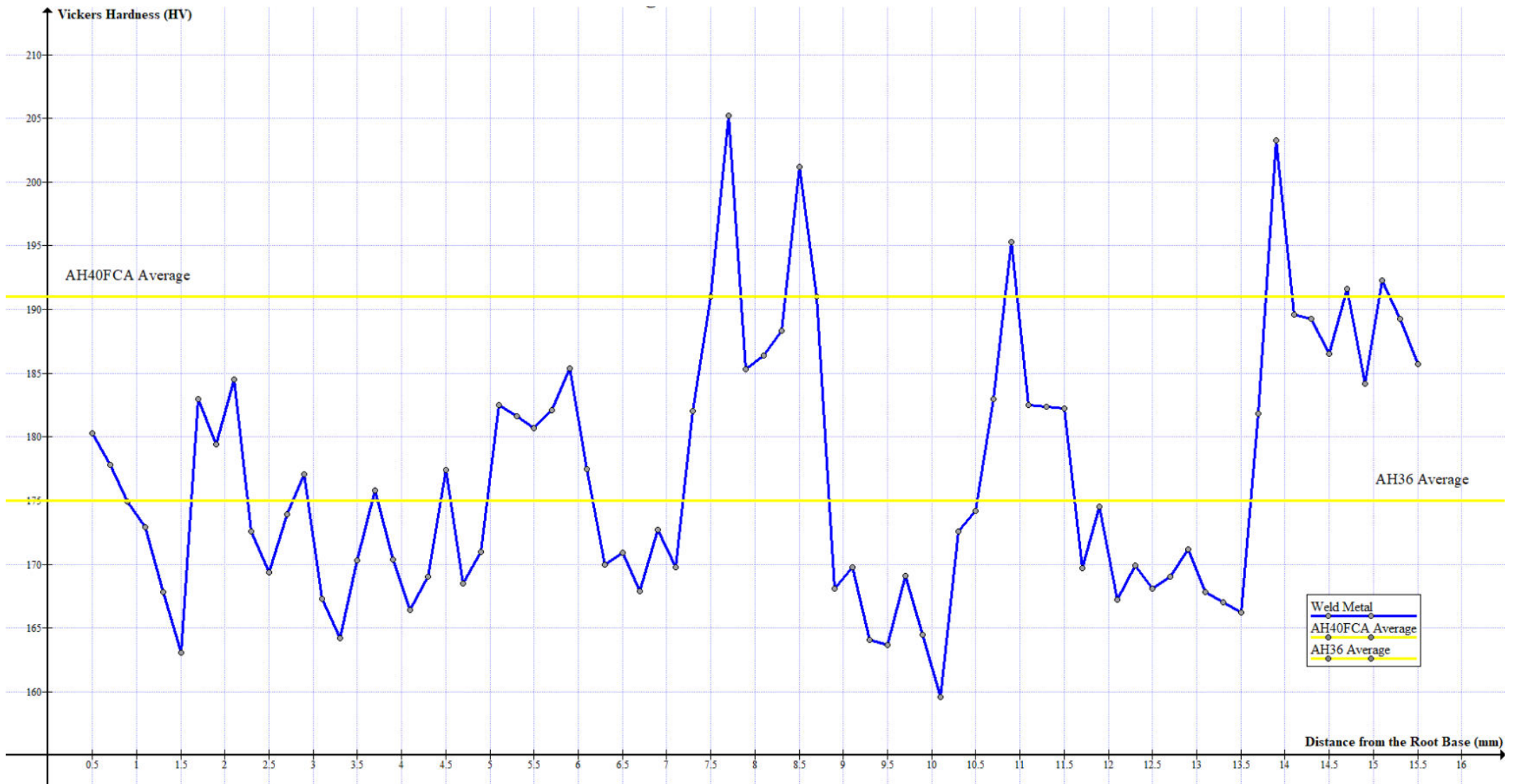
- AH40 FCA: Στην περίπτωση αυτή δεν υπήρχε λόγος να διεξαχθούν μετρήσεις σε διαφορετικά επίπεδα, καθώς η μικροδομή του χάλυβα είναι ομοιόμορφη και ανεξάρτητη της διεύθυνσης έλασης της TMCP μεθόδου παραγωγής του (βλ. επόμενη παράγραφο). Η μέση τιμή για τη μικροσκληρότητα Vickers HV<sub>0.3</sub> προέκυψε ίση με 191,4 HV<sub>0.3</sub>, σε συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία [6, 19], ότι δηλαδή έχει σκληρότητα περί τα 190 - 195 HV<sub>0.3</sub>, με μικρή τυπική απόκλιση (5.2 HV<sub>0.3</sub>)

Στο δοκίμιο που εξήχθη από τη συγκόλληση έγιναν τρεις κατηγορίες μετρήσεων. Η πρώτη κατηγορία μετρήσεων - Κατηγορία Μετρήσεων Α- έγινε κατά τη διεύθυνση του πάχους των ελασμάτων στον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης (κατακόρυφη, Through – Thickness Measurements). Η δεύτερη κατηγορία -Κατηγορία Μετρήσεων Β- αφορά στις μετρήσεις που οφείλουν να γίνουν παράλληλα στο επίπεδο της ρίζας της συγκόλλησης (οριζόντια) και χωρίζεται στις υποκατηγορίες, Κατηγορία Μετρήσεων Β1 για το 1/3 του πάχους και Κατηγορία Μετρήσεων Β2 για τα 2/3 του πάχους. Οι τρεις διευθύνσεις των μετρήσεων παρουσιάζονται ακολούθως.



**Εικ. 4.4** Διευθύνσεις μετρήσεων μικροσκληρότητας

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι και στις τρεις κατηγορίες ελήφθησαν μέτρησης ανά 0.2mm. Το συγκεκριμένο βήμα μετρήσεων είναι αρκετά μικρό ώστε να λαμβάνονται κατά το δυνατόν περισσότερες μετρήσεις, με σκοπό τη λήψη όσο περισσότερων δεδομένων γίνεται από το δοκίμιο και τη σωστή δημιουργία διαγραμμάτων μικροσκληρότητας. Συγχρόνως με το βήμα αυτό, δεδομένου του μεγέθους του αποτυπώματος, κάθε μέτρηση βρίσκεται αρκετά μακριά από τις δυο κοντινότερες της και έτσι η παραμόρφωση που προκαλείται από τη διεισδυτική πυραμίδα της μεθόδου Vickers σε μια μέτρηση δεν επηρεάζει την επόμενη. Προτού γίνει αναλυτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα διαγράμματα των μετρήσεων μικροσκληροτήτων, για κάθε κατηγορία μετρήσεων.. Η κάθε περιοχή από την οποία ελήφθησαν μετρήσεις (Μ.Β., Θ.Ε.Ζ., Ζ.Τ.) συμβολίζεται με διαφορετικό χρώμα, ενώ έχουν τοποθετηθεί και με οριζόντιες γραμμές οι μέσες τιμές των Μετάλλων Βάσης που υπολογίστηκαν, ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης των μετρήσεων της συγκόλλησης με αυτές των Μ.Β.

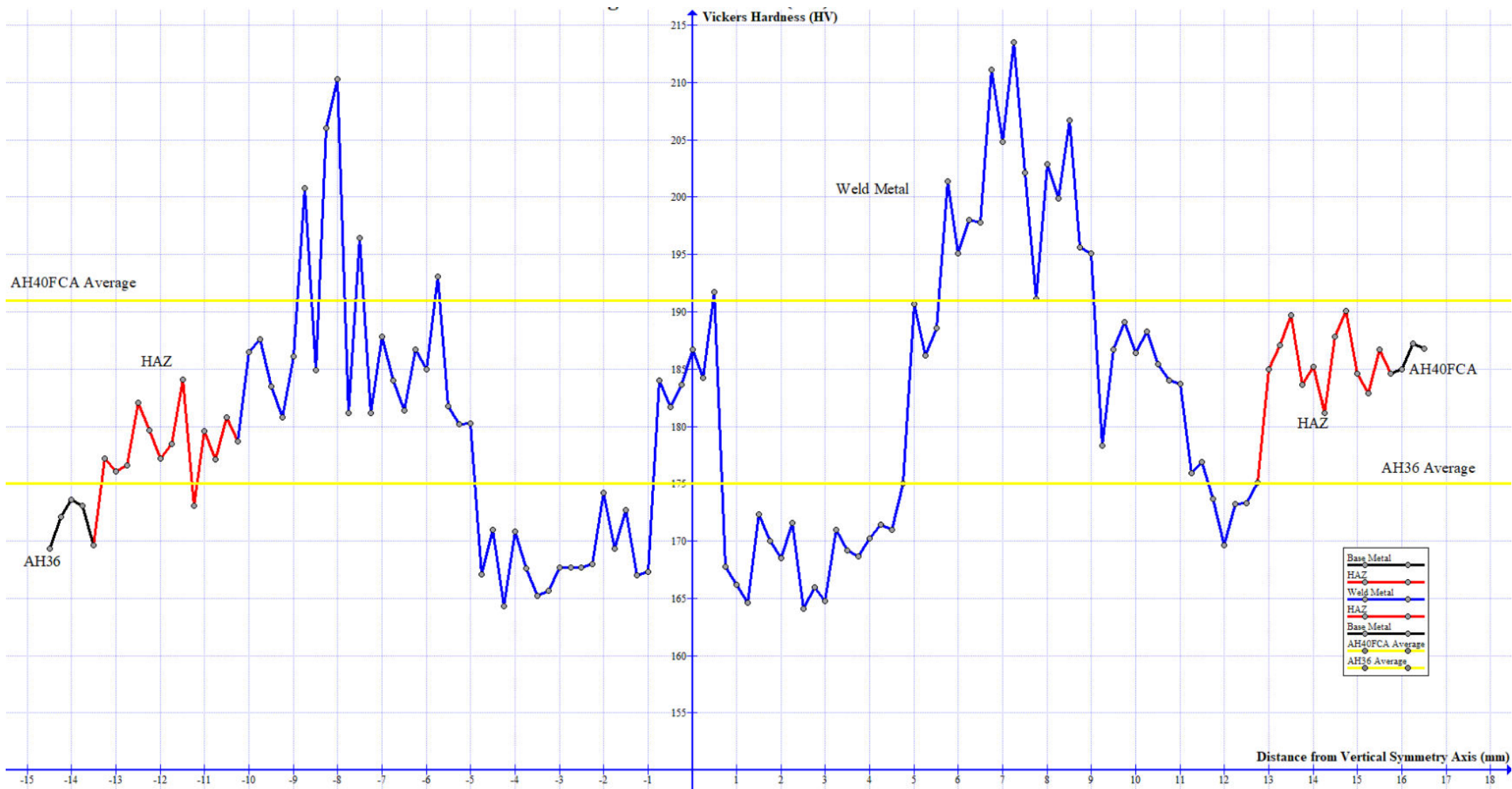


Εικ. 4.5 Κατακόρυφες μετρήσεις μικροσκληροτήτων Vickers HV<sub>0.3</sub>, Κατηγορίας A



Εικ. 4.6 Οριζόντιες μετρήσεις μικροσκληροτήτων Vickers HV<sub>0.3</sub> στο 1/3 του πάχους του δοκιμίου, Κατηγορίας B1





Εικ. 4.7 Οριζόντιες μετρήσεις μικροσκληροτήτων Vickers HV<sub>0.3</sub> στα 2/3 του πάχους του δοκιμίου, Κατηγορίας B2

Ακόμα, προτού γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές της μικροσκληρότητας κάθε εξεταζόμενης περιοχής του δοκιμίου (M.B., Θ.E.Z., Z.T.). Οι μέσες τιμές αυτές έχουν μεγάλη χρησιμότητα παρά τη μεγάλη διακύμανση των μετρήσεων στη Ζώνη Τήξης, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

**Πίνακας 4.3: Μέσες τιμές Μικροσκληρότητας ανά Περιοχή**

<b>Μικροσκληρότητα</b>		
<b>Περιοχή</b>	<b>Μέση Τιμή HV<sub>0.3</sub></b>	<b>Τυπική Απόκλιση HV<sub>0.3</sub></b>
<b>AH36</b>	175.6	3.6
<b>HAZ AH36</b>	181.3	4.1
<b>WELD METAL</b>	184.3	24.4
<b>HAZ AH40 FCA</b>	192.5	3.3
<b>AH40 FCA</b>	191.4	5.2

Όπως είναι φανερό οι μέσες τιμές των εξεταζόμενων περιοχών βρίσκονται εξαιρετικά κοντά μεταξύ τους. Αυτό είναι μεγάλης σημασίας, καθώς, όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη παράγραφο σχετική με τα πειράματα εφελκυσμού, οι μικροσκληρότητες των υλικών σχετίζονται με τις μηχανικές τους ιδιότητες. Συγκεκριμένα, το όριο θραύσης ενός υλικού προσεγγίζεται με σχετική ακρίβεια πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή της μικροσκληρότητάς του με συντελεστή 3.1 για τη μέθοδο Vickers [52]. Η ακριβής τιμή του συντελεστή αλλάζει ανά μέθοδο υπολογισμού μικροσκληρότητας και στο σημείο αυτό δεν εξετάζονται τα όρια θραύσης (ακολουθεί σε επόμενη παράγραφο), απλώς γίνεται σαφές ότι καθώς τα δυο μεγέθη συνδέονται με μια σταθερά, η περιοχή με τις μικρότερες τιμές μικροσκληρότητας σε μια κατασκευή θα είναι και η πιο επιρρεπής από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων εφελκυσμού. Εκτός αυτού, ένα ομοιόμορφο προφίλ μικροσκληροτήτων είναι σημαντικό για αποφυγή της δημιουργίας εγκοπής στο υλικό (material notch effect). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν υπάρχει συσσώρευση τάσεων σε ένα σημείο της επιφάνειας του υλικού. Η ανισοκατανομή της σκληρότητας του υλικού, δηλαδή η ύπαρξη περιοχών με αισθητά μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας σε σχέση με άλλες γειτονικές περιοχές, μπορεί να οδηγήσει στην προαναφερθείσα συσσώρευση τάσεων, προκαλώντας και δημιουργία εγκοπής στο υλικό.

Αναφορικά με τον σχολιασμό της μικροσκληρότητας της Ζώνης Τήξης, παρατηρείται εύκολα και από τις κατακόρυφες μετρήσεις (Κατηγορία A) και από τις οριζόντιες (Κατηγορίες B1, B2) ότι τα γραφήματα των μετρήσεων παρουσιάζουν κορυφές και κοιλάδες, που οδηγούν σε διακύμανση  $\pm 20$  HV<sub>0.3</sub> από την προαναφερθείσα μέση τιμή. Οι κορυφές, με αυξημένες τιμές σκληρότητας, που κυμαίνονται πάνω από τα 190 HV<sub>0.3</sub> και φτάνουν έως και τη μέγιστη τιμή τους κοντά στα 215 HV<sub>0.3</sub> σε αρκετές περιπτώσεις, είναι από μετρήσεις που έγιναν στην πρωτογενή μικροδομή ταχείας απόψυξης. Πιο συγκεκριμένα στην Κατηγορία A, οι κορυφές που παρουσιάζονται προκύπτουν διαδοχικά από τις πρωτογενείς μικροδομές των πάσων 2, 4 και 7. Στην Κατηγορία B1, η κορυφή που παρατηρείται στο μέσον του διαγράμματος δίνεται από μετρήσεις στην πρωτογενή μικροδομή του 2<sup>ου</sup> πάσου της συγκόλλησης.

Τέλος στην Κατηγορία B2 οι δυο μεγάλες περιοχές κορυφών κοντά στις Θ.Ε.Ζ προκύπτουν από τις δυο μεγάλες πρωτογενείς περιοχές των πάσων επικάλυψης 6 και 7, τα οποία είχαν και την ταχύτερη στερεοποίηση από όλα, ενώ η χαμηλότερη κορυφή περί το μέσον είναι από τη μικρότερη σε μέγεθος πρωτογενή περιοχή του 5<sup>ου</sup> πάσου.

Εν γένει στην πρωτογενή μικροδομή παρατηρείται αύξηση της τάξης του 10% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH40 FCA και αύξηση της τάξης του 15-20% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH36.

Οι τιμές της μικροσκληρότητας που αντιστοιχούν σε “κοιλιάδες”, όπως αναφέρθηκε αντιστοιχούν στη δευτερογενή μικροδομή. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αναθέρμανση που υφίστανται αυτές οι περιοχές, ουσιαστικά λειτουργεί σαν ανόπτηση, που ως γνωστόν [1] μειώνει τη σκληρότητα των υλικών. Στις περιοχές αυτές η μέση τιμή της μικροσκληρότητας ανέρχεται στα 170 HV<sub>0.3</sub>.

Επομένως στη δευτερογενή μικροδομή υπάρχει μείωση της τάξης του 10% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH40 FCA και μείωση της τάξης του 5-7% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH36.

Αν και όπως εξηγήθηκε προκύπτει με μεγάλη διασπορά τιμών, η συνολική μέση τιμή για τη Ζ.Τ. είναι ελαφρώς αυξημένη από τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH36 και ελαφρώς μειωμένη από τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH40 FCA (αύξηση/μείωση της τάξης του 3% αντίστοιχα). Συμπερασματικά η μέση τιμή αυτή, λαμβάνοντας υπ’ όψιν και το αντίκτυπο της στις μηχανικές ιδιότητες, θα μπορούσε και να χαρακτηριστεί και ως ιδανική αφού, αριθμητικά τουλάχιστον, δεν υποδηλώνει ανομοιογένεια μηχανικών ιδιοτήτων, σε σύγκριση με τα Μέταλλα Βάσης.

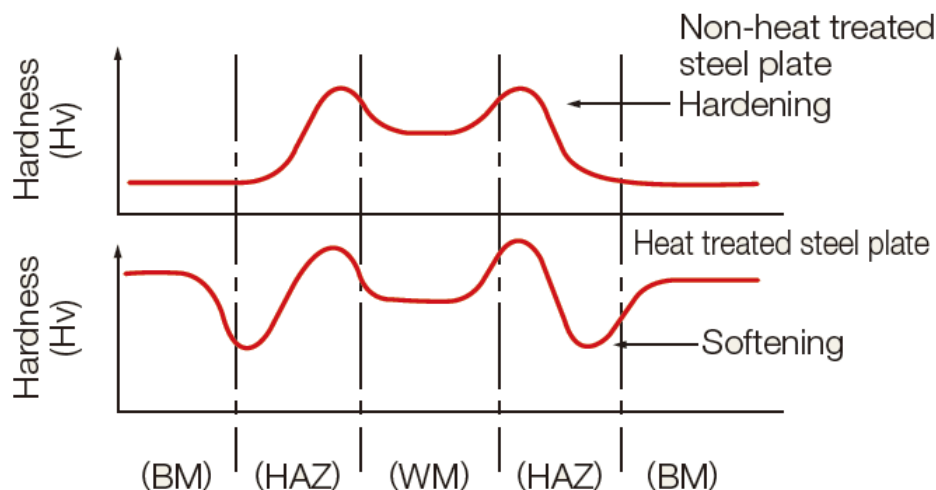
Εκτός όμως από τη Ζ.Τ. που παρουσιάζει ενδιαφέρον στη μελέτη συγκολλήσεων, σε ό,τι αφορά το κομμάτι των μικροσκληροτήτων η περιοχή που απαιτούν τη μεγαλύτερη προσοχή είναι οι Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες. Αυτό, καθώς όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη είναι ευαίσθητη περιοχή σε συγκολλήσεις. Σε μια συγκόλληση οι πιθανοί θερμικοί κύκλοι ποικίλλουν, εγκυμονώντας δύο εκ διαμέτρου αντίθετους αλλά εξ ίσους σημαντικούς κινδύνους για τις Θ.Ε.Ζ. Μπορεί είτε να προκύψουν υπερβολικά σκληρές δομές (HAZ hardening), που συνδέονται με ταχείς ρυθμούς απόψυξης (χαμηλή πρόσδοση Θερμότητας), είτε με υπερβολικά μαλακές δομές (HAZ softening), που σχετίζονται με αργούς ρυθμούς απόψυξης (μεγάλη πρόσδοση Θερμότητας).

Η μεγάλη σκληρότητα οδηγεί σε αύξηση του κινδύνου ρωγμάτωσης, καθώς οι σκληρές μικροδομές γενικά σχετίζονται με χαμηλή αντίσταση στη θραύση και χαμηλή ολκιμότητα [1, 52] ενώ σχετίζονται και με άλλα φαινόμενα, όπως την ψαθυροποίηση από απορρόφηση υδρογόνου (hydrogen embrittlement), η οποία συμβαίνει όταν το ποσοστό του υδρογόνου ξεπεράσει τη διαλυτότητά του στο μέταλλο [2], τις υψηλές παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από τους θερμικούς κύκλους που δίνουν σκληρές δομές.



Οι μαλακές δομές με μικρή σκληρότητα καθιστούν τη Θ.Ε.Ζ. επιρρεπή σε πλαστική κατάρρευση όταν τεθεί υπό φόρτιση, καθώς όπως αναφέρθηκε η αντοχή σε εφελκυσμό σχετίζεται με τη σκληρότητα. Έχει αναφερθεί ότι οι χάλυβες που παράγονται με TCMP μέθοδο (AH40 FCA) είναι εν γένει επιρρεπείς σε χαμηλές σκληρότητες στη Θ.Ε.Ζ. (HAZ softening) [49, 55, 56, 83], επομένως απαιτείται προσοχή στην περίπτωση μας.

Γενικά χάλυβες που έχουν δεχθεί θερμική κατεργασία είναι πιο επιρρεπείς σε μείωση της μικροσκληρότητας, ενώ χάλυβες που δεν έχουν δεχθεί θερμικές κατεργασίες είναι πιο επιρρεπείς σε αύξηση της σκληρότητας (Εικ. 4.7) [19].



**Εικ. 4.8** Προβλήματα μικροσκληρότητας Θ.Ε.Ζ. θερμικά κατεργασμένων και μη χάλυβων.

Αντιλαμβάνεται κανείς επομένως ότι πρέπει να επιτευχθεί μια αρκετά σκληρή δομή στη Θ.Ε.Ζ., η οποία όμως ταυτοχρόνως να μην είναι υπερβολικά σκληρή, να μην ξεπερνά δηλαδή κάποια όρια [11, 15], τα οποία υπαγορεύουν να μην ξεπερνά η μικροσκληρότητα στη Θ.Ε.Ζ. τα 350 HV<sub>0.3</sub>, όριο που σχετίζεται με την ψυχρή ρωγμάτωση, ενώ το όριο τίθεται πιο αυστηρά στα 248 HV<sub>0.3</sub> για περιπτώσεις που χρειάζεται βεβαιότητα αποφυγής “sulfide stress corrosion cracking”. Τονίζεται ότι δεν ξεπεράστηκαν σε καμία μέτρηση τα προαναφερθέντα όρια για τις Θ.Ε.Ζ.

Αναφορικά, λοιπόν, με τις δυο Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες (ο σχολιασμός είναι ενιαίος, καθώς παρατηρήθηκε το ίδιο φαινόμενο) μετρήθηκαν μικροσκληρότητες ελαφρώς υψηλότερες από αυτές των αντίστοιχων Μετάλλων Βάσης. Και στις δυο περιπτώσεις η αύξηση αυτή είναι αμελητέα (της τάξεως του 1-3%) και δεν υπήρξαν τιμές με μεγάλη διακύμανση από τη μέση τιμή. Έτσι είναι εύλογο να πούμε ότι η μικροσκληρότητα των Θ.Ε.Ζ. έμεινε πρακτικά ίση με αυτή του αντίστοιχου Μετάλλου Βάσης.

Επομένως τοπικά στη συγκόλληση οι μικρότερες μεμονωμένες τιμές παρατηρήθηκαν σε περιοχές δευτερογενούς μικροδομής της Ζ.Τ., έχοντας ελάχιστη διαφορά (πάλι της τάξης του 1-3%) από τις μικρότερες τιμές στην περιοχή του χάλυβα AH36, η οποία παρουσίασε και τη μικρότερη μέση τιμή μικροσκληρότητας.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σε κανένα σημείο του εξεταζόμενου δοκιμίου δεν μετρήθηκαν τιμές σκληρότητας ικανές να δικαιολογήσουν την πιθανότητα ύπαρξης μαρτενσίτη, κάτι που είναι θετικό καθώς η σκληρή και εύθραυστη δομή του είναι ανεπιθύμητη. Η μη ύπαρξη μαρτενσίτη επιβεβαιώνεται και στην επόμενη ενότητα μελέτης της μικροδομής.

Εν κατακλείδι, η επιλογή των συνθηκών στη μελετουμένη συγκόλληση, κρίνοντας από το προφίλ μικροσκληροτήτων, κρίνεται ως απόλυτα πετυχημένη, καθώς επετεύχθη η επιθυμητή κατάσταση κοντινών τιμών μικροσκληρότητας σε όλο το εξεταζόμενο προφίλ, με προϋπόθεση να μην είναι μικρότερες οι τιμές στις Θ.Ε.Ζ. και στη Ζ.Τ. από ότι στα Μ.Β., αλλά και ούτε πολύ υψηλές κατ' απόλυτη τιμή.

#### 4.4 Μελέτη Μικροδομής

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η μελέτη της μικροδομής των συγκολλημένων ελασμάτων, δηλαδή Μετάλλων Βάσης, Θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών και της Ζώνης Τήξης, ήταν ένα από τα βασικά τμήματα μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Προκειμένου να συμβεί αυτό, τα δοκίμια της συγκολληθείσας διατομής λειάνθηκαν, στιλβώθηκαν και προσεβλήθησαν χημικά, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι από τα χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν αυτό που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή διαυγείς εικόνες με καθαρές μορφές δομών, ήταν το Nital 2%. Οι εικόνες που ακολουθούν στην παρούσα ενότητα είναι όλες από προσβολή με αυτό. Οι λευκές περιοχές είναι σε κάθε εικονιζόμενη περίπτωση φερρίτης, ενώ οι σκούρες είναι περλίτης ή μπαινίτης.

Το Marshall's reagent δεν έδωσε εικόνες από τις οποίες μπορούσε να εξαχθεί κάτι παραπάνω. Το ίδιο ισχύει και για το LePera's reagent, ωστόσο η χρήση του συγκεκριμένου χημικού αντιδραστηρίου βοήθησε στην επιβεβαίωση των μετρήσεων μικροσκληρότητας, ως προς το γεγονός ότι δεν υπήρχε μαρτενσίτης σε κανένα σημείο της συγκόλλησης, αφού το συγκεκριμένο αντιδραστήριο εξειδικεύεται στην εμφάνιση μπαινίτη και μαρτενσίτη και δεν εμφάνισε πουθενά τον τελευταίο. Ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι μέσω αυτού του αντιδραστηρίου επιβεβαιώθηκαν ισχυρισμοί που γίνονται στη συνέχεια με τη βοήθεια των διαγραμμάτων CCT και των μικροσκληροτήτων, σχετικά με το αν οι σκούρες εμφανιζόμενες δομές ήταν περλίτης ή μπαινίτης. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται μεικτά ανά υποενότητα εικόνες οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Αρχικά γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των μικροδομών των Μετάλλων Βάσης (Μ.Β.). Στη συνέχεια ακολουθούν οι Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες (Θ.Ε.Ζ.) και τέλος η Ζώνη Τήξης. Στις παραπάνω περιοχές γίνεται ανάλυση φάσεων και μέτρηση του μεγέθους των κόκκων. Οι μετρήσεις μεγέθους κόκκων έγιναν σε φωτογραφίες μεγάλων μεγεθύνσεων και οι μέσες τιμές που εξήχθησαν ήταν από περισσότερες των 100 μετρήσεων ανά περιοχή, έτσι ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν το σφάλμα.

#### 4.4.1 Μέταλλα Βάσης

##### 4.4.1.1 Χάλυβας AH36

Παρατηρώντας τις μικρογραφίες του μετάλλου βάσης (Εικ.4.7-7.10) διαπιστώνεται ότι πρόκειται για διφασική φερριτοπερλιτική δομή, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο υλικό. Επίσης, οι κόκκοι του φερρίτη και του περλίτη έχουν έντονο προσανατολισμό, πράγμα που οφείλεται στον προσανατολισμό τους κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (θερμή έλαση) των ελασμάτων χάλυβα. Ο προσανατολισμός των κόκκων είναι κάθετος στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, δηλαδή ίδιος με τη φορά της έλασης.

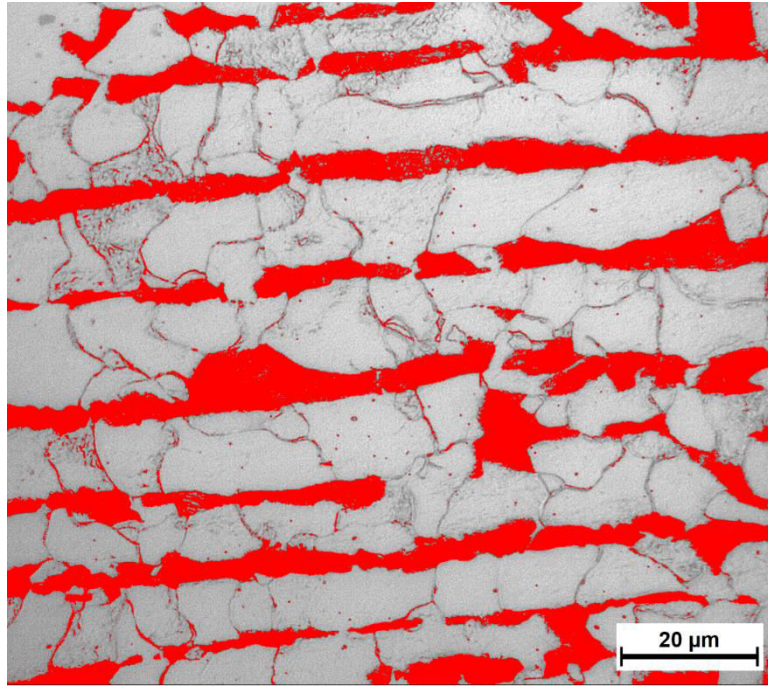
Ο προσανατολισμός της μικροδομής (banding) προς τη διεύθυνση της έλασης είναι ένα συχνό φαινόμενο διφασικών χαλύβων παραγομένων με θερμηλασία. Μάλιστα είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο, καθώς η αντοχή λιγότερο και η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα περισσότερο, μειώνονται λόγω της μεγάλης ανισοτροπίας στο υλικό [86]. Όπως είναι γνωστό σε διφασικούς χάλυβες χαμηλού άνθρακα, το Μαγγάνιο και το Πυρίτιο είναι δυο εκ των συνηθέστερων κραματικών στοιχείων. Τα δυο αυτά κραματικά στοιχεία (κυρίως το Μαγγάνιο, έχοντας ισχυρότερη επίδραση στο φαινόμενο) διαχωρίζονται από τους δενδρίτες του δ-φερρίτη, μαζί και με τη βοήθεια της πίεσης από την έλαση, δημιουργώντας έτσι ενδοδενδριτικές περιοχές πλούσιες σε αυτά (Mn/Si enriched regions) και περιοχές χωρίς αυτά (Mn/Si depleted regions). Αυτή η κατάσταση διατηρείται κατά τη φάση δενδριτικής ανάπτυξης των κρυστάλλων και μετατροπής του ωστενίτη σε φερρίτη. Ο σχηματισμός λωρίδων περλίτη σχετίζεται με την ανακατανομή του άνθρακα στις περιοχές με/χωρίς μαγγάνιο. Στις περιοχές χωρίς Μαγγάνιο ξεκινάει να κρυσταλλοποιείται αλλοτρίομορφος φερρίτης που ανακατανέμει τον άνθρακα, ο οποίος συσσωρεύεται σε περιοχές πλούσιες σε μαγγάνιο. Σε εκείνες τις περιοχές είναι που σχηματίζεται ο περλίτης.

Η φερριτική δομή (λευκόχρωμη φάση) έχει μεγαλύτερη έκταση από την περλιτική, πράγμα αναμενόμενο για τη χημική σύσταση του χάλυβα (0.18%C). Συγκεκριμένα τα ποσοστά των φάσεων μετρήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος οπτικής ανάλυσης Fiji: Image J. Παρακάτω φαίνεται η αναλυμένη εικόνα της μικροδομής και τα αποτελέσματα ποσοστών φάσεων.

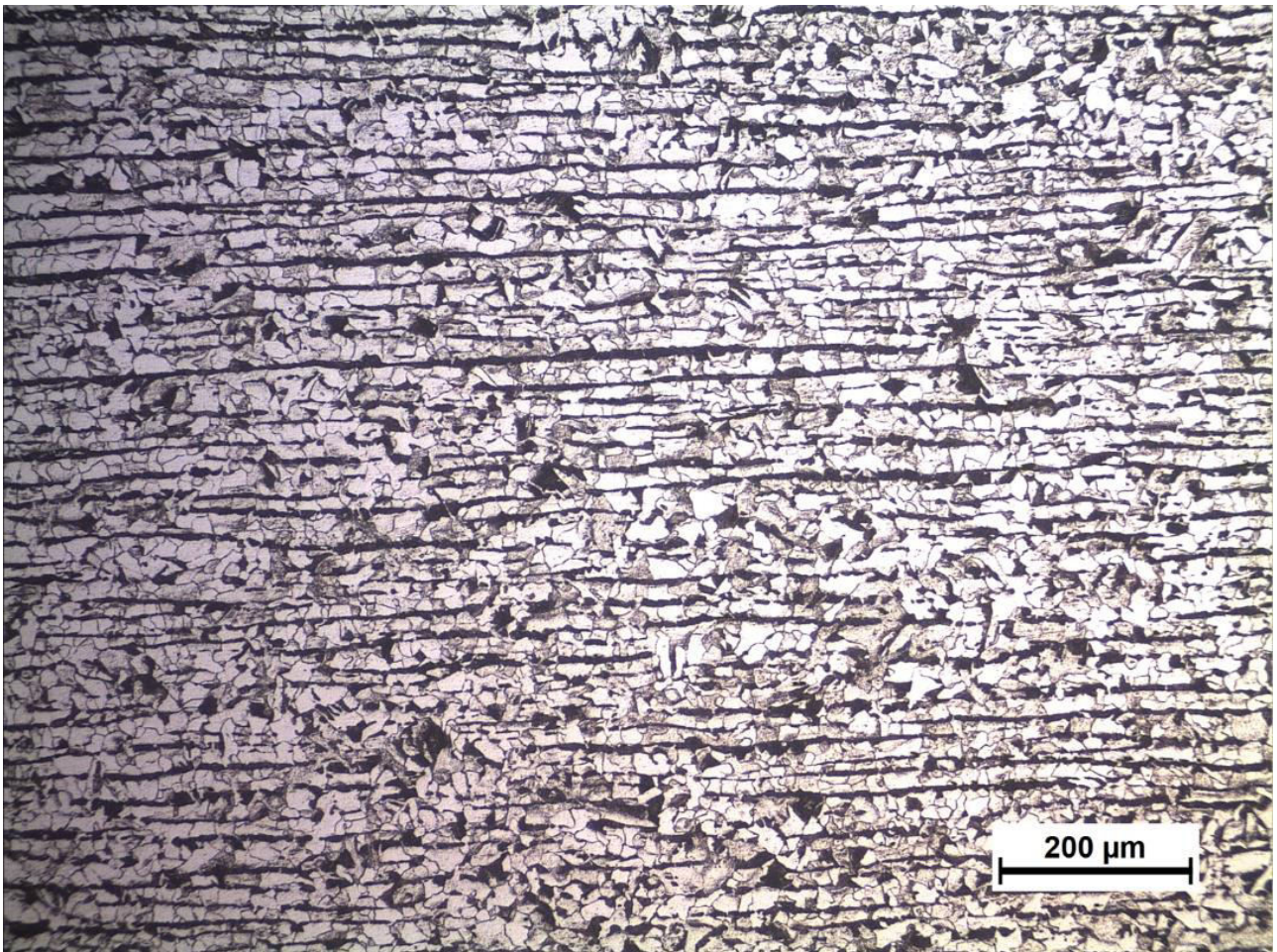
**Πίνακας 4.4: Ποσοστά Φάσεων Χάλυβα AH36**

Ποσοστά Φάσεων	
Φάση	Ποσοστό %
Φερρίτης	79.3
Περλίτης	20.7



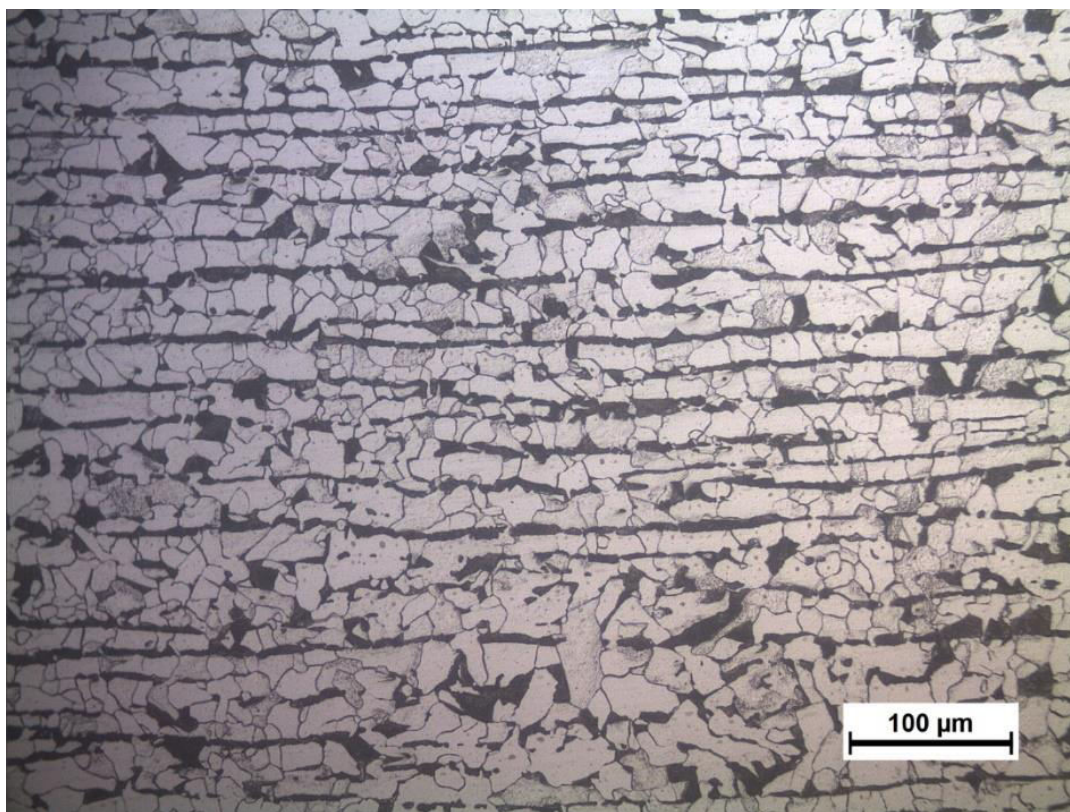


**Εικ. 4.9** Χάλυβας AH36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x1000. Οπτική ανάλυση φάσεων φερρίτη -περλίτη.



**Εικ. 4.10** Χάλυβας AH36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x100. Είναι εμφανής η προσανατολισμένη (banded) δομή, ενώ ακόμα είναι ξεκάθαρα τα όρια των κόκκων του φερρίτη.





**Εικ. 4.11** Χάλυβας AH36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x200. Είναι εμφανής η προσανατολισμένη (banded) δομή, ενώ ακόμα είναι ξεκάθαρα τα όρια των κόκκων του φερρίτη.

Στον χάλυβα AH36 οι μετρήσεις του μεγέθους των κόκκων του φερρίτη έδωσαν μέση τιμή ίση με 10.6  $\mu\text{m}$ . Στις μετρήσεις υπήρχε μικρή απόκλιση. Η τιμή αυτή όπως θα δούμε παρακάτω είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του AH40 FCA, κάτι αναμενόμενο, αφού ο τελευταίος παράγεται με μέθοδο TMCP που δίνει ιδιαιτέρως λεπτόκοκκες δομές, ωστόσο και αυτή χαρακτηρίζεται ως λεπτόκοκκη με τόσο μικρό μέγεθος κόκκων. Ο φερρίτης στον χάλυβα AH36 είναι ισοαξονικός (πολυγωνικός – polygonal ferrite) ή ημιπολυγωνικός (quasi-polygonal ferrite) σε όλα τα σημεία του μετάλλου.

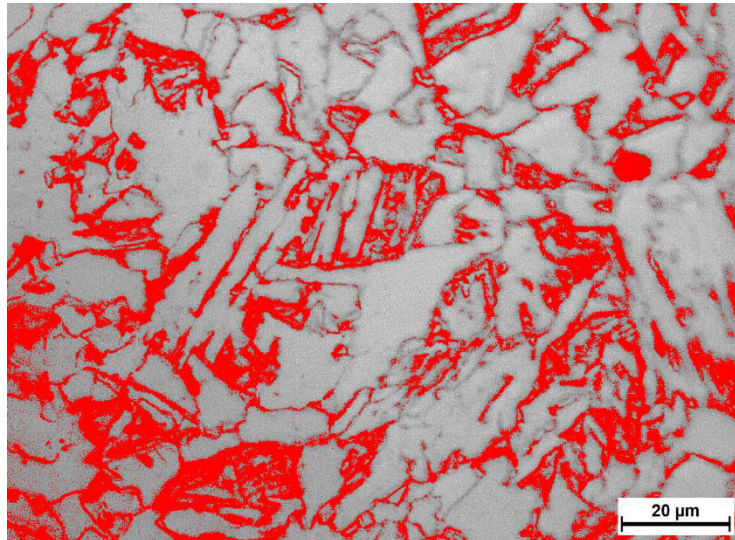
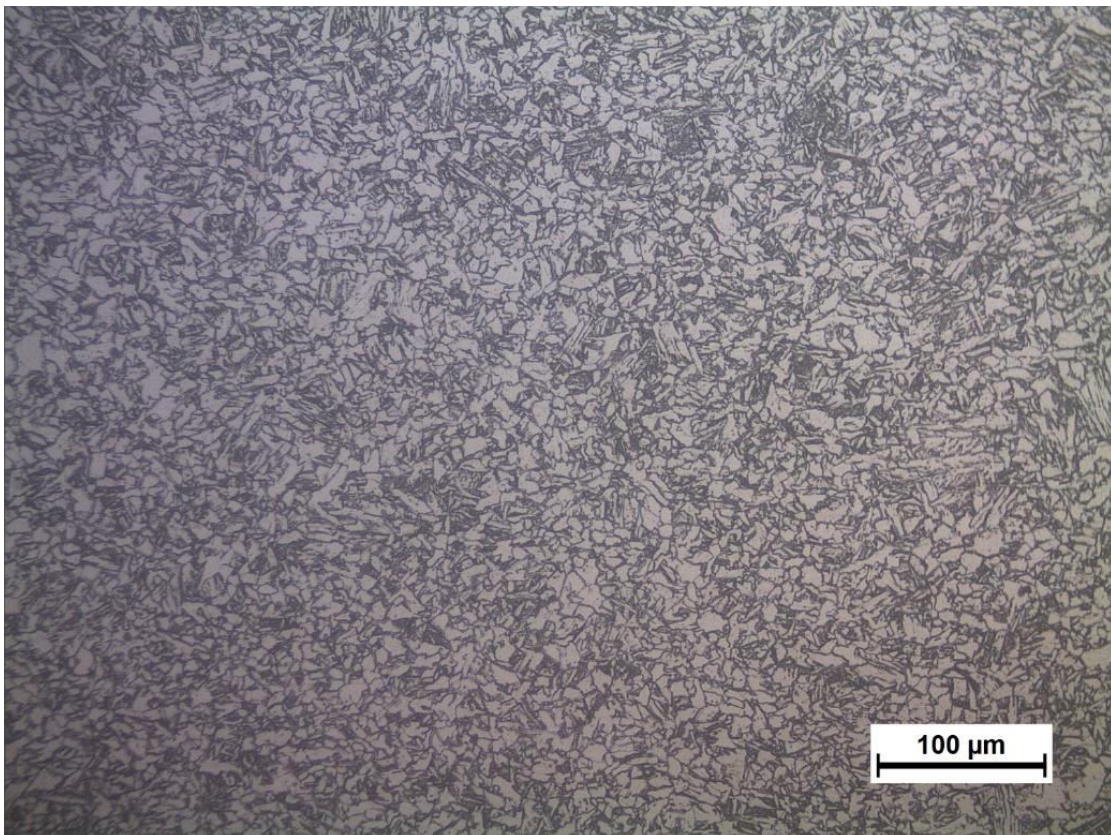
#### 4.4.1.2 Χάλυβας AH40 FCA

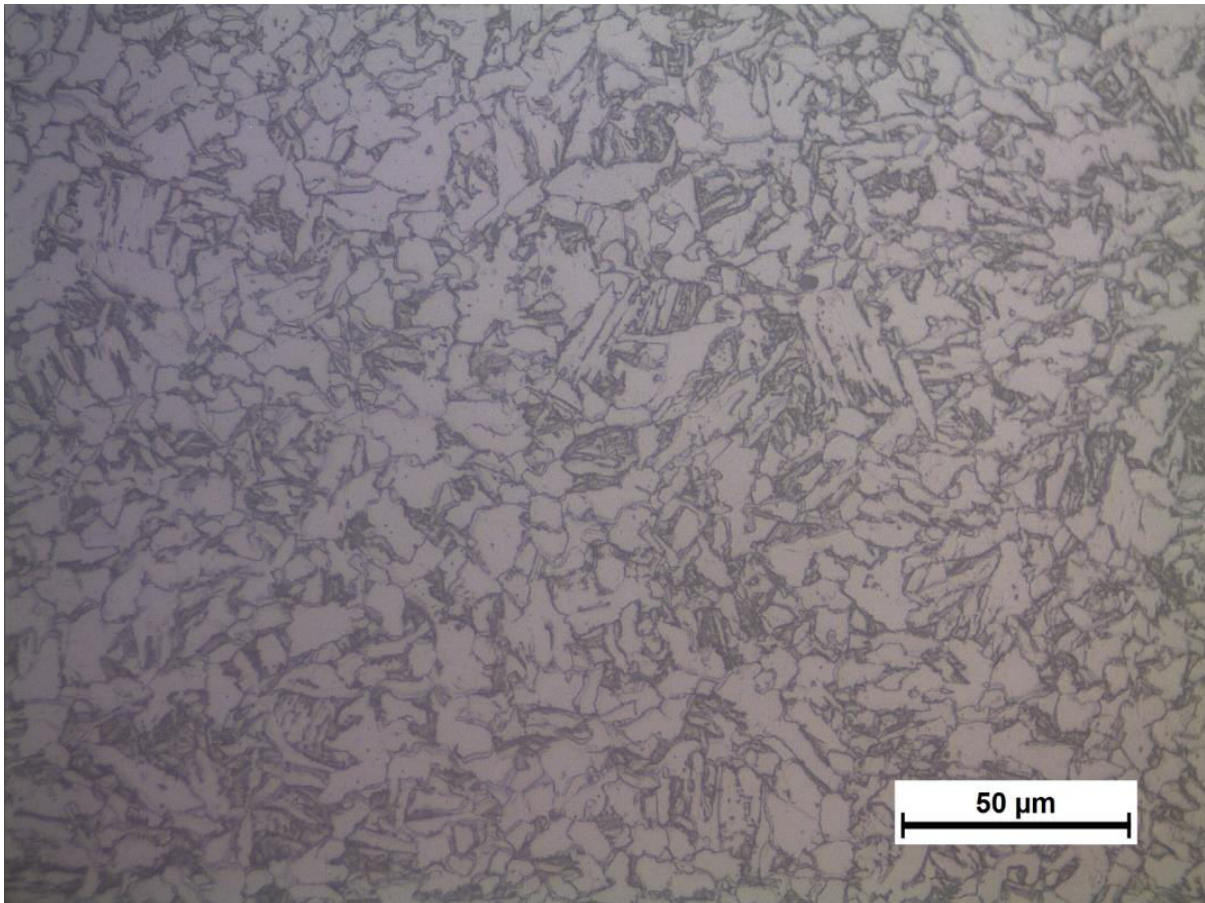
Αναφορικά με τον χάλυβα AH40 FCA, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο, η μικροδομή του είναι λεπτόκοκκη, διφασική, αποτελούμενη από εναλλαγές κόκκων φερρίτη και μπαινίτη. Οι λευκές περιοχές αντιπροσωπεύουν τη φάση του φερρίτη, ενώ οι μαύρες τους κόκκους του μπαινίτη. Η φερριτική δομή (λευκόχρωμη φάση) έχει μεγαλύτερη έκταση από την μπαινίτη, πράγμα αναμενόμενο για τη χημική σύσταση του χάλυβα (0.04%C). Συγκεκριμένα τα ποσοστά των φάσεων μετρήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος οπτικής ανάλυσης Fiji: Image J. Παρακάτω φαίνεται η αναλυμένη εικόνα της μικροδομής και τα αποτελέσματα ποσοστών φάσεων.



**Πίνακας 4.5: Ποσοστά Φάσεων Χάλυβα ΑΗ40 FCA**

Ποσοστά Φάσεων	
Φάση	Ποσοστό %
Φερρίτης	81.2
Μπαινίτης	18.8

**Εικ. 4.12** Χάλυβας ΑΗ40 FCA, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x1000. Οπτική ανάλυση φάσεων φερρίτη -μπαινίτη.**Εικ. 4.13** Χάλυβας ΑΗ36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x200. Φαίνεται η ημιπολυγωνική, λεπτόκοκκη, διφασική φερριτομπαινιτική μικροδομή.



**Εικ. 4.13** Χάλυβας AH36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x500. Φαίνεται η ημιπολυγωνική, λεπτόκοκκη, διφασική φερριτομπαινιτική μικροδομή, ενώ ακόμα είναι διακριτός τοπικά βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite).

Όπως συμβαίνει στους χάλυβες που έχουν παραχθεί με TMCP, υπάρχει βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite), που υποβοηθάται από την παρουσία Nb στη χημική σύσταση του χάλυβα. Γενικά, ωστόσο, η μικροδομή του χάλυβα κυριαρχείται από ημιπολυγωνικό φερρίτη ενώ ακόμα έχει ισοαξονικούς κόκκους φερρίτη. Το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη στον χάλυβα αυτό είναι ιδιαίτερα μικρό, όπως έχει προαναφερθεί, δίνοντας μια εξαιρετικά λεπτόκοκκη μικροδομή. Η μέση τιμή μετρήθηκε ίση με 9.4 μm, χωρίς να υπάρχει απόκλιση στις τιμές, δείχνοντας την απόλυτη ομοιογένεια του υλικού. Όπως αναφέρθηκε το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη είναι μικρότερο από αυτό του χάλυβα AH36.



#### 4.4.2 Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες

Πρώτου γίνει η παρουσίαση των Θ.Ε.Ζ. των συγκολλημένων χαλύβων κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη ανάλυση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της περιοχής αυτής. Η Θ.Ε.Ζ., όπως είναι γνωστό, είναι η περιοχή του συγκολλουμένου μετάλλου η οποία θερμαίνεται λόγω αγωγής, επειδή βρίσκεται κοντά στη Ζώνη Τήξης. Στη Θ.Ε.Ζ. αναπτύσσονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες για να προκαλέσουν αλλαγή της μικροδομής στέρεας κατάστασης, αλλά όχι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν τήξη. Η περιοχή αυτή χωρίζεται σε υποπεριοχές, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, οι οποίες είναι [2]:

- Ζώνη υπερθέρμανσης (coarse grained HAZ - CGHAZ), για  $\theta \gg A_{c3}$ , δηλαδή για θερμοκρασίες μέσα στην ωστενιτική περιοχή ( $>1100^{\circ}\text{C}$ ).
- Ζώνη ολικής ανόπτησης (fine grained HAZ - FGHAZ), για  $\theta > A_{c3}$ , δηλαδή για σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, μέσα στην ωστενιτική περιοχή.
- Ζώνη μερικής ανόπτησης (intercritical HAZ - ICHAZ), για θερμοκρασίες μεταξύ  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , δηλαδή, όπου δεν υπάρχει πλήρης ωστενιτοποίηση.

Στη ζώνη υπερθέρμανσης εμφανίζονται φαινόμενα μεγέθυνσης των κόκκων του ωστενίτη. Τα φαινόμενα αυτά απαιτούν αρκετό χρόνο για να ολοκληρωθούν. Στην πρακτική των συγκολλήσεων, η μεγέθυνση των κόκκων εκδηλώνεται μόνον για θερμοκρασίες αρκετά ανώτερες των  $1100^{\circ}\text{C}$ . Κατά τη απόψυξη από αυτές τις θερμοκρασίες, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε φερρίτη, που έχει βελονοειδή μορφή (Windmastätten), η οποία μειώνει τη δυσθραυστότητα του χάλυβα. Οι σχετικά μεγάλες ταχύτητες απόψυξης (πάνω από 100-200 C/min) ευνοούν το σχηματισμό βελονοειδούς φερρίτη. Για τους ίδιους λόγους ο σχηματισμός φερρίτη Windmastätten, ο οποίος περιβάλλεται από τροοστίτη (πολύ λεπτό περλίτη), συναντάται τόσο στη ζώνη υπερθέρμανσης όσο και στη ζώνη τήξης μιας συγκόλλησης. Η παρουσία καρβιδιογόνων στοιχείων (π.χ. Mn, Cr, Mo) ευνοεί το σχηματισμό αυτό. Στη ζώνη πλήρους ανόπτησης επικρατούν συνθήκες ολικής ανόπτησης ή ανόπτησης εξομόλυνσης. Επομένως μετασχηματισμός του ωστενίτη σε φερρίτη και περλίτη, κατά τη απόψυξη, οδηγεί σε λεπτές και πολύ ομοιόμορφες δομές με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Τέλος, στη ζώνη μερικής ανόπτησης, δεν πραγματοποιείται πλήρως ωστενιτοποίηση, καθώς ούτε η θερμοκρασία, ούτε ο χρόνος παραμονής επαρκούν για την πλήρη ωστενιτοποίηση. Στις ωστενιτοποιημένες περιοχές, κατά την απόψυξη, ο κόκκος εκλεπτύνεται με τη δημιουργία ευτυκτοειδούς φερρίτη και περλίτη. Έτσι, εμφανίζονται φερριτοπερλιτικές δομές, κατά κανόνα πολύ λεπτές, αλλά και με κάποια ανομοιομορφία στο μέγεθος του κόκκου.

Οι προαναφερθείσες περιοχές ωστόσο είναι ιδιαίτερα δυσδιάκριτες, επομένως στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η Θ.Ε.Ζ. αντιμετωπίστηκε ως ενιαία ζώνη. Η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας, λόγω της εισαγόμενης θερμότητας, στην αλλαγή της μικροδομής του υλικού στη ΘΕΖ, μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση του διαγράμματος CCT (Continuous Cooling Transformation Diagram) του χάλυβα.

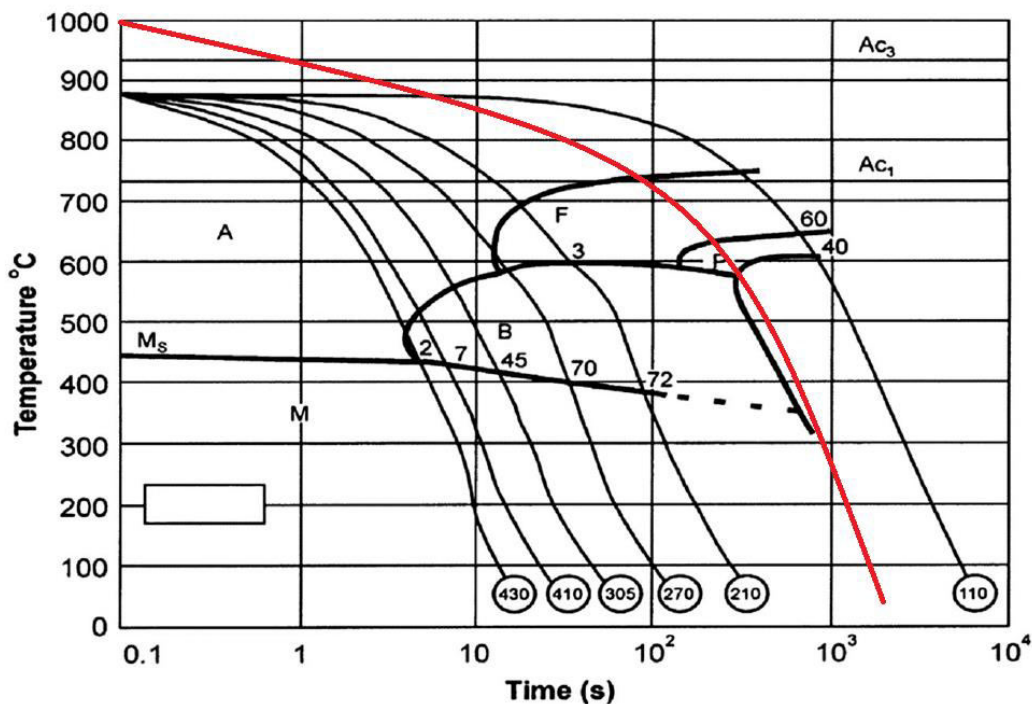
#### 4.4.2.1 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη ΑΗ36

Στη Θ.Ε.Ζ. του ΑΗ36 το πρώτο πράγμα που παρατηρείται είναι ότι η χαρακτηριστική προσανατολισμένη (banded) δομή του χάλυβα αυτού δεν υπάρχει πλέον, πάρα μόνο στις παρυφές της ζώνης μερικής ανόπτησης προς τη μεριά του Μ.Β.

Αυτό συμβαίνει καθώς οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στην Θ.Ε.Ζ. προκαλούν διάχυση και ανακατανομή των ατόμων, χαλώντας τη δομή αυτή, αφού πλέον δεν υπάρχει ο παράγων της έλασης που συντελούσε στη δημιουργία της.

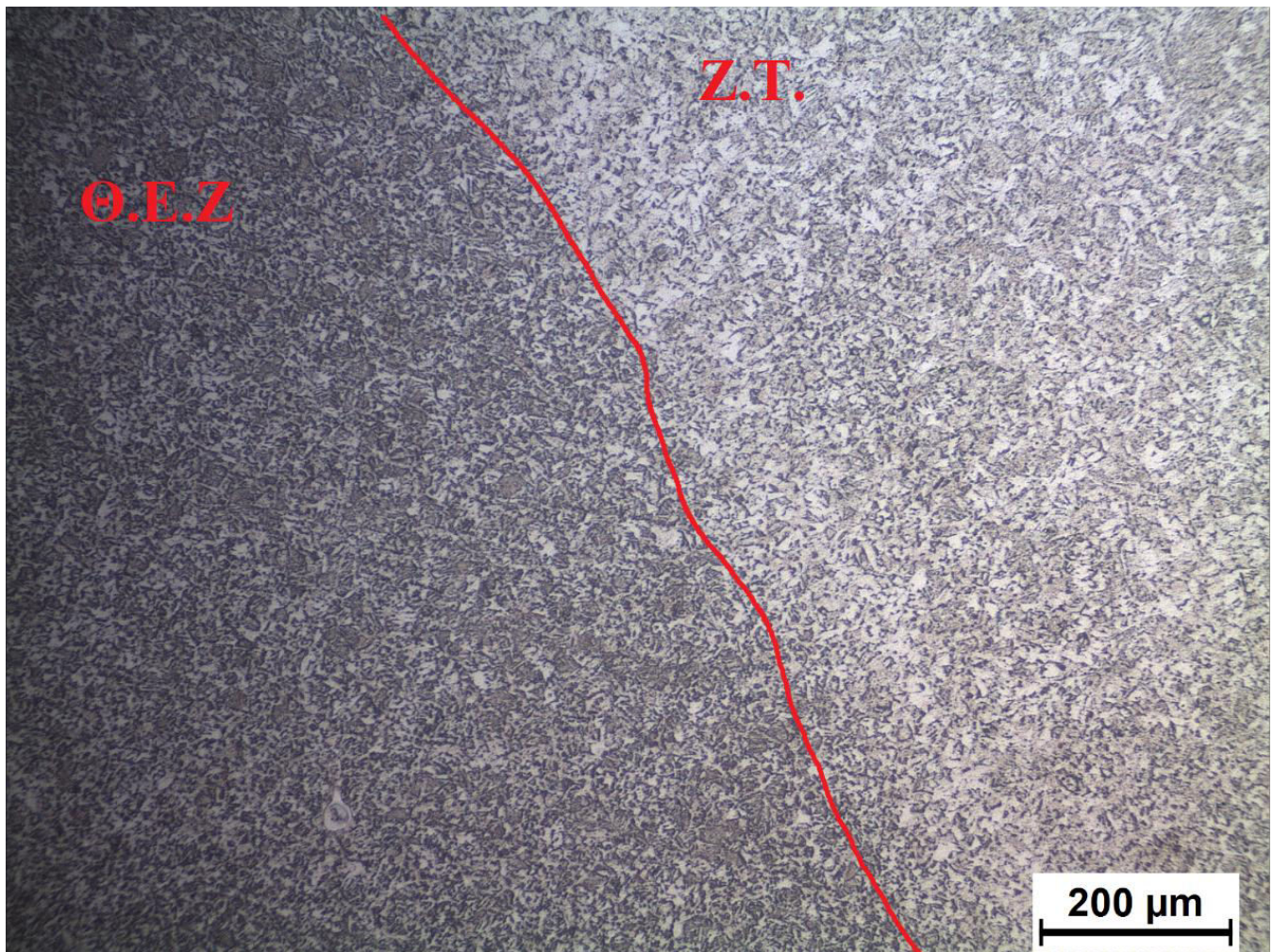
Στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη παρατηρείται τοπικά (και κυρίως στη ζώνη υπερθέρμανσης) η ύπαρξη βελονοειδούς φερρίτη (acicular ferrite), ο οποίος ενοείται από την παρουσία ΤΙ και Νb και αναπτύσσεται γύρω από μη μεταλλικά εγκλείσματα, και φερρίτη Widmanstätten, ο οποίος ενοείται από την παρουσία καρβιδιογόνων στοιχείων όπως το Μn, Cr, Μο. Από τα προαναφερθέντα χημικά στοιχεία όλα, εκτός του Τi υπήρχαν στον χάλυβα ΑΗ36 και μάλιστα το Μαγγάνιο και το Χρώμιο σε αρκετά μεγάλη ποσότητα.

Παρατηρώντας τη μικροδομή των Θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών και λαμβάνοντας υπόψη τις μικροσκληρότητες που μετρήθηκαν, σε συνδυασμό με το διάγραμμα CCT του προηγούμενου εδαφίου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. του ΑΗ36 αποτελείται από φερρίτη και περλίτη, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη εικόνα. Η απεικόνιση δεν είναι απόλυτα ακριβής, λόγω των προαναφερθέντων ιδιοτεροτήτων του θερμικού κύκλου μια συγκόλλησης, και λόγω του γεγονότος ότι το διάγραμμα CCT δεν είναι προσαρμοσμένο διάγραμμα CCT-S, ωστόσο αποτελεί την καλύτερη δυνατή εκτίμηση.



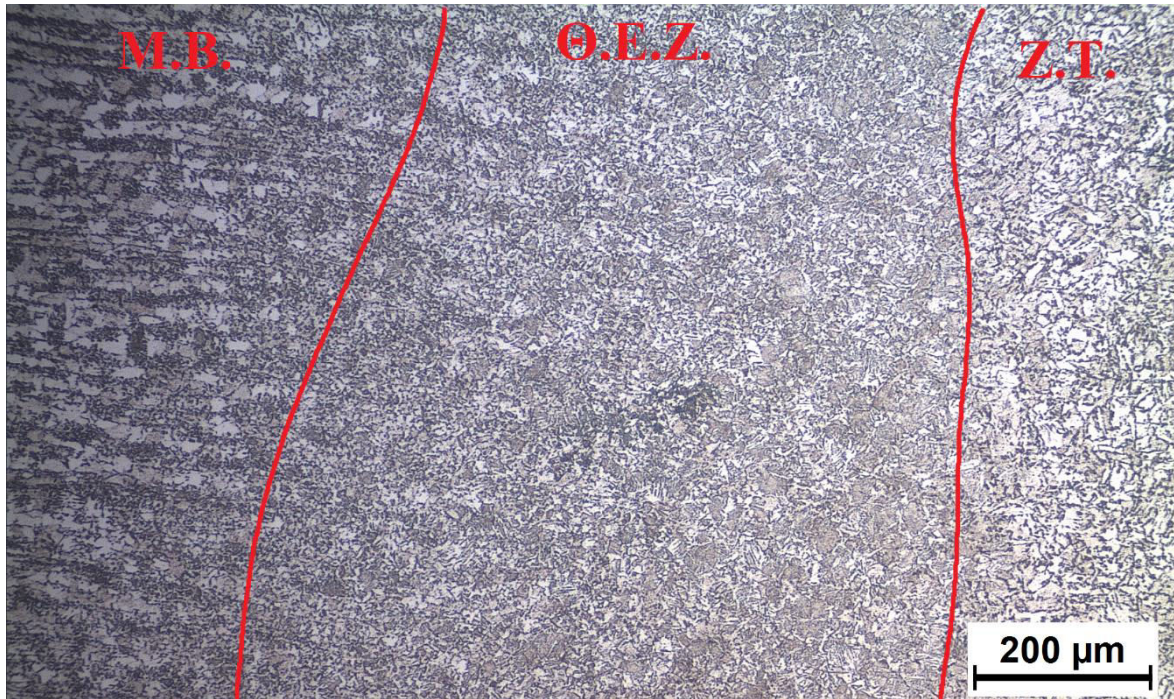
Εικ. 4.14 Διάγραμμα CCT χάλυβα ΑΗ36 και εκτιμώμενη απόψυξη (κόκκινη γραμμή).

Εκτός των ανωτέρω, υπήρχε σε μεγάλη έκταση (σε όλες τις υποπεριοχές) ημιπολυγωνικός φερρίτης (quasi-polygonal ferrite), στον οποίο έγιναν και οι περισσότερες μετρήσεις για το μέγεθος των κόκκων. Το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη στη Θ.Ε.Ζ. του ΑΗ36 απέκτησε μια ανεπαίσθητη αύξηση, μιλώντας με όρους μέσης τιμής, η οποία οφείλεται εξ ολοκλήρου στη ζώνη υπερθέρμανσης, η οποία είναι εξ ορισμού πιο χονδρόκοκκη (grain coarsening). Η μέση τιμή του μεγέθους των κόκκων του φερρίτη προέκυψε ίση με 10.9 μm. Στις τιμές υπήρχε φυσικά απόκλιση από τη μέση τιμή, καθώς οι διάφορες ζώνες της HAZ έχουν άλλη κοκκομετρία. Μια τόσο μικρή απόκλιση από τη μέση τιμή του Μ.Β. επιτρέπει να θεωρηθεί ότι το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη έμεινε πρακτικά ίδιο. Και εδώ η δομή μπορεί να χαρακτηριστεί ως λεπτόκοκκη. Σε αυτό συντέλεσε σημαντικά η χαμηλή πρόσδοση θερμότητας που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

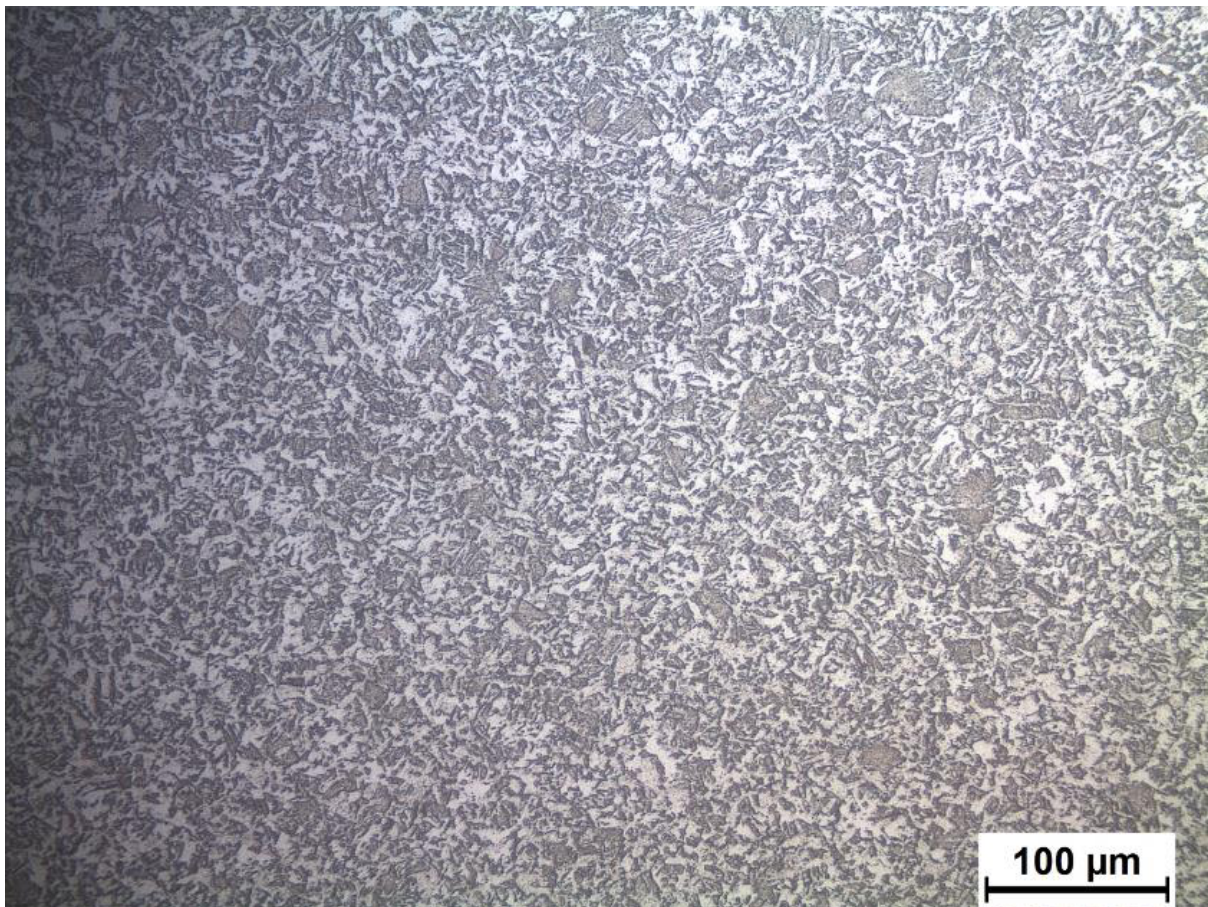


**Εικ. 4.15** Θ.Ε.Ζ ΑΗ36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x100. Είναι εμφανής η μετάβαση από τη Θ.Ε.Ζ. στη Ζ.Τ και η ζώνη σύνδεσης.



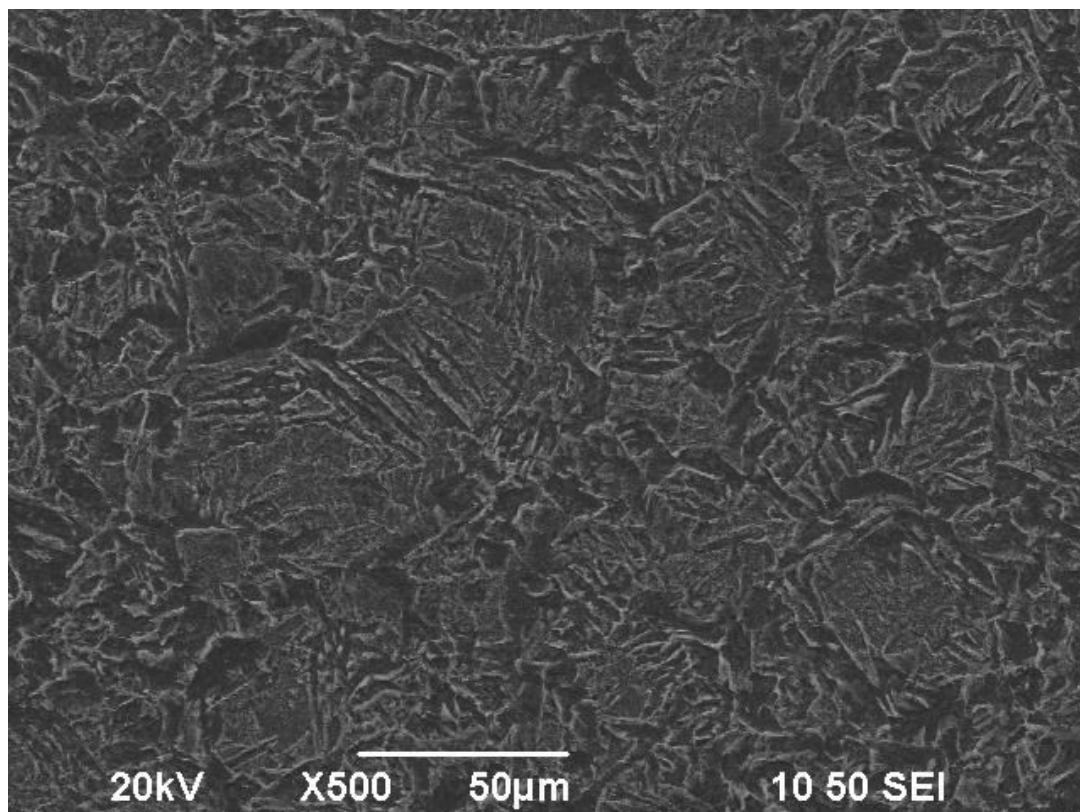


**Εικ. 4.15** Θ.Ε.Ζ AH36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x100. Είναι εμφανής η μετάβαση από το M.B. στη Θ.Ε.Ζ. και από εκεί στη Z.T.



**Εικ. 4.17** Θ.Ε.Ζ AH36, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x200. Όπως φαίνεται έχει χαθεί η banded δομή και κυριαρχεί ημιπολυγωνικός φερρίτης.





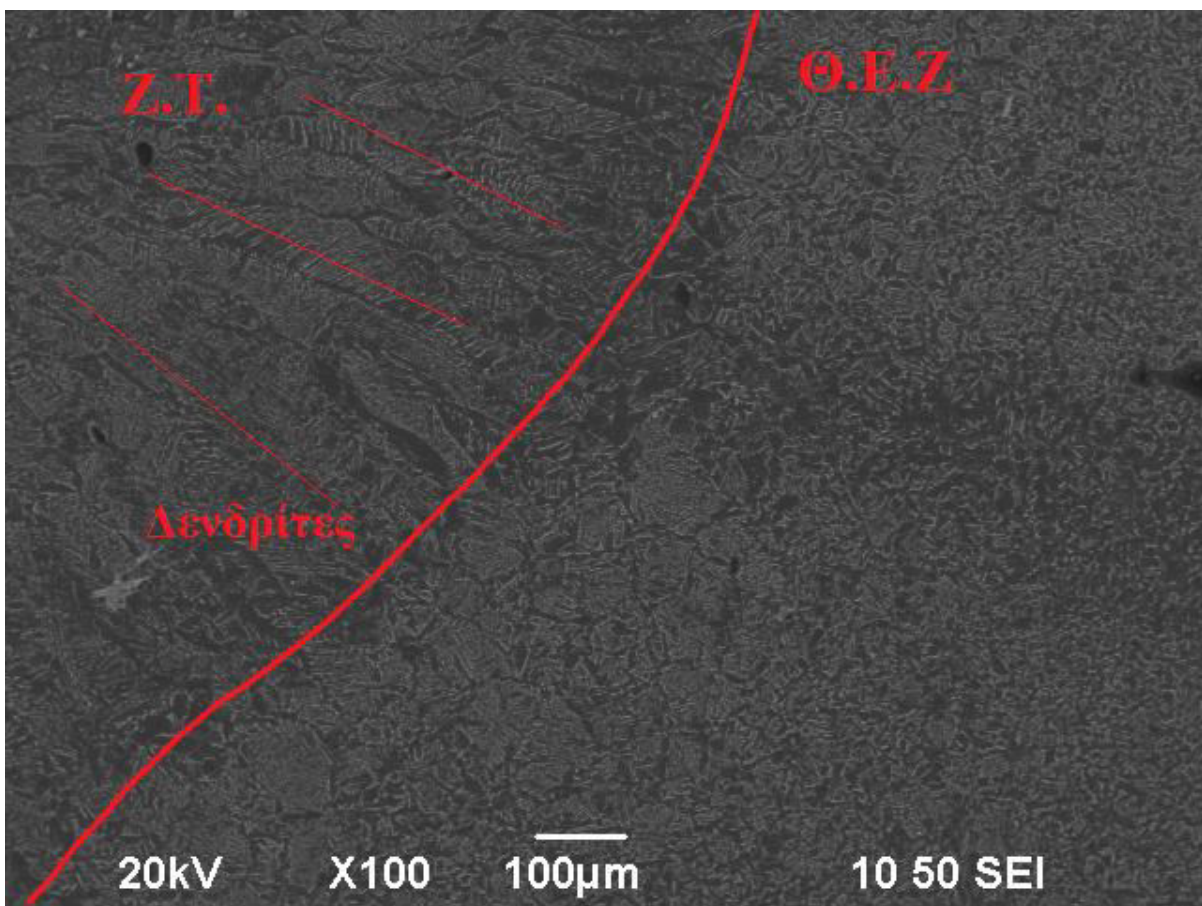
**Εικ. 4.18** Θ.Ε.Ζ ΑΗ36, SEM, μεγέθυνση x500. Φαίνονται τοπικά βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite) και φερρίτης Widmanstätten.

#### 4.4.2.2 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη ΑΗ40 FCA

Στη Θ.Ε.Ζ. του ΑΗ40 FCA παρατηρείται ότι η μικροδομή δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά. Παρατηρώντας τη μικροδομή των Θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών και λαμβάνοντας υπόψη τις μικροσκληρότητες που μετρήθηκαν, σε συνδυασμό με το διάγραμμα CCT του προηγούμενου εδαφίου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι μικροδομή της Θ.Ε.Ζ. του ΑΗ40 FCA αποτελείται από φερρίτη και μπαινίτη, χωρίς ύπαρξη περλίτη, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη εικόνα. Η απεικόνιση δεν είναι ακριβής, λόγω των προαναφερθέντων ιδιοτεροτήτων του θερμικού κύκλου μια συγκόλλησης, και λόγω του γεγονότος ότι το διάγραμμα CCT δεν είναι προσαρμοσμένο διάγραμμα CCT-S, ωστόσο αποτελεί την καλύτερη δυνατή εκτίμηση.

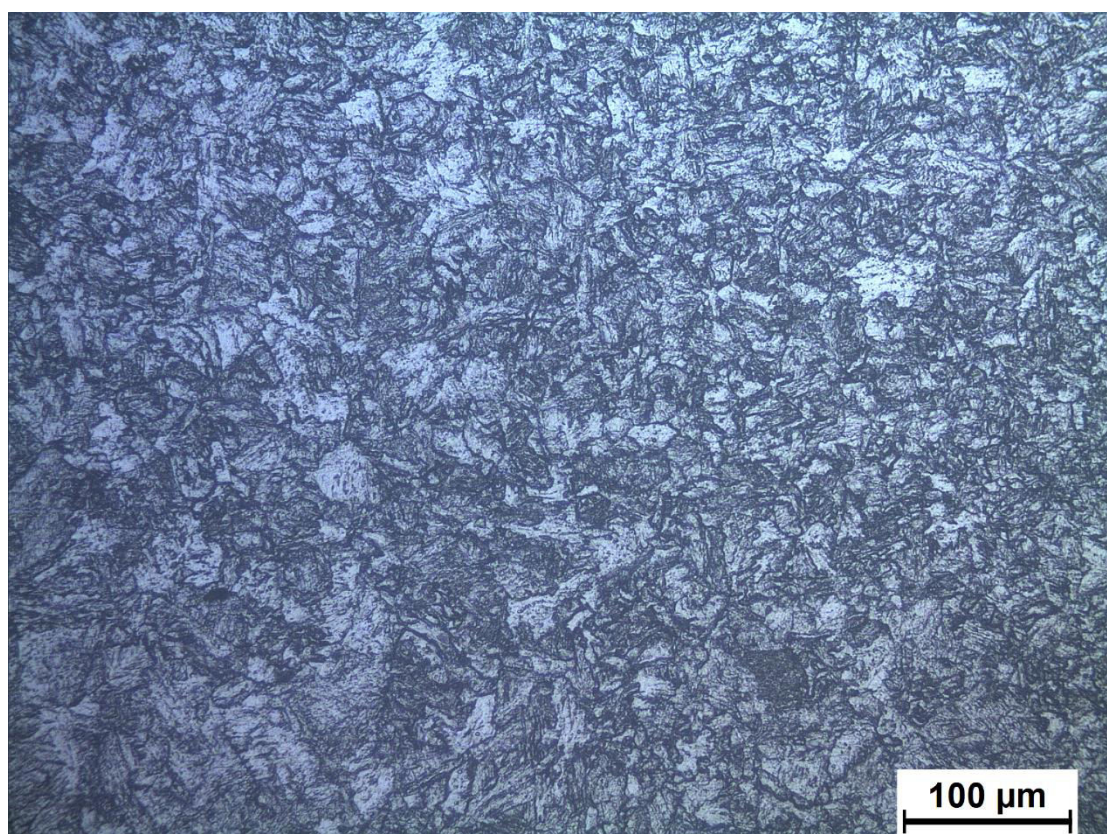
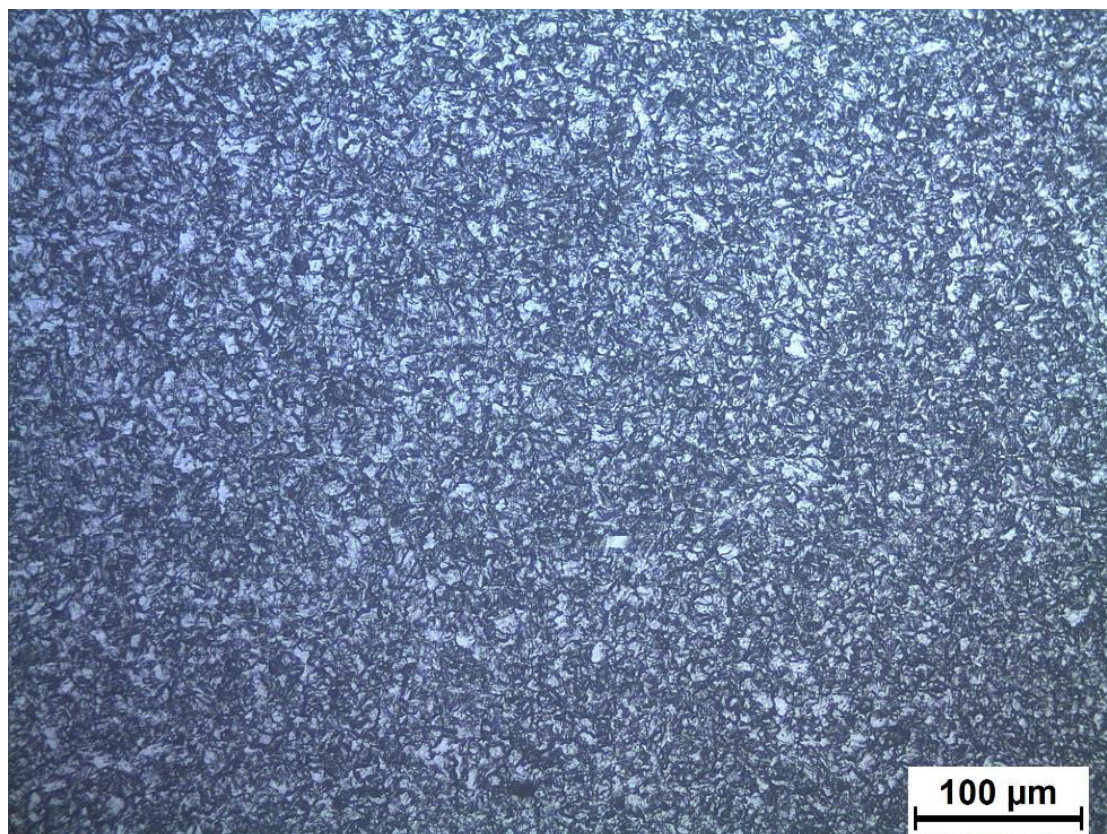
Διατηρείται δηλαδή η διφασική φερριτομπαινιτική μικροδομή του χάλυβα ΑΗ40 FCA, επιβεβαιώνοντας τη βιβλιογραφία (βλ. Κεφ.2) ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να διατηρεί τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του και στη Θ.Ε.Ζ. των συγκολλήσεών του, διατηρώντας συνάμα και τα πλεονεκτήματα της έναντι της κόπωσης και της έναρξης και διάδοσης ρωγμών.

Οι κόκκοι του φερρίτη ακολουθούν ίδια λογική με το M.B. Δηλαδή υπάρχει βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite), που υποβοηθάται από την παρουσία Nb στη χημική σύσταση του χάλυβα και από μη μεταλλικά εγκλείσματα. Γενικά, ωστόσο, η μικροδομή του χάλυβα κυριαρχείται από ημιπολυγωνικό φερρίτη ενώ ακόμα έχει ισοαξονικούς κόκκους φερρίτη. Το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη ήταν και σε αυτή την περίπτωση ανεπαίσθητα αυξημένο, γεγονός που οφείλεται και εδώ στη ζώνη υπερθέρμανσης, όπου έχουμε εξ ορισμού αύξηση του μεγέθους των κόκκων (grain coarsening). Η μέση τιμή μετρήθηκε ίση με 9.6  $\mu\text{m}$ , με μικρή απόκλιση στις τιμές, δείχνοντας ότι εν γένει διατηρήθηκε και η ομοιογένεια του υλικού. Μια τόσο μικρή απόκλιση από τη μέση τιμή του M.B. επιτρέπει να θεωρηθεί ότι το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη έμεινε πρακτικά ίδιο, διατηρώντας και στη Θ.Ε.Ζ. τα χαρακτηριστικά της λεπτόκοκκης δομής του.



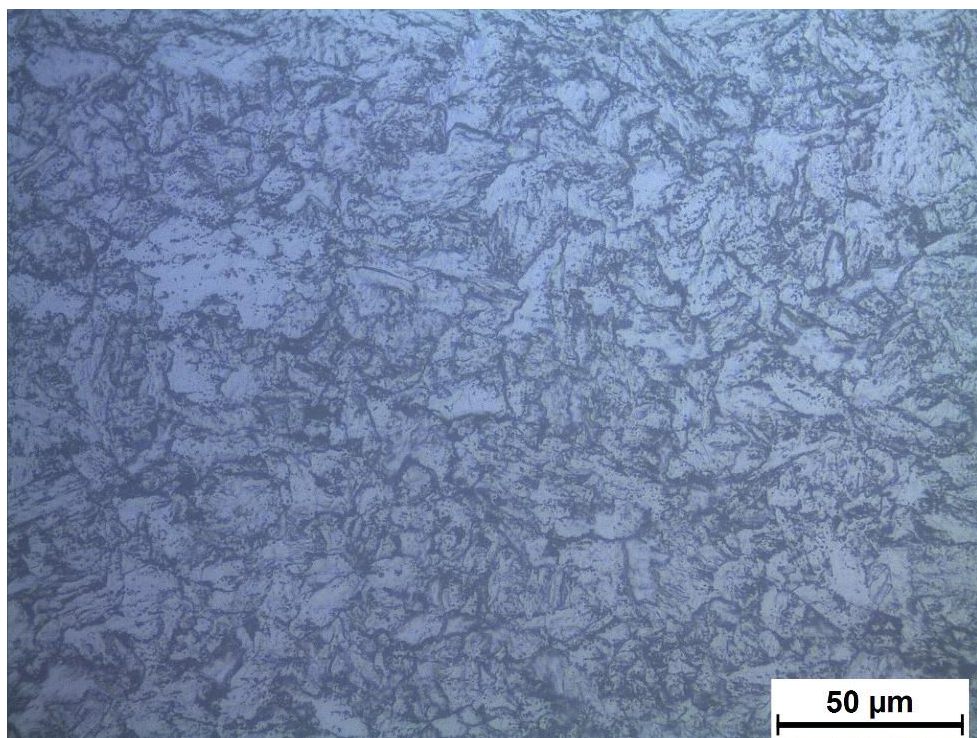
**Εικ. 4.19** Θ.Ε.Ζ AH40 FCA, SEM, μεγέθυνση x200. Είναι εμφανής η Θ.Ε.Ζ., η ζώνη σύνδεσης αλλά και η Z.T.





**Εικ. 4.20α, 4.20β** Θ.Ε.Ζ ΑΗ40 FCA, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x200. Πάνω φαίνεται η ζώνη FGHAZ και κάτω η CGHAZ. α) Είναι εμφανείς κυρίως ημιπολυγωνικοί κόκκοι φερριτη. β) διακρίνεται και βελονοειδής φερριτης.





**Εικ. 4.21** Θ.E.Z AH40 FCA, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x500.

#### 4.4.3 Ζώνη Τήξης

Μέσα στη Ζώνη Τήξης (Z.T.), όπως αναφέρθηκε, παρατηρούνται δύο είδη μικροδομών, τα οποία έχουν να κάνουν με τους ρυθμούς απόψυξης και στερεοποίησης του τηγμένου μετάλλου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κορδόνι που εισάγεται στη συγκόλληση στερεοποιείται ταχέως και η μικροδομή του αναπτύσσεται, όπως είναι γνωστό, για μεγάλους ρυθμούς απόψυξης [2] με τη μορφή δενδριτών, σχηματίζοντας την πρωτογενή μικροδομή. Παρόλα αυτά η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της ενέργειας που εισάγεται στη συγκόλληση από το επόμενο πάσο, συμβάλλει στην ανόπτηση και στην ανακρυστάλλωση του μετάλλου συγκόλλησης που έχει ήδη εναποτεθεί και στερεοποιηθεί, σχηματίζοντας τη δευτερογενή περιοχή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν βρέθηκε σε κανένα σημείο της Z.T. μαρτενσίτης (ελέγχθηκε με LePera's Reagent), όπως υποδείκνυαν και οι μετρηθείσες τιμές μικροσκληρότητας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς για τη μελετουμένη συγκόλληση και τις εφαρμογές, η σκληρή και εύθραυστη δομή του μαρτενσίτη καθίσταται σχεδόν απαγορευτική. Αναφέρεται απλώς ότι η ζώνη σύνδεσης μετρήθηκε περίπου στα 100μm. Ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στο SEM δεν παρατηρήθηκαν οξειδία και σουλφίδια ή άλλου τύπου ακαθαρσίες, πάρα μόνο λίγα μη μεταλλικά εγκλείσματα. Παρακάτω γίνεται αρχικά παρουσίαση και ανάλυση των πρωτογενών περιοχών ταχείας ανακρυστάλλωσης και στη συνέχεια ακολουθούν οι “ανοπτημένες” περιοχές.

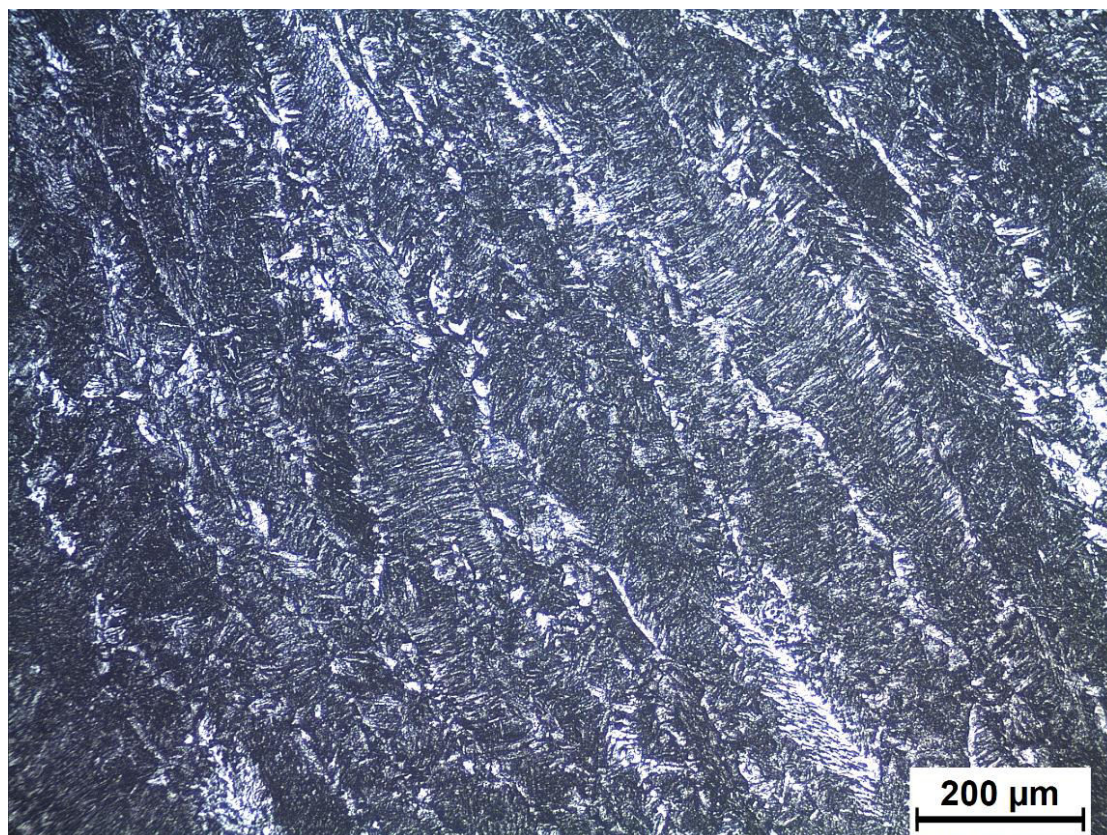


#### 4.4.3.1 Πρωτογενής Μικροδομή

Γενικά στη Ζ.Τ. οι κόκκοι αναπτύσσονται στη διεύθυνση της ροής θερμότητας και έχουν ανισοτροπία [73]. Στην περίπτωση των περιοχών πρωτογενούς μικροδομής της υπό μελέτη συγκόλλησης οι δενδρίτες αναπτύσσονται κάθετα στην ζώνη σύνδεσης (Εικ. 4.20) με κατεύθυνση το κέντρο της συγκόλλησης.

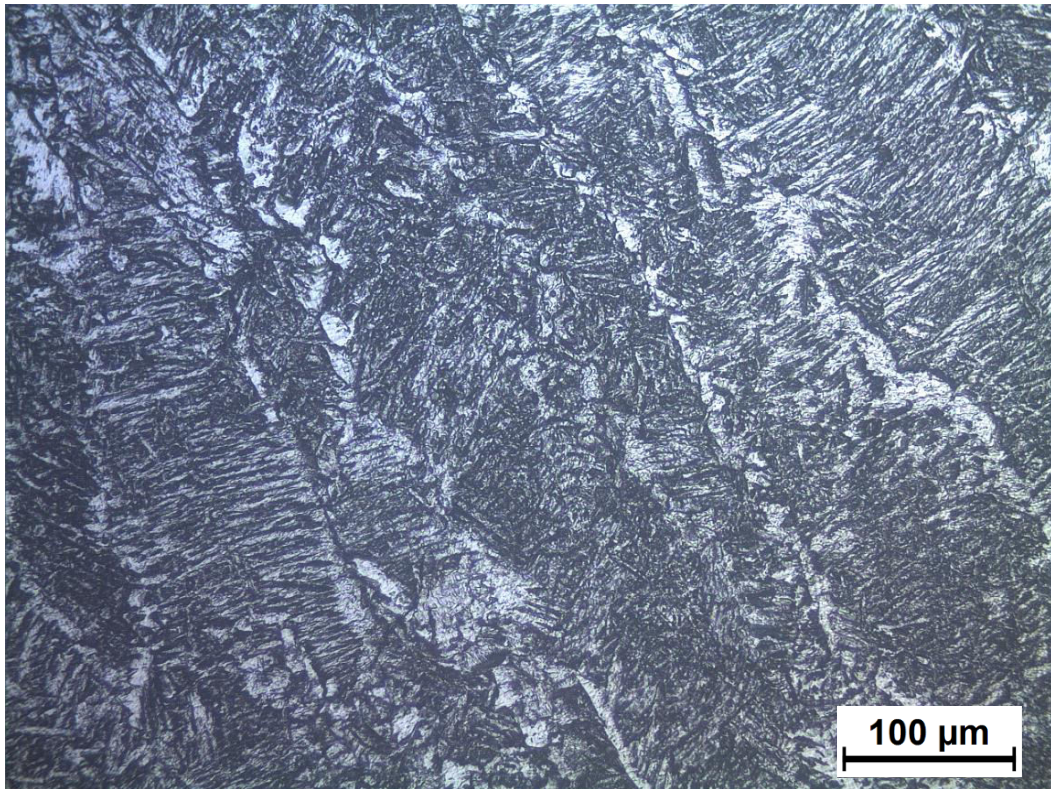
Στις περιοχές αυτές η μικροδομή είναι φερριτομπαινιτική, όπως υποδεικνύεται και από τις μικροσκληρότητες. Η μικροδομή είναι μια μίξη πολλών ειδών φερρίτη και είναι γενικώς όμοια στις διάφορες περιοχές πρωτογενούς μικροδομής, με μικρές διαφορές. Αρχικά παρατηρείται αλλοτριόμορφος φερρίτης (grain-boundary ferrite) ο οποίος είναι ο πρώτος που αναπτύχθηκε από τον ωστενίτη. Από τον αλλοτριόμορφο φερρίτη κρυσταλλοποιούνται υπό γωνία ομάδες φερρίτη Widmanstätten. Ο φερρίτης Widmanstätten είναι εντονότερος στις περιοχές των πάσων επικάλυψης (WM-6 και WM-7) όπου κυριαρχεί τη μικροδομή. Στις υπόλοιπες πρωτογενείς περιοχές υπάρχει, όχι όμως σε τόσο μεγάλο βαθμό, καθώς είναι εντονότερος ο ημιπολυγωνικός και ο πολυγωνικός φερρίτης, οι οποίοι υπάρχουν σε μικρότερο βαθμό στα πάσα επικάλυψης. Σε ορισμένες περιοχές παρατηρείται μικρή ποσότητα βελονοειδούς φερρίτη (acicular ferrite) που έχει αναπτυχθεί γύρω από μη μεταλλικά εγκλείσματα.

Επισημαίνεται ότι δεν ελήφθησαν από τις περιοχές αυτές πολλές μετρήσεις για το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη της Ζ.Τ., καθώς κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό στις διαδεδομένες μορφές του αλλοτριόμορφου φερρίτη και του φερρίτη Widmanstätten.

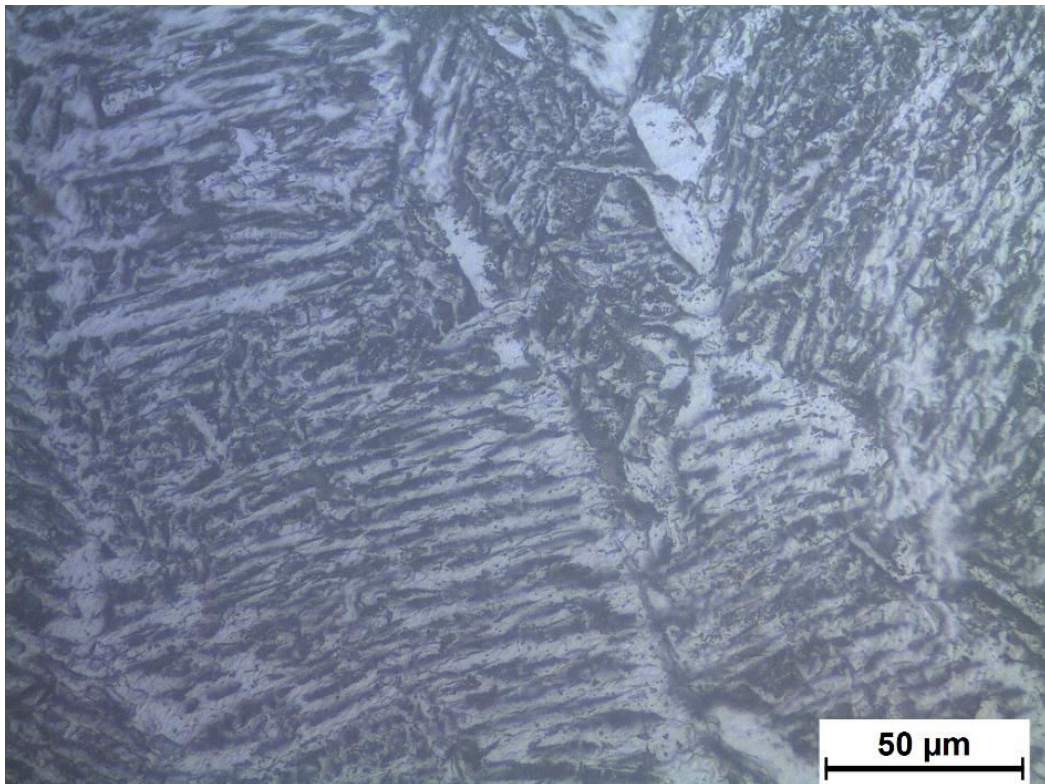


**Εικ. 4.22** Ζ.Τ, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x100. Φαίνεται η χαρακτηριστική πρωτογενή μικροδομή και ο αλλοτριόμορφος φερρίτης που διατρέχει τους δενδρίτες.

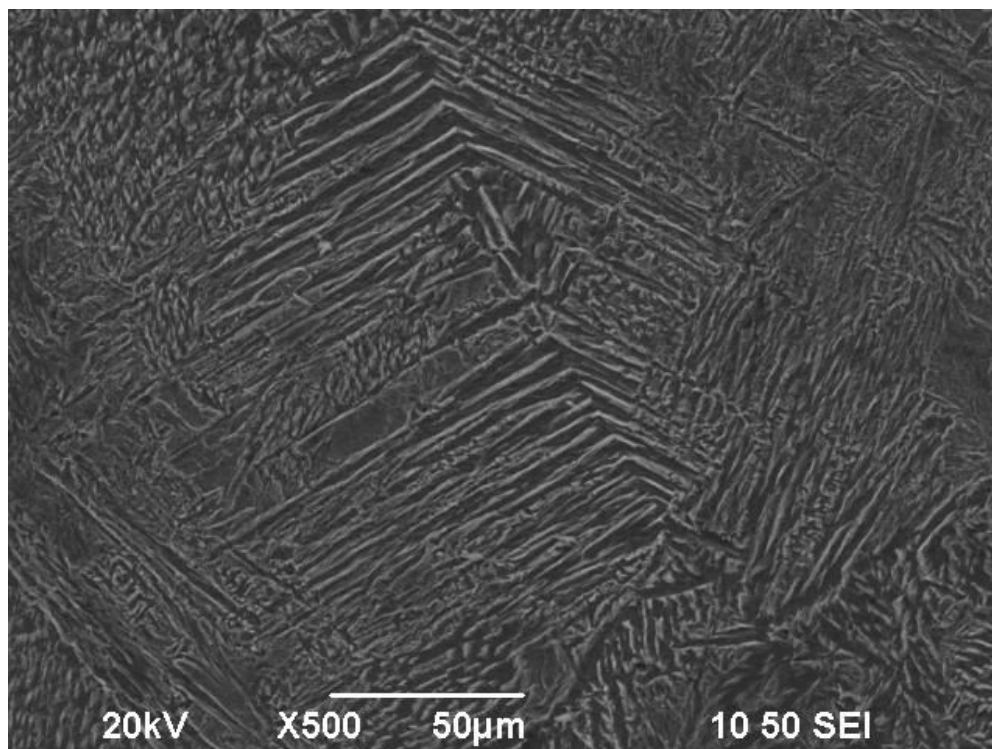




**Εικ. 4.23** Z.T, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x200. Φαίνεται ο αλλοτριόμορφος φερρίτης που διατρέχει τους δενδρίτες και ο φερρίτης Widmanstätten με την ομαδοποιημένη μορφή παράλληλων βελονιών, υπό γωνία στον αλλοτριόμορφο. Φαίνονται και μικρές περιοχές βελονοειδούς φερρίτη και ημιπολυγωνικού φερρίτη.



**Εικ. 4.24** Z.T, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση x500. Φαίνεται χαρακτηριστικά ο φερρίτης Widmanstätten.



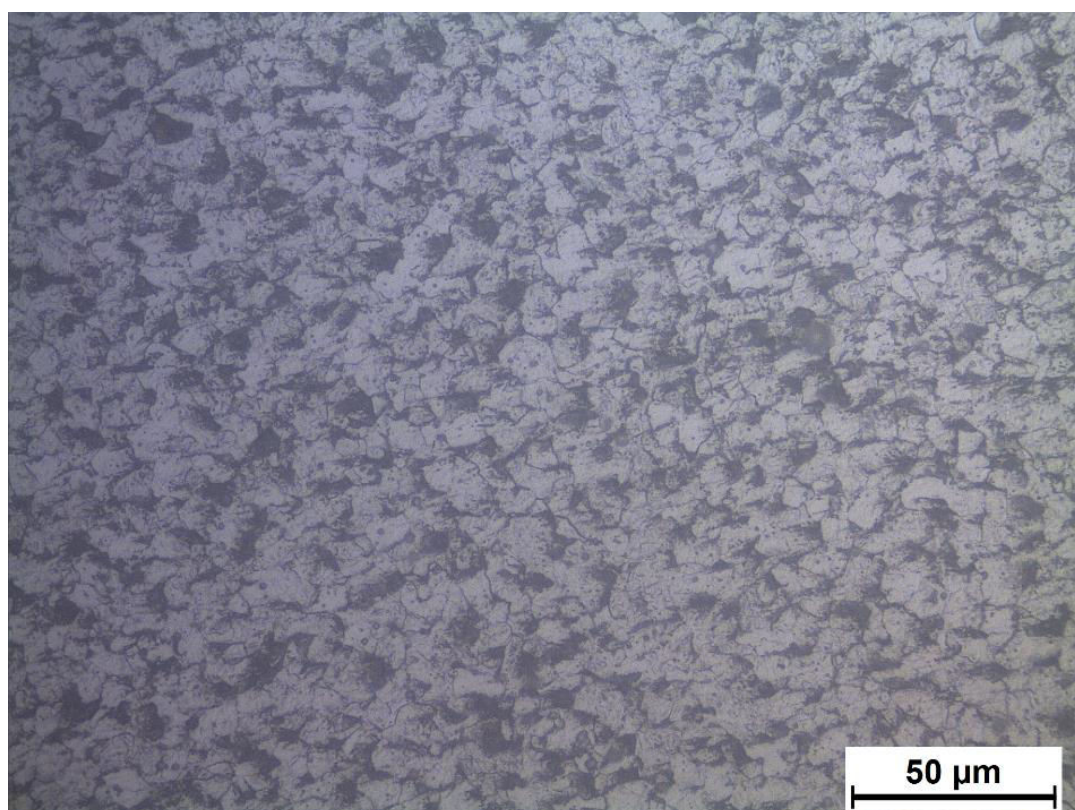
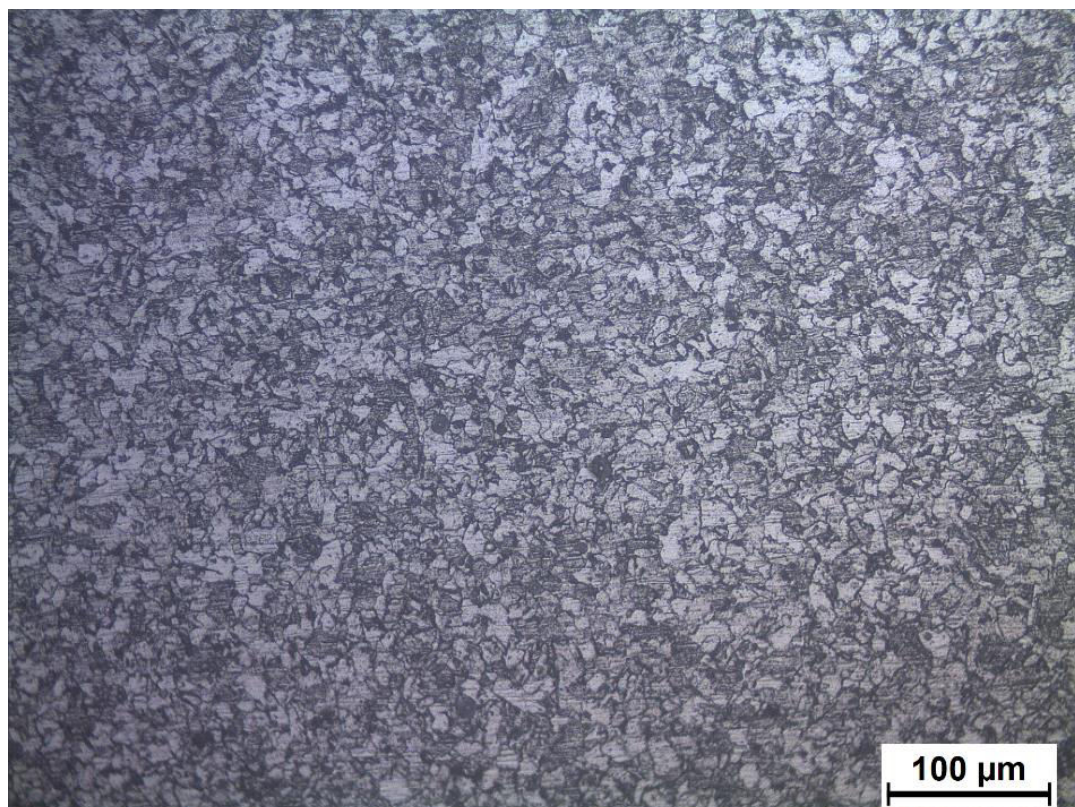
**Εικ. 4.25** Z.T, SEM, μεγέθυνση x500. Φαίνεται χαρακτηριστικά ο φερρίτης Widmanstätten και άνω δεξιά ο βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite).

#### 4.4.3.2 Δευτερογενής Μικροδομή

Στις δευτερογενείς περιοχές η μικροδομή παρουσιάζει πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Κατ' αρχάς υπάρχει κατά κύριο λόγο φερριτοπερλιτική δομή, όπως υπαγορεύουν και οι μετρήσεις μικροσκληρότητας που προηγούνται. Στις περιοχές αυτές κυριαρχεί ο πολυγωνικός-ισοαξονικός φερρίτης με μικρές περιοχές ημιπολυγωνικού φερρίτη, ενώ απουσιάζουν όλες οι άλλες δομές φερρίτη, αποτέλεσμα της ανόπτησης. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι και η ρίζα της συγκόλλησης είναι ανακρυσταλλωμένη περιοχή δευτερογενούς μικροδομής, αφού επιδέχεται όλα τα επόμενα θερμικά φορτία.

Στις περιοχές αυτές έγιναν μετρήσεις για το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη, το οποίο μετρήθηκε από πληθώρα κόκκων με μεγάλη ευκολία. Προέκυψε πολύ λεπτόκοκκη δομή, με μέση τιμή μεγέθους κόκκων φερρίτη ίση με 9.5 µm, τιμή εξαιρετικά κοντινή σε αυτή του AH40 FCA. Στις μετρήσεις μάλιστα δεν υπήρξε παρά αμελητέα απόκλιση, δηλαδή οι περιοχές δευτερογενούς μικροδομής παρουσιάζουν πλήρη ομοιομορφία στη συγκόλληση (ήταν ελαφρώς μεγεθυμένοι οι κόκκοι της ρίζας).





**Εικ. 4.26** Ζ.Τ, οπτικό μικροσκόπιο, μεγέθυνση  $\times 200$  (πάνω) και  $\times 500$  (κάτω).  
Φαίνονται οι ισοαξονικούς κοκκοι του φερριτη.



#### 4.4.4 Κατανομή Μεγέθους Κόκκων

Αν και οι μετρήσεις για το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη παρουσιάστηκαν ανά περιοχή έχει σημασία να παρουσιαστούν και να αναλυθούν εκ των υστέρων ολιστικά, με σκοπό την αξιολόγηση του προφίλ της κοκκομετρίας.

Αυτό γιατί όπως εξηγήθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο (βλ. Κεφ.2) το μέγεθος των κόκκων είναι ένας σημαντικός παράγων αντοχής στα υλικά, αφού συνδέεται με την αντοχή τους και το όριο διαρροής τους, μέσω της σχέσης Hall – Petch [17]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Όπου  $\sigma_0$  και  $k_y$  είναι σταθερές. Από τη σχέση αυτή αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι λεπτόκοκκες δομές παρουσιάζουν μεγαλύτερο όριο αντοχής. Για το λόγο αυτό η απόκτηση λεπτόκοκκων χαλύβων κατά την δημιουργία τους είναι από τους βασικότερους στόχους όλων των μεθόδων παραγωγής χαλύβων. Εν γένει η εκλέπτυνση της μικροδομής (grain refining) είναι εκ των συνηθέστερων τρόπων ισχυροποίησης των χαλύβων μέσω θερμικών κατεργασιών [1, 17].

Ακόμη έχει διαπιστωθεί ότι μια λεπτόκοκκη μικροδομή σε όλο το προφίλ της συγκόλλησης δίνει τον βέλτιστο συνδυασμό αντοχής και δυσθραυστότητας [90] και για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό η Ζ.Τ. και οι Θ.Ε.Ζ. να έχουν παρόμοιο μέγεθος κοκκομετρίας με τα Μ.Β. [89]. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του μεγέθους των κόκκων παρουσιάζονται ακολούθως, ενώ σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ελήφθη μεγάλος αριθμός μετρήσεων από κάθε μελετούμενη περιοχή ( $N > 100$ ).

**Πίνακας 4.6: Προφίλ Μεγέθους Κόκκων**

Μέγεθος Κόκκων		
Υλικό	Μέση Τιμή Μεγέθους Κόκκων (μm)	Τυπική Απόκλιση Μεγέθους Κόκκων(μm)
AH36	10.6	2.5
HAZ AH36	10.9	2.5
WM	9.5	1.7
HAZ AH40	9.6	2.1
AH40	9.4	2.3

Όπως είναι εμφανές, το προφίλ του μεγέθους των κόκκων του φερρίτη είναι εξαιρετικά ομοιόμορφο σε όλη τη συγκόλληση και ιδιαίτερα λεπτόκοκκο. Στις δυο Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες προέκυψε ελάχιστη αύξηση της μέσης τιμής του μεγέθους των κόκκων σε σχέση με τη μέση τιμή του αντίστοιχου Μετάλλου Βάσης. Η Ζώνη Τήξης έχει μέση τιμή μεγέθους κόκκων φερρίτη πρακτικά ίδια με αυτή του χάλυβα AH40 FCA, το οποίο ήταν και το ζητούμενο, ενώ του χάλυβα AH36 είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι η επιλογή των συνθηκών κρίνεται σωστή και από αυτή τη σκοπιά μελέτης, μετά από αυτή των μικροσκληροτήτων, καθώς ο στόχος ομοιόμορφου προφίλ μεγέθους κόκκων επετεύχθη.

#### 4.5 Μελέτη Μηχανικών Ιδιοτήτων – Πειράματα Εφελκυσμού

Η διαδικασία των τριών πειραμάτων εφελκυσμού που διεξήχθησαν περιγράφηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο και, όπως αναφέρθηκε, μετά την εκτέλεση του πειράματος παρατηρήθηκε ότι και τα τρία δοκίμια αστόχησαν λόγω όλκιμης θραύσης, υπό γωνία στην περιοχή του AH36, και στα τρία μακριά από την Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη.

Από τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) που κατασκευάστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα της μηχανής εφελκυσμού εξήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το όριο διαρροής, το όριο θραύσης και την επιμήκυνση. Σημειώνεται ότι η ανάλυση που ακολουθεί θα γίνει για τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων. Όπως είναι φανερό οι επιμέρους τιμές δεν εμφανίζουν μεγάλη διασπορά γύρω από τη μέση τιμή.

**Πίνακας 4.7: Πειραματικά Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων**

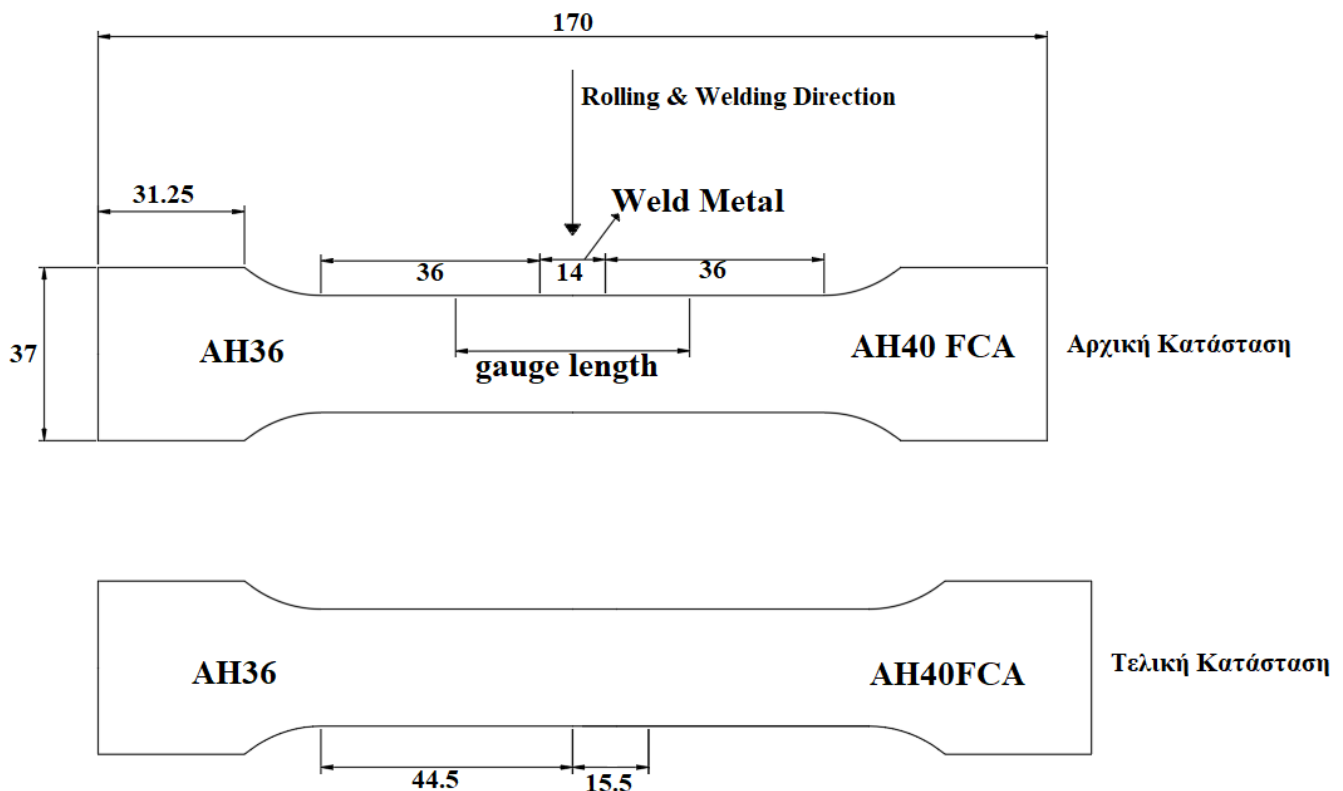
Μηχανικές Ιδιότητες	Πείραμα 1	Πείραμα 2	Πείραμα 3	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Όριο Διαρροής, Re 0.2% (MPa)	407	406	438	417	18
Όριο Θραύσης, Rm (MPa)	518	521	523	521	2.5
Επιμήκυνση, A (%)	14.8	15	14.9	14.9	0.1

Παρατηρείται ότι οι τιμές του ορίου διαρροής (408 MPa) και του ορίου θραύσης (521 MPa) είναι εξαιρετικά κοντινές με τις τιμές που παρήχθησαν από το πιστοποιητικό του χάλυβα AH36 και ήταν 415 MPa και 535 MPa αντίστοιχα. Επομένως τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν απόλυτα με το φαινόμενο της όλκιμης θραύσης στην περιοχή του AH36, αφού το όριο διαρροής που μετρήθηκε είναι χαμηλότερο από αυτό του χάλυβα AH40 FCA (421 MPa), ενώ το ίδιο ισχύει και για το όριο θραύσης (575 MPa). Έτσι συμπεραίνουμε ότι η συγκόλληση ισχυροποιήθηκε από την ανάμειξη των μετάλλων βάσης και, όπως ήταν φυσικό, η διαρροή και τελικά η θραύση επήλθε στο πιο ανίσχυρο μέταλλο βάσης εκ των δύο. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο και από τις μετρήσεις μικροσκληρότητας, καθώς η μικρότερη μέση τιμή παρουσιάστηκε στον χάλυβα AH36, αλλά και από το γεγονός ότι ήταν ο πιο χονδρόκοκκος εκ των δυο M.B. και σύμφωνα με τη σχέση του Hall-Petch, που προαναφέρθηκε, αυτό συνεπάγεται μικρότερο όριο διαρροής.

Ωστόσο το μέγεθος της υπολογισθείσας επιμήκυνσης από τις μετρήσεις δεν συνάδει με αυτή που παρείχε ο κατασκευαστής για τον χάλυβα AH36, αφού μετρήθηκε 14.9%, ενώ ο χάλυβας AH36 είχε 24%. Αυτή η απόκλιση είναι μεγάλη, καθώς δεν είναι εύκολο να δικαιολογηθεί μια τέτοια πτώση της ολκιμότητας, ειδικά βάσει των λοιπών αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού βρίσκεται στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

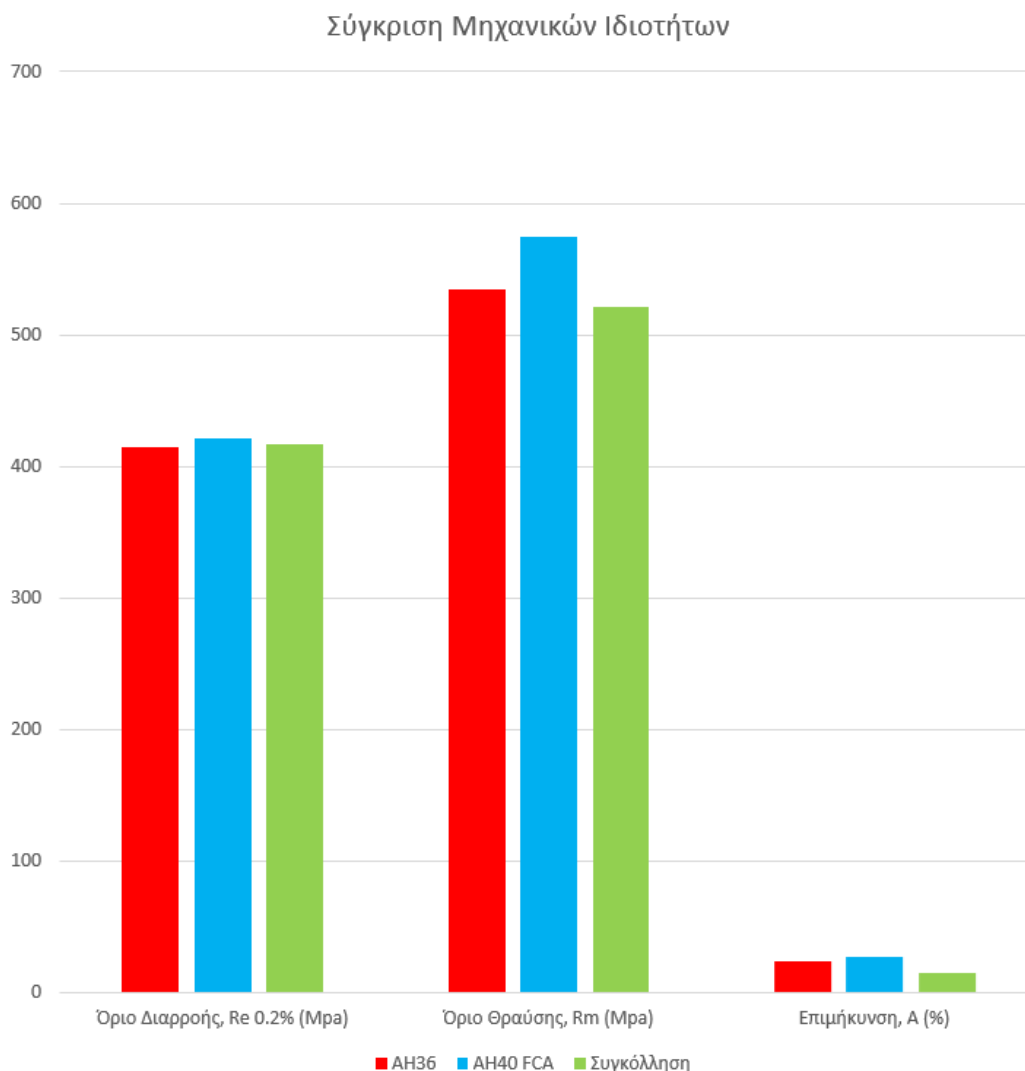
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, το επιμηκυνσιόμετρο που τοποθετήθηκε μετρούσε ένα εύρος 50mm, με το επιμηκυνσιόμετρο τοποθετημένο συμμετρικά στον άξονα της συγκόλλησης, δηλαδή 25mm μήκος μέτρησης εκατέρωθεν του άξονα.

Το πλάτος της συγκόλλησης στα δοκίμια μειωμένου πάχους (βλ. Κεφ. 3), μετρήθηκε και σημειώθηκε πάνω στα δοκίμια, ίσο με 14mm περίπου, δηλαδή 7mm εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης, αφήνοντας 18mm μέτρησης από τα Μ.Β. σε κάθε πλευρά. Η επιμήκυνση της περιοχής της συγκόλλησης μετρήθηκε μετά την εκτέλεση των πειραμάτων ίση με 1mm περίπου, δηλαδή περίπου 10.5% (1.5mm σε 14mm πλάτους συγκόλλησης). Ο δε χάλυβας AH40 FCA, είχε μηδαμινή επιμήκυνση αφού βρισκόμαστε μακριά από το όριο διαρροής του. Αντιλαμβάνεται λοιπόν κανείς ότι οι περιοχές των οποίων το επιμηκυνσιόμετρο υπολόγιζε την επιμήκυνση δεν επιμηκύνονταν ομοιόμορφα. Τουναντίον, μια περιοχή (χάλυβας AH40 FCA) δεν επιμηκύνθηκε σχεδόν καθόλου και μια άλλη (συγκόλληση) επιμηκύνθηκε πολύ λίγο, ενώ μόνο μια είχε σημαντική επιμήκυνση, αυτή του χάλυβα AH36, η οποία μετρήθηκε περίπου 23.6% (8.5mm σε 36mm χάλυβα AH36). Έτσι είναι λογικό η μέτρηση του επιμηκυνσιομέτρου να δίνει τιμή χαμηλότερη της πραγματικής του χάλυβα AH36, εξάλλου η διάταξη φτιάχτηκε με σκοπό τον έλεγχο της συγκόλλησης εν προκειμένω. Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζεται και σχηματικά στην επόμενη εικόνα.



**Εικ. 4.27** Δοκίμια εφελκυσμού, πριν και μετά τη διεξαγωγή του πειράματος. Φαίνεται η επιμέρους επιμήκυνση που μετρήθηκε στις κρίσιμες περιοχές της συγκόλλησης και του χάλυβα AH36.

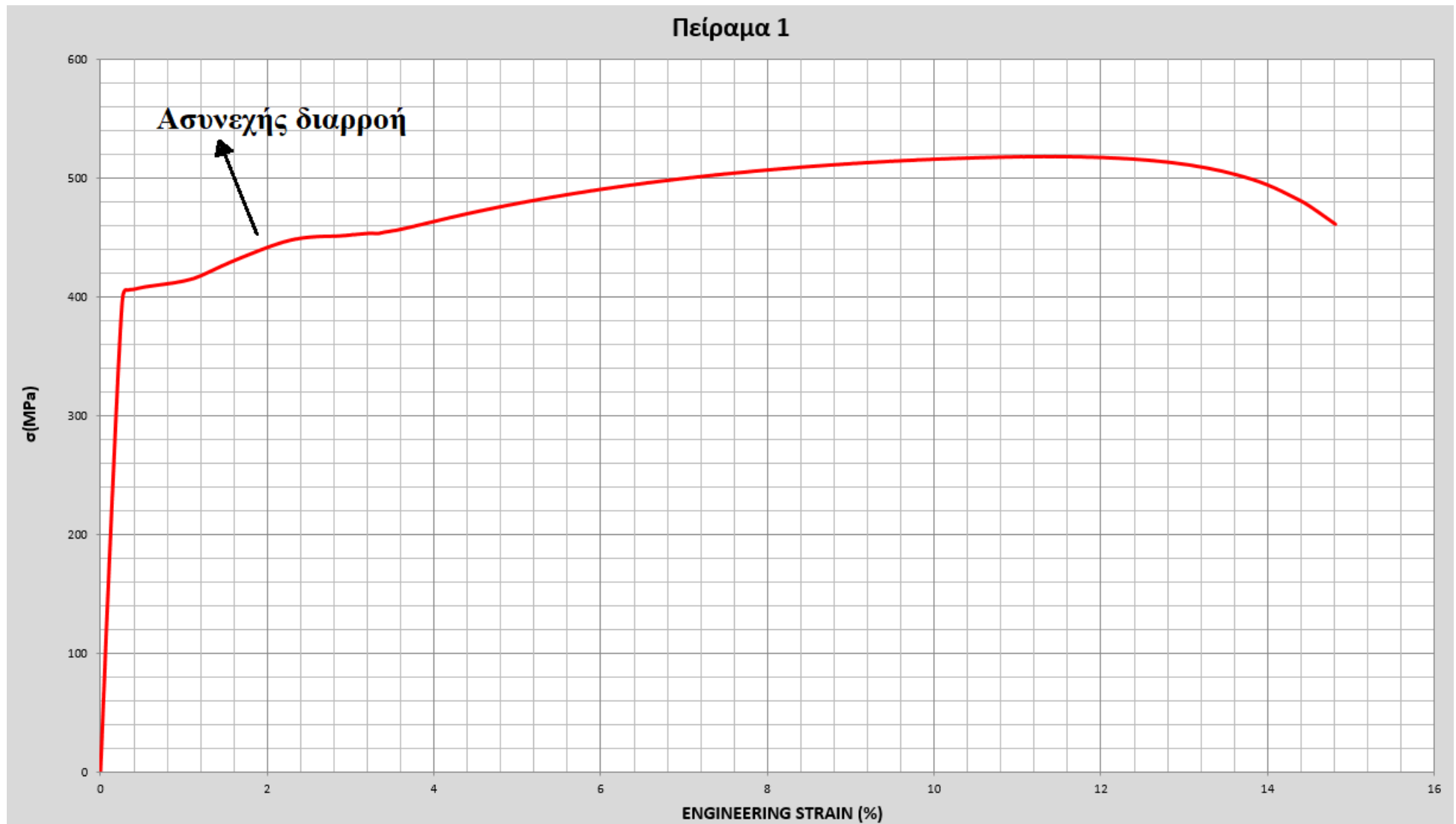
Η σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης με αυτών των δύο Μ.Β. παρουσιάζεται ακολούθως.



**Εικ. 4.28** Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων συγκόλλησης και χαλύβων AH36 και AH40 FCA.

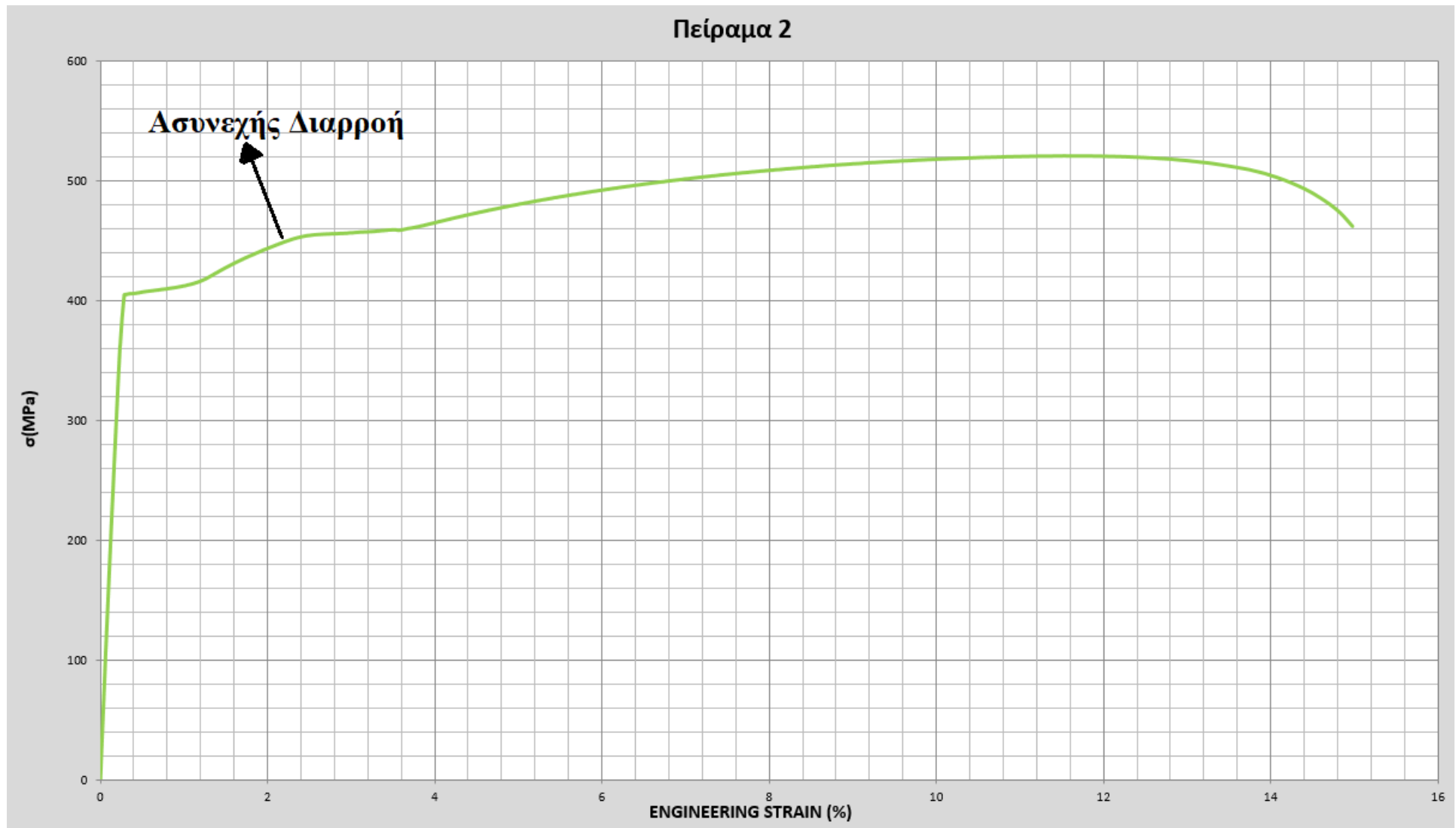
Παρακάτω παρουσιάζονται για λόγους πληρότητας τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων που κατασκευάστηκαν για τη μελέτη του εφελκυσμού και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Για λόγους πληρότητας, ακόμα, αναφέρεται ότι και στα τρία παρατηρείται το φαινόμενο της ασυνεχούς διαρροής που υπάρχει σε φερριτοπερλιτικούς χάλυβες [81].

Εν κατακλείδι, το ευάλωτο σημείο της κατασκευής που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, προέκυψε ότι είναι ο χάλυβας AH36, δεδομένων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και της μεθόδου και των συνθήκων συγκόλλησης που επιλέχθηκαν.

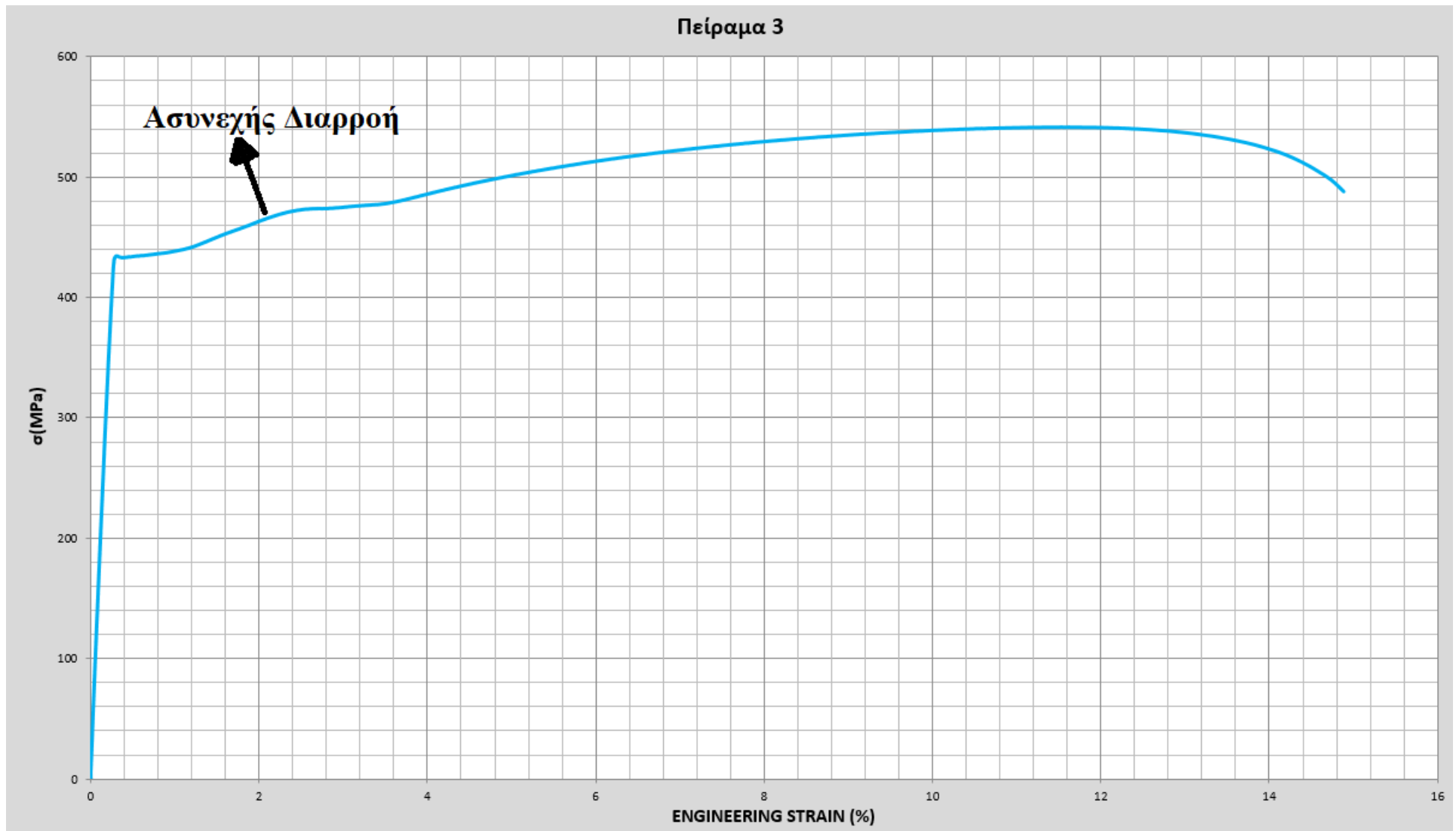


Εικ. 4.29 Διάγραμμα ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) του πρώτου πειράματος εφελκυσμού.





Εικ. 4.30 Διάγραμμα ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) του δευτέρου πειράματος εφελκυσμού.



**Εικ. 4.31** Διάγραμμα ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) του τρίτου πειράματος εφελκυσμού.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα

#### 5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορούσε τη μελέτη της ετερογενούς συγκόλλησης AH40 FCA – AH36 με μέθοδο ρομποτικής συγκόλλησης MCAW. Τα δυο μέταλλα που συγκολλήθηκαν μαζί με την συγκόλληση μελετήθηκαν αρχικά ως προς τη δομή τους μακροσκοπικά. Στη συνέχεια μελετήθηκαν ως προς τις μικροσκληρότητες τους με τη μέθοδο Vickers HV<sub>0.3</sub>. Έπειτα ακολούθησε μελέτη της μικροδομής τόσο με τη βοήθεια οπτικού, όσο και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Τέλος, διεξήχθησαν πειράματα εφελκυσμού με σκοπό να εξαχθούν δεδομένα για τις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος των συγκολλημένων μετάλλων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανωτέρω πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται ακολούθως.

- Από τη μακροσκοπική παρατήρηση μετρήθηκαν στη Ζώνη Τήξης οι δενδριτικές περιοχές ταχείας απόψυξης και οι ανακρυσταλλωμένες περιοχές και προέκυψαν ως ποσοστά της Ζ.Τ. Ακόμα τα ποσοστά της αραίωσης και η χημική σύσταση του μετάλλου της Ζ.Τ., καθώς μετρήθηκε και το πλάτος των Θερμικά Επηρασμένων Ζωνών
- Από τη μελέτη μικροσκληροτήτων με τη μέθοδο Vickers HV<sub>0.3</sub>, επετεύχθη η επιθυμητή κατάσταση κοντινών τιμών μικροσκληρότητας σε όλο το εξεταζόμενο προφίλ, με προϋπόθεση να μην είναι μικρότερες οι τιμές στις Θ.Ε.Ζ. και στη Ζ.Τ. από ότι στα Μ.Β., αλλά και ούτε πολύ υψηλές κατ' απόλυτη τιμή. Εν γένει στις δενδριτικές περιοχές έχουμε αύξηση της τάξης του 10% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH40 FCA και αύξηση της τάξης του 15-20% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH36. Στις ανακρυσταλλωμένες περιοχές υπάρχει μείωση της τάξης του 10% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH40 FCA και μείωση της τάξης του 5-7% σε σχέση με τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH36. Η μέση τιμή για τη Ζ.Τ., αν και όπως εξηγήθηκε προκύπτει με μεγάλη διασπορά τιμών, βρίσκεται ελαφρώς αυξημένη από τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH36 και ελαφρώς μειωμένη από τη μέση τιμή της μικροσκληρότητας του AH40 FCA (αύξηση/μείωση της τάξης του 3% αντίστοιχα). Στις Θ.Ε.Ζ. μετρήθηκαν μικροσκληρότητες ελαφρώς υψηλότερες από αυτές των αντίστοιχων Μετάλλων Βάσης. Και στις δυο περιπτώσεις η αύξηση αυτή είναι αμελητέα (της τάξεως του 1-3%) και τα επιτρεπτά όρια δεν ξεπεράστηκαν σε κανένα σημείο. Η περιοχή του χάλυβα AH36 παρουσίασε τη μικρότερη μέση τιμή μικροσκληρότητας.

- Από τη μελέτη μικροδομής για τα Μέταλλα Βάσης προέκυψε ότι ο χάλυβας AH36 έχει διφασική φερριτοπερλιτική δομή με τους κόκκους του φερρίτη και του περλίτη έχουν έντονο προσανατολισμό, ίδιο με τη φορά της έλασης. Ο χάλυβας AH40 FCA, έχει λεπτόκοκκη, διφασική, ισοαξονική μικροδομή, χωρίς προσανατολισμό αποτελούμενη από εναλλαγές κόκκων φερρίτη και μπαινίτη. Και για τους δυο χάλυβες μετρήθηκαν τα ποσοστά των φάσεων περί την αναλογία 80%-20%.
- Στη μελέτη μικροδομής για τις Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες, αναλύθηκαν οι υποπεριοχές της Θ.Ε.Ζ. Στη Θ.Ε.Ζ. του AH36 η χαρακτηριστική προσανατολισμένη (banded) δομή του χάλυβα αυτού δεν υπάρχει πλέον, πάρα μόνο στις παρυφές της ζώνης μερικής ανόπτησης προς τη μεριά του M.B. Παρατηρήθηκε τοπικά η ύπαρξη βελονοειδούς φερρίτη και φερρίτη Widmanstätten. Εκτός των ανωτέρω υπήρχε σε μεγάλη έκταση ημιπολυγωνικός φερρίτης (quasi-polygonal ferrite), ενώ έχουμε φερριτοπερλιτική δομή. Στη Θ.Ε.Ζ του AH40 FCA παρατηρήθηκε ότι κυριαρχείται από ημιπολυγωνικό φερρίτη ενώ ακόμα έχει ισοαξονικούς κόκκους φερρίτη, ενώ έχουμε φερριτομπαινιτική δομή.
- Στη μελέτη μικροδομής για τη Ζώνη Τήξης, αναλύθηκαν οι μικροδομές των δενδριτικών και των ανακρυσταλλωμένων περιοχών. Στις δενδριτικές περιοχές η μικροδομή είναι φερριτομπαινιτική. Αρχικά παρατηρείται αλλοτριόμορφος φερρίτης (grain-boundary ferrite), φερρίτης Widmanstätten, πολυγωνικός φερρίτης. Σε ορισμένες περιοχές παρατηρείται μικρή ποσότητα βελονοειδούς φερρίτη (acicular ferrite). Στις ανακρυσταλλωμένες περιοχές η μικροδομή είναι φερριτοπερλιτική. Στις περιοχές αυτές κυριαρχεί ο πολυγωνικός-ισοαξονικός φερρίτης με μικρές περιοχές ημιπολυγωνικού φερρίτη, ενώ απουσιάζουν όλες οι άλλες δομές φερρίτη, αποτέλεσμα της ανόπτησης. Η ρίζα της συγκόλλησης είναι ανακρυσταλλωμένη, αφού επιδέχεται όλα τα επόμενα θερμικά φορτία. Σε κανένα σημείο της μικροδομής δεν παρατηρήθηκε μαρτενσίτης.
- Το προφίλ του μεγέθους των κόκκων του φερρίτη είναι εξαιρετικά ομοιόμορφο σε όλη τη συγκόλληση και ιδιαίτερα λεπτόκοκκο. Στις δυο Θερμικά Επηρεασμένες Ζώνες προέκυψε ελάχιστη αύξηση της μέσης τιμής του μεγέθους των κόκκων σε σχέση με τη μέση τιμή του αντίστοιχου Μετάλλου Βάσης. Η Ζώνη Τήξης έχει μέση τιμή μεγέθους κόκκων φερρίτη πρακτικά ίδια με αυτή του χάλυβα AH40 FCA, το οποίο ήταν και το ζητούμενο, ενώ του χάλυβα AH36 είναι ελαφρώς μεγαλύτερη.

- Σε ό,τι αφορά τον εφελκυσμό και τα τρία δοκίμια έσπασαν από όλκιμη θραύση υπό γωνιά στον χάλυβα AH36. Παρατηρείται ότι οι τιμές του ορίου διαρροής (407.8 MPa) και του ορίου θραύσης (520.6 MPa) είναι εξαιρετικά κοντινές με τις τιμές που παρήχθησαν από το πιστοποιητικό του χάλυβα AH36 και ήταν 395MPa και 520MPa αντίστοιχα. Επομένως τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν απόλυτα με το φαινόμενο της όλκιμης θραύσης στην περιοχή του AH36, αφού το όριο διαρροής που μετρήθηκε είναι αρκετά χαμηλότερα από αυτό του χάλυβα AH40 FCA (421 MPa), ενώ το ίδιο ισχύει και για το οροί θραύσης (575 MPa). Έτσι συμπεραίνουμε ότι η συγκόλληση ισχυροποιήθηκε από την ανάμειξη των μετάλλων βάσης και, όπως ήταν φυσικό, η διαρροή και τελικά η θραύση επήλθε στο πιο ανίσχυρο μέταλλο βάσης εκ των δύο. Η όλκιμότητα προέκυψε αρκετά μικρότερη από αυτή του χάλυβα AH36, γεγονός που αποδόθηκε λογικά στην πειραματική διάταξη, καθώς δεν δικαιολογείται μείωση της όλκιμότητας στο M.B. στο οποίο είχαμε διαρροή και θραύση.
- Εν κατακλείδι, το ευάλωτο σημείο της κατασκευής που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, προέκυψε ότι είναι ο χάλυβας AH36, δεδομένων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και της μεθόδου και των συνθήκων συγκόλλησης που επιλέχθηκαν. Οι επιλεχθείσες συνθήκες προφανώς κρίνονται επιτυχημένες, καθώς η συγκόλληση δεν ήταν καν το αδύναμο σημείο της κατασκευής, αποκτώντας εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και εξαιρετική μικροδομή.

## 5.2 Προτάσεις για Μελέτη

Αναφορικά με μελλοντικές μελέτες πάνω στη συγκεκριμένη συγκόλληση προτείνονται τα εξής:

- Μελέτη της εν λόγω συγκόλλησης σε φαινόμενα διάβρωσης και μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων σε διαβρωμένα δοκίμια.
- Μελέτη της δυσθραυστότητας της συγκόλλησης (δοκιμή Charpy) και της συμπεριφοράς της σε κόπωση.
- Διεξαγωγή της ίδιας μελέτης με αυτή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με ίδια μέθοδο συγκόλλησης και ίδιες συνθήκες, αλλά μεταξύ δυο ελασμάτων χάλυβα AH36, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τις μηχανικές ιδιότητες εκείνου του συστήματος.



## Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.
- [2] Β.Ι Παπάζογλου, , Δ. Ι. Παντελής, 1994, Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων (Σημειώσεις), Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π .
- [3] Β. Ι. Παπάζογλου, Ναυπηγική Τεχνολογία, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995.
- [4] M. E. Kazasidis, D. I. Pantelis (2017), The effect of the heat input energy on the tensile properties of the AH-40 fatigue crack arrester steel, welded by the use of the robotic metal-cored arc welding technique.
- [5] M. E. Kazasidis, D. I. Pantelis (2015), Experimental Investigation of FCAW-G Weldments of HSLA AH40-FCA (Fatigue Crack Arrester) Steel.
- [6] Germanischer Lloyd (2009), Rules for Classification and Construction/Materials and Welding.
- [7] IACS (2018), Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers
- [8] T. Kasuya, N. Yurioka, M. Okumura (1995), Methods for Predicting Maximum Hardness of Heat-Affected Zone and Selecting Necessary Preheat Temperature for Steel Welding.
- [9] Lancaster, J.F. (1999), Metallurgy of welding - Sixth Edition.
- [10] Carbon equivalents and transformation temperature. The Japan Welding Engineering Society. Retrieved 14 November 2011.
- [11] Det Norske Veritas (2009), Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding.
- [12] Ginzburg, Vladimir B. Ballas, Robert (2000), Flat rolling fundamentals.
- [13] Specification For General Requirements For Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, And Sheet Piling. ASME BPVC Section II: ASME. 2001.
- [14] Y. Itoh, K. Bessho (1968), Japan Welding Engineering Society 37(9).
- [15] Japan Welding Engineering Society (2009), Determination of Necessary Preheat Temperature.
- [16] Tsirkas SA, Papanikos P, Kermanidis T (2003) Numerical simulation of the laser welding process in the butt joint specimens. Journal of Material Processing and technology 134:59–69.
- [17] Bhadeshia H, Honeycombe R (2006) Steels: microstructure and properties.

- [18] R. Kurji, N. Coniglio (2014), Towards Establishment of Weldability Test Standards for Hydrogen Assisted Cold Cracking.
- [19] Nippon Steel & Sumitomo Metal (2001), Steel Plates.
- [21] Β. Πετρόπουλος (2016), Η Επίδραση της Ενέργειας Συγκόλλησης Ρομποτικών MCAW Συγκολλήσεων στη Μικροδομή των Χαλύβων AH 40 FCA.
- [22] BS EN ISO 15614–1 (2012) Specification and qualification of welding procedures for metallic materials.
- [23] Japan Welding Engineering Society, Weld Simulator, [http://www-it.jwes.or.jp/weld\\_simulator/en](http://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en)
- [24] T.Kasuya, N. Yurioka, Carbon Equivalent and Multiplying Factor for Hardenability of Steel
- [25] BS EN ISO 1011. Welding recommendations for welding metallic materials. Part 15: General guidance for arc welding. BSI, UK 2009
- [26] Welding Technology Institute of Australia, Hardness Testing of Welds
- [27] M. Kazasidis, D. I. Pantelis, Parametric analysis of the stringer bead reinforcement area and prediction of the number of beads in a single-V butt joint, using the robotic Flux Cored Arc Welding technique, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2016
- [28] S. Kou (2003), Welding Metallurgy – Second Edition
- [29] Scotti A, Ponomarev V, Lucas W (2012) A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMAwelding. J Mater Process Technol 212:1406–1413
- [30] Lincoln electric (2010) Gas metal arc welding. Product and Procedure Selection
- [31] S.A. Mohamata, I.A.. Ibrahim, A. Amir, A. Ghaliba (2012), “The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) processes on different Parameters”, International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, 2012.
- [32] K. Poorhaydari, B.M. Patchett, D.G. Ivey (2005), Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness
- [33] Rosenthal, D. 1941. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Journal 20(5): 220-s to 234-s.
- [34] Rosenthal, D. 1946. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Trans. ASME 48: 848–866
- [35] Adams, C. M., Jr. 1958. Cooling rates and peak temperatures in fusion welding. Welding Journal 37(5): 210-s to 215-s.
- [36] P. Walker, W.H. Tarn (1991), Handbook of Metal Etchants

- [37] A.O. Benschotter, M.J. Perricone (2005), Marshall's Reagent: Origins, Modifications, and New Applications
- [38] D.N. Hawkins (1981), An Etchant for Revealing the Substructure in Low-Carbon Steels
- [39] D.C. Zipperian (2011), Pace Technologies Metallographic Handbook
- [40] F. Hairer, A. Karelava, C. Kremaszky, E. Werner, T. Hebesberger, A. Pichler, Etching Techniques for the Microstructural Characterization of Complex Phase Steels by Light Microscopy
- [41] F.S. LePera(1979), Improved Etching Technique for the Determination of Percent Martensite in High-Strength Dual-Phase Steels
- [42] B. L. Bramfitt, 2002 ASM International, Metallographer's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels
- [43] Α. Ντεμάγκου (2010), Μελέτη της τάσης για διάβρωση συγκολλήσεων χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 με χρήση ηλεκτροχημικών μεθόδων
- [44] Stokes, Debbie J. (2008), Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM). Chichester: John Wiley & Sons
- [45] McMullan, D. (2006), "Scanning electron microscopy"
- [46] JR Blueford, "Classification of Microscopes"
- [47] R.L. Smith & G.E. Sandland, "An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness."
- [48] Carl Slater, Claire Davis, Mayorkinos Papaelias, Elias Hatzidouros, D. Pantelis, V. Papazoglou, Aurora Lopez, Elena Rodriguez, Jan Przydatek (2013), HSLA STEEL SELECTION AND CHARACTERISATION
- [49] Mohandas T., Madhusudan R.G., Satish K.B., (1999). "Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels", Journal of Materials Processing Technology 88 (1999) 284–294.
- [50] Pirinen M., (2013). "The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures", Lappeenranta University of Technology May of 2013.
- [51] EN ISO 4136: 2012 Destructive tests on welds in metallic materials— transverse tensile test
- [52] Welding Technology Institute of Australia (WTIA) , Hardness Testing of Welds
- [53] A.M. Pazooki, M.J. Hermans, I.M. Richardson (2016), Control of welding distortion during gas metal arc welding of AH36 plates by stress engineering

- [54] Γ. Μικερόζης (2014), Διεξαγωγή Μετωπικών Συγκολλήσεων FCAW Διφασικών Χαλύβων FCA με χρήση του Αυτοματοποιημένου Συγκολλητικού Βραχίονα IGM RT 330.1
- [55] F. Ade, *Weld. J.* 70 (1991) 53–57
- [56] I.G. Crough, *Metals Forum* 12 (1988) 31–35.
- [57] J. N. Pires, A. Loureiro, G. Bolsmjo, *Welding Robots, Technology, System Issues and Applications*, Springer, Berlin, Germany 2006
- [58] S.B. Chen, Y. Zhang T. Qiu T. Lin, *Robotic Welding with Vision – Sensing and Self–learning Neuron Control of Arc Welding Dynamic Process*, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 36, Netherlands 2003
- [59] American Welding Society, *Welding Handbook, 9<sup>th</sup> ed., Volume 2, Welding Processes, Part 1*, U.S.A. 2004
- [60] K. Weman G. Linden, *MIG Welding Guide*, Woodhead Publishing, Cambridge, U.K. 2006
- [61] K. Weman, *Welding processes handbook, 2<sup>nd</sup> ed.*, Woodhead Publishing, Cambridge U.K. 2012
- [62] Lincoln Electric, *Gas Metal Arc Welding, Products and Procedure Selection*, Lincoln Electric, Cleveland, U.S.A. 2006
- [63] Miller Electric, *Guidelines for Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, Miller Electric Mfg. Co., Illinois, U.S.A. 2012
- [64] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2010
- [65] J. Norrish, *Advanced welding processes, Technologies and processes control*, Woodhead Publishing, Cambridge, U.K. 2006
- [66] BOC, *GMAW (MIG)/FCAW/MCAW*, BOC 2007
- [67] Myers, *Advantages and Disadvantages of Metal Cored Wires*, ESAB KNOWLEDGE CENTER, ESAB, Stockholm, Sweden, 2016, [www.esabna.com](http://www.esabna.com)
- [68] American Welding Society, CAW Best Practices, *Welding Journal*, November 2006, Miami, U.S.A. 2006
- [69] ASM International (2004) Tensile testing
- [70] R. Laitinen (2006), Improvement of weld HAZ toughness at low heat input by controlling the distribution of M/A constituents.

- [71] T. Udomphol (2007), Solidification and phase transformation in welding
- [72] Y. Chen, D. Zhang, Y. Liu, H.Li, D. Xu (2013), Effect of dissolution and precipitation of Nb on the formation of acicular ferrite/bainite ferrite in low-carbon HSLA steels
- [73] I.J. Hjeltreie (2015), Characterization of Non-Metallic Inclusions in Ferritic Weld Metals for Arctic Applications
- [74] K. Noburu, I. Akimori, A. Kazushige, T. Yukichi, Y. Takumi, I. Lotsberg, A proposed Design S-N Curve for steels with improved Fatigue Resistance (FCA Steels), Tokyo 2010.
- [75] Nippon Steel & Sumimoto Metal, Fatigue Solutions of Nippon Steel & Sumimoto Metal, Tokyo 2012
- [76] JFE Steel Corp., Steel Plates, JFE Steel Corp., Japan 2012.
- [77] J. Kudryatsef, J. Kleinman, G. Prokopenko, V. Knysh, L. Gimbrede, Effect of Ultrasonic Peening on Microhardness and Residual Stress in Material and Welded Elements, Integrity Testing Laboratory Inc., Ontario Canada 2004
- [78] I. Schipperen, J. Andric, D. Brennan, J. D. Caprace, C. M. Chou, J. Gordo, et al, MATERIALS AND FABRICATION TECHNOLOGY, 114-122, Scibautechnische Gesellschaft, Rockstoc, Germany 2012.
- [79] Y. Komizo, Status & Prospects of Shipbuilding Steel and Its Weldability, Joining and Welding Research Institute, Osaka, Japan 2007.
- [80] Kawasaki Heavy Industries (2010), Application of the Latest Technologies to Fatigue Strength Improvement
- [81] F.P. Beer, E. Russel Johnston, J.T. DeWolf, D.F. Mazurek, Mechanics of Materials (6<sup>th</sup> Edition)
- [82] S.Imai (2002), General Properties of TMCP Steels
- [83] Y. Komizo (2010), Performance of welded joints in TMCP plates
- [84] J. Cheon et. al (2016), Thermal metallurgical analysis of GMA welded AH36 steel using CFD–FEM framework



- [85] E.V Chatzidouros, V.J. Papazoglou, T.E. Tsiourva, D.I. Pantelis (2011), Hydrogen effect on fracture toughness of pipeline steel welds, with in situ hydrogen charging
- [86] F.G. Caballero, A. Garcia-Junceda, C.Capdevilla (2006), Evolution of Microstructural Banding during the Manufacturing Process of Dual Phase Steels
- [87] R. Grossterlinden, R. Kawalla, U. Lotter and H. Pircher: Steel Res. 63 (1992) 331–336.
- [88] F.G. Caballero, C. Garcia-Mateo, C.Capdevilla, J. Chao, The microstructure of continuously cooled tough bainitic steels
- [89] Z. Liu, Y. Kobayashi, F. Yin, M. Kubawara, K. Nagai (2007), Nucleation of Acicular Ferrite on Sulfide Inclusion during Rapid Solidification of Low Carbon Steel
- [90] T. Gladman: The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, Maney, London, (1997), 39.